

**Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau**

**Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes**

**Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade**

Relevé de la fissuration des superstructures routières

Rissaufnahme von Strassenbelägen

**Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne
IMAC – Institut de Mesure d'Analyse des Contraintes
Professeur Dr Léopold Pflug**

**Mandat de recherche 24/90 sur proposition de
l'Office Fédéral des Routes**

Novembre 1995

SOMMAIRE

PREFACE	v
RESUME (Français)	vii
SUMMARY (Anglais)	xi
TABLE DES MATIERES	xv
Section A : LE PROJET CREHOS. Introduction, étude et conception	1
Section B: LE BALYAGE par miroir polygonal tournant	43
Section C: LA DETECTION par collecteur holographique multifacettes	61
Section D: LE ROBOT pour l'enregistrement automatique d'hologrammes multifacettes analogiques	143
Section E: LE TRAITEMENT reconnaissance des fissures en temps réel par processeur parallèle ad hoc	187
Section F: LE SYSTEME DANS SON ENSEMBLE Prototype 1	231
Section G: CONCLUSIONS GENERALES	251
REMERCIEMENTS	271
BIBLIOGRAPHIE	275
ANNEXES	277
CURRICULUM VITAE	283

PREFACE

La sécurité des ouvrages constitue un impératif reconnu de longue date mais les moyens de contrôle régulier de ceux-ci sont restés longtemps en majeure partie empiriques.

Cette façon de procéder conserve certes sa valeur mais souffre d'inconvénients notables; en effet, l'appréciation des indices ou des symptômes de dégradation dépendent fortement de l'opérateur, de sa formation, de son expérience, voire de son degré d'optimisme ou au contraire d'anxiété.

Pour améliorer cette situation, le maître de l'ouvrage a donc besoin d'un système d'auscultation cohérent, de rendement élevé et peu onéreux de surcroît.

En matière de sécurité routière, la fissuration du revêtement constitue un facteur important. La typologie des fissures représente un indice permettant de remonter à la nature même des défauts structurels; le diagnostic précoce de ceux-ci sera d'autant mieux assuré que l'observation et relevé de l'état de fissuration pourra être effectué à intervalles réguliers d'une façon parfaitement répétitive. L'importance de ce diagnostic précoce est évidemment décisive pour garantir la sécurité à un coût modeste.

La thèse de Max Monti s'inscrit dans cette perspective. Trois idées forces inspirent et guident sa recherche :

- le système doit percevoir et traiter l'information en temps réel;
- chaque centimètre carré du revêtement doit être observé et reconnu sain ou fissuré;
- l'appareil de mesure doit s'intégrer au trafic (vitesse du relevé au moins 80 km/h).

Ces exigences sont extrêmement contraignantes et n'ont pas été satisfaites jusqu'alors. Le grand mérite de notre candidat, ingénieur en électronique-physique, est d'avoir élaboré l'ensemble de son travail à partir de contraintes pratiques aussi sévères.

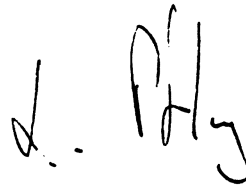
Loin de brimer son imagination, ces impératifs l'ont au contraire stimulé et conduit à concevoir puis à réaliser un appareillage original faisant appel à des techniques de pointe dont l'emploi est encore fort rare.

C'est ainsi que le recours aux éléments optiques holographiques ou hologrammes multifacettes couvrant une ligne de mesure de plusieurs mètres constitue à notre connaissance une première tout à fait spectaculaire. Dans le domaine du traitement ultra-rapide de l'information, le recours à des processeurs parallèles dédiés représente également une innovation qui trouvera certainement d'autres débouchés.

Il n'est pas inutile de rappeler ici que la durée de perception d'une fissure d'un millimètre de large est de l'ordre de vingt milliardièmes de seconde (20 ns). C'est dire combien la veine inventive de Monsieur Monti a été mise à

contribution, relevant de surcroît chez l'intéressé une remarquable faculté à maîtriser des problèmes ressortissant de disciplines fort diverses.

A l'heure où tant de médias véhiculent la lassitude ou le défaitisme, il est réconfortant de constater que l'enthousiasme et la créativité sont bien présents dans nos Hautes Ecoles et y portent des fruits aussi prometteurs que ceux présentés ici par Max Monti.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'L. Pflug'.

Prof. Léopold Pflug

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des Projektes

Risse an der Strassenoberfläche nehmen einen bedeutenden Platz unter den möglichen Beschädigungen des Strassenbelags ein. Sie haben einen beträchtlichen Einfluss auf die Unterhaltskosten, die Sicherheit, den Komfort und die Lebensdauer der Strassen, die von immer mehr Faktoren beansprucht werden. Risse können auch das Zeichen einer strukturellen Verschlechterung des Zustandes sein.

Im Rahmen einer effizienten Politik des Strassenunterhalts muss der Zustand der Rissbildung im Strassenbelag regelmässig erhoben werden, um allfällige Eingriffe zu planen oder, noch besser, um ihnen vorzubeugen. Die Forschung für ein besseres Verständnis des Phänomens und Versuche mit neuen Materialien seien hier ebenfalls erwähnt.

Die heute existierenden Mittel zur Aufnahme des Zustands der Rissbildung sind den Anforderungen eines modernen Strassenmanagements nicht mehr gewachsen. Auf diesem Gebiet gibt es auf internationaler Ebene seit über einem Jahrzehnt einen echten Bedarf nach neuen Arbeitsmitteln.

Das Hauptziel dieses Projekts besteht darin, diesem Bedarf nachzukommen und die bestehende Lücke vollständig und dauerhaft zu schliessen - mit Sicht auf zukünftige Entwicklungen im Bereich des Strassenunterhalts.

Ein neues, hochwirksames System zur automatischen Aufnahme der Rissbildung im Strassenbelag wird hier vorgestellt. Die vorliegende Doktorarbeit beinhaltet sowohl die Studie und die Konzeption des Systems als auch die Realisierung eines ersten, vollständigen Prototypen.

Das CREHOS genannte System kann nicht nur für die Messung von Strassenoberflächen verwendet werden, sondern auch an andere grosse raue Oberflächen angepasst werden, insbesondere an Betonoberflächen, Tunnelwände, Gestein, Geleise oder Schienenschwellen, sowie an vorfabrizierte Konstruktionselemente und für die Massenherstellung einiger Produkte.

CREHOS

CREHOS steht für Crack REcognition HOlographic System. Das System basiert auf folgendem Prinzip: Der Strassenbelag wird von einem fokussierten Laserstrahl transversal abgetastet, und das zurückgestreute Licht wird mit Hilfe eines holographischen Multifacettenelements zu einem Detektor geführt.

Wenn der Strahl in einen Riss fällt, wird das Licht absorbiert, und das Signal am Ausgang des Detektors geht schlagartig zurück. Dieses Signal wird gefiltert und binarisiert, um eine Kette von binären Pulsen zu erhalten, welche die Risse darstellt. Die Pulsketten werden analysiert, erkannt, und mit Hilfe eines Parallelprozessors gespeichert.

CREHOS ist in einem Anhänger untergebracht und setzt sich aus drei Hauptbestandteilen zusammen: Die Abtastvorrichtung, die Vorrichtung zur holographischen Detektion und die elektronische Verarbeitungseinheit.

Die vorgesehenen Spezifikationen sind im folgenden zusammenfasst:

<i>Gemessene Parameter:</i>	Position des Risses (x und y) Länge des Risses Breite des Risses (8 Kategorien) Form des Risses (vektoriert)
<i>Empfindlichkeit:</i>	einstellbar zwischen 0.5 und 20 mm Breite
<i>Räumliche Auflösung:</i>	zwischen 1 und 2 mm in Laufrichtung kontinuierliche seitliche Abtastung
<i>Analysierte Oberfläche:</i>	4 m x 200 km
<i>Geschwindigkeit des Fahrzeugs:</i>	40 km/h bei einer longitudinalen Auflösung von 1 mm 80 km/h bei einer longitudinalen Auflösung von 2 mm
<i>Speicherung:</i>	PC, Sy-Quest 105 MByte
<i>Messbericht:</i>	unmittelbar nach der Messung verfügbar
<i>Darstellung der Daten</i>	« à la carte »
<i>Globaler Ertrag:</i>	potentiell 150'000 km / Jahr (8 Stunden Messung werktags)

Drei Hauptprobleme müssen gelöst werden:

Das Rauschen

Die Rauheit der Strassenbeläge bewirkt eine völlig zufällige und schwer detektierbare Rückstreuung des Lichtes. Dieses Problem wurde dank einer neuen Art von holographischen Kollektoren mit Multifacetten gelöst. Die Herstellung dieser speziellen Hologramme erforderte die Konstruktion eines eigens dafür konzipierten Roboters.

Der enorme Informationsfluss

Eine Fläche von 4 m x 200 km entspricht 800 Milliarden mm². Bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 43 km/h ergibt das 48 Millionen Punkte pro Sekunde, d.h. 5.7 MByte/s. Eine Messung von 8 Stunden erzeugt somit 161 GByte. Würde das Ausgangssignal des Detektors ohne vorgängige Verarbeitung gespeichert, so besetzte es demnach Hunderte von GBytes, die grösstenteils unnütz sind. Die Daten müssen also optimiert werden, um ihnen ausschliesslich die bedeutsame Information zu entziehen. Die Risse müssen in Echtzeit erkannt werden.

Die Geschwindigkeit

Eine Auflösung von 1 mm in beiden Richtungen für ein sich mit 40km/h bewegendes Fahrzeug bedingt ein sehr schnell arbeitendes System. Diese Probleme wurden mit einem Parallelprozessor gelöst, der sich aus Dutzenden von spezialisierten Modulen zusammensetzt.

Aufbau der Doktorarbeit

Diese Arbeit beinhaltet sechs Unterteilungen verschiedener Art, wobei jede einzelne als ein separates vollständiges Projekt betrachtet werden kann. Jede Unterteilung wird in einem unabhängigen Abschnitt behandelt. Der letzte Abschnitt ist den Schlussfolgerungen gewidmet. Der Inhalt aller Abschnitte wird im folgenden zusammengefasst:

Abschnitt A. Studie und Konzept

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die globalen Aspekte, das Bauingenieurwesen, die Politik des Strassenunterhalts und über das Konzept und die Organisation des Projekts.

Abschnitt B. Die Abtastvorrichtung.

Dieser Abschnitt beschränkt sich auf die Dimensionierung und die Wahl der geeignetsten Abtastvorrichtung; es wurden keine wesentlich neuen Elemente eingebracht.

Abschnitt C. Die Detektionsvorrichtung mit Multifacettenhologrammen.

Einer der wichtigsten Hauptabschnitte. Die holographischen Kollektoren mit Multifacetten werden hier von der Grundidee bis zu den Algorithmen der Disposition der Facetten erläutert. Der Abschnitt behandelt vor allem die Optik und Methoden der Anordnung oder Pflasterung.

Abschnitt D. Der Roboter für die Aufnahme der Multifacettenhologramme.

Es werden die mechanischen, optischen, elektronischen und informatischen Aspekte des Roboters behandelt, der zur Herstellung der Multifacettenhologramme konstruiert wurde, sowie einige Beispiele für andere Anwendungen als jene für CREHOS.

Abschnitt E. Das System der Datenverarbeitung.

Der zweite Hauptabschnitt des Projekts beschreibt das elektronische Parallelsystem, das die Erkennung der Risse in Echtzeit erlaubt und das der Messung die signifikanten Daten entzieht.

Abschnitt F. Das System in seiner Gesamtheit.

Dieser Abschnitt widmet sich der Realisierung des Prototypen, dem Zusammenstellen der verschiedenen Bestandteile, ihrer Synchronisation und ihrer Synergie, sowie der Präsentation der Resultate.

Abschnitt G. Generelle Schlussfolgerungen.

Nebst den Schlussfolgerungen findet sich hier eine Rekapitulation der durchgeführten Hauptarbeiten und eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate. Ausserdem werden diejenigen Arbeiten erwähnt, die nötig sind, um das Projekt fortzusetzen und zu einem definitiven System zu gelangen.

Orientierung der Arbeit

CREHOS ist eine sehr breitgefächerte Arbeit, die sich aus ziemlich vielen, verschiedenen grossen Modulen zusammensetzt, welche sich auf mehrere Fächer abstützen. Unter diesen Umständen versteht es sich, dass es innerhalb einer beschränkten Zeitspanne unmöglich ist, jedes dieser Module bis zum ausgereiftesten Zustand zu entwickeln. Die Arbeit konzentriert sich deshalb vor allem auf das System in seiner Gesamtheit. Es handelt sich keineswegs darum, verschiedene unabhängige Module zu entwickeln, sondern ein kohärentes und vollständiges Ganzes zu entwerfen. So ist die Arbeit auf das gesamte System und sein Verhalten ausgerichtet: Die Optimierung der Synergie der verschiedenen Bestandteile hatte Priorität vor der Optimierung dieser Bestandteile im einzelnen. Dies gilt sowohl für die theoretische Konzeption als auch für die praktische Realisierung.

Die Konsistenz und die Originalität des Projektes CREHOS liegen in seiner Ausrichtung auf das System, in seiner Orientierung auf die Praxis, seiner Interdisziplinarität und in seinen drei innovativen Elementen.

Innovative Elemente

Ausser dem System CREHOS als ganzem können drei seiner Elemente in einem weiteren Sinn als innovativ bezeichnet werden.

Die holographischen Kollektoren mit Multifacetten

Es handelt sich gleichzeitig um einen neuen Kollektortyp und um eine originelle Anwendung der Multifacettenhologramme. Das zugrundeliegende Prinzip wurde patentiert.

Der Roboter für die Aufnahme der Multifacettenhologramme.

Obschon keine neuen Techniken benutzt werden, ist dieses Gerät einzigartig. Es erlaubt die Realisierung verschiedener Typen von Multifacettenhologrammen innerhalb von kurzer Zeit und zu einem sehr bescheidenen Preis.

Die Datenverarbeitungseinheit und die Erkennung der Risse in Echtzeit

Die vorgeschlagene parallele Architektur erlaubt es, mit Hilfe einfacher Bestandteile, die leicht integrierbar sind, den Pulsen, die zu einem Kontext gehören und die zufällig überlagert sind, rasch zu folgen. Diese Art von Problemen trifft man besonders bei den Techniken zur Verfolgung von sich unabhängig voneinander bewegenden Objekten (Radar o.ä.) und beim Lesen von Messketten mit vielen Kanälen an.

RESUME

(Ce travail est également résumé, dans un style moins technique, dans un article de divulgation qui se trouve en annexe, page 277).

But du projet

Parmi les dégradations des revêtements routiers, une place importante est occupée par la fissuration de surface. Les fissures ont une incidence considérable sur les coûts d'entretien, la sécurité, le confort et la durée de vie de ces ouvrages de plus en plus sollicités par toutes sortes de facteurs. Elles peuvent être également le signe apparent de dégradations structurelles.

Dans le cadre d'une politique de maintenance routière efficace, il est indispensable de relever fréquemment l'état de fissuration des revêtements, afin de décider des interventions nécessaires, les planifier ou, mieux, les prévenir. Sans oublier la recherche d'une meilleure compréhension du phénomène et l'essai de nouveaux matériaux.

Or, les moyens de relevé de la fissuration existants ne sont pas adaptés aux exigences du management routier moderne. Il y a dans ce domaine, sur le plan international et depuis plus d'une dizaine d'années, un véritable besoin de nouveaux outils.

Le but premier de ce projet est de répondre à cette demande, et de combler cette lacune de manière complète et durable, dans la perspective des développements futurs en matière de maintenance routière.

Un nouveau système de relevé automatique à très haut rendement de l'état de fissuration des revêtements routiers est proposé. La thèse présente comprend l'étude et la conception de ce système, ainsi que la réalisation d'un premier prototype complet de tous ses organes.

Le système, baptisé CREHOS, peut également être adapté à des grandes surfaces rugueuses autres que les revêtements routiers, notamment les surfaces en béton, les parois de tunnel, la roche, les rails ou les traverses, les éléments de construction préfabriqués et bon nombre de produits à fabrication linéaire à grand débit.

CREHOS

CREHOS est l'acronyme de *Crack REcognition HOlographic System*. Il est basé sur le principe suivant: le revêtement routier est balayé transversalement par un faisceau laser focalisé et la lumière rétrodiffusée est collectée sur un détecteur par le biais d'un élément holographique multifacettes.

Lorsque le faisceau d'éclairage tombe dans une fissure, la lumière est absorbée et le signal de sortie du détecteur décroît brusquement. Ce signal est filtré et binarisé, afin d'obtenir un train d'impulsions binaires représentant les fissures. Les trains d'impulsions sont analysés, reconnus et mémorisés à l'aide d'un processeur parallèle ad hoc.

CREHOS est installé dans une remorque et se compose de trois organes principaux: le dispositif de balayage, le dispositif holographique de détection et le dispositif électronique de traitement.

Les performances visées sont résumées ci-dessous.

Paramètres mesurés:	• position de la fissure (x et y) • longueur de la fissure • largeur de la fissure (en 8 catégories) • forme de la fissure (vectorisée)
Sensibilité:	• réglable de 0.5 à 20 mm de largeur
Résolution spatiale:	• de 1 à 2 mm dans le sens de marche • balayage latéral continu
Surface analysée:	• 4 m x 200 km
Vitesse du véhicule:	• 40 km/h, 1mm de résolution longitudinale • 80 km/h, 2mm de résolution longitudinale
Mémorisation:	• PC, Sy-Quest 80Mbytes
Rapport de mesure:	• disponible immédiatement après la mesure • représentation des données "à la carte"
Rendement global:	• potentiellement 150'000 km/an (8 heures de mesure les jours ouvrables)

Trois problèmes majeurs doivent être résolus:

Le bruit

La rugosité des revêtements routiers rend la rétrodiffusion complètement aléatoire et difficile à détecter. Ce problème a été résolu grâce à un nouveau type collecteur holographique multifacettes. La réalisation de cet hologramme particulier a nécessité la construction d'un "robot" dédié.

L'énorme débit d'information à traiter

Une surface de 4m x 200 km contient 800 milliards de mm². Pour un véhicule circulant à une vitesse de 43 km/h, cela correspond à 48 millions de points par seconde, c'est à dire 5.7 Mbytes/s. Huit heures de mesure produisent 161 Gbytes de données. Si le signal de sortie du détecteur était mémorisé sans traitement préalable, il occuperait donc des centaines de Gbytes, pour la plupart inutiles. Les données doivent donc être optimisées afin d'en extraire uniquement l'information significative. Les fissures doivent être reconnues en temps réel.

La vitesse

Pour un véhicule circulant à une vitesse de 40 km/h, une résolution spatiale de 1 mm dans les deux directions impose à tout le système de travailler très rapidement.

Ces problèmes ont été résolus par un processeur parallèle ad hoc, composé de dizaines de modules spécialisés.

Organisation de la thèse

Ce travail comporte donc six volets de nature différente, chacun pouvant être considéré comme un projet à part entière. Chaque volet fait l'objet d'une section indépendante. Une dernière section est consacrée aux conclusions. Le contenu de chaque section est résumé ci-dessus.

Section A. ÉTUDE ET CONCEPTION.

Cette section traite avec recul des aspects globaux, de génie civil, de politique de maintenance routière, de la conception et de l'organisation du projet.

Section B. LE DISPOSITIF DE BALAYAGE.

Section brève car n'apportant pas d'éléments originaux, elle est consacrée au dimensionnement et au choix du dispositif de balayage le mieux adapté.

Section C. LE DISPOSITIF DE DÉTECTION par hologramme multifacettes.

Une des sections clé du projet, elle présente le collecteur holographique multifacettes, de l'idée de base aux algorithmes de disposition des facettes. Cette section traite donc essentiellement d'optique et de méthodes de pavage.

Section D. LE ROBOT pour l'enregistrement d'hologrammes multifacettes.

Y sont décrites les parties mécanique, optique, électronique et informatique du robot nécessaire à la réalisation des hologrammes multifacettes, ainsi que quelques exemples d'application autres que le collecteur pour CREHOS.

Section E. LE SYSTÈME DE TRAITEMENT.

Deuxième section clé du projet, elle décrit le système électronique parallèle permettant la reconnaissance en temps réel de fissures et l'extraction des données significatives.

Section F. LE SYSTÈME DANS SON ENSEMBLE.

Cette section est consacrée à la réalisation du prototype, à l'assemblage des différents organes, à leur synchronisation et à leur synergie, ainsi qu'à la présentation des résultats.

Section G. CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

Outre les conclusions, nous trouverons ici un récapitulatif des principaux travaux effectués et une synthèse des résultats plus pertinents. Sont également indiqués les travaux nécessaires à la poursuite de ce travail pour aboutir au système définitif.

Orientation du travail

CREHOS est un travail très ample qui réunit un nombre important de modules de taille variable, qui relèvent de plusieurs disciplines. Dans ces conditions et dans un temps limité, il apparaît clairement qu'il est impossible de pousser chacun de ces modules jusqu'à son développement ultime.

L'objet de ce travail est donc le *système* dans son ensemble. Il ne s'agit nullement de développer plusieurs modules indépendants mais plutôt de concevoir un tout cohérent et complet. Ce travail est donc centré sur l'*ensemble* et sur son comportement: la priorité revient à l'optimisation de la synergie des différents constituants plutôt qu'à l'optimisation des constituants eux-mêmes. Et ceci tant au niveau de la conception théorique qu'à celui de la réalisation pratique.

La consistance et l'originalité du projet CREHOS résident dans son aspect système, son orientation pratique, son interdisciplinarité et dans trois éléments innovateurs.

Éléments innovateurs

Outre le système CREHOS dans son ensemble, trois de ses éléments peuvent être considérés comme innovateurs sur un plan plus général.

Le collecteur holographique multifacettes

Il s'agit à la fois d'un type de collecteur inédit et d'une application originale des hologrammes multifacettes. Son principe a été couvert par un brevet.

Le robot pour l'enregistrement d'hologrammes multifacettes.

Bien qu'elle ne fasse pas appel à des techniques nouvelles, cette machine est néanmoins unique. Elle permet de réaliser différents types d'hologrammes multifacettes, à un coût très faible et dans un temps très limité.

Le dispositif de traitement et de reconnaissance des fissures en temps réel

L'architecture parallèle proposée permet, par le biais de composants simples et facilement intégrables, de suivre rapidement des impulsions appartenant à un contexte et superposées aléatoirement. Ce type de problème se rencontre notamment dans les techniques de suivi (radar ou autres) d'objets en mouvement indépendant et dans la lecture de chaînes de mesure multicanal.

SUMMARY

Goal of the project

In road management, the cracking condition of the pavement is an important parameter to monitor. In fact, degenerated cracks can cause severe and expensive damage to the road network. They can also be a sign of structural degradation.

In order to implement an effective prevention policy, it is imperative, on one hand, to be able to detect small cracks before they begin to propagate and to degenerate, and on the other hand, to carry out frequent surveys. These conditions are certainly not fulfilled by the simplest measurement method, based on direct "human sight" observations, which have five major drawbacks : slowness, low resolution, imprecision, unrepeatability, and data acquisition problems. Some semi-automated systems do exist, but, to our knowledge, none of them simultaneously overcomes all of the above mentioned disadvantages. These faults are all the more unacceptable if considered from the perspective of an automated computer-aided management of the whole road network.

There has been for several years and at the international level, a real need of new tools. The main goal of this project is to meet this demand, and to fill the gap in a complete and lasting way, in the perspective of future developments of road management.

A new high yield system is proposed, for the fully automated crack detection on road pavements. This thesis includes the study and the design of the system and the realization of a first complete prototype.

The system, called CREHOS, can be adapted to almost any rough large surface, such as concrete pavements (airports), tunnel's walls, rock, rails or sleepers, prefabricated building elements and linear mass-produced products.

CREHOS

CREHOS is the acronym of *Crack REcognition HOlographic System*. It is based on the following principle : the road pavement is scanned in the lateral direction by a focused laser beam, and back-scattered light is collected on a detector by means of a multifacet holographic optical element.

When the light spot falls into a crack, light is absorbed, and the signal on the detector abruptly decreases. This signal is filtered and binarized, in order to obtain sets of binary pulses representing the cracks. Those sets will be then recognized, treated and stored in real time by means of a custom parallel processor.

CREHOS is mounted on a trailer and is actually composed of three sub-systems: the scanning device, the holographic light-collection system, and the electronic treatment system.

It is expected to have the following characteristics.

Measured parameters:	• crack position, lateral and longitudinal • crack length • crack width (eight discrete categories) • crack shape (vectorized)
Sensitivity:	• adjustable from 0.5 mm to 20 mm of width
Spatial resolution:	• 1mm to 2mm in the running direction • continuous scanning in the lateral direction
Scanned area:	• 4 m x 200 km
Speed of the vehicle:	• 40 km/h with 1mm longitudinal resolution • 80 km/h with 2mm resolution
Data storage:	• PC, Sy-Quest 80Mbytes
Report:	• directly available at the end of the run • data representation "à la carte"
Global yield:	• potentially 150'000 km/year (8 hours per working day)

Three major problems have to be solved:

Noise

The extreme roughness of the road causes the light to be back-scattered in a random direction, making its detection very difficult. This problem has been solved by means of a new type of multifacet holographic collector. A dedicated "robot" was built, which automatically records this complex hologram.

Huge flow of data

A surface of 4m x 200 km contains 800 billions of mm². For a vehicle running at the speed of 43 km/h, this corresponds to 48 millions of points per second, i.e. 5.7 Mbytes/s. Eight hours of measurement produce 161 Gbytes of data.

If stored without any previous treatment, the binary signal coming from the detector would then occupy hundreds of Gbytes, most of them being useless. The data need to be optimized in order to extract only significant information. Cracks must be recognized in real time.

Speed

For a vehicle running at 40 km/h, a resolution of 1mm in both directions imposes on the whole system to work very rapidly.

Those problems are solved by a custom parallel processor composed of tens of specialized modules.

Structure of the thesis

This work consists of six parts, each of them representing a full project. The parts correspond to six sections of the thesis. A last section is dedicated to final conclusions. The content of the sections is summarized below.

Section A. STUDY & DESIGN.	This section treats with hindsight the global aspects of civil engineering, of road management policy and the organization of the project.
Section B. THE SCANNING SYSTEM.	This short section is dedicated to the choice of the scanning system and to its optical characteristics.
Section C. THE DETECTION SYSTEM using a multifacet hologram.	This is one of the key-sections of the project. It presents the multifacet holographic collector, from the basic principles to the paving algorithms.
Section D. THE ROBOT for recording analog multifacet holograms	This section describes the mechanical, optical, electronic and software parts of the robot built to realize the multifacet collector. Some others examples of multifacet holograms which can be recorded with this machine are shown.
Section E. THE TREATMENT SYSTEM.	Second key-section of the project, it describes the parallel electronic system which recognizes and vectorizes the cracks in real time.
Section F. THE WHOLE SYSTEM.	This section is dedicated to the realization of the first prototype and to the assembly of the different parts of the system. The main results are also presented.
Section G. CONCLUSIONS.	Besides the global conclusions, we will find in this section a summary of the main realizations and of the main results.

Trend of the project

CREHOS is a large project composed of many modules, covering different subjects. The time being limited, it is not possible in this context to bring each module to its ultimate development stage. The objet of this work is thus the development of the whole system, and the synergy of its different parts, and not the complete development of the parts themselves, as well at the theoretical level as at the practical one. This work is characterized by a "system" approach, by its interdisciplinarity and by its practical aspect.

Innovative elements

Besides the whole CREHOS system, three elements of this project can be considered as innovative in a more general way.

The multifacet holographic collector

This element is on one hand a new type of collector, and on the other hand an original application of multifacet holograms techniques. Its principle has been covered by a patent.

The robot for recording analog multifacet holograms

Without introducing new techniques, this machine is unique. It allows to realize different types of multifacet holographic elements at a very low cost and very rapidly.

The treatment system for the real time recognition of sets of pulses

By the means of simple components, the proposed parallel architecture allows to follow and to separate sets of pulses which are randomly superimposed. This type of problem appears in the techniques of multiple tracking of moving objects or in multipoints measurement systems.

TABLE DES MATIERES

Section A.	LE PROJET CREHOS	
	<u>Introduction, étude et conception</u>	<u>1</u>
1.	Introduction	3
1.1.	Les buts du projet	3
1.2.	Motivations	4
1.3.	Les dispositifs existants	7
2.	Esprit et orientations de ce travail	13
2.1.	Contexte suisse	14
2.2.	Contexte européen	15
3.	Les revêtements routiers	19
3.1.	Les différentes dégradations	20
3.2.	La fissuration	21
4.	Définition du problème	23
4.1.	Cahier des charges	23
4.2.	Les difficultés majeures	26
5.	La solution proposée: CREHOS	27
5.1.	Points de départ	27
5.2.	Principe de la méthode	28
5.3.	Essais préliminaires	28
5.4.	CREHOS en bref	31
5.5.	Les performances visées	33
6.	L'épine dorsale du projet: l'information	35
6.1.	Glossaire	35
6.2.	L'évolution de l'information dans CREHOS	37
7.	Structure du projet et organisation de la thèse	39
7.1.	Schéma-bloc du projet complet	40
Section B.	LE BALAYAGE	
	<u>par miroir polygonal tournant</u>	<u>43</u>
8.	Rôle du dispositif de balayage	45
8.1.	L'information	45
9.	Dimensionnement et limitations	47

9.1. Prototype de 60 cm de largeur	53
10. Choix de la méthode	55
10.1. Les méthodes écartées	55
10.2. La solution retenue: le miroir polygonal tournant	55
11. Signaux de synchronisation	57
12. Conclusions	59
12.1. Montage	59
12.2. Résultats	59
 Section C. LA DETECTION	
par collecteur holographique multifacettes	61
 13. Introduction	63
13.1. Les trois parties du dispositif de détection	65
13.2. Le rôle du dispositif de détection	65
14. Propriétés optiques des revêtements routiers	69
14.1. Remarques qualitatives	70
14.2. Modèles analytiques	79
14.3. Approche expérimentale	82
14.4. Conclusions	89
15. Collecter la lumière rétrodiffusée	91
15.1. Le problème	91
15.2. La solution proposée	92
16. Le collecteur holographique multifacettes	95
16.1. Les hologrammes multifacettes	95
16.2. Principe du collecteur pour CREHOS	96
16.3. Algorithme de disposition des facettes	101
16.4. Recherche des fonctions de pavage	113
16.5. Pavages à densité uniforme	115
16.6. Pavage à densité variable	119
16.7. Réalisations pratiques	123
16.8. Conclusions.	133
17. Conversion photoélectrique	135
17.1. Optimisation du signal	135
18. Mise en forme du signal	139
18.1. Le signal de sortie	140
18.2. Conclusions	142

Section D.	LE ROBOT	
	pour l'enregistrement d' hologrammes multifacettes	143
19.	Introduction	145
	19.1. Motivations	145
	19.2. Spécifications requises	146
	19.3. Structure globale	147
20.	Structure mécanique	153
	20.1. Cadre rigide	153
	20.2. Masque	153
	20.3. Plaque de base	159
	20.4. Tourelle porte-plaque	161
	20.5. Positionnement de l'onde de référence	165
	20.6. Positionnement de l'onde objet	167
21.	Dispositif optique	171
	21.1. Système à fibres optiques	171
	21.2. Stabilisation de phase	171
	21.3. HOE pour l'onde objet	172
	21.4. possibilités de mouvement des ondes	173
22.	Electronique de commande	175
23.	Programmes de contrôle	177
24.	Un exemple de séquence d'enregistrement	179
25.	Quelques exemples de MFHOE réalisables avec le robot	181
26.	Conclusions	185
Section E.	LE TRAITEMENT	
	Reconnaissance des fissures en temps réel	
	par processeur parallèle ad hoc	187
27.	Le Rôle du système de traitement	189
28.	Le problème	191
	28.1. Corréler les impulsions	192
	28.2. Reconnaître les fissures	192
	28.3. Comprimer l'information	193
	28.4. Mémoriser	194
29.	La solution proposée: traitement parallèle	195
	29.1. Principe	195
	29.2. L'algorithme de base	196
	29.3. Analyse et mémorisation des fissures suivies	200
	29.4. Cas particuliers	205

29.5. Positionnement	205
29.6. Format de sortie des données	209
30. Programme de simulation	211
30.1. Interface graphique	213
30.2. Interface utilisateur	215
30.3. Génération aléatoire des fissures	215
30.4. Génération des signaux	216
30.5. Simulation de la mémoire tampon	216
30.6. Simulation des suiveurs	216
30.7. Lecture des suiveurs	222
30.8. Résultats	222
31. Implémentation électronique	225
31.1. La carte tampon	226
31.2. Les suiveurs	228
32. Conclusions	229
 Section F. LE SYSTEME DANS SON ENSEMBLE	
<u>Prototype 1</u>	<u>231</u>
33. Assemblage du prototype	233
33.1. Structure	233
33.2. Installation électronique	235
33.3. Gestion des signaux	236
33.4. Configuration testée	237
33.5. Vue d'ensemble	239
34. Résultats en laboratoire	241
34.1. Dispositif de balayage	241
34.2. Dispositif de détection	241
34.3. Dispositif de traitement	244
35. Mesures "in situ"	245
36. Evaluation globale	249
 Section G. CONCLUSIONS GENERALES	
<u>251</u>	<u>251</u>
37. Récapitulatif du travail effectuée	253
38. Récapitulatif des résultats obtenus	257
38.1. Remarques	258
38.2. "By-products"	258
39. Autres applications de CREHOS	261

40.	Développements futurs	263
	40.1. Prototype 2	263
	40.2. Système définitif	263
41.	Diffusion	265
	41.1. Publications	265
	41.2. Promotion	266
	41.3. Film	267
42.	Commentaires finaux	269

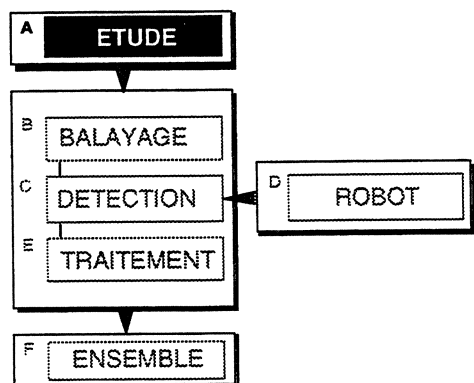
REMERCIEMENTS	271
BIBLIOGRAPHIE	275
ANNEXES	277
Extrait de "Science & VIE"	279
Exemple de rapport de relevé visuel	281
CURRICULUM VITAE	283

Table des matières

Section A

LE PROJET CREHOS

Introduction, étude et conception



Cette première section est consacrée à la définition globale du projet: ses buts, ses motivations, sa structure d'ensemble, les principes sur lesquels il repose et les raisons de certains choix. Nous l'aborderons avec le recul nécessaire, afin de mieux pouvoir introduire et situer à la fois l'ensemble de ce travail et les différents aspects qui le caractérisent.

1. Introduction	3
1.1. Les buts du projet	3
1.2. Motivations	4
1.3. Les dispositifs existants	7
2. Esprit et orientations de ce travail	13
2.1. Contexte suisse	14
2.2. Contexte européen	15
3. Les revêtements routiers	19
3.1. Les différentes dégradations	20
3.2. La fissuration	21
4. Définition du problème	23
4.1. Cahier des charges	23
4.2. Les difficultés majeures	26
5. La solution proposée: CREHOS	27
5.1. Points de départ	27
5.2. Principe de la méthode	28
5.3. Essais préliminaires	28
5.4. CREHOS en bref	31
5.5. Les performances visées	33
6. L'épine dorsale du projet: l'information	35
6.1. Glossaire	35
6.2. L'évolution de l'information dans CREHOS	37
7. Structure du projet et organisation de la thèse	39
7.1. Schéma-bloc du projet complet	40

Section A. LE PROJET CREHOS

1. INTRODUCTION

Le titre complet de ce travail de thèse est le suivant:

CREHOS:

un scanner laser de très grandes dimensions, à très haute vitesse et haute résolution, avec détection par hologrammes multifacettes et traitement parallèle de l'information pour la reconnaissance en temps réel de fissures dans des surfaces de rugosité importante.

Application au relevé automatique à haut rendement de l'état de fissuration des revêtements routiers.

Quant au nom CREHOS, il est l'acronyme anglais de

Crack REcognition HOlographic System

1.1. Les buts du projet

Parmi les dégradations des revêtements routiers, une place importante est occupée par la fissuration de surface. Les fissures ont une incidence considérable sur les coûts d'entretien, la sécurité, le confort et la durée de vie de ces ouvrages de plus en plus sollicités par toutes sortes de facteurs. Elles peuvent être également le signe apparent de dégradations structurelles.

Il est donc indispensable de connaître l'état de fissuration des revêtements, et ceci le mieux possible, afin de décider des interventions nécessaires, les planifier ou, mieux, les prévenir. Sans oublier la recherche d'une meilleure compréhension du phénomène et l'essai de nouveaux matériaux.

Or, les moyens de relevé de la fissuration existants ne sont pas adaptés aux exigences du management routier moderne. Il y a sur ce point, sur le plan international et depuis plus d'une dizaine d'années, un véritable besoin de nouveaux outils.

Le but premier de ce projet est de répondre à cette demande, et de combler cette lacune de la manière la plus complète et durable, dans la perspective des développements futurs en matière de maintenance routière. Plus précisément, le mandat qui m'a été confié¹ est double:

- ◆ *Concevoir* un dispositif fiable et performant² permettant de détecter, de quantifier et de mémoriser l'état de fissuration de surface d'un revêtement routier.
- ◆ *Réaliser* un prototype de ce dispositif, complet de tous ses organes.

1 Par le Prof. Léopold Pflug, directeur de thèse, sur demande de l'Office Fédéral des Routes (OFR).

2 Cette notion sera définie précisément dans les paragraphes suivants.

Remarques:

- ◇ Sont exclus du projet les problèmes liés à l'installation du dispositif sur un véhicule homologué pour la circulation.
- ◇ Est également exclue du projet l'interprétation des résultats fournis par le système. Le rôle du dispositif se limite à fournir les données complètes décrivant l'état de fissuration du revêtement, sous la forme d'un fichier informatique. Le développement de programmes de représentation de ces données sous des formes diverses pourra faire l'objet d'un projet de semestre ou de diplôme pour un étudiant¹. Si les données brutes sont bien structurées et autosuffisantes, il n'y aura aucun problème à réaliser ces programmes dans un temps très limité.
- ◇ Soulignons que le revêtement routier est une surface qui présente les pires qualités optiques. Un dispositif donnant de bons résultats sur une telle surface serait donc susceptible de donner des résultats encore meilleurs sur d'autres surfaces, telles que le béton, le métal poli ou très rugueux (brut ou usé), la roche etc.

1.2. Motivations

Du point de vue de l'utilisateur, les buts finaux à atteindre par le biais d'un dispositif de mesure sont:

- ◇ la connaissance de l'état du réseau
- ◇ la minimisation des coûts d'entretien
- ◇ l'augmentation de la durée de vie des revêtements
- ◇ la mise au point de nouvelles techniques et de nouveaux matériaux
- ◇ une sécurité et un confort accrus.

L'obtention de ces résultats dépend fortement non seulement des performances du dispositif, mais aussi de la *cohérence* de ces performances.

Pour mieux saisir l'intérêt d'un dispositif *performant* considérons d'abord le *cas idéal*. De nos jours, un système performant doit présenter dix caractéristiques essentielles :

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| ◇ mesure détaillée | ◇ pas de perturbation du trafic |
| ◇ probabilité de détection élevée | ◇ fiabilité et répétabilité |
| ◇ sensibilité élevée | ◇ informatisation directe |
| ◇ grand rendement global | ◇ compatibilité passé-futur |
| ◇ faible coût d'exploitation | ◇ compatibilité internationale |

Mesure détaillée

Un système performant doit permettre une mesure des fissures aussi détaillée que possible, c'est à dire forme, largeur, profondeur, position latérale et position longitudinale de chaque fissure. A partir de ces données brutes, il sera par la suite possible d'extraire toutes sortes d'informations

¹ On reviendra sur l'utilisation de ces données brutes plus loin. Si leur exploitation n'incombe pas à CREHOS, il est néanmoins indispensable que ce dernier les fournisse dans un format permettant une manipulation aussi souple qu'aisée.

différentes, suivant la diversité des besoins (évaluations statistiques, évaluations locales, modélisations théoriques, coûts de réparation, prévisions, sécurité, etc.).

Probabilité de détection élevée

La mesure détaillée de chaque fissure doit s'accompagner d'une bonne probabilité de détection: si tel n'était pas le cas, l'analyse des données devrait se limiter à des évaluations statistiques ou à des extrapolations. Extrapoler des résultats partiels à l'ensemble du tronçon est un exercice très délicat dans le domaine des fissures, qui sont des dégradations très localisées.

Sensibilité élevée

Plus le système est sensible, c'est à dire apte à détecter des fissures étroites, plus il est utile en termes économiques. Une détection précoce permet une réparation à moindres frais. A contrario, une intervention tardive peut conduire jusqu'à la reconstruction du tronçon dans son ensemble. Un revêtement très dégradé pose également des problèmes de sécurité et de confort.

Grand rendement global

Le rendement global du dispositif doit être élevé. En d'autres termes, le temps qui s'écoule entre la mise en service du véhicule de mesure et la remise du rapport au mandataire doit être le plus court possible, voire même "instantané"¹. Cela pour permettre des mesures fréquentes, et donc une surveillance "permanente" des tronçons sensibles, condition nécessaire à une détection précoce et à une politique de prévention. Si le rendement du système était faible, il serait inutile d'en optimiser la sensibilité².

Faible coût d'exploitation

Un faible coût d'exploitation du système de mesure est, pour des raisons évidentes, une condition nécessaire pour profiter à plein de la sensibilité et du rendement.

Pas de perturbation du trafic

La faculté du véhicule de mesure de s'intégrer au trafic sans le perturber est également indispensable à son utilisation intensive.

-
- ¹ Dans le sens que ce temps correspond simplement au temps nécessaire à parcourir le tronçon.
 - ² Ecartons d'emblée l'alternative consistant en un grand nombre de dispositifs, qui ne serait pas économiquement intéressante.

Fiabilité et répétabilité de la mesure

Il est important d'appliquer strictement les mêmes critères de mesure à chaque tronçon (ou aux mesures successives d'un même tronçon), condition indispensable à la cohérence des mesures. Ceci rend possible la comparaison des mesures, permettant un suivi *dynamique* de l'évolution d'un revêtement, indispensable à la mise en oeuvre d'une politique préventive qui prolongerait la durée de vie des ouvrages.

Informatisation directe

Ce point, souvent négligé dans le passé, revêt aujourd'hui une grande importance. La forme de mémorisation des données qui est à fois souple, accessible, compacte, économique et répandue est, bien sûr, la forme informatique. Les résultats des campagnes de mesure doivent donc être disponibles *directement* sur ordinateur, sans étapes supplémentaires, réalisant à la fois un archivage rationnel et une base fonctionnelle pour des traitements ultérieures.

Un traitement informatique approprié permettra en outre d'accroître énormément la *valeur symbolique* de l'information, en transformant, par exemple, les coordonnées des fissures en coûts de réparation, en kilos de bitume nécessaires, en nombre d'hommes à engager, ou encore en planification des interventions¹.

Des données brutes informatisées sont facilement accessibles pour tout programme de calcul, simulation ou statistique.

Compatibilité passé-futur

Les résultats fournis par le nouveau dispositif doivent être compatibles avec les résultats fournis par les méthodes appliquées jusqu'à présent, pour ne pas créer une rupture qui pourrait être fortement préjudiciable à l'adoption du nouveau système. De même, le nouveau dispositif devrait d'ores et déjà tenir compte de l'évolution probable du management routier dans les années futures, pour s'y trouver parfaitement intégré².

Compatibilité internationale

Dans le cadre d'une politique de maintenance au niveau européen dont la Suisse ferait partie, il est important que tant le dispositif lui-même que les résultats qu'il fournit puissent être utilisés par d'autres pays. Cela implique une compatibilité avec un certain nombre de "standards".

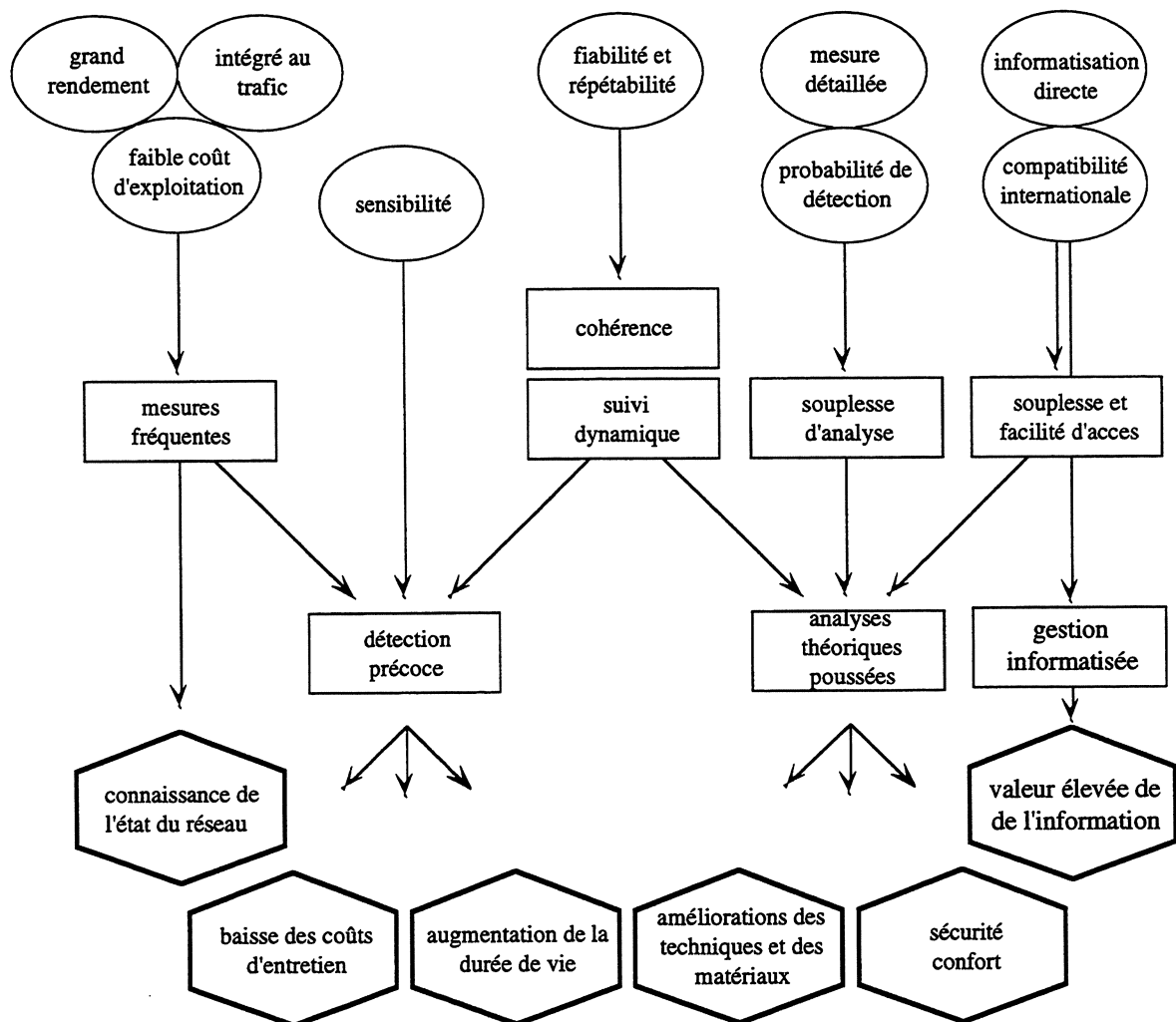
Les relations entre les performances idéales du dispositif et leur influence directe ou indirecte sur les buts réels à atteindre sont résumées par le *diagramme d'action* à la page suivante.

¹ Nous reviendrons à plusieurs reprises et de façon plus détaillée, sur cette notion de *valeur symbolique de l'information*. Contentons-nous ici d'une compréhension intuitive.

² Le futur du management routier est vraisemblablement représenté par une harmonisation globale au niveau européen, une entrée en force de l'informatique, à plusieurs niveaux (banques de données centralisées, systèmes experts, etc.) et, peut être, par des nouveaux matériaux.

Ce diagramme d'action servira d'étalon pour l'évaluation des méthodes existantes et de guide dans la conception de CREHOS. Les ovales représentent les performances, les rectangles les conséquences, et les hexagones les buts finaux. Nous verrons notamment que le diagramme d'action est coupé ou inexistant dans la plupart des méthodes actuellement employées, ce qui les empêche d'atteindre pleinement les buts.

Diagramme d'action du système idéal



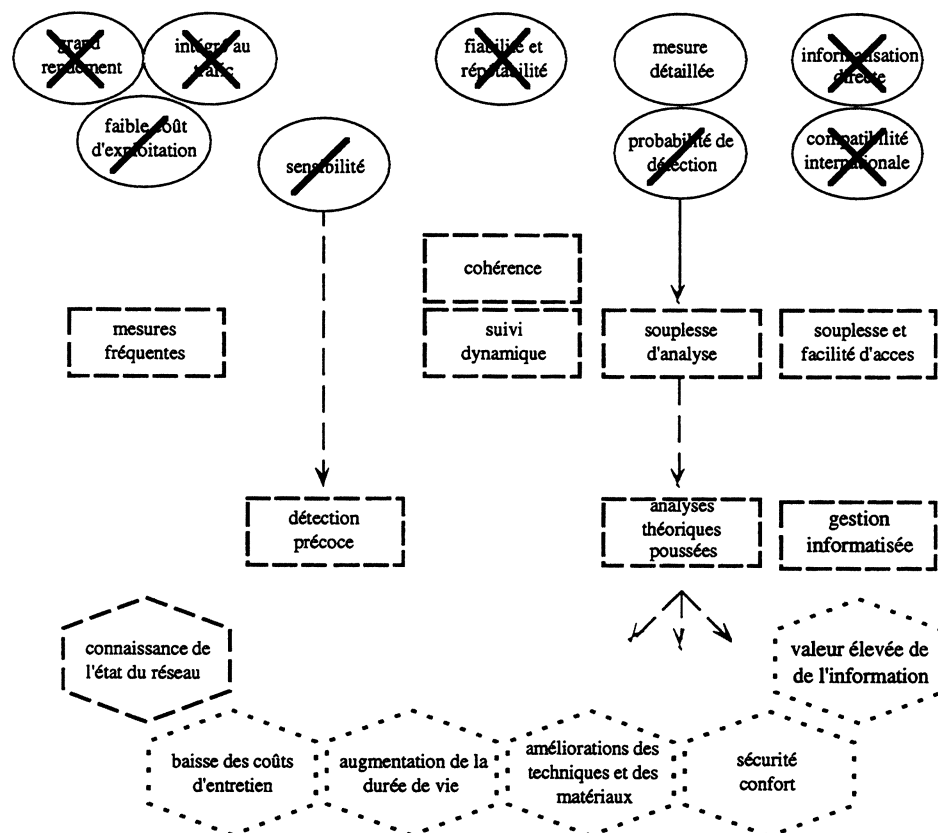
1.3. Les dispositifs existants

Un certain nombre de techniques de relevé de l'état de fissuration sont actuellement mises en oeuvre dans les différents pays industrialisés. Leurs performances sont très variables, mais aucune ne répond de manière complète aux exigences du système idéal. Cela a pour conséquence que les buts ultimes (baisse des coûts d'entretien, augmentation de la durée de vie, amélioration des techniques et des matériaux, sécurité et confort) ne sont pas

atteints, ou le sont très partiellement, rendant discutable l'investissement nécessaire à la mesure. Nous passerons ici brièvement en revue les systèmes existants: les raisons qui pénalisent leur performances apparaissent clairement dans les diagrammes d'action respectifs. Dans ces diagrammes les traits pleins, segmentés, pointillés signifient respectivement "condition remplie complètement, partiellement, pas du tout".

Inspection visuelle

Cette méthode est la plus simple: un employé formé à cette tâche parcourt la chaussée à pied (ou sur véhicule lent), l'observe à l'oeil nu, et note ses observations dans un formulaire. Le formulaire, dont un spécimen figure en annexe, permet d'une part de noter un grand nombre de dégradations différentes, qui, d'autre part, ne sont décrites que de manière très sommaire.



Le point fort de cette méthode réside dans sa grande souplesse potentielle quant aux paramètres observables. Dans le cas d'une observation très lente on pourrait également avoir une sensibilité très élevée, car l'oeil peut discerner des fissures très petites. Mais ces atouts ne sont pas exploités dans la pratique, et ne sont pas exploitables car isolés: le rendement est très faible, le trafic perturbé¹, la sensibilité assez moyenne, et la mesure peu fiable et peu répétable car a forte composante humaine. En conclusion, cette technique, qui ne peut amener qu'une connaissance sommaire et locale du réseau, est d'utilité limitée.

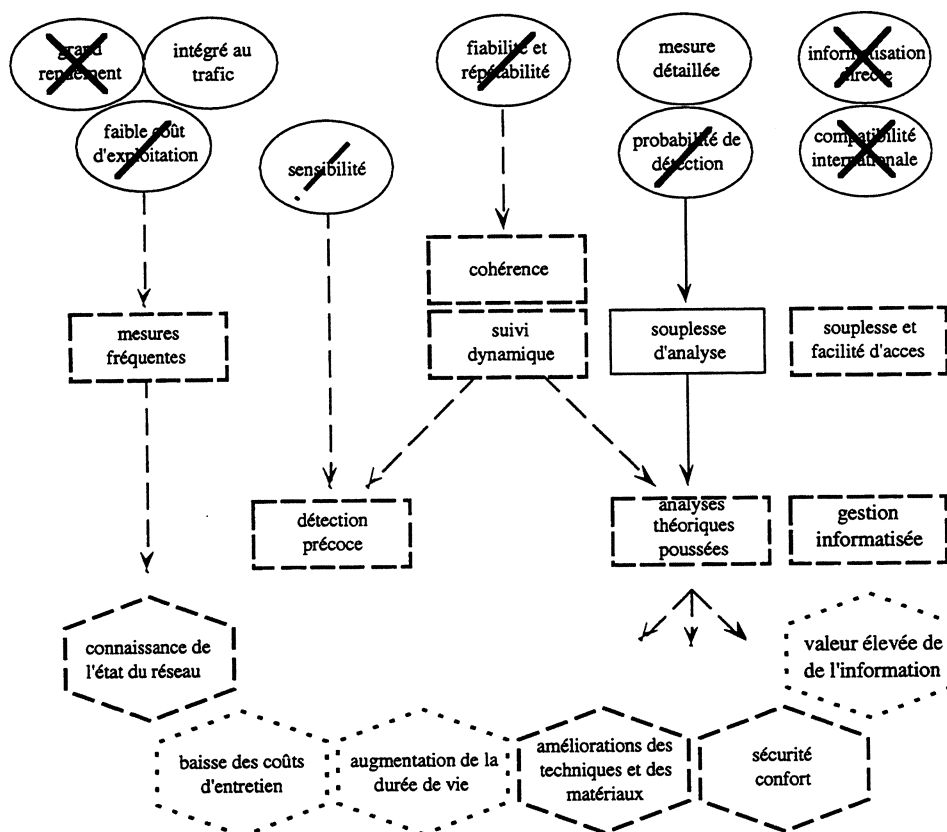
¹ Une observation depuis le bord de la route diminuerait considérablement la probabilité de détection et la sensibilité.

Système GERPHO avec analyse manuelle

Développé en France et utilisé dans différents pays européens, ce dispositif consiste en une caméra à film montée sur un véhicule. Grâce à une synchronisation entre la vitesse du véhicule et le défilement du film, il est possible de filmer en continu plusieurs km de route. Le film est par la suite développé, et analysé à l'oeil en laboratoire.

Cette méthode garde donc les limitations de l'inspection visuelle liées à la composante humaine, mais présente par rapport à celle-ci deux avantages considérables: une très bonne intégration au trafic et la mémorisation des données brutes, autrement dit la possibilité d'effectuer a posteriori des analyses variées, et de comparer des mesures.

Les inconvénients sont un accès aux données peu aisé (donc lent et nécessitant un personnel formé spécialement) et une sensibilité assez modeste¹. Cette méthode est meilleure que la précédente, mais elle est loin de satisfaire pleinement aux buts finaux.



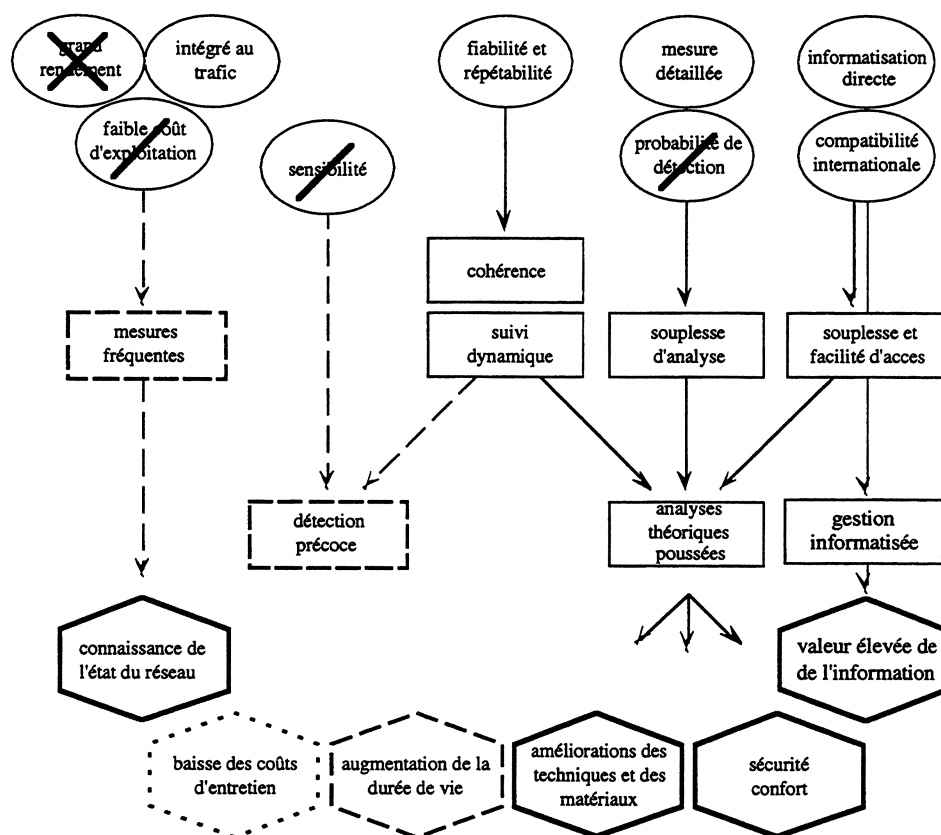
Système GERPHO avec analyse automatique

Avec le projet MACADAM, le Laboratoire des Ponts et Chaussées français (LCPC) travaille à la mise au point d'un système permettant une analyse automatique (ou semi-automatique) des films produits par GERPHO. Ce projet, basé sur les techniques numériques de traitement d'image, n'est pas terminé à l'heure actuelle, et je dispose de peu de détails à ce sujet. Un tel

¹ Ne disposant pas de données précises à ce propos, je fonde mon estimation sur les problèmes inhérents au grandissement, à la diffraction et à la résolution du film.

traitement améliorerait considérablement les performances globales de GERPHO.

Le grand atout de ce système, qui n'apparaît pas directement dans le diagramme d'action, c'est de pouvoir effectuer simultanément une analyse de plusieurs types de dégradations (fissures, nids de poule, bandes blanches, trous, etc.). Les inconvénients sont à mon avis une perte de sensibilité considérable et un temps de traitement très long, nécessitant la présence d'un opérateur spécialisé. Ce système pourrait atteindre quelques uns des buts, mais n'est pas optimal en ce qui concerne les fissures¹. Par ailleurs, GERPHO est intégré à un véhicule de mesure multifonctions, SIRANO, qui présente un grand intérêt d'ensemble.

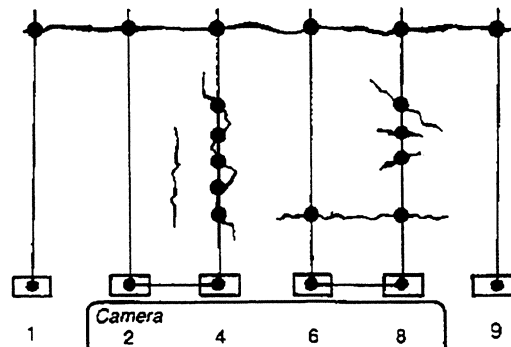


Système Laser-RST (Suède)

Ce système, développé par le laboratoire suédois VTI de Linköping, est installé sur un véhicule qui effectue simultanément sept mesures différentes: profondeur des ornières, rugosité, texture, pente transversale, courbure, rampes et fissures². Ce véhicule est sans doute très intéressant dans son aspect global. Nous nous limiterons ici à en évaluer la partie inhérente aux fissures. Le relevé de la fissuration se fait non pas par un dispositif dédié,

- ¹ Au début de ce travail, j'ai également envisagé de recourir aux techniques de traitement d'image. L'étude que j'ai menée en ce sens m'a porté à conclure qu'il ne s'agit pas d'une solution bien adaptée au problème, en tout cas en ce qui concerne les fissures.
- ² D'après la brochure de présentation.

mais en exploitant la même installation servant à la mesure du profil et de la texture.



Elle est constituée de quatre faisceaux laser disposés transversalement au sens de marche, qui produisent quatre points lumineux sur la chaussée, distants d'environ 40-50 cm. La lumière réfléchiée est vraisemblablement analysée par une caméra (ci-contre, un extrait de la brochure de présentation).

Ne disposant pas d'informations plus détaillées sur ce système, je ne puis en tracer le diagramme d'action. Néanmoins, il apparaît que le grand inconvénient de ce système est un échantillonnage spatial excessivement faible: réduire 3 à 4 m de chaussée à quatre points me paraît très hasardeux: la probabilité de détection et la répétabilité sont très faibles et le seul type d'analyse possible est une statistique très grossière. Il est également légitime d'avoir des doutes quant à la représentativité et quant au sens des données recueillies. Ce système ne peut garder un intérêt que dans le contexte du véhicule multifonctions, à titre indicatif.

Conclusions

L' état de l'art en matière de détection de fissures est loin d'être satisfaisant: les systèmes existants ne permettent pas vraiment d'avoir une bonne vision de l'état de fissuration de l'ensemble du réseau, ni de baisser les coûts d'entretien, ni d'augmenter la durée de vie des revêtements¹.

¹ Par ailleurs, il est clair que ces objectifs ne sauraient être atteints par la seule détection des fissures.

2. ESPRIT ET ORIENTATIONS DE CE TRAVAIL

CREHOS est un travail très ample qui se compose de cinq projets de taille importante. Chacun de ces projets génère à son tour plusieurs modules. Ce travail réunit un nombre important de modules de taille variable, qui relèvent de plusieurs disciplines. Dans ces conditions et dans un temps limité, il apparaît clairement qu'il est impossible de pousser chacun de ces modules jusqu'à son développement ultime. Il a donc fallu faire des choix précis sur les options d'orientation du travail à mener.

La consistance et l'originalité de CREHOS résident dans son aspect système, son orientation pratique, son interdisciplinarité et dans deux éléments innovateurs.

Aspect système

L'objet de ce travail est le *système* dans son ensemble¹. Il ne s'agit nullement de développer plusieurs modules indépendants mais plutôt de concevoir un tout cohérent et complet. Ce travail est donc centré sur l'ensemble et sur son comportement: la priorité revient à l'optimisation de la *synergie* des différents constituants plutôt qu'à l'optimisation des constituants eux-mêmes. Et ceci tant au niveau de la conception théorique qu'à celui de la réalisation pratique.

Orienté pratique

CREHOS répond à une demande concrète : il s'agit de doter les organismes responsables de la maintenance routière d'un outil de mesure qui réponde au mieux à leurs exigences présentes et si possible futures. Ce travail doit donc aboutir à un prototype opérationnel et complet, développé dans tous ses organes.

Dans un temps limité, ce deux parti-pris excluent donc un développement très poussé des différents organes du système. Un tel développement se prêterait d'ailleurs fort bien à d'autres travaux de thèse².

Interdisciplinarité

CREHOS est un projet *interdisciplinaire* où sont concernées, à des niveaux divers, le génie civil, la mécanique, l'électronique, la micro-informatique, la programmation, la topologie et, bien sur, l'optique. Là encore, l'accent est mis sur la symbiose cohérente entre ces différents domaines et leurs techniques respectives, de manière *inter-disciplinaire* au sens propre.

Soulignons que parmi ces disciplines, un rôle déterminant est tenu par l'optique, qui se trouve au coeur non seulement du projet global, mais également de plusieurs sous-projets.

-
- ¹ Le mot *système*, fortement polysémique, est considéré ici dans les sens "*Ensemble d'idées, logiquement solidaires, considérées dans leurs relations*" et "*Ensemble possédant une structure, constituant un tout organique*" (Le Robert).
 - ² Je pense notamment aux collecteurs holographiques multifacettes, à l'utilisation du robot pour d'autres applications et à l'électronique de compression de l'information et de reconnaissance en temps réel (voir sections C, D et E).

Éléments innovateurs

Le problème de la détection de fissures dans les revêtements routiers n'est pas nouveau: on s'y intéresse depuis plusieurs années et dans de nombreux pays. Malgré ces efforts, aucun système vraiment performant n'existe à ce jour. Les possibilités des techniques "classiques" ont donc déjà été explorées, mais elles se heurtent à des barrières, tantôt de vitesse, tantôt de résolution, ou encore d'approximation¹. Pour dépasser ces barrières il faut donc innover. CREHOS comporte deux éléments essentiellement innovateurs: le collecteur holographique multifacettes et le module électronique de reconnaissance des fissures en temps réel par traitement parallèle de l'information. Un troisième élément partiellement innovateur est aussi constitué par le robot pour l'enregistrement analogique d'hologrammes multifacettes, qui, sans faire appel à des notions vraiment nouvelles, reste néanmoins une machine à ma connaissance unique².

Relevons que ces trois éléments, bien qu'ayant été conçus en fonction de CREHOS, ont des potentialités d'application bien plus générales. Le système CREHOS dans son ensemble a d'ailleurs aussi des domaines d'application qui dépassent l'analyse routière³.

Soulignons également le dépôt d'un brevet sur le collecteur multifacettes, qui sera décrit plus loin.

Pour les raisons mentionnées plus haut, il n'a pas été question ici de parfaire le développement de ces éléments: je me suis volontairement limité à un stade de développement suffisant à prouver leur bien-fondé et garantissant leur fonctionnalité probatoire au sein de l'ensemble.

2.1. Contexte suisse

Collaborations, conseil

Le projet CREHOS a été partiellement financé par l' Office Fédéral des Routes (OFR).

La nature interdisciplinaire de ce projet m'a amené tout naturellement à chercher conseil, aide ou collaboration auprès de différents instituts de l'École ou d'institutions externes. Une demi-douzaine de petits projets ont notamment été confiés à des étudiants du département de Microtechnique et du département d'Electricité (informatique, micro-informatique), et de l'Ecole Technique de Buchs (SG) sous la forme de projets de semestre ou de diplôme. J'ai en outre pu bénéficier de précieuses discussions informelles avec les professeurs Clavel (DMT), Declercq (DE), Kunt (DE), Dumont (LAVOC), Fournier (Rowland Institute of Science, Boston USA). Sans oublier, bien sûr, les irremplaçables conseils du Dr. Pierre Jacquot (IMAC), ainsi que les fructueux échanges d'idées avec tous les collaborateurs de l'IMAC⁴.

-
- 1 Je me réfère essentiellement aux techniques basées sur l'imagerie, film ou vidéo, ou l'échantillonnage spatial.
 - 2 Ces trois éléments sont présentés respectivement dans les sections C, E et D.
 - 3 Ces autres applications de CREHOS, qui seront détaillées plus loin, sont par exemple l'analyse de barrages, de parois de tunnel (roche ou revêtement), d'éléments préfabriqués, de produits à fabrication linéaire, des anciens films du système GERPHO, etc.
 - 4 La liste complète des personnes qui ont collaboré à ce projet, à des degrés divers, est bien trop longue pour être citée ici in extenso. Voir le chapitre *Remerciements*.

2.2. Contexte européen

CREHOS se trouve parfaitement inséré dans le contexte européen, et de plus dans une position intéressante. En tant que responsable du projet CREHOS, j'ai eu l'honneur d'être nommé par l'Office Fédéral de l'Education et de la Science (OFES) en qualité de représentant suisse dans l'action européenne COST 325 PAV-MON.

Le but de cette action est de jeter les bases d'une politique commune en matière de nouvelles techniques d'auscultation des chaussées, et tout particulièrement les *visual distress*, où les fissures occupent une place clé (avec la *bearing capacity*). Il s'agit entre autres de définir des sortes de "standards" recommandés pour les instruments de mesure qui seront développés dans les années à venir. J'ai pu prendre une part active dans le sous-comité technique chargé de l'élaboration de cette action. Grâce à cela et au fait que CREHOS est en avance par rapport aux travaux en cours dans les autres pays européens¹, il y a des bonnes raisons de croire que c'est CREHOS qui définira les standards européens (voire les normes) en matière de fissuration. Etant la référence, CREHOS sera donc parfaitement compatible avec le développement futur du management routier européen, et donc potentiellement utilisable par tous les autres pays². De même, le format des résultats sera parfaitement adapté aux futures bases de données européennes.

La Déclaration Commune d'Intentions (DCI) a été acceptée par Bruxelles, et a été signée par la Suisse au courant de 1994. En voici quelques brefs extraits (à la rédaction desquels j'ai contribué personnellement).

◇ Extrait de la Note explicative

Objectif de l'action

Cette action a pour objet de développer la coopération internationale dans les domaines de la mesure à grande vitesse de la capacité de portance des chaussées et de l'analyse automatique des dégradations de surface des chaussées. Ces paramètres sont fondamentaux, et ne font à l'heure actuelle l'objet que d'efforts isolés. Pour ce deux domaines, la coopération à l'échelon international des équipes de recherche et de développement permettra:

- de mettre en commun des connaissances et des moyens de recherche;
- de partager les efforts à accomplir sur des sujets difficiles;
- de donner un champ d'application très vaste aux futurs produits de la recherche.

Contexte suisse

Le développement de nouveaux outils d'auscultation performants doit se faire de concert avec les autres pays européens. Cela permet d'une part de mettre en commun le savoir accumulé au cours d'années d'expériences isolées, et d'autre part d'éviter dans le futur une trop

¹ D'après les informations dont je dispose, CREHOS est également en avance par rapport aux Etats Unis et au Japon.
² Dans un cadre économique et juridique qui reste à définir.

grande diversité entre les dispositifs, les méthodes, les paramètres mesurés et le format des données.

L'EPFL a développé un prototype de dispositif de mesure aux performances très élevées et orienté vers une perspective européenne.

Soulignons également la stricte interdépendance entre cette action et l'action COST 324 "Performances de chaussées à long terme", à laquelle la Confédération vient de donner son accord.

Participation

Présidence: France; vice-présidence: Suède.

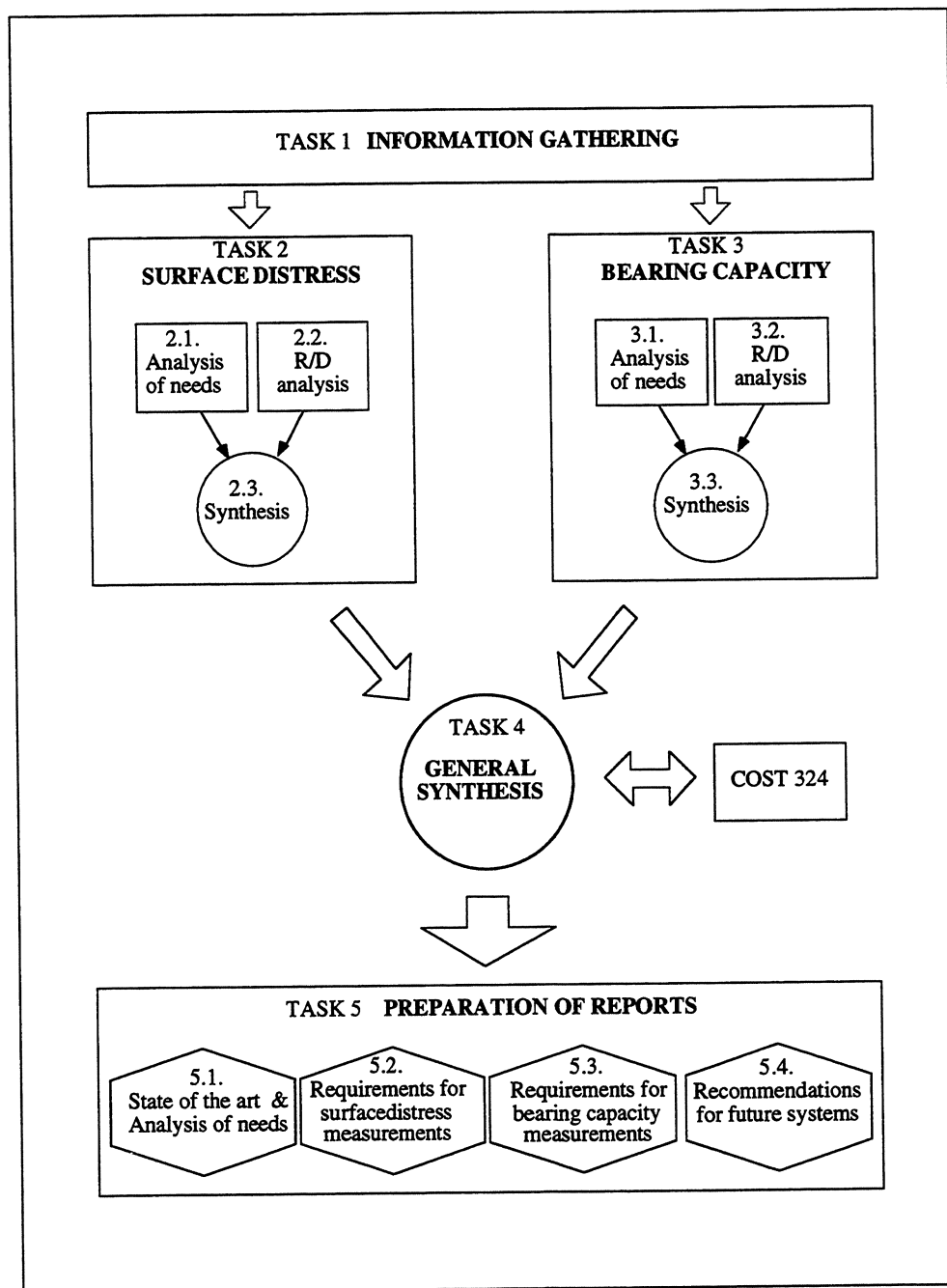
Pays ayant participé activement à la rédaction de l'annexe technique: Belgique, Danemark, Finlande, France, Pays-Bas, Royaume Uni, Suède, Suisse. Autre pays intéressés: Italie, Espagne, Allemagne, Grèce, Portugal, Hongrie, Slovaquie. La Suisse est représentée par l'EPFL (LAVOC, Prof. A.-G. Dumont, et IMAC, Max Monti), en association avec l'ETHZ et l'EMPA.

◇ Extrait de la Déclaration Commune d'Intention

L'action COST 325 a pour objectif:

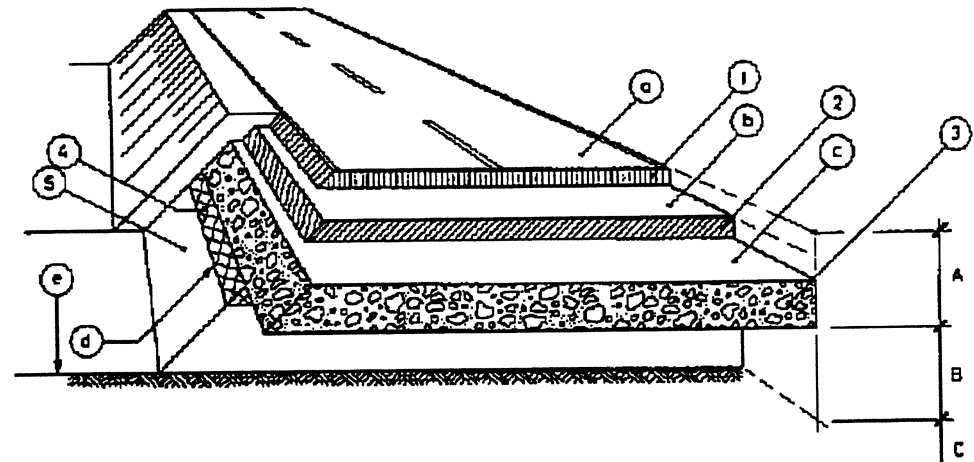
- de concevoir sous un angle plus européen les données nécessaires aux responsables de l'entretien du réseau routier; de présenter un état de l'art de la recherche menée actuellement pour créer des outils et des méthodes de mesure à grande vitesse et de dresser l'inventaire des technologies disponibles aujourd'hui pour atteindre nos objectifs;
- de définir avec réalisme ce que doivent être les nouveaux instruments et les nouvelles méthodes de mesure à grande vitesse, compatibles avec les besoins des usagers, pour qu'elles soient sûres, efficaces et économiques et transcendent les contraintes de compatibilité;
- de constituer une base solide pour de futurs projets européens de recherche et développement, associant des concepteurs et des usagers de différents pays. La conjugaison des efforts individuels devrait créer un processus de recherche et de développement plus efficace, générant, au bout du compte, des produits adaptés à l'ensemble des applications;
- d'améliorer les processus de gestion des routes au niveau de la collecte des données en vue d'optimiser l'allocation des ressources d'entretien pour préserver la valeur du réseau et d'offrir un meilleur niveau de service aux usagers.

Task Organization of COST 325



3. LES REVETEMENTS ROUTIERS

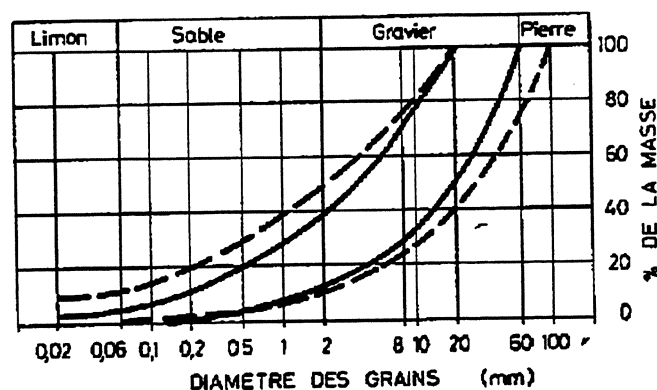
Rappelons brièvement qu'une chaussée comprend l'infrastructure et la superstructure, chacune composée de plusieurs couches, comme l'illustre la fig. 3.1. En Suisse sont utilisés essentiellement deux types de superstructures: la souple, qui comprend un revêtement hydrocarboné (béton bitumineux), et la rigide, dont le revêtement est constitué d'une dalle rigide en béton. Nous considérerons ici les superstructures souples, qui sont de loin les plus répandues.



- (A) Superstructure (B) Infrastructure (C) Terra : naturel
 (1) Couche de surface (2) couche de support
 (3) Couche de fondation (4) couche anticontaminante
 (5) Couche de forme (+ event. remblai)
 (a) Surface de roulement
 (b) forme de la couche de support
 (c) Forme de la couche de fondation
 (d) Forme (de l'infrastructure)
 (e) Forme du terrain

Fig. 3.1. Nomenclature des couches d'une chaussée (superstructure souple)¹.

La couche concernée par ce projet est la surface de roulement (revêtement hydrocarboné), formée de matériaux pierreux et d'un liant bitumineux.



Exemple typique de granulométrie¹ (courbe cumulée !).

¹ Extrait du cours "Voies de circulation II" de M. Pigois.

3.1. Les différentes dégradations

Le tableau ci-dessous énumère les dégradations répertoriées en les classant en différentes catégories. Afin de mieux situer le domaine d'action de ce projet, les dégradations détectables par CREHOS sont marquées par un ♦.

Par ailleurs, soulignons que l'IMAC a déjà développé un système optique de mesure des déformations, HECTOR. Les dégradations mesurées par HECTOR sont marquées par un ◇.

REVETEMENT BITUMINEUX

Dégradations de surface

polissage
ressuage
usure
désherbage
sablage
perte de gravillons
pelades
(◇) nids de poule

Déformations

◇ ornières
◇ bourrelets
◇ tôle ondulée
◇ déformations de poussée
◇ affaissements des bords
◇ soulèvements dus au gel
♦ fissures d'affaissement

Fissures

♦ fissures longitudinales
♦ fissures de joint
♦ fissures transversales
♦ fissures diverses
♦ faïençage
♦ fissures d'épaulement

Réparations

REVETEMENT EN BETON

Dégradations de surface

polissage
usure
désherbage
pelade
écaillages

Déformations

cavités sous dalle
pompage
◇ blow-up
◇ marches d'escalier

Fissures

♦ fissures
♦ cassures

Dégradations aux bords et joints

◇ dégradation des bords
épaufrures
♦ jointoyage absent
jointoyage friable

Réparations

Les descriptions détaillées et des photographies des ces dégradations se trouvent dans le *Catalogue des dégradations*, VSS, norme suisse SN 640 925.

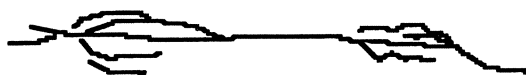
3.2. La fissuration

Caractéristiques

fissure franche



fissure ramifiée

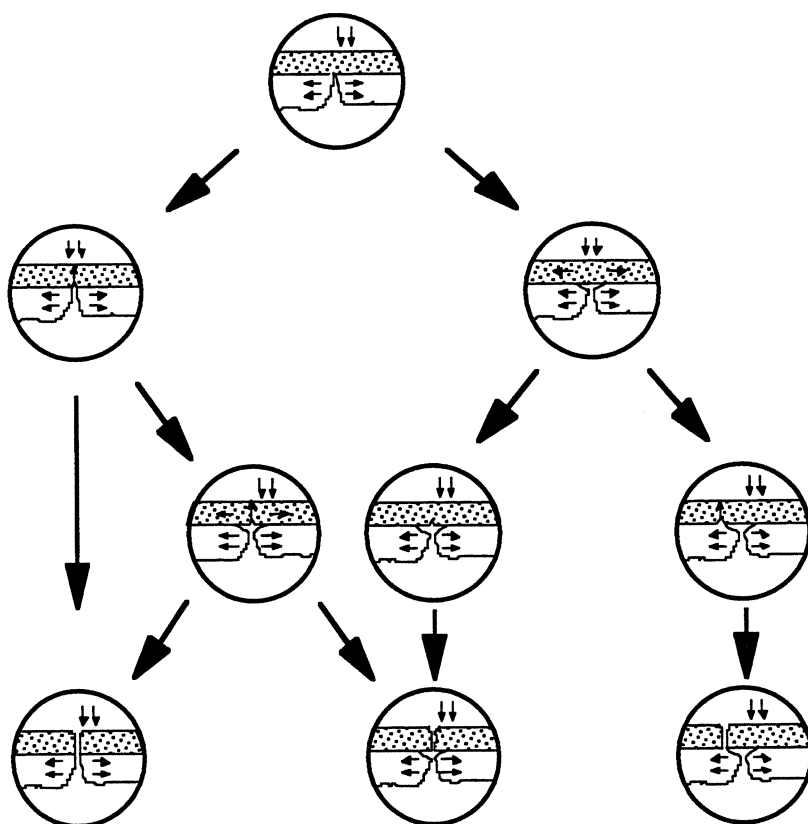


fissure faïencée



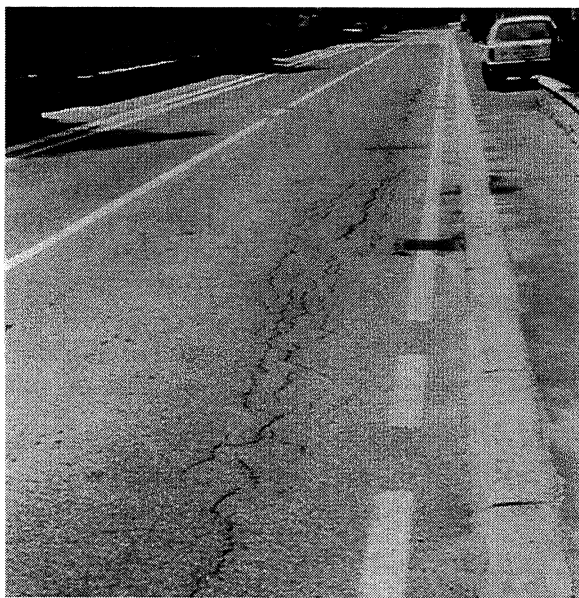
La forme des fissures est généralement relativement *rectiligne*, mais peut être tortueuse ou courbe. Elles sont le plus souvent *longitudinales* ou *transversales*, rarement obliques ou paraboliques, et peuvent être *franches*, *dédoublees*, *ramifiées* ou *faïencées*. Parmi les origines possibles des fissures, on trouve principalement la *fatigue*, le *retrait*, les *mouvements du sous-sol*, et les *défauts de construction*.

Les fissures prennent presque toujours origine dans les couches inférieures et se propagent jusqu'à la surface. Les cheminements possibles sont illustrés dans le schéma ci-dessous¹.

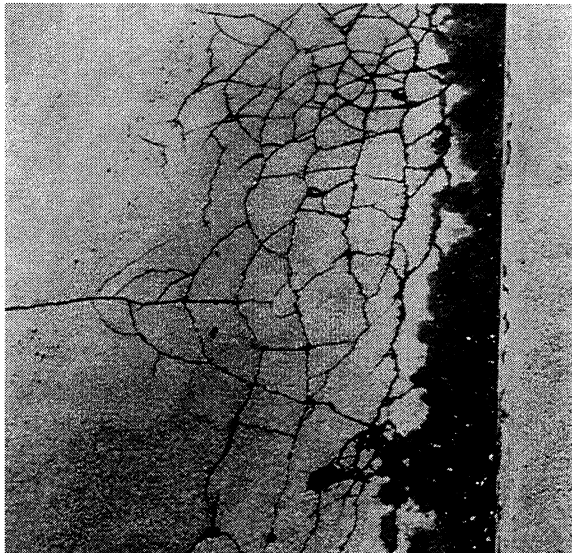
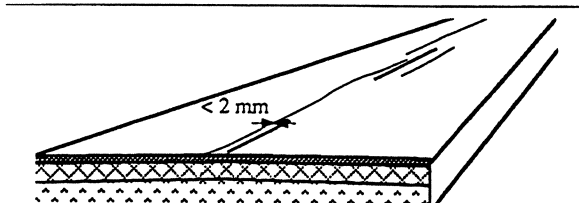


¹ D'après H. Goacolou et J.-P. Marchand. Ces modèles se réfèrent essentiellement aux revêtements utilisés en France.

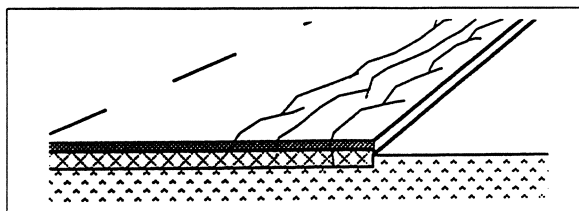
Deux exemples¹



Fissures longitudinales.



Fissures d'épaulement
(faïencées).



schwer / grave

¹ Extrait de "Catalogue des dégradations", VSS, norme suisse SN 640 925.

4. DEFINITION DU PROBLEME

4.1. Cahier des charges

Nous avons vu au §1.2. quels sont les paramètres cruciaux pour un système idéal, mais surtout comment leur *synergie* permet d'atteindre des buts globalement utiles. Nous allons maintenant définir ces caractéristiques de manière plus précise, toujours pour le cas idéal: nous obtiendrons ainsi la liste des points à optimiser dans l'étude d'un système *performant*. Ce cahier des charges servira de base à la conception de CREHOS.

Description de la fissure

Si l'on admet que la fissure est un volume d'air de forme filaire à la surface d'un revêtement, elle est décrite de manière exhaustive par les coordonnées des points délimitant ce volume.

Cependant, dans le cas pratique une description si détaillée n'est pas nécessaire. Le dispositif idéal pourrait se contenter de mesurer:

- ◇ *la forme* 2D de la fissure, approximée par un nombre fini de coordonnées ¹;
- ◇ *sa largeur* en chacune de ces coordonnées;
- ◇ *sa profondeur* en chacune de ces coordonnées;

Ce dernier paramètre, la profondeur, mérite quelques remarques. Nous avons vu au §3.2. que la fissure se propage à partir des couches inférieures vers la surface de roulement. La direction de sa propagation dépend de différents facteurs, notamment du type de matériau et des causes d'apparition. Si une fissure devient visible, elle a donc une profondeur plus importante que celle de la couche de surface. Le fait que la progression de la fissure n'est pas forcément rectiligne rend délicate la définition de la notion de profondeur. Une progression oblique de la fissure est pratiquement impossible à mesurer optiquement. Par ailleurs, même dans le cas d'une fissure verticale, la mesure optique de la profondeur serait extrêmement laborieuse. *Pour ces raisons la mesure de profondeur ne sera pas prise en compte par CREHOS.*

De ces données il sera possible d'extrapoler la longueur de la fissure, son orientation moyenne ou son volume.

Position de la fissure

- ◇ La fissure doit pouvoir être localisée *latéralement* sur la bande mesurée.
- ◇ La fissure doit pouvoir être localisée *longitudinalement* le long de la route.

¹ Le nombre de ces points d'échantillonnage peut de plus être assez limité, car l'intérêt pour la forme microscopique de la fissure est faible dans ce contexte.

- ◇ Il serait opportun d'exprimer la position de la fissure non pas en distance le long du parcours, mais en *coordonnées absolues*, c'est à dire en coordonnées de cartes d'état major ou en méridiens et parallèles. Ceci aurait l'avantage de rendre l'information *self-consistent*. Si tel n'était pas le cas, les coordonnées ne prendraient un sens que par rapport à des informations complémentaires telles que le nom de la route mesurée, la position du kilomètre zéro, les déplacements hors du trajet mesuré¹.

Sensibilité

Un système efficace doit détecter les fissures aussi précocement que possible, et doit donc être sensible essentiellement aux fissures fines, qui viennent d'apparaître. Raisonnablement, on peut viser une sensibilité de 1mm, ou un peu en dessous².

Résolution spatiale³

La résolution spatiale du système devrait être du même ordre que la taille minimale mesurable des fissures. Ceci non pas pour résoudre la position de la fissure (une telle précision serait inutile), mais pour pouvoir séparer (et compter) des fissures très proches.

Précision

Si d'une part la sensibilité et la résolution spatiale du système doivent être élevées, une grande précision n'est par contre pas toujours nécessaire. Il faut distinguer entre:

- ◇ *précision sur les coordonnées de forme* de la fissure: environ cinq fois la sensibilité (5mm), car on s'intéresse essentiellement à la forme moyenne de la fissure, et non pas à ses détails infimes.
- ◇ *précision sur la largeur* de la fissure: de l'ordre de la sensibilité (1 mm).
- ◇ *précision sur la position latérale* de la fissure: suffisante pour la situer dans les différentes parties de la chaussée (au centre, décalée, sur un bord, etc.)⁴, de l'ordre de 20 cm.
- ◇ *précision sur la position longitudinale* de la fissure: une précision de l'ordre du mètre (ou même de la dizaine de mètres) serait suffisante.

1 Ce qui alourdirait considérablement la procédure de mesure et celle d'archivage des données. Ce point sera développé dans la section E.

2 En descendant en dessous de 1mm, on risquerait de prendre pour fissures les interstices séparant les grains.

3 Ici les notions de sensibilité et de résolution spatiale sont très proches et s'expriment dans les mêmes unités (m), du fait que l'on mesure en chaque point du plan une longueur (la largeur de la fissure) qui est dans le même plan. Elles restent néanmoins deux notions distinctes, la sensibilité indiquant la largeur minimale détectable et la résolution indiquant la distance minimale à laquelle deux fissures peuvent être séparées.

4 Ceci serait utile surtout dans l'étude des causes provoquant l'apparition de fissures.

Surface analysée

De l'ordre de 4m x 200km, afin de couvrir sans arrêts la largeur complète d'une voie de circulation sur des tronçons de longueur importante.

Vitesse du véhicule

Il est indispensable que le système puisse s'intégrer au trafic en le perturbant le moins possible. Le véhicule de mesure doit donc pouvoir effectuer la mesure à une vitesse se situant autour des 60 km/h.

Haut rendement, analyse des données

Un seul système doit pouvoir ausculter un grand nombre de km durant l'année. Cela implique une analyse des données très rapide. Ce qui signifie que non seulement la mesure proprement dite doit être effectuée à haute vitesse, mais aussi que le dépouillement des données, c'est à dire l'extraction de l'information significative et sa présentation dans un format pertinent, doit pouvoir se faire rapidement. Le cas idéal est de disposer du rapport de mesure et des données prêtes pour l'archivage le jour même de la mesure, de manière à libérer les installations et le personnel. Pour accélérer au maximum ce traitement, il faut *minimiser l'intervention humaine* dans le processus.

Mémorisation des données

Au stade final de la mesure, les données doivent être mémorisées sur un support informatique (disquette, disque dur ou bande magnétique). C'est à partir de ce fichier de données informatiques que sera généré le rapport¹ (et pas l'inverse !)². Le *format* de mémorisation est également important, notamment en ce qui concerne les trois points suivants.

- ◇ *Compression de l'information.* La quantité de données doit être minimisée, afin d'éviter de mémoriser les résultats sur des fichiers énormes et ingérables. Etant donné le nombre gigantesque de mm² à analyser ($8 \cdot 10^{11}$), une mauvaise gestion des données aurait des conséquences catastrophiques.
- ◇ *Données brutes.* Malgré la compression, les données doivent rester le plus brutes, le moins interprétées possible. Ceci afin d'une part de laisser ouvertes toutes les possibilités de traitement ultérieur, et d'autre part de permettre des conversions de format (pour des exigences de compatibilité).
- ◇ *Clarté et compatibilité.* Au stade final du traitement, les données doivent se trouver mémorisées dans un format simple, clair et accessible, afin de pouvoir être interprétées sans ambiguïté. Toute personne désireuse de développer un programme utilisant ces données devrait pouvoir le faire sans avoir à étudier un épais mode d'emploi. Ce format de données pourrait être défini au niveau européen, dans la perspective des grandes banques de données.

¹ Rappelons que rapport pourra prendre des formes diverses.

² Il arrive parfois que les données soient tapées dans un fichier informatique à partir de documents de mesure divers.

4.2. Les difficultés majeures

La piètre qualité optique de la route

Comme nous le verrons plus loin, il y a des bonnes raisons de chercher une solution parmi les méthodes optiques. Cette voie soulève tout de même un problème de taille, car les revêtements routiers, du point de vue optique, ne présentent pas un bon état de surface.

Outre le fait que la route soit très foncée, la responsable de cette mauvaise qualité optique est une triple *rugosité*, qui apparaît à trois ordres de grandeur différents (voir section C, §14.1.):

- ◊ l'orniérage, les bosses et les affaissements, de l'ordre du mètre
- ◊ la structure granulaire de la texture, de l'ordre du mm
- ◊ la rugosité des grains eux-mêmes, de l'ordre du μm

Si le mètre n'est pas trop gênant, le mm se trouve dans le domaine de sensibilité: il faut donc s'attendre à des importants problèmes de bruit¹. Le μm , à son tour, pourrait engendrer du speckle gênant dans le cas de l'utilisation de lumière cohérente (ce qui sera le cas). Par ailleurs, un système qui donnerait de bons résultats sur un revêtement routier ne pourrait que mieux fonctionner sur tout autre revêtement.

Une surface à analyser immense

Rappelons que nous nous apprêtons à analyser, millimètre par millimètre, une bande de 4m de large et de 200 km de long à chaque mesure. Cela signifie 800 milliards de mm^2 . Si nous comparons cette valeur à une feuille A4 numérisée à 300 DPI, cela nous donne 40'000 feuilles par mesure.

Un traitement de l'information très puissant sera donc nécessaire, surtout si l'on tient compte du fait que sur ces milliards de points, seul une proportion infime est significative. Une grande partie du traitement devra donc pouvoir se faire en temps réel².

Un flux d'information très élevé

En poursuivant dans l'analogie, une mesure effectuée à une vitesse de 40 km/h produirait l'équivalent de 4.6 pages A4 par seconde. C'est à dire que chaque seconde 40 millions de points doivent être traités, ce qui laisse 25 ns de temps pour chacun. Il apparaît donc que tous les signaux devront pouvoir se propager très vite dans le système, à tous les niveaux.

Un environnement hostile

Sur le terrain, le système final sera confronté aux vibrations, à l'humidité, à la pluie, au froid, à la chaleur, à la poussière ou à des chocs. Cela implique une réalisation robuste et d'accès facile (nettoyages, remplacement de pièces, réglages). S'agissant ici de développer un prototype, et surtout de vérifier le bien fondé de la méthode, ces problèmes ne seront pas abordés.

¹ La solution de ce problème (l'hologramme multifacettes) constitue d'ailleurs l'un des points-clé de ce travail. La section C y est presque entièrement consacrée.

² Ce traitement est le deuxième point-clé du projet. Il est décrit dans la section E.

5. LA SOLUTION PROPOSEE: CREHOS

5.1. Points de départ

Les seules connaissances a priori dont nous disposons à propos des fissures, sont leur *apparence noire* et leur *forme filaire*. CREHOS est bâti sur de ces deux connaissances simples. Examinons la première.

Apparence noire signifie absorption de lumière: les méthodes optiques semblent donc naturellement adaptées au problème. Une autre raison de s'orienter vers les ondes électromagnétiques est leur vitesse de propagation, car, pour les vitesses de mesure visées, les ondes sonores pourraient s'avérer trop lentes.

Du point de vue optique, la fissure est une brusque diminution de la réflectivité d'une surface. Pour mesurer une distribution spatiale de réflectivité il n'y a que deux possibilités de base, la spatiale ou la temporelle, c'est à dire, respectivement:

- ◇ distribuer l'éclairage sur toute la zone de mesure et relever la réflectivité point par point;
- ou
- ◇ éclairer la zone de mesure point par point et relever la réflectivité en intégrant sur l'espace.

La solution spatiale conduit aux techniques d'imagerie, la temporelle aux techniques de balayage. Les *techniques vidéo* cumulent les deux principes: l'information est d'abord acquise spatialement, sous éclairage distribué, et ensuite convertie point par point, par un balayage électronique, en signal temporel. L'utilisation d'un système vidéo fournirait donc à sa sortie le *même type de signal* qu'un système de balayage, mais avec des inconvénients de taille: limitation de vitesse, limitation de résolution, limitation de sensibilité, et, de manière générale, un accès difficile aux paramètres critiques¹.

D'ailleurs, le fait d'effectuer la mesure *en mouvement* fait que le problème est de toute façon *temporel*: tout traitement spatial de l'information ne ferait que le compliquer.

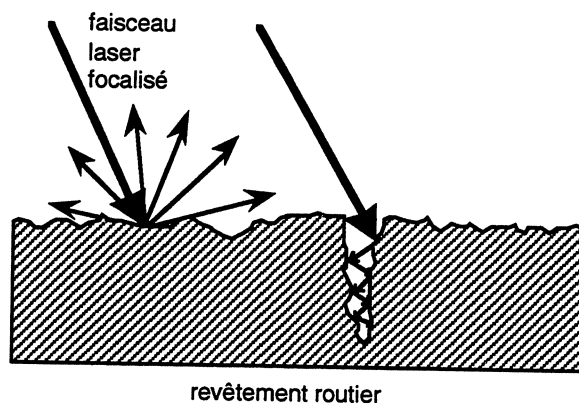
Pour ces raisons, la *solution propre* paraît être celle du système de *balayage*.

Quant à la deuxième connaissance a priori, la *forme filaire* des fissures, c'est ce qui permet de reconnaître une fissure comme telle. Cette propriété est le critère de corrélation de l'information locale. Cet aspect sera examiné plus loin.

¹ Pour répondre à nos spécifications, il faudrait l'équivalent d'un capteur CCD linéaire intensifié à 4000 pixels travaillant à 12 kHz.

5.2. Principe de la méthode

Conformément aux considérations du paragraphe précédent, CREHOS est basé sur un système de balayage. Il repose sur le principe suivant:



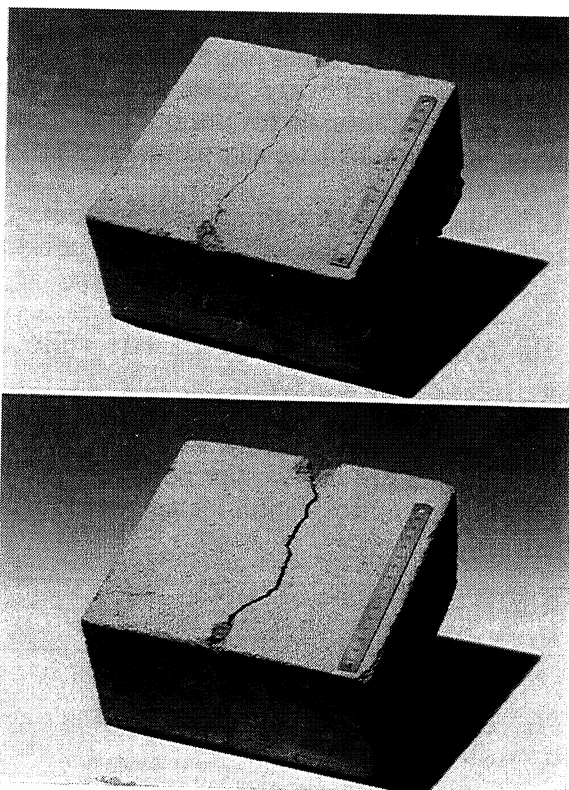
La lumière est rétrodiffusée par les portions saines de revêtement. Elle est absorbée par les fissures.

L'information devient donc temporelle et est contenue dans l'intensité du flux de photons rétrodiffusés par le revêtement.

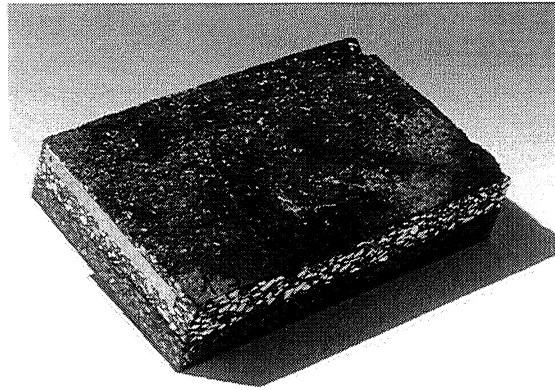
5.3. Essais préliminaires

Le bien fondé du principe décrit ci-dessus a été mis en évidence de la manière suivante.

Echantillons testés



Eprouvettes de laboratoire (non usées) en béton clair, fissures de 0.2 mm, 1.0 mm, 3 mm.

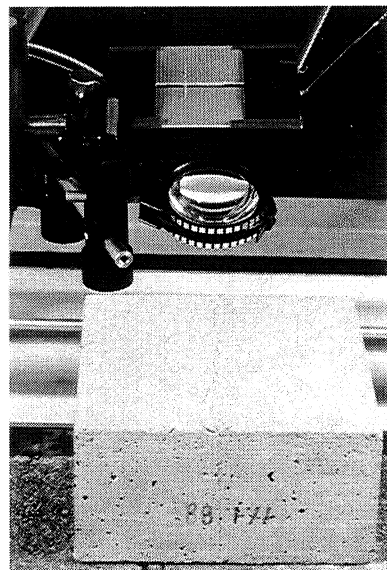


"Carotte" de revêtement bitumineux réel (usé et sale), différentes fissures de 1mm à 3 mm.

Cette éprouvette réunit un bon nombre de conditions défavorables: elle est très sombre, et comporte des salissures importantes, elle n'est pas plane et les fissures ne sont pas très franches.

Dispositif de test

L'échantillon est balayé en x sur une longueur de 10 cm avec un faisceau laser focalisé. Il peut être déplacé manuellement dans la direction y. La lumière réfléchie est détectée par deux photodiodes ou par un photomultiplicateur, directement ou par le biais d'une lentille.

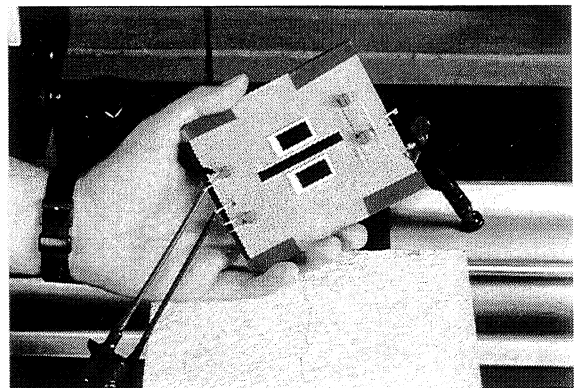


Laser: He-Ne 30mW

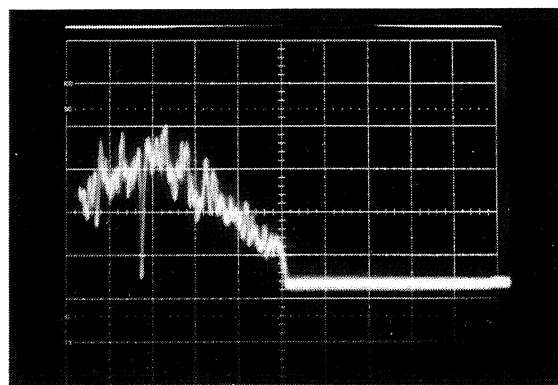
Diamètre de la tache focale: 0.1 à 3 mm

Angle d'incidence: normal au revêtement

Fréquence de balayage: de 10 Hz à 1kHz



Résultats



La photo ci-contre montre l'intensité détectée par les photodiodes (somme) sur un balayage comportant une fissure de 1mm. L'échantillon est la carotte de route réelle.

Malgré un bruit important, la propriété d'absorption de lumière par les fissures est bien mise en évidence (pic négatif).

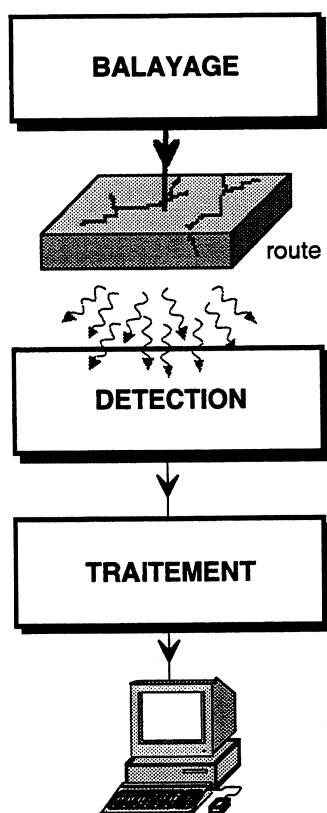
Pour une largeur de balayage si réduite (10 cm), un élément collecteur (lentille) n'amène pas de gain notable.

Il apparaît par contre clairement que ce montage simple ne saurait être suffisant pour un balayage de largeur plus importante, comme l'illustre la trace d'oscilloscope à la page précédente (balayage de 20 cm). L'intensité diminue fortement dès que la tache focale s'éloigne du centre du balayage, réduisant nettement le rapport signal/bruit sur les bords.

5.4. CREHOS en bref

L'existence du mesurable étant prouvée, considérons maintenant le problème de son exploitation effective dans les spécifications requises, en commençant par une présentation de synthèse du concept CREHOS. Nous en verrons les détails dans les sections respectives.

Le système de mesure CREHOS est constitué de trois organes principaux: le *dispositif de balayage*, l'*unité de détection* et le *système de traitement*.



Le balayage

La route est balayée transversalement (direction x) par un faisceau laser focalisé. La composante longitudinale "y" est fournie par le véhicule. Le balayage, à 12 kHz, est réalisé par un miroir polygonal tournant. La tache focale, d'un diamètre de 500 μm , se déplace latéralement à une vitesse virtuelle supérieure à 172'000 km/h.

La détection

La lumière rétrodiffusée par le revêtement est collectée par le biais d'un collecteur holographique multifacettes de 2 fois 15cm x 4m (de part et d'autre de la ligne de balayage). Cet élément assez particulier réalise une fonction optique complexe, qui réduit le bruit dû à la rugosité du revêtement et augmente la probabilité de détection des fissures¹. La variation dans le temps de l'intensité de la lumière récoltée est convertie en un signal électrique par deux photomultiplicateurs (de part et d'autre). Le signal est ensuite mis sous une forme binaire qui prend la valeur *vrai* lors des minima d'intensité.

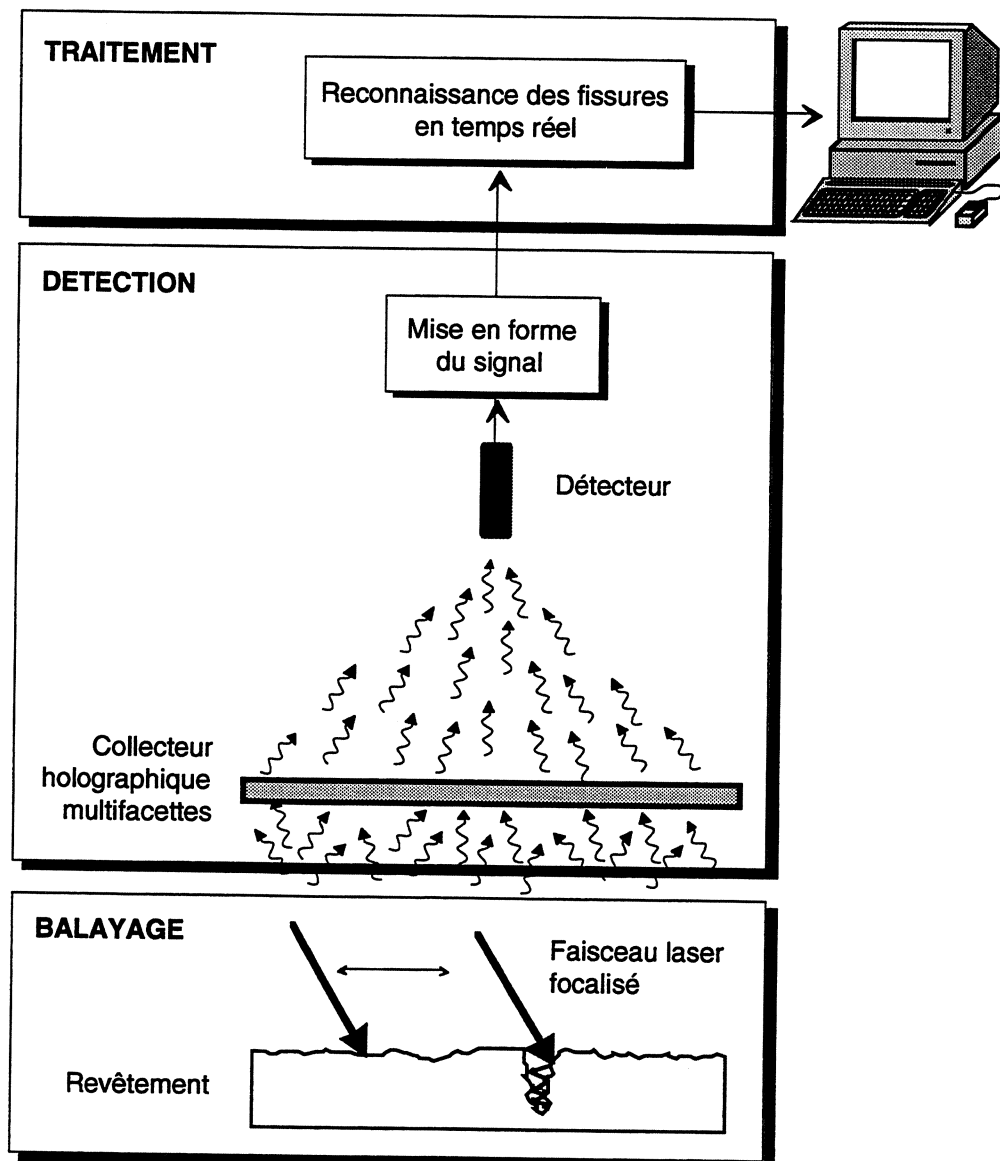
Le traitement

Le signal sortant de la détection se présente comme une série de valeurs binaires, débités à une cadence de 48 Mbit/s pendant 8 heures, pour un total de 160 Gbytes. Dans ces conditions, il est exclu de mémoriser le signal pour le traiter *a posteriori*, d'autant plus que la partie significative de ce signal est très faible. Le traitement se fait donc en temps réel, par le biais d'un système électronique de traitement composé quelques dizaines de modules de calcul

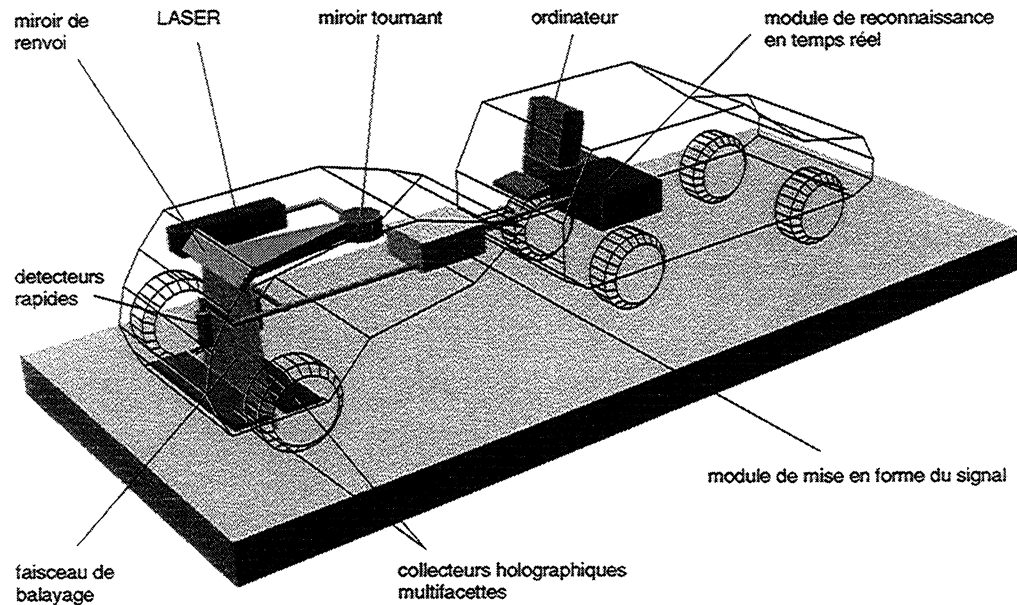
¹ La réalisation de ce collecteur holographique multifacettes a nécessité la construction d'un robot *ad hoc*.

travaillant en parallèle. Ce système reconnaît les fissures et en mémorise les coordonnées significatives (vectorisation) sur un disque dur amovible (Sy-Quest 40, 80 ou 105 Mb). Cet organe comprend également un dispositif de positionnement absolu par satellite (GPS), couplé à un système de positionnement relatif (roue).

Le schéma ci-dessous, qui se lit de bas en haut, illustre plus en détail la fonction des trois organes.



Le système final sera installé sur une remorque, qui pourra ainsi venir compléter un véhicule multifonctions.



5.5. Les performances visées

Paramètres mesurés	• position de la fissure (x et z) • longueur de la fissure • largeur de la fissure (en 8 catégories) • forme de la fissure (vectorisée)
Sensibilité	• réglable de 0.5 à 20 mm de largeur
Résolution spatiale	• de 1 à 2 mm dans le sens de marche • balayage latéral continu
Surface analysée	• 4 m x 200 km
Vitesse du véhicule	• 40 km/h avec une résolution longitudinale de 1 mm • 80 km/h avec une résolution longitudinale de 2 mm
Analyse des données	• reconnaissance de la fissure en temps réel • compression de l'information en temps réel
Mémorisation des données	• PC, hard disk (80Mbytes)
Rapport de mesure	• disponible immédiatement après la mesure • représentation des données "à la carte"
Rendement global	• potentiellement 150'000 km/an (8 heures de mesure les jours ouvrables)

6. L'EPINE DORSALE DU PROJET: L'INFORMATION

Une notion très importante tout au long de ce travail est celle d'*information*. C'est de l'information que l'on veut extraire de la route et c'est bien cette information, transformée, qui constitue le résultat final. Considérons CREHOS dans la perspective de la *machine à transformer l'information*.

Pour la clarté de l'exposé, il est opportun de définir quatre termes qui désignent des notions que nous utiliserons souvent: *sème*, *information*, *valeur symbolique et fidélité*. Ces définitions n'ont ici qu'un but pratique et une ambition locale.

6.1. Glossaire

♦ Sème

"Unité constituant un acte de communication minimal (un signe, un signal peut être formé d'un ou plusieurs sèmes)" (Le Robert).

Terme emprunté à la sémiotique, il est utilisé ici dans un sens légèrement détourné, de *"unité minimale d'information pourvue d'une signification appartenant à un contexte défini"*.

Autrement dit, et peut-être de manière simpliste, l'unité minimale d'information peut être considérée le bit: dans un problème pratique, une partie des bits sont significatifs, mais pas tous les bits significatifs sont forcément utiles ou nécessaires pour décrire un contexte spécifique. J'entends par *sèmes* ces bits significatifs utiles, nécessaires et suffisants.

Plus concrètement, dans notre cas nous devons effectuer une mesure binaire: décider de l'appartenance ou non d'un point du revêtement à une fissure (le contexte défini), sur la base de son taux d'absorption de la lumière. A chaque point correspond donc une unité d'information indiquant si le point est absorbant ou ne l'est pas. Parmi ces unités d'information, seuls sont significatives celles indiquant une absorption, mais pas tous les points absorbants sont des fissures. Sont donc des sèmes les points du revêtement appartenant à des fissures, et n'en sont pas les points de revêtement sain ni les points absorbants appartenant à des dégradations autre que les fissures.

♦ Information

"Élément ou système pouvant être transmis par un signal ou une combinaison de signaux appartenant à une structure commune" (Le Robert).

Ce terme sera utilisé ici, en limitant le contexte à la fissure, dans un sens plus restreint de *"l'ensemble des sèmes"*. L'information de départ, l'ensemble des fissures physiques d'un tronçon donné, contient une infinité de sèmes.

♦ **Fidélité de l'information**

"*Conformité à la vérité*". (Le Robert)

J'entends ici par *fidélité* de l'information transformée, une notion empirique décrivant la proximité en quantité de sèmes entre une information transformée et l'information source.

Typiquement, une information sous-échantillonnée est d'une fidélité inférieure à une information continue, car des sèmes sont perdus.

♦ **Valeur symbolique de l'information**

J'entends ici par *valeur symbolique de l'information*, une notion empirique décrivant la proximité entre la forme de codage de l'information et la représentation symbolique que *l'homme* utilise pour s'en servir dans un but défini.

Autrement dit, plus la valeur symbolique est élevée, plus l'information se rapproche des représentations humaines (dans le cadre d'une utilisation donnée)¹.

Plus pratiquement, l'état de fissuration d'un tronçon exprimé en termes de kg de bitume nécessaires à la réparation, ou en une échelle de gravité de dégradation par mètre, a plus de *valeur* aux yeux d'un responsable de l'entretien que s'il était exprimé sous la forme d'un signal électrique dans le temps.

Remarques

- ◊ Plus la *valeur symbolique* de l'information augmente, plus elle devient tributaire de l'utilisation à laquelle elle est destinée. Par exemple, une fissuration codée en kg de bitume aura une *valeur* élevée pour un responsable de l'entretien, mais elle aura une *valeur* très faible pour l'ingénieur chargé de l'étude des causes d'apparition des fissures, et inversement.
- ◊ Pour que l'information augmente sa *valeur symbolique*, il est nécessaire d'inclure dans le système des informations supplémentaires, souvent sous la forme de connaissances a priori.

Par exemple, dans CREHOS le signal électrique qui *représente* l'intensité réfléchie par la route est transformé en signal binaire indiquant l'appartenance probable de tel point à une fissure. La valeur symbolique de cette dernière information est plus élevée (car elle représente la réponse à une question), mais pour l'obtenir on a dû faire usage de la connaissance "une fissure absorbe la lumière".

¹ Cette notion est étalonnée sur l'homme, car en dernier lieu c'est l'homme qui interprète le *sens* de l'information. Par ailleurs, définir une notion générale de valeur de l'information par rapport à un ordinateur ou à un programme serait délicat, en raison de la souplesse de codage qui les caractérisent et de l'absence de notion de *sens* dans les machines.

- ◇ La *fidélité* de l'information est souvent affectée par les transformations de valeur symbolique de manière *irréversible*. Par exemple, l'information décrivant un état de fissuration exprimée en coûts de réparation, bien que de valeur plus élevée, est de fidélité inférieure à une fissuration exprimée en coordonnées des fissures. Cette dernière information contient en effet plus de sèmes.
- ◇ Une information de fidélité élevée permet une augmentation de valeur symbolique, et une information de faible fidélité limite les possibilités de transformation de valeur symbolique.
- ◇ Si l'on considère l'information source comme faisant partie du système de mesure, il n'est pas nécessaire d'introduire la notion d'*extraction* de l'information. L'information source est présente dans le système, mais avec une valeur très faible, telle que l'utilisateur n'est pas en mesure de s'en servir.

Considérés dans cette perspective, les buts de CREHOS peuvent être redéfinis comme suit:

- ◆ L'information source étant l'état de fissuration d'un tronçon routier, CREHOS a pour but d'en *maximiser la valeur symbolique tout en lui conservant une fidélité élevée* (donc un nombre élevé de sèmes). La fidélité de l'information finale doit être suffisante à permettre plusieurs types de valorisations symboliques ultérieures (ces dernières pouvant entraîner des pertes de fidélité).

Autrement dit, CREHOS doit *identifier le noyau minimal de sèmes* permettant un grand nombre de représentations différentes, et les coder sous une forme ayant une valeur symbolique élevée, et donc facilement utilisables. Concrètement, l'information de sortie sera codée sous la forme de fichier informatique contenant les coordonnées absolues des fissures vectorisées.

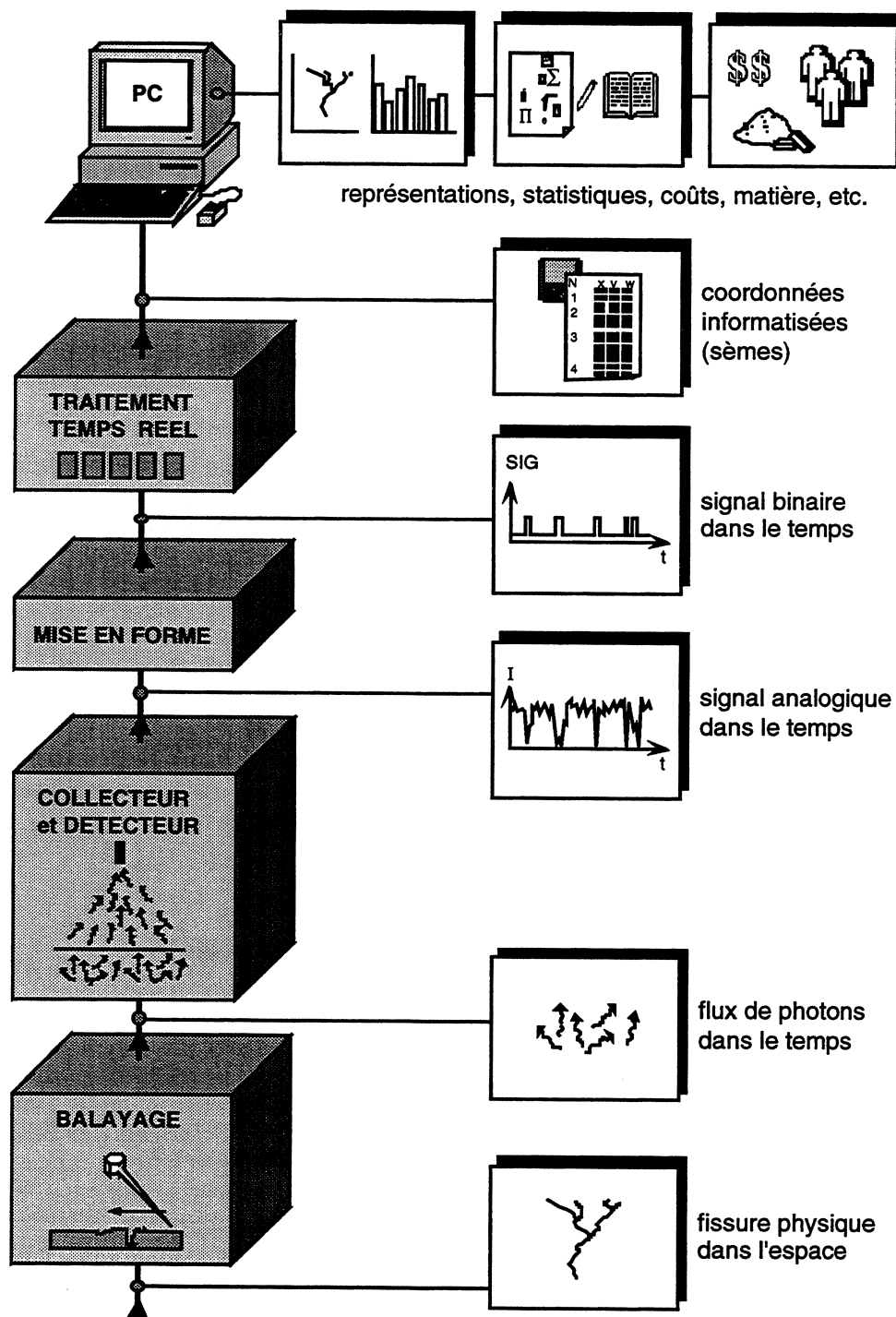
A titre de comparaison, l'inspection visuelle fournit une information de valeur symbolique élevée (mais pour un seul type d'utilisation) mais une fidélité très faible; GERPHO visuel, au contraire, fournit une grande fidélité mais une très faible valeur, et le système Laser-RST une faible valeur et une faible fidélité. Seul GERPHO avec analyse automatique est susceptible d'associer fidélité et valeur symbolique élevées.

6.2. L'évolution de l'information dans CREHOS

Dans les chapitres précédents, nous avons insisté sur la cohérence du système dans son ensemble. Or, le concept autour duquel cette cohérence doit se construire est justement l'*information* et son évolution. Dans le problème de la fissuration, l'information de départ (les fissures physiques) a une faible valeur symbolique: elle est codée sous la forme de discontinuités distribuées inhomogènement sur une surface immense. Elle est de ce fait (dans son ensemble) peu utilisable pour l'homme. CREHOS va par étapes successives *transformer* cette information, pour aboutir à une information de *valeur symbolique élevée*, et donc utilisable efficacement par l'homme pour atteindre des buts d'ordre divers. Des exemples d'information de valeur élevée sont les fichiers informatiques complets et compatibles au niveau

européen, les courbes statistiques par tronçon, les dessins reproduisant les fissures, les kg de bitume nécessaires à la réparation, le coût de la réparation par tronçon, la corrélation entre apparition d'un type de fissure avec d'autres facteurs (matériaux, climat, charge), etc. Comme nous venons de voir, cette augmentation de valeur symbolique doit se faire jusqu'à un niveau donné, permettant de *limiter au maximum la dégradation de la fidélité de l'information*. Ceci afin de laisser ouvertes toutes les voies pour des augmentations de valeur ultérieures.

Au sein de CREHOS la valeur symbolique de l'information évolue de la manière illustrée ci-dessous (le dessin se lit de bas en haut).



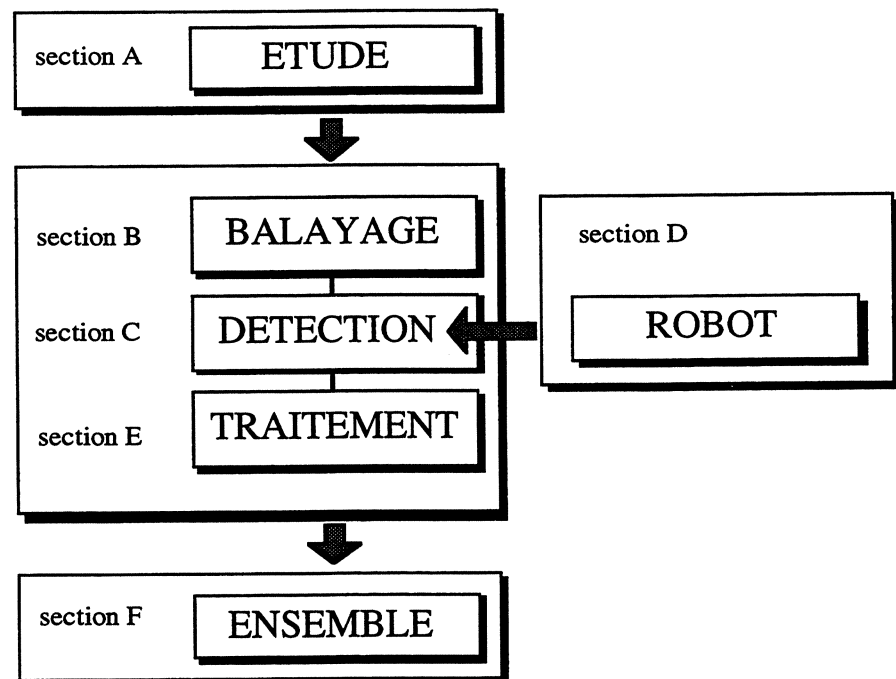
7. STRUCTURE DU PROJET ET ORGANISATION DE LA THESE

Nous avons vu que le dispositif CREHOS comporte trois organes principaux (balayage, détection, traitement). Le développement de chacun de ces organes constitue un volet du projet, qui en comporte six au total.

Le premier volet est l'étude et la conception du système, qui fait l'objet de la présente section. Suivent les trois volets correspondant aux trois organes, et un cinquième volet qui a pour objet la synergie l'ensemble, sa cohérence, sa synchronisation son montage en prototype, ainsi que les principaux résultats.

Le dispositif de détection comporte un hologramme multifacettes: pour le réaliser il a été nécessaire de construire une machine dédiée, appelée ici *le robot*. La conception et la réalisation du robot font l'objet du sixième volet.

Bien qu'ils soient interdépendants et qu'ils aient été souvent développés en parallèle, ces six volets sont présentés séparément dans les six sections de la thèse. Chaque section peut être considérée comme un projet à part entière.



A ces sections s'en ajoute une dernière, consacrée aux conclusions générales. Résumons très brièvement les sujets traités dans chaque section.

Section A. Étude et conception

Il s'agit de la section présente: elle traite avec recul des aspects globaux, de génie civil, de politique de maintenance routière, de la conception et de l'organisation du projet.

Section B. Le dispositif de balayage

Section brève car n'apportant pas d'éléments originaux, elle est consacrée au dimensionnement et au choix du dispositif de balayage le mieux adapté.

Section C. Le dispositif de détection par hologramme multifacettes

Une des sections clé du projet, elle présente le collecteur holographique multifacettes, de l'idée de base aux algorithmes de disposition des facettes. Cette section traite donc essentiellement d'optique et de méthodes de pavage (heuristiques).

Section D. Le robot pour l'enregistrement d'hologrammes multifacettes

Y sont décrites les parties mécanique, optique, électronique et informatique du robot nécessaire à la réalisation des hologrammes multifacettes, ainsi que quelques exemples d'application autres que le collecteur pour CREHOS.

Section E. Le système de traitement

Deuxième section clé du projet, elle décrit le système électronique parallèle permettant la reconnaissance en temps réel de fissures et l'extraction des données significatives.

Section F. Le système dans son ensemble

Cette section est consacrée à la réalisation du prototype, à l'assemblage des différents organes, à leur synchronisation et à leur synergie, ainsi qu'à la présentation des résultats.

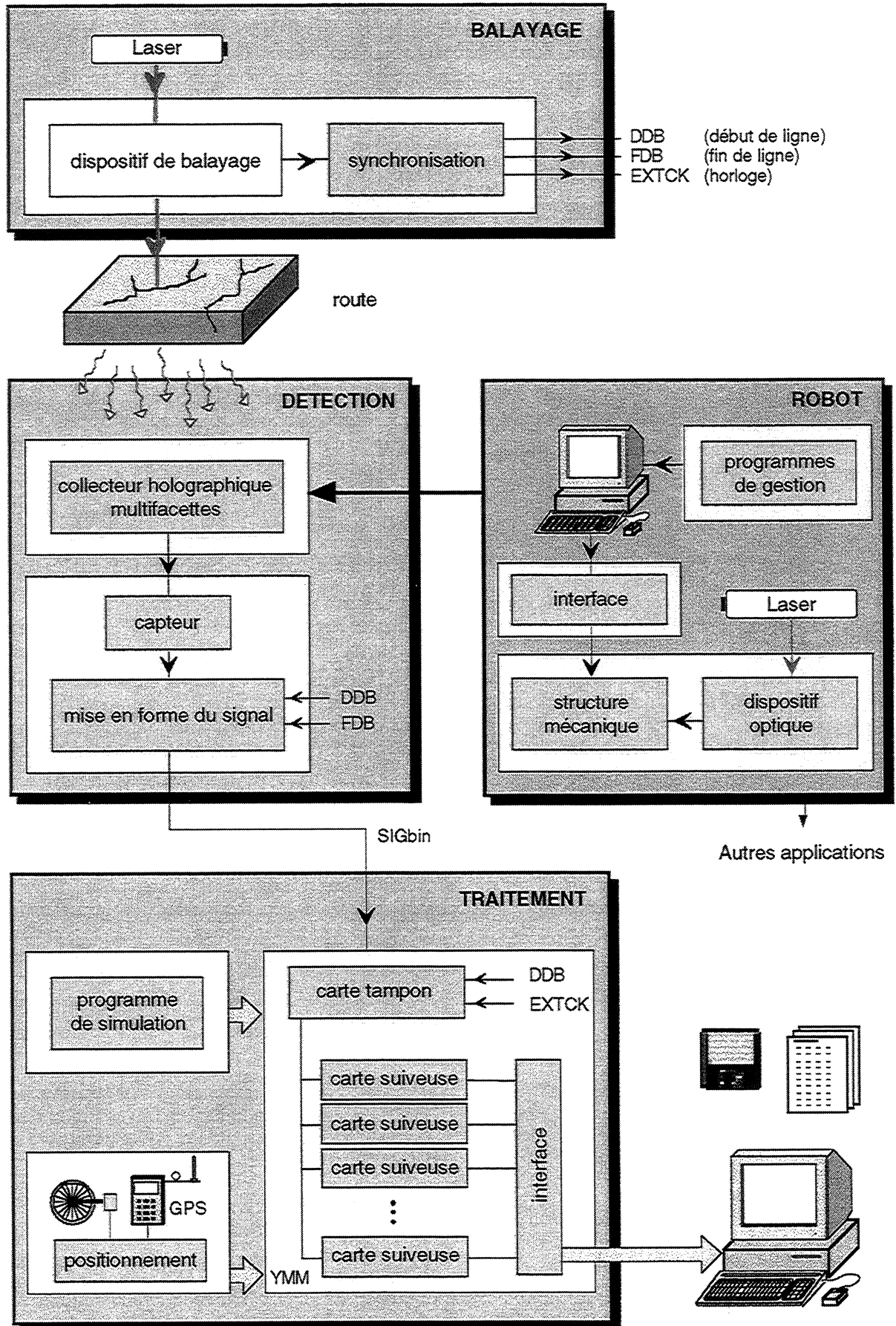
Section G. Conclusions générales

Outre les conclusions, nous trouverons ici un récapitulatif des principales spécifications du prototype et une synthèse des résultats plus pertinents. Sont également indiqués les travaux nécessaires à la poursuite de ce travail pour aboutir au système définitif.

7.1. Schéma-bloc du projet complet

Le schéma à la page suivante donne une vision complète de l'organisation des nombreux sous-projets qui composent ce travail.

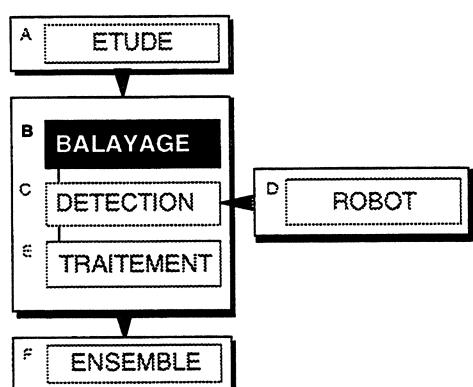
Dans le schéma sont indiqués en vert les dispositifs réalisés à l'IMAC, (par des étudiants, par les collaborateurs techniques ou par moi-même); sont indiqués en blanc les dispositifs achetés à l'extérieur.



Section B

LE BALAYAGE

par miroir polygonal tournant



Cette section présente le dispositif permettant d'illuminer la route avec un point lumineux focalisé se déplaçant latéralement à une vitesse apparente de 172'000 km/h, à raison de 12'000 balayages/s.

Nous y aborderons essentiellement les questions de dimensionnement et le choix du dispositif le mieux adapté.

Cette étape du projet sera traitée brièvement, car elle ne comporte pas d'innovations significatives.

8.	Rôle du dispositif de balayage	45
8.1.	L'information	45
9.	Dimensionnement et limitations	47
9.1.	Prototype de 60 cm de largeur	53
10.	Choix de la méthode	55
10.1.	Les méthodes écartées	55
10.2.	La solution retenue: le miroir polygonal tournant	55
11.	Signaux de synchronisation	57
12.	Conclusions	59
12.1.	Montage	59
12.2.	Résultats	59

Section B. LE BALAYAGE

8. ROLE DU DISPOSITIF DE BALAYAGE

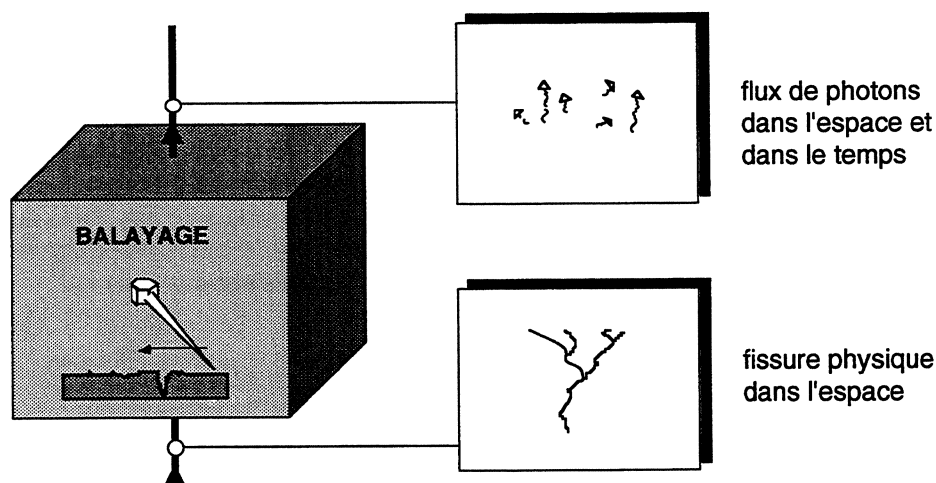
Le rôle du dispositif de balayage est de balayer transversalement (axe x) la route au moyen d'un faisceau laser focalisé, sur une largeur de 4m. La composante longitudinale (axe y) est fournie par le mouvement du véhicule, qui doit se déplacer à une vitesse de l'ordre de 40 km/h.

Il doit être dimensionné de manière à illuminer successivement chaque mm^2 du revêtement¹. La lumière sera réfléchiée par les points sains et absorbée par les points appartenant aux fissures (voir section C).

Le dispositif de balayage doit également générer trois signaux de synchronisation, qui seront exploités au niveau de la détection et du traitement.

8.1. L'information

Ce dispositif effectue la première transformation de codage de l'information: de la fissure physique (distribution spatiale de réflectivité) à un flux de photons (flux de photons dans l'espace et dans le temps).



Bien que cette transformation de codage n'augmente pas la *valeur* symbolique de l'information, remarquons que le seul fait de balayer la surface introduit un *premier traitement* de l'information source (avec altération du nombre de sèmes²):

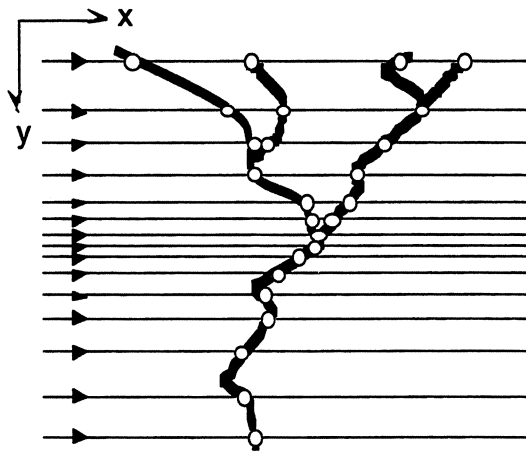
- ◊ Le balayage opère un premier *échantillonnage spatial* de l'information dans la direction y. L'information reste par contre continue dans la direction x (³).

¹ Comme nous le verrons dans la section E, nous pouvons tolérer une résolution longitudinale de 2mm, ce qui porte la vitesse de mesure à 80 km/h.

² Pour la définition de la notion de *sème*, voir §6.1.

³ Ce qui ne serait pas le cas avec des techniques vidéo, où pour obtenir un signal de sortie de même type, on aurait déjà introduit un double échantillonnage en x et en y.

La fréquence spatiale d'échantillonnage longitudinal dépend de la fréquence de balayage et de la vitesse du véhicule, elle peut donc varier au cours de la mesure (voir figure ci-dessous).



Ceci peut être corrigé soit en adaptant la fréquence de balayage à la vitesse de roulement de manière à garantir un échantillonnage spatial "y" constant, soit en intégrant les variations dans l'algorithme de traitement.

Nous verrons dans la section E que la deuxième possibilité est la plus simple. Ce problème n'est pas critique, en raison de la forme filaire de fissures.

Le rapport entre cette fréquence d'échantillonnage et la fréquence spatiale selon l'axe "y" des fissures dépend de l'orientation de ces dernières. Pour les fissures longitudinales (qui sont les plus nombreuses), la fréquence d'échantillonnage est bien supérieure. Par contre, les fissures presque parallèles à l'axe x de balayage peuvent être sous-échantillonnées. Elles feront donc l'objet d'un traitement séparé, basé sur la largeur apparente de la fissure, qui devient dans ce cas très grande (voir section E)¹.

- ◇ Même dans le cas des fissures longitudinales, ce premier échantillonnage introduit une perte de sèmes, mais nous verrons dans la section E que la plupart des sèmes perdus peuvent être recréés par extrapolations des sèmes présents, sans pertes de *fidélité* significative.
- ◇ Le codage de l'information semi-échantillonnée passe de *spatial* à *temporel*, devenant donc monodimensionnel et plus simple à manipuler.

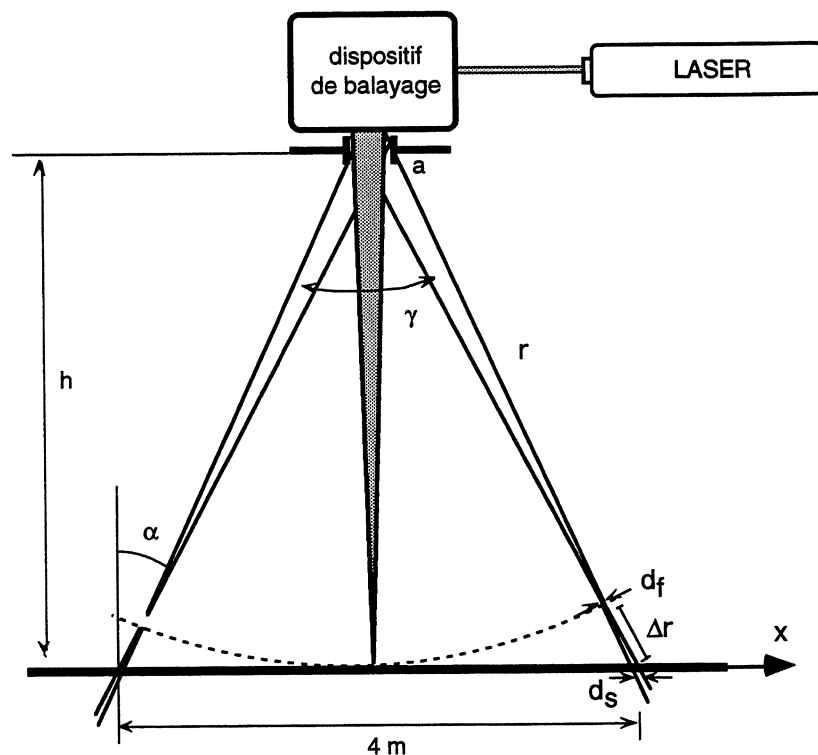
¹ Pour s'affranchir complètement de ce problème, un double balayage, selon deux orientations différentes, serait nécessaire. Cette option a été écartée car elle compliquerait considérablement les autres étages du système.

9. DIMENSIONNEMENT ET LIMITATIONS

Ce chapitre s'appuie sur des considérations théoriques et géométriques amplement décrites dans la littérature. Nous n'aborderons donc ici que les principes et les résultats d'utilité pratique.

Considérons

une ligne de balayage de 4 m de largeur;
un véhicule roulant à 12 m/s (43.2 km/h);
une résolution spatiale de 1 mm dans les deux directions x, y .



Soient¹

a	le diamètre de la pupille
h	la distance plan de la pupille-revêtement
r	la distance pupille-point focal
$r + \Delta r(x)$	la distance pupille-point d'impact du faisceau
γ	l'angle d'ouverture du balayage
$\alpha(x)$	l'angle d'incidence maximal
d_f	le diamètre du point focal dans le plan focal
$d_s(x)$	le diamètre du point lumineux au niveau du sol

¹ Ces noms de variables ne concernent que cette section (ils seront réaffectés à d'autres variables locales dans d'autres sections).

Laser

A ce jour, le laser le mieux adapté à cette application est de type YAG Solid State Laser. Il réunit les avantages suivants: bonne qualité de l'émission, faible encombrement et installation facile sur un système mobile (pas de refroidissement encombrant), consommation électrique raisonnable et puissance optique suffisante (de l'ordre de 100 mW). Son seul inconvénient est le prix, de l'ordre de 70 kFr. Dans le cadre de la réalisation d'un premier prototype et dans le souci de contenir les coûts, nous avons utilisé un laser Argon ILT refroidi à l'air de 40 mW, déjà disponible à l'IMAC. Ce laser donne satisfaction pour les essais de laboratoire, mais n'est pas adapté pour le système définitif.

La route étant grise (voire noire), la longueur d'onde de travail a été choisie en fonction du rendement du laser. La raie d'émission choisie est l'une des vertes:

$$\lambda = 514 \text{ nm}$$

Angle d'incidence

L'angle d'incidence du faisceau d'éclairage par rapport à la normale au sol vaut

$$\alpha(x) = \arctan\left(\frac{x}{h}\right)$$

Les conditions idéales seraient représentées par un éclairage normal, constant pour tous les points. En l'absence d'optique de correction (voir 10.2), h doit donc être suffisamment grande pour approcher ces conditions.

Diamètre du point focal

Nous savons que $r \gg a$ (d'un ordre 100 à 1000). Une valeur raisonnable pour le diamètre de pupille a est de l'ordre de 5 mm. Dans ces conditions géométriques, deux approches permettent d'estimer le diamètre du point focal d_f (dans le plan focal): l'une privilégiant la diffraction par la pupille, et l'autre privilégiant la nature gaussienne du faisceau.

◇ d_f limité par la diffraction par la pupille

En supposant la pupille circulaire et uniformément éclairée, nous savons que la diffraction limite le *diamètre* du point focal à

$$d_f = 2.44 \frac{\lambda r}{a} \quad [9.1.]$$

ce qui correspond à la distance entre les premiers zéros de la fonction d'Airy. A l'intérieur de ce diamètre se trouve 84% de l'énergie de l'onde.

Pour $r = 4 \text{ m}$ et $a = 5 \text{ mm}$, nous trouvons

$$d_f \cong 1 \text{ mm}$$

◇ d_f déterminé par la nature gaussienne du faisceau

Un faisceau gaussien se focalisant à une distance r peut être décrit le long de sa direction de propagation z par son *rayon* $w(z)$ (1/e de l'amplitude maximale). Nous savons que

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{r - z}{z_m} \right)^2} \quad [9.2.]$$

avec

$$z_m = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

où

w_0

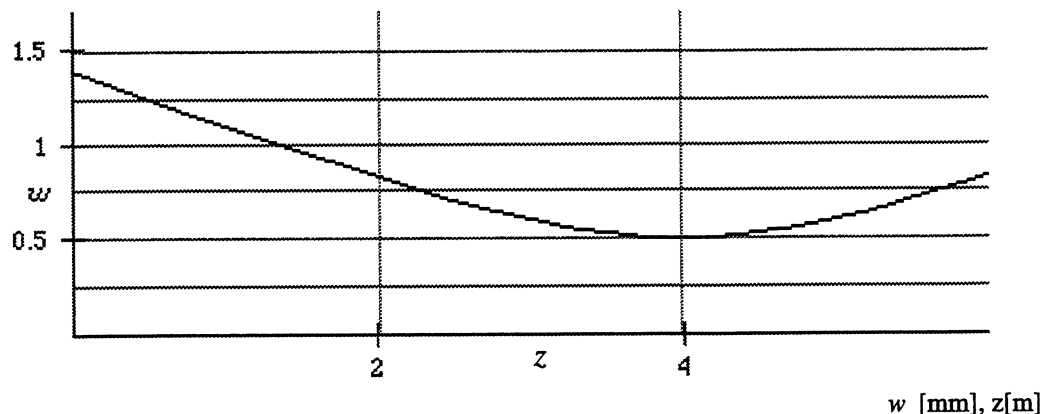
le "rayon" du point focal en $x=r$
(beam waist)

Le *rayon* w_0 indique en effet la distance à laquelle l'amplitude vaut 1/e de l'amplitude maximale. L'énergie contenue dans cette portion du faisceau représente le ~86.5 % de l'énergie totale (cette valeur est donc comparable à d_f dans [9.1.]).

Pour avoir un point focal de diamètre $d_f = 1$ mm, posons

$$w_0 = 0.5 \text{ mm} \quad [9.3.]$$

Avec [9.3.], [9.3.] et $r = 4$ m, l'allure de $w(z)$ est la suivante:



Nous remarquons qu'une pupille de diamètre $a \approx 3$ mm suffirait pour obtenir ce faisceau gaussien. En prenant une marge plus confortable, posons $a = 5$ mm : nous avons donc approximativement les mêmes grandeurs fournies par l'approche précédente (diffraction par la pupille).

Nous nous trouvons ici dans une situation particulière, car les deux approches fournissent des résultats sensiblement équivalents. Toutefois, la logique veut que le système de balayage, et en particulier la pupille, soit dimensionné de manière à ce que la diffraction ne soit pas cause de limitation. Comme le calcul précédent montre qu'il est possible et réaliste de le faire, nous poursuivrons donc les calculs en utilisant l'approche gaussienne [9.2.].

Diamètre du faisceau au sol

Compte tenu des conditions géométriques de l'installation, le diamètre effectif au niveau du sol du faisceau (focalisée à la distance r) est le paramètre déterminant pour la résolution du système.

Ce *diamètre* effectif $d_s(x)$ résulte de la différence de parcours pupille-point d'impact introduite par la nature circulaire du balayage, et de l'angle d'incidence du faisceau.

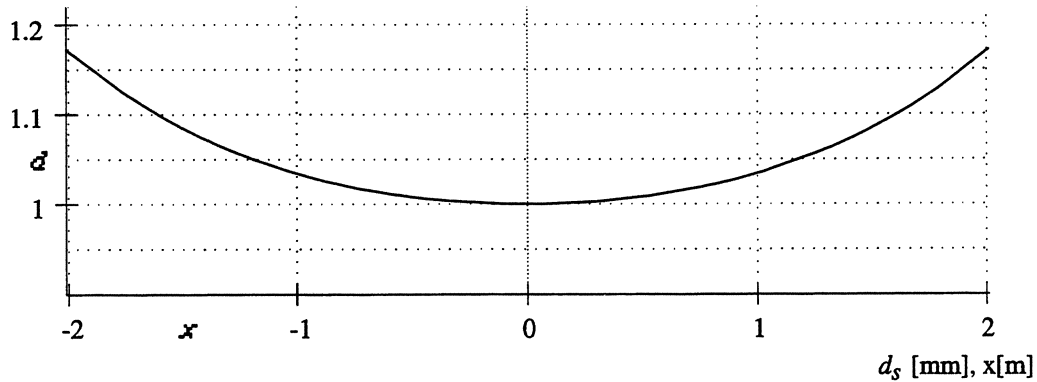
En admettant que $w(z) \approx w(z \pm \varepsilon)$ pour $\varepsilon < z_m$, nous avons

$$d_s(x) = \frac{2}{\cos[\alpha(x)]} w[r + \Delta r(x)]$$

et donc par [9.2.]

$$d_s(x) = \frac{2w_0}{\cos\left[\arctan\left(\frac{x}{h}\right)\right]} \left[1 + \left(\frac{r - \sqrt{h^2 + x^2}}{z_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [9.4.]$$

Pour $r=h=4m$, $d_s(x)$ prend les valeurs suivantes



en $x=\pm 2$, $d_{s \max}=1.170$ mm

Ces valeurs sont acceptables, bien qu'au bord du balayage ($x=\pm 2m$), d_s soit 17% plus étendu qu'au centre. Afin de détecter des fissures de 1mm, il faut que $d_s \approx 1mm$. Si d_s est légèrement plus grand, l'effet d'absorption sera moins marqué, mais tout de même présent.

Optimisation de $d_s(x)$

La variation du diamètre du faisceau au sol $d_s(x)$ peut être optimisée, en focalisant le faisceau non pas en $r=h$, mais un peu plus loin. Deux critères d'optimisation sont envisageables: l'un portant sur l'uniformité du diamètre du faisceau au sol, l'autre sur la minimisation du diamètre maximal (aux bords).

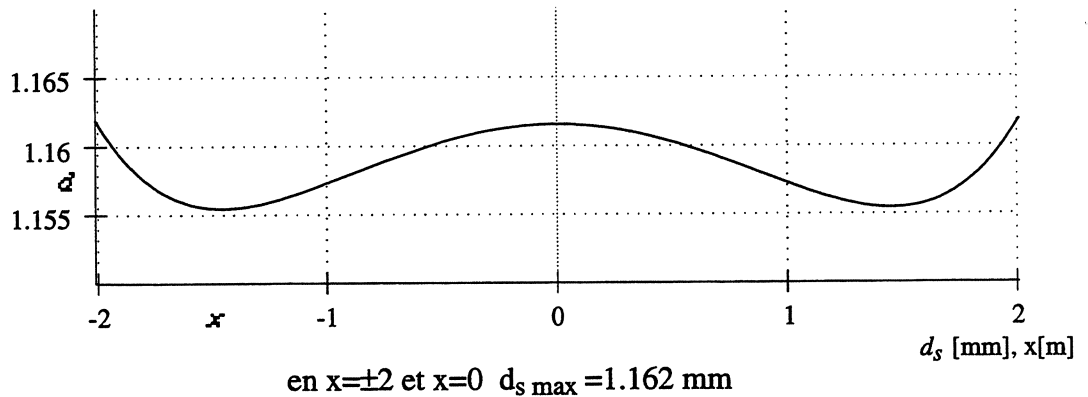
◇ *Distribution uniforme*

Afin que le diamètre d_s soit le même au centre et aux bords du balayage,

posons dans [9.4.] $d_s(0) = d_s(2m)$

nous obtenons $r_{\text{opt}}(h=4m) = 4.903 \text{ m}$

Voici l'allure de $d_s(x)$ pour $h=4$ et $r = r_{\text{opt}} = 4.903 \text{ m}$.



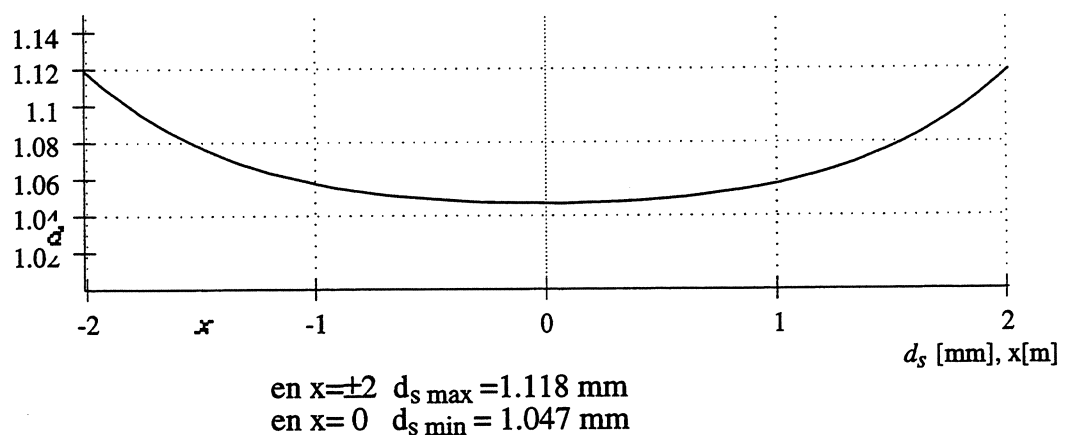
Nous remarquons que $d_s(x)$ est plus uniforme, mais reste toujours plus grand que le diamètre du point focal d_f . Ceci est dû au fait que dans [9.4.] l'influence de la projection angulaire est bien plus importante que celle de la forme gaussienne du faisceau.

Dans ce cas, ce type d'optimisation n'apporte pas de gain notable sur $d_{s \text{ max}}$ (1.162 mm contre 1.170 mm). De plus, r_{opt} est presque d'un mètre supérieur à $r=h$, ce qui nécessiterait une pupille plus grande, ($a_{\text{min}}=3.36 \text{ mm}$ contre $a_{\text{min}}=2.80 \text{ mm}$). Dans ces conditions géométriques, ce type d'optimisation n'est donc pas indiqué.

◇ *Minimisation de $d_s(x)$ aux bords*

Le diamètre minimal aux bords du balayage est obtenu lorsque

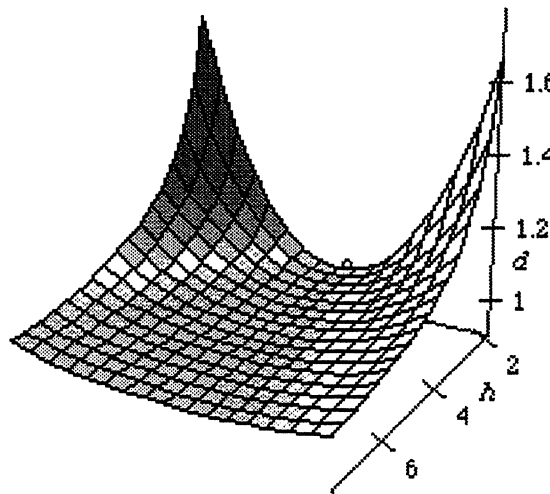
$$d_f = r + \Delta r = 4.47 \text{ m}$$



Ce type d'optimisation est ici plus favorable et sera donc adopté en pratique.

Distance de balayage et diamètre de la pupille

Pour ce dispositif, il serait inutile de vouloir focaliser le faisceau sur un diamètre beaucoup plus petit que $d_s = 1\text{ mm}$, car d'une part nous risquerions de confondre les fissures avec les interstices séparant les granulats, et d'autre part cela compliquerait les techniques de balayage. En effet, un point focal plus petite impliquerait une divergence plus élevée, et donc une plus grande variation de d_s entre le centre et les bords du balayage.

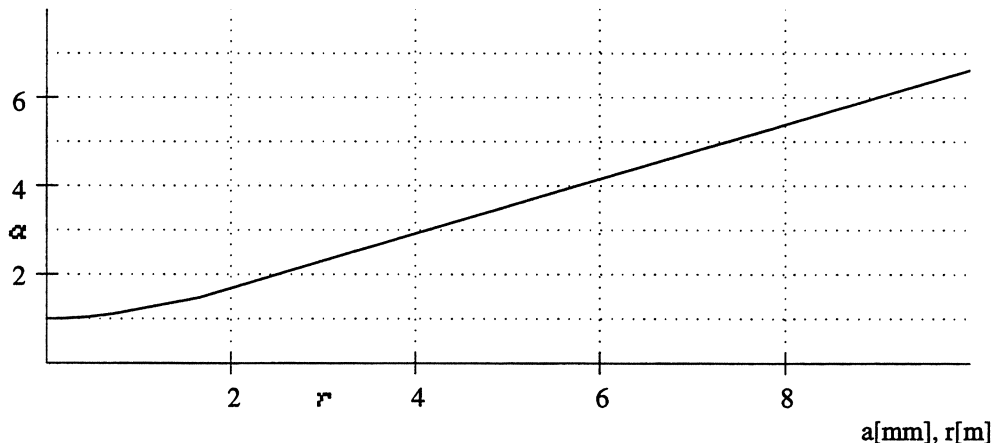


Tout en garantissant un diamètre du point focal $d_f = 1\text{ mm}$, il convient de balayer avec une distance h le plus grande possible.

Le graphe ci-contre montre le comportement de $d_s(x)$ en fonction de la distance de balayage h (avec $r=h$).

Nous constatons que la courbe $d_s(x)$ s'aplatit considérablement pour des h grands.

Mais pour focaliser un point de 1 mm à une grande distance, une grande pupille est nécessaire. Le graphe ci-dessous montre le *diamètre* minimal de la pupille ($1/e$ du faisceau gaussien) nécessaire pour focaliser $d_f = 1\text{ mm}$ à une distance r .



Il faut donc trouver un bon compromis entre une distance h suffisamment grande pour fournir un balayage homogène tant en fonction de d_s qu'en fonction de α , et une pupille suffisamment petite pour être réalisable en pratique, sans avoir recours à des dispositifs encombrants et coûteux.

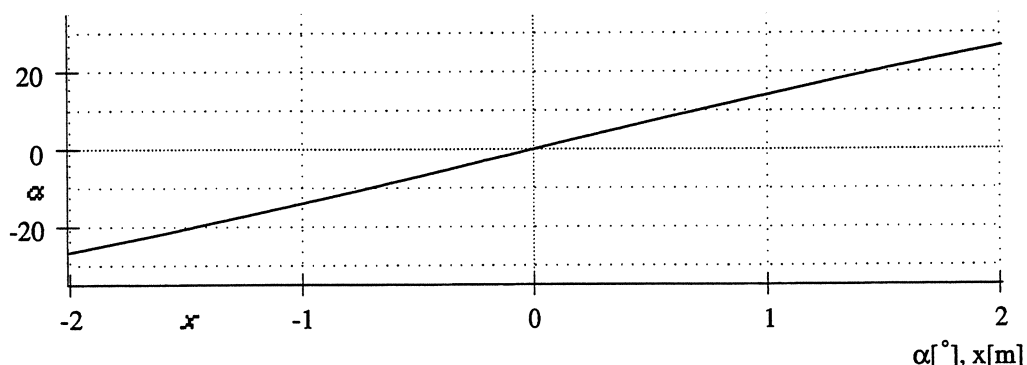
◆ Je propose pour le dispositif final

$$\begin{aligned} h &= 4\text{ m} \\ r &= 4.47\text{ m} \end{aligned}$$

ce qui donne un angle d'ouverture du balayage

$$\gamma = 53.13^\circ$$

Ces valeurs fournissent un $d_s(x)$ de qualité suffisante, malgré une variation d'angle d'incidence $\alpha(x)$ relativement importante. Le graphe ci-dessous l'illustre ($\alpha_{\max} = 26.6^\circ$).



Pour la réalisation du système définitif, il serait opportun d'étudier un dédoublement optique du balayage ou un élément optique de correction.

Fréquence de balayage

Avec un véhicule circulant à une vitesse de 12m/s (43.2 km/h) et afin de balayer chaque mm^2 du revêtement sur 4m de largeur, la fréquence de balayage nécessaire est de

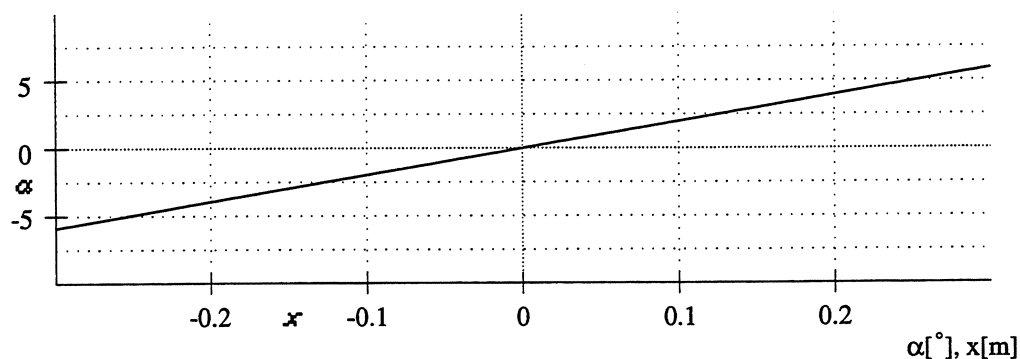
$$f_{\text{bal}} = 12 \text{ kHz}$$

Ceci produit au niveau de sol un point lumineux se déplaçant à la vitesse apparente de 172'000km/h.

9.1. Prototype de 60 cm de largeur

Pour un balayage de $\Delta x_{\max} = \pm 30\text{cm}$, le problème est plus simple. Compte tenu des exigences mécaniques du montage, les valeurs suivantes ont été choisies.

- ◇ diamètre de la pupille: $a = 5 \text{ mm}$
- ◇ distance de balayage: $h = 2.900 \text{ m}$
- ◇ angle d'ouverture du balayage: $\gamma = 11.8^\circ$
- ◇ L'excursion de l'angle d'incidence α , tout à fait acceptable, est la suivante:

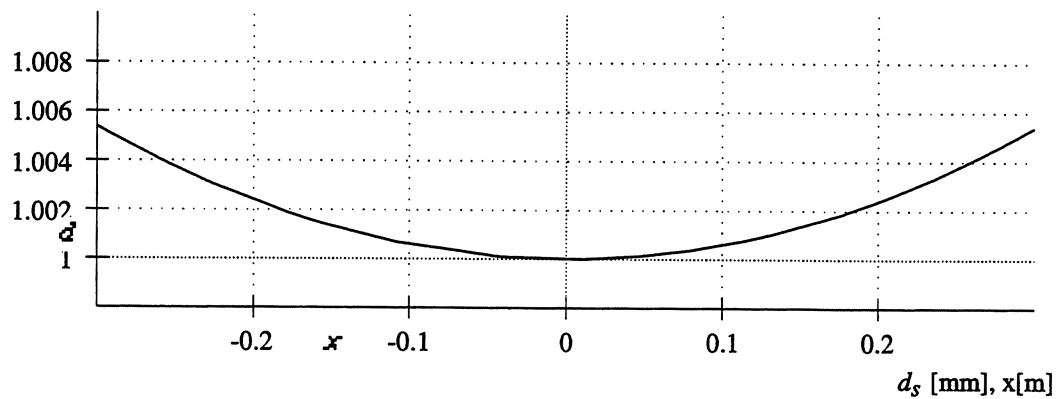


◇ Diamètre effectif du faisceau au sol.

Le diamètre minimal (1/e) de la pupille permettant une focalisation $d_f = 1$ mm à la distance $r = 2.90$ m vaut

$$a = 2.15 \text{ mm}$$

Le diamètre effectif du faisceau au sol est le suivant [9.4.] :



Ce qui représente un écart infime entre le centre et les bords.

10. CHOIX DE LA METHODE

Il existe quatre méthodes de base pour produire un balayage continu: les HOE tournants (hologon), les modulateurs acousto-optiques, les miroirs galvanométriques et les miroirs polygonaux tournants.

Examinons brièvement les raisons qui ont conduit à porter notre choix sur la dernière.

10.1. Les méthodes écartées

HOE tournant

Le principal avantage de cette solution est la souplesse: il serait en effet possible de concevoir un hologramme de balayage sur mesure, qui inclurait directement toutes les corrections nécessaires au maintien de la qualité de la tache focale le long de la ligne de balayage. La réalisation de cet hologramme serait par contre trop laborieuse dans le cadre de ce projet. De plus, la grande vitesse requise engendrerait des problèmes mécaniques importants.

Modulateurs acousto-optiques

Les modulateurs disponibles sur le marché sont très rapides, mais seraient insuffisants à la fois en ouverture angulaire de balayage et en diamètre de pupille.

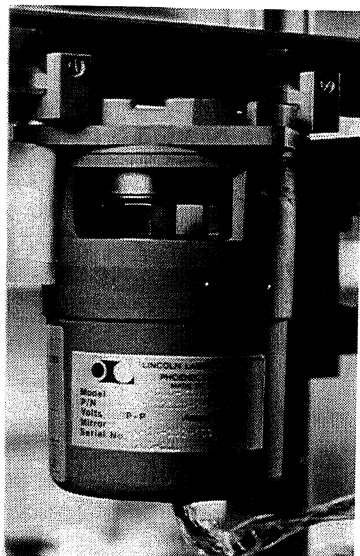
Miroir galvanométrique

Grâce au concours de l'Institut de Microtechnique, des essais préalables ont pu être faits avec un miroir galvanométrique piloté par ordinateur, ce qui a permis d'en évaluer les performances. Si d'une part ouverture angulaire et pupille sont suffisamment grands, apparaissent par contre d'importants problèmes d'inertie. Anticipons ici que le système de traitement du signal (voir section E) demande un balayage monodirectionnel (pas d'aller-retour): les miroirs devraient donc être commandés par un signal en dents de scie. Or, l'inertie des miroirs limite considérablement la fréquence de balayage et introduit des "rebonds" non admissibles lors du retour rapide.

10.2. La solution retenue: le miroir polygonal tournant

Les seuls éléments offrant à la fois fréquence de balayage élevée, grande ouverture angulaire, grande ouverture de la pupille et balayage monodirectionnel sont les miroirs polygonaux tournants. Le marché propose une vaste gamme de miroirs tournants aux performances excellentes et aux prix raisonnables.

Le modèle choisi a les caractéristiques suivantes:



Modèle: Lincoln Laser Company
 Nombre de facettes: 24
 Pupille: 5mm x 5mm
 Vitesse de rotation: 30'000 tours/min
 (500 Hz)
 Stabilisation par cristal
 Fréquence de balayage: 12 kHz

D'où on calcule, en tenant compte de la géométrie du système:

Une ligne de balayage chaque 83.3 ms
 Durée d'une fissure de 1mm: 20.83 ns

Vitesse apparente du point au sol:
 172'000 km/h

Un léger inconvénient de ce dispositif est l'absence de feed-back sur la vitesse de rotation: l'alimentation envoie un signal très stable, mais cela n'implique pas forcément une grande stabilité de la vitesse de rotation réelle.

Une mesure optique a en effet montré une légère instabilité, de l'ordre de 0.5%, due probablement à l'apparition d'écoulements d'air turbulents à l'intérieur du logement du miroir et à l'erreur d'alignement entre les facettes.

Hologramme de correction

Un HOE de 4m placé à proximité du revêtement pourrait corriger à la fois les défauts de focalisation et la variation d'angle d'incidence. Nous verrons dans la section C que le système de détection fait appel à un collecteur holographique de 4m: au besoin, l'HOE de correction pourrait être intégré au collecteur.

En pratique, la réalisation d'un tel HOE correcteur soulèverait de nombreux problèmes, pour une amélioration négligeable des performances. Son étude n'a donc pas été abordée dans le cadre de cette thèse.

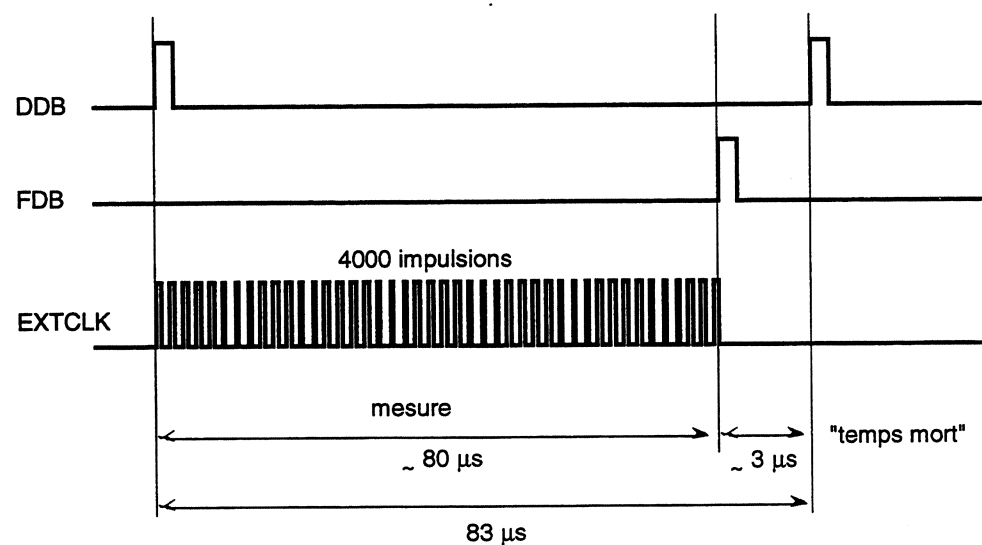
11. SIGNAUX DE SYNCHRONISATION

La synchronisation entre les différents organes du système joue un rôle décisif dans le repérage des fissures. Le système de balayage étant l'organe le plus sujet à des instabilités temporelles, il appartient aux autres unités de s'adapter à ses variations (voir sections C et E). Dans ce but, le dispositif de balayage génère trois signaux TTL:

le signal DDB : début de balayage

le signal FDB : fin du balayage

le signal EXTCK: 4000 impulsions entre DDB et FDB (balayage de 4m)



DDB et FDB

La fenêtre de balayage utilisée pour la mesure est plus petite que l'ouverture angulaire totale du miroir polygonal. Chaque 83 μs commence un nouveau balayage, qui parcourt la zone de mesure en 80 μs (+/-2). On a donc un "temps mort" d'environ 3 μs (+/-2). Ces valeurs dépendent de la vitesse de rotation du miroir, qui peut ne pas être parfaitement stable. Il importe donc de bien synchroniser les unités électroniques avec la fenêtre temporelle de mesure.

Ce problème est résolu par deux photodiodes placées dans le balayage, aux extrémités de la fenêtre spatiale de mesure. En pratique, elles doivent se trouver légèrement à l'intérieur de la fenêtre, et pourraient donc créer des ombres gênantes dans le faisceau de mesure.

Deux solutions simples permettent de pallier à cet inconvénient: les cellules peuvent être placées sur un deuxième faisceau obtenu en prélevant une faible partie du faisceau de mesure, ou bien elles peuvent être placées dans le faisceau, mais à l'extérieur de la fenêtre, leurs signaux étant "corrigés" électroniquement.

EXTCK

Pour une parfaite synchronisation avec le système de traitement et donc une corrélation exacte entre information spatiale et information temporelle, il est opportun que le signal d'horloge (48 Mhz) soit généré directement par le balayage. Cette horloge servira entre autres à l'échantillonnage temporel du signal, et doit être parfaitement corrélé d'un balayage à l'autre. Les 4000 impulsions par balayage correspondent en effet aux 4000 mm que le point focal parcourt sur le revêtement.¹

On peut envisager ici deux types de solutions, l'un électronique et l'autre optique.

- ◇ La solution électronique consiste à générer le signal EXTCK en multipliant par 4000 la fréquence du signal DDB, par le biais d'un PLL (phase locked loop). Cette solution est de réalisation simple, mais le signal EXTCK ainsi obtenu n'est pas synchronisé avec *chacune* des lignes de balayage, mais avec leur moyenne (sur un temps assez court).
- ◇ Optiquement, parmi différentes possibilités, retenons la projection de franges sur un minuscule détecteur après réflexion sur le miroir tournant. Les franges peuvent être obtenues par interférence directe (par exemple par un prisme de Wollastone), ou par un HOE ad hoc.
Cette solution est plus exacte mais peut poser des problèmes pratiques, notamment au niveau de la stabilité et du contraste des franges.

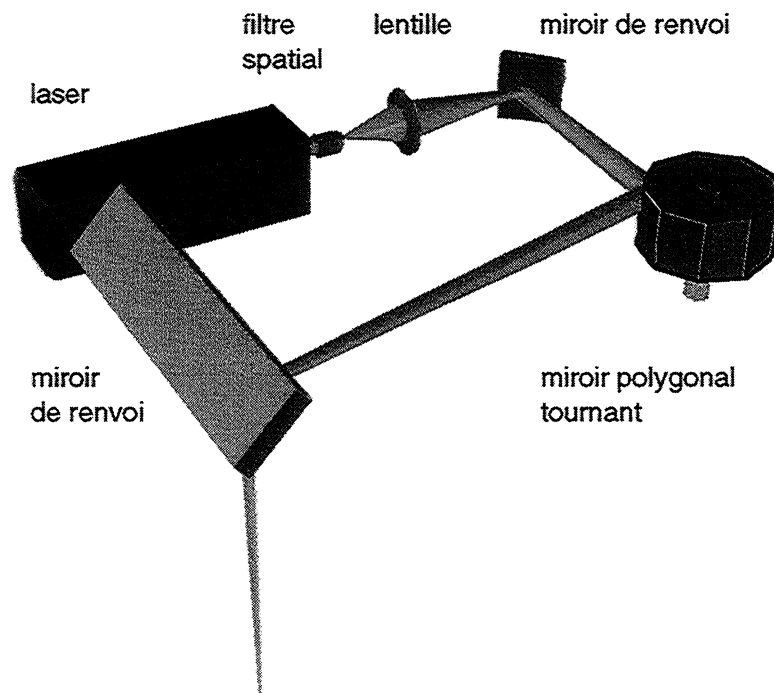
Dans le prototype¹ (voir section F), une solution électronique simplifiée a été implémentée à titre provisoire. Le développement de la solution optique est prévu dans le cahier des charges des travaux futurs.

¹ Nous négligerons ici le "temps mort" du balayage.

12. CONCLUSIONS

12.1. Montage

Le montage optique réalisant la fonction de balayage est schématisé ci-dessous. Des photographies du montage réel installé dans le prototype se trouvent dans la section E.



12.2. Résultats

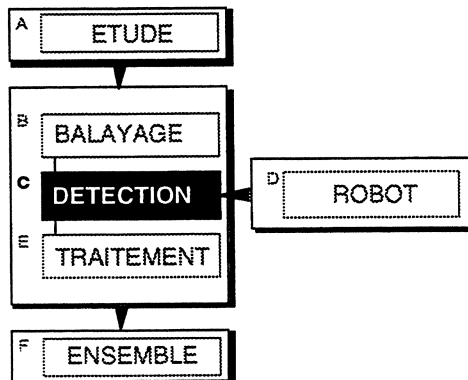
Le dispositif de balayage a été testé en laboratoire sur les échantillons décrits dans la section A. Le paramètre le plus critique, le diamètre effectif du point focal, a été évalué dans les conditions opératoires, c'est à dire par absorption par des fissures de différentes largeurs, avec des bons résultats même pour des fissures de 0.2 mm (absorption partielle mais nettement détectable).

Le comportement global du dispositif est conforme aux prévisions et répond aux spécifications requises.

Section C

LA DETECTION

par collecteur holographique multifacettes



Cette section aborde les questions qui constituent le coeur de CREHOS: la mauvaise qualité optique des revêtements routiers, la stratégie de détection et surtout les moyens de l'implémenter par le biais d'un collecteur holographique multifacettes de 2 fois 4m, qui représente une des innovations majeures apportées par ce travail.

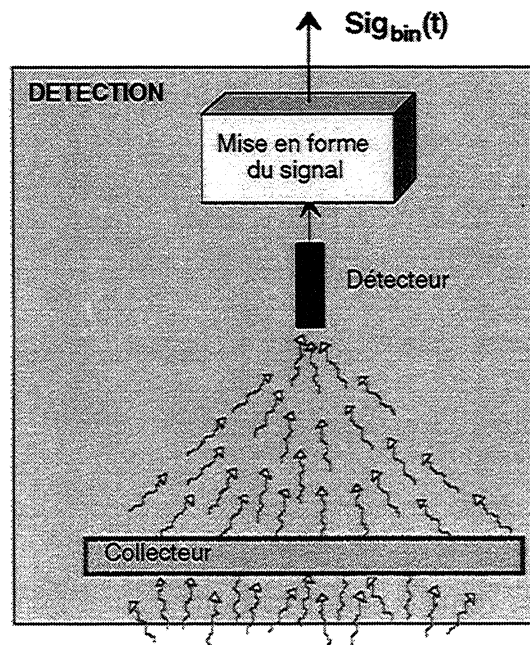
Sera abordée également la conversion du signal lumineux d'entrée en un signal électronique binaire, affecté de valeur symbolique.

13. Introduction	63
13.1. Les trois parties du dispositif de détection	65
13.2. Le rôle du dispositif de détection	65
14. Propriétés optiques des revêtements routiers	69
14.1. Remarques qualitatives	70
14.2. Modèles analytiques	79
14.3. Approche expérimentale	82
14.4. Conclusions	89
15. Collecter la lumière retrodiffusée	91
15.1. Le problème	91
15.2. La solution proposée	92
16. Le collecteur holographique multifacettes	95
16.1. Les hologrammes multifacettes	95
16.2. Principe du collecteur pour CREHOS	96
16.3. Algorithme de disposition des facettes	101
16.4. Recherche des fonctions de pavage	113
16.5. Pavages à densité uniforme	115
16.6. Pavage à densité variable	119
16.7. Réalisations pratiques	123
16.8. Conclusions	133
17. Conversion photoélectrique	135
17.1. Optimisation du signal	135
18. Mise en forme du signal	139
18.1. Le signal de sortie	140
18.2. Conclusions	142

Section C. LA DETECTION

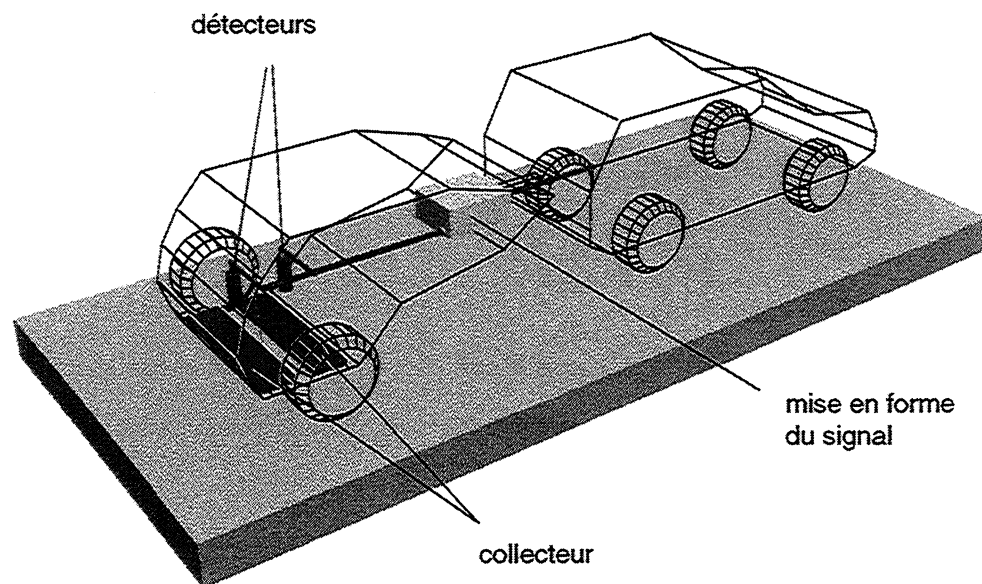
13. INTRODUCTION

La section B décrit le moyen d'éclairer successivement chaque mm^2 du revêtement routier. Il s'agit maintenant de collecter la lumière rétrodiffusée et de générer un signal binaire TTL dans le temps $\text{Sig}_{\text{bin}}(t)$, indiquant si oui ou non la lumière a été absorbée par ce qui pourrait être une fissure.



Le système de détection comprend trois parties : un collecteur optique, un détecteur photoélectrique et une unité électronique de mise en forme du signal. Ces parties étant de nature différente (optique, opto-électronique et électronique), elles seront traitées indépendamment dans des chapitres spécifiques.

De ces trois parties, le collecteur optique revêt une importance majeure car il constitue l'un des points-clé de CREHOS; il représente également l'une des innovations principales apportées par ce projet.



13.1. Les trois parties du dispositif de détection

Avant de présenter les détails des trois parties, résumons leurs principales caractéristiques.

Collecteur

Cet élément optique passif doit collecter la lumière émise successivement par chacun des points de la ligne balayée et la diriger sur un capteur. Ce problème est ardu, si l'on considère qu'il s'agit de "focaliser", par le biais d'un même élément, une succession d'ondes sphériques disposées le long d'une ligne de 4m de long¹. Une difficulté supplémentaire est introduite par la très mauvaise qualité optique du revêtement: son importante rugosité rend l'orientation du lobe rétrodiffusé totalement aléatoire. Ce double problème a été résolu grâce à un hologramme multifacettes qui, en plus, réalise une fonction de pré-filtrage de l'information. Nous y consacrerons les chapitres 14, 15 et 16.

Détecteur

Cet aspect du dispositif ne présente pas d'intérêt scientifique particulier, dans la mesure où de nombreux capteurs photoélectriques sont disponibles sur le marché. Les plus adaptés à notre problème sont des photomultiplicateurs. Les critères de choix et les caractéristiques techniques sont brièvement décrits au ch. 17.

Mise en forme du signal

Il s'agit ici de développer une unité électronique capable d'extraire les minima du signal analogique produit par les photomultiplicateurs, et de générer des impulsions binaires correspondantes à ces minima (position et largeur). Le problème réside essentiellement dans un rapport signal/bruit assez faible, et dans le fait que signal et bruit ont souvent les mêmes composantes spectrales. De plus, le niveau moyen du signal est soumis aux variations de couleur du revêtement. Ces problèmes sont abordés au ch. 18.

13.2. Le rôle du dispositif de détection

Le bloc de détection, considéré dans son ensemble, reçoit à son entrée un flux de photons rétrodiffusés par le revêtement. Son rôle est de coder cette information sous la forme d'un signal binaire dans le temps $Sig_{bin}(t)$: ce signal doit prendre la valeur *vrai* si, à l'instant t , l'intensité totale des photons rétrodiffusés $I_{tot}(t)$ est en dessous d'un seuil donné σ , et *faux* dans le cas contraire. La valeur du seuil σ est ici considérée constante et fournie de l'extérieur².

-
- ¹ Il ne s'agit pas de *focaliser* en un point, mais plutôt de concentrer la lumière sur une surface restreinte, d'un diamètre d'environ 3 cm (surface du capteur).
 - ² La possibilité d'un σ variable et réglé automatiquement sera abordée par la suite.

$$Sig_{bin}(t) = \begin{cases} vrai & \text{si } I_{tot}(t) < \sigma \\ faux & \text{si } I_{tot}(t) \geq \sigma \end{cases}$$

Considérons les transformations d'information intervenant dans cet étage du système. L'information d'entrée est codée sous la forme de flux d'énergie, forme peu exploitable directement. A sa sortie, par contre, la détection fournit un signal logique affecté d'une valeur symbolique: $Sig_{bin}(t)$ peut être considéré comme la valeur de vérité de la proposition "*il est probable qu'en cet instant le balayage se trouve sur un point appartenant à une fissure*". Le signal $Sig_{bin}(t)$ contient donc l'information relative à la forme des fissures, y compris leur largeur.

- ◇ Dans ce passage la *valeur symbolique*¹ de l'information est considérablement augmentée. L'augmentation de valeur symbolique est obtenue par l'utilisation de la connaissance a priori "*la fissure rétrodiffuse beaucoup moins que le revêtement sain*".
- ◇ En ce qui concerne la *fidélité*¹ de l'information, non seulement tous les *sèmes*² sont conservés, mais en plus ils ont été extraits d'une très grande quantité d'information inutile, réduisant ainsi l'énorme flux d'information brute aux seuls *sèmes* (ou du moins les signaux présumés tels). Notons que ce *filtrage sémique* se fait relativement en amont du système, afin de répartir le travail entre les différentes unités: le dernier étage (le dispositif de reconnaissance) bénéficiera donc d'un flux d'information déjà minimisé (au bruit près).
- ◇ Précisons que ce *filtrage sémique* extrait les unités d'information qui ont une *probabilité* élevée de représenter des points appartenant à des fissures. Il pourrait notamment s'agir de bruit (de nature optique ou électronique), ou de points réellement absorbants, mais appartenant à des dégradations autres que les fissures (nids de poule, joints, perte de gravillons, désenrobage, etc.). L'identification des "vrais" sèmes incombera à l'unité de traitement (section E), tout comme la reconstitution d'éventuels sèmes manquants.
- ◇ Notons également que le signal $Sig_{bin}(t)$ n'introduit pas d'échantillonnage spatial latéral de la fissure³. Jusqu'ici, la surface à analyser n'a donc été échantillonnée que dans la direction de marche (par le dispositif de balayage), et reste continue transversalement⁴.
- ◇ Ce dispositif permet de transférer un problème typiquement spatial dans le domaine temporel, où il est plus facilement maniable: tous les étages supérieurs du système s'occuperont donc de mesure de temps.

¹ Les notions de *valeur symbolique* et de *fidélité* de l'information sont définies dans la section A, § 6.1.

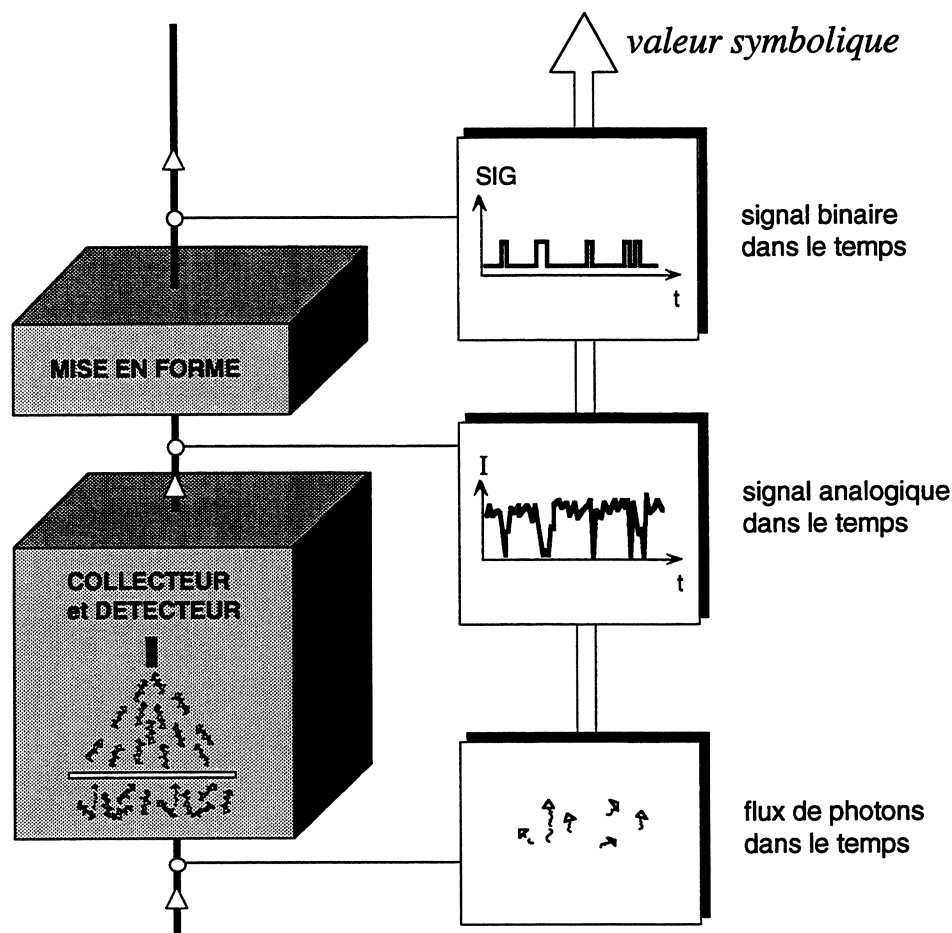
² Rappelons que l'on entend ici par *sème* tout signal véhiculant une *signification*, aux sens du problème qui nous occupe. Sont des *sèmes* les signaux provenant des points appartenant à des fissures, et n'en sont pas ni les signaux correspondant aux points de route saine, ni ceux correspondant à d'autres dégradations. Pour plus de détails, voir les définitions au § 6.1.

³ Nous négligeons ici le temps de relaxation des composants électroniques, qui sera considéré plus loin.

⁴ Ce qui ne serait pas le cas en technique vidéo, qui introduirait d'emblée un double échantillonnage spatial.

Entre l'état d'entrée et l'état de sortie, l'information se trouve codée dans un état intermédiaire sous la forme de signal analogique¹. La transformation flux de photons $\rightarrow$ signal analogique n'amène pas de gain de valeur symbolique notable; elle est par contre à l'origine de problèmes considérables, qui seront développés dans les chapitres suivants.

Le schéma ci-dessous illustre les différentes transformations d'information intervenant dans le dispositif de détection.



¹ Les techniques vidéo CCD comporteraient un état intermédiaire supplémentaire: une distribution spatiale de charges électriques (état des pixel du CCD).

14. PROPRIETES OPTIQUES DES REVETEMENTS ROUTIERS

Du point de vue optique, les revêtements routiers présentent les pires caractéristiques. Ils cumulent trois inconvénients majeurs: le matériau est de couleur très variable, généralement très foncé, et surtout *extrêmement rugueux*. Examinons ses propriétés optiques plus en détail, en commençant par des considérations qualitatives. Nous verrons ensuite quelle approche quantitative est la plus adaptée.

Bien que les paragraphes qui vont suivre n'impliquent pas de calculs formels, il est opportun d'introduire une notation mathématique pour les paramètres qui seront le plus souvent cités. Ceci dans le but de pouvoir formuler des énoncés précis.

Soient

I_{in}	l'intensité du faisceau incident focalisé au niveau du revêtement.
$R_{i,j}$	le point du revêtement éclairé, où i entier $\in [1, \infty]$: position latérale (direction x) dans balayage j (direction y). Où j entier $\in [1, N_{bal}^{max}]$.
$d(R_{i,j})$	le diamètre du faisceau d'éclairage au sol, au point $R_{i,j}$.
$g(R_{i,j})$	le diamètre moyen du granulat éclairé.
$\langle g(R_{i,j}) \rangle$	la moyenne de la distribution granulométrique du revêtement.
$\vec{u} = (\theta, \gamma)$	un vecteur unitaire $\in \mathcal{R}^3$ indiquant une direction de propagation.
$\xi_{mat}(x, y)$	la fonction aléatoire décrivant la rugosité du revêtement, exprimée en écart du plan moyen. L'indice <i>mat</i> désigne le matériau ($\xi_{bitum.}$, $\xi_{béton}$, $\xi_{métal}$, etc.)
$\rho(R_{i,j})$	le coefficient de réflectivité global associé au point $R_{i,j}$. Ce coefficient regroupe différents effets.
$I_{diff}(\vec{u}, R_{i,j})$	l'intensité rétrodiffusée par le point $R_{i,j}$ dans la direction $\vec{u}$ (distribution polaire de l'intensité rétrodiffusée).
$I_{diff}^T(R_{i,j})$	l'intensité totale rétrodiffusée par le point $R_{i,j}$, intégrée sur la demi-sphère centrée en $R_{i,j}$.

Nous assumerons par la suite que l'intensité incidente I_{in} est constante, et que l'angle d'incidence de I_{in} est constant et normal au revêtement.

Nous assumons également que le point focal n'éclaire à la fois qu'une partie d'un seul granulat:

$$d(R_{i,j}) < \langle g(R_{i,j}) \rangle$$

14.1. Remarques qualitatives

Lorsqu'un point du revêtement est éclairé par un faisceau d'intensité I_{in} , l'intensité totale rétrodiffusée, qui est le paramètre à mesurer, peut s'exprimer par

$$I_{diff}^T(R_{i,j}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I_{diff}(\vec{u}, R_{i,j}) d\vec{u} \quad [14.1.]$$

$$= \rho(R_{i,j}) \cdot I_{in} \quad [14.2.]$$

Tous les problèmes résident dans la nature de $\rho(R_{i,j})$ et dans la détermination de $I_{diff}(\vec{u}, R_{i,j})$. En examinant ces deux fonctions plus en détail, en commençant par le cas d'un revêtement sain (pas de fissures), on peut formuler les remarques suivantes.

La réflectivité globale et l'intensité rétrodiffusée totale

◇ $\langle \rho(R_{i,j}) \rangle \ll 1$

Dans la plupart des cas (enrobés bitumineux) la valeur moyenne de ρ est très faible. Les revêtements routiers sont généralement noirs ou très foncés. La lumière incidente est donc fortement absorbée, à la fois par la faible réflectance du matériau et par sa texture. Ceci peut être gênant dans notre cas, qui vise à mesurer des *minima* d'intensité rétrodiffusée.

◇ $\langle \rho(R_{i,j}) \rangle$ est très variable

Tous en restant petite, la valeur moyenne de ρ peut varier beaucoup d'un revêtement à l'autre, en raison du type de matériau, de sa texture ou de son usure.

◇ $\rho(R_{i,j})$ est aléatoire

Examinons les facteurs qui contribuent à la réflectivité globale ρ . On peut assumer que

$$\rho(R_{i,j}) = f[r(R_{i,j}), \chi(R_{i,j}, \xi)] \quad [14.3.]$$

où $r(R_{i,j})$ est la réflectance de $R_{i,j}$, propre au matériau

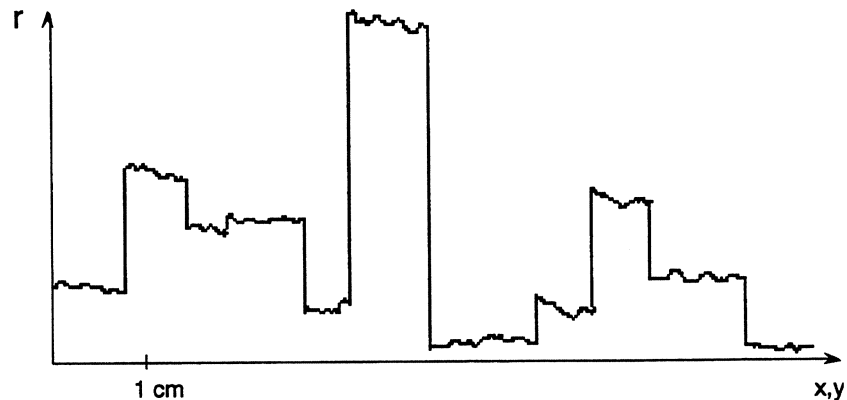
$\chi(R_{i,j}, \xi)$ est une fonction traduisant les effets de diffusion multiple (multiple scattering)¹ au point $R_{i,j}$ en fonction de la rugosité ξ .

¹ Rappelons que l'on dénomme diffusion multiple le phénomène par lequel un rayon incident n'est pas réfléchi directement, mais subit au niveau de la surface une série de n réflexions successives, dues à une rugosité très importante. De ce fait, la réflectance apparente est r^n .

Bien que $\chi(R_{i,j}, \xi)$ soit très complexe à évaluer quantitativement, on est en droit de formuler quelques considérations qualitatives sur l'allure de $\rho(R_{i,j})$.

La réflectance $r(R_{i,j})$ dépend essentiellement de la nature et de la couleur des différents granulats, de leur état de polissage (usure) ou d'éventuels dépôts. Le revêtement étant composé de granulats de taille et de nature différents répartis de manière aléatoire, $r(R_{i,j})$ est une fonction *aléatoire* et discontinue. Plus précisément, elle peut être dérivable localement sur un intervalle de l'ordre de la longueur de corrélation de la rugosité, mais elle ne peut l'être au-delà de cet intervalle, ni autour des points d'interface entre les granulats.

De plus, $r(R_{i,j})$ peut présenter des écarts importants de sa moyenne (granulats blancs). On peut estimer qualitativement l'allure de $r(R_{i,j})$ à une fonction du type suivant, avec une longueur de corrélation de $\langle g(R_{i,j}) \rangle$ (granulométrie).



Quant à $\chi(R_{i,j}, \xi)$, il est extrêmement difficile de la modéliser correctement, car il faudrait prendre en considération l'allure détaillée de ξ et la réflectivité de tous les points dans un environnement plus ou moins étendu de $R_{i,j}$. On peut considérer qu'il s'agit également d'une fonction *aléatoire*, dont les valeurs sont probablement plus proches de la moyenne que dans le cas de $r(R_{i,j})$. Si l'on suppose que l'effet de diffusion multiple est plus marqué autour des interfaces entre les granulats, la longueur de corrélation de χ est de l'ordre de $\langle g(R_{i,j}) \rangle$.

Pour résumer, $\rho(R_{i,j}) = f[r(R_{i,j}), \chi(R_{i,j}, \xi)]$ est donc une fonction aléatoire (au sens défini plus haut) et non-dérivable. Sa longueur de corrélation est déterminée par la granulométrie et vaut $\langle g(R_{i,j}) \rangle$ et est typiquement du même ordre que la largeur des fissures à détecter.

◇ $I_{\text{diff}}^T(R_{i,j})$ est aléatoire

L'intensité totale rétrodiffusée dépendant de $\rho(R_{i,j})$ ([14.2.]), elle est donc aléatoire (au même sens que ρ). Elle aura la même longueur de corrélation que ρ , $\langle g(R_{i,j}) \rangle$.

La rugosité du revêtement

La fonction de rugosité $\xi_{mat}(x, y)$ décrit la surface du revêtement exprimée en écart du plan moyen. Dans le cas des revêtements routiers et indépendamment du matériau qui les compose, elle résulte de la somme de trois ordres de rugosité différents:

$$\xi_{mat}(x, y) = \xi_m(x, y) + \xi_{mm}(x, y) + \xi_{\mu m}(x, y) \quad [14.4.]$$

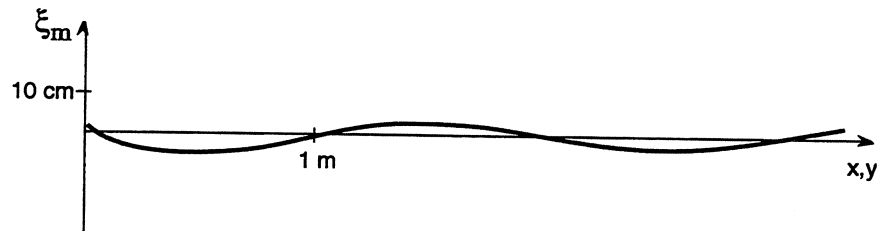
La rugosité influence surtout la distribution polaire d'intensité rétrodiffusée. Chacune de ses trois composantes produit un effet différent. Examinons-les.

◇ $\xi_m(x, y)$

Il s'agit d'une rugosité de longueur de corrélation de l'ordre du mètre et d'amplitude moyenne de l'ordre de quelques cm. Elle est produite essentiellement par l'orniérage ou des affaissements de la chaussée. Son effet principal est de faire varier aléatoirement le diamètre du point focal au sol $d(R_i, j)$. Compte tenu de la géométrie du dispositif de balayage, cette variation n'est pas trop importante: chaque cm d'écart de la chaussée de son plan moyen produit un Δd de 1%.

Par ailleurs, ces ondulations vont engendrer des mouvements du véhicule qui pourraient s'avérer gênants pour la mesure, notamment au niveau de la distance revêtement-collecteur.

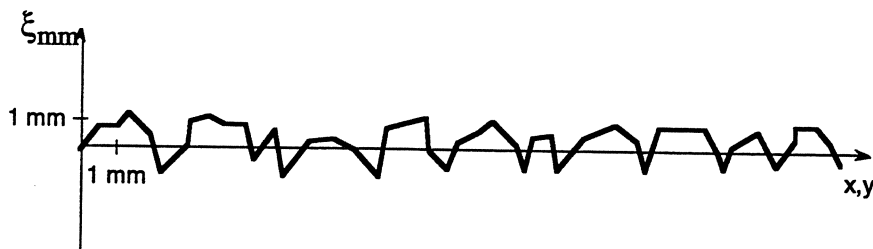
$\xi_m(x, y)$ est aléatoire, et son allure est du type suivant



◇ $\xi_{mm}(x, y)$

Cette rugosité due à la nature granulaire du revêtement présente une longueur de corrélation et une amplitude moyenne de l'ordre du mm, qui correspondent en effet à la taille moyenne des granulats, $\langle g(R_i, j) \rangle$.

$\xi_{mm}(x, y)$ est aléatoire et non-dérivable, car elle résulte de la forme même des granulats, qui peuvent présenter des "plans de clivage" abruptes et orientés aléatoirement. L'usure de la couche de roulement peut partiellement atténuer cet effet. L'allure de ξ_{mm} est du type suivant.

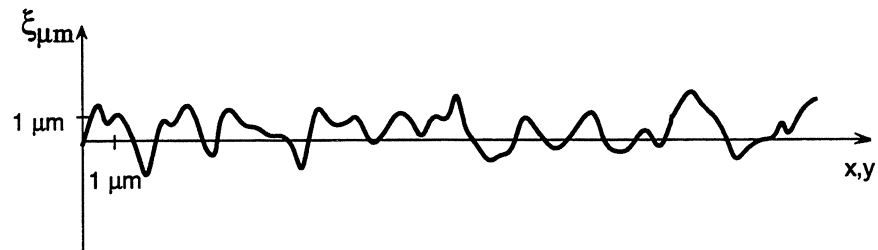


Cette rugosité est très gênante à plusieurs titres. D'une part, l'orientation aléatoire des "plans de clivage" rend très difficile l'estimation de la distribution polaire d'intensité rétrodiffusée, et d'autre part la fréquence spatiale de ξ_{mm} est typiquement la même que celle des fissures, et est du même ordre que $d(R_i, j)$. Ceci rend délicate toute opération de filtrage.

Le collecteur holographique multifacettes que nous examinerons plus loin vise justement à remédier à ces nombreux inconvénients engendrés par ξ_{mm} .

◇ $\xi_{\mu m}(x, y)$

Cette rugosité, de longueur de corrélation et d'amplitude de l'ordre du μm , traduit la texture propre du matériau composant le granulat. Il s'agit également d'une fonction aléatoire.



Comme dans notre cas la lumière d'éclairage est cohérente, $\xi_{\mu m}(x, y)$ cause l'apparition d'un champ de speckles, qui vient rajouter une composante aléatoire supplémentaire à $I_{diff}(\bar{u}, R_i, j)$.

- ◆ La rugosité résultante $\xi_{mat}(x, y)$ est donc une fonction aléatoire dont l'allure est illustrée schématiquement dans le dessin suivant (pour des raisons graphiques, les proportions entre les trois échelles n'y sont pas respectées).



Les différents types de revêtement (bitumineux neuf, bitumineux utilisé, en béton, etc.) vont généralement garder ces trois composantes ξ_m , ξ_{mm} et $\xi_{\mu m}$, mais avec un poids relatif différent (et bien entendu des ρ différents).

La distribution polaire d'intensité rétrodiffusée

La distribution d'intensité autour du point éclairé est un paramètre très important dans notre cas, car elle va déterminer la stratégie de détection. De l'efficacité de cette stratégie dépend le bon fonctionnement de tout le système.

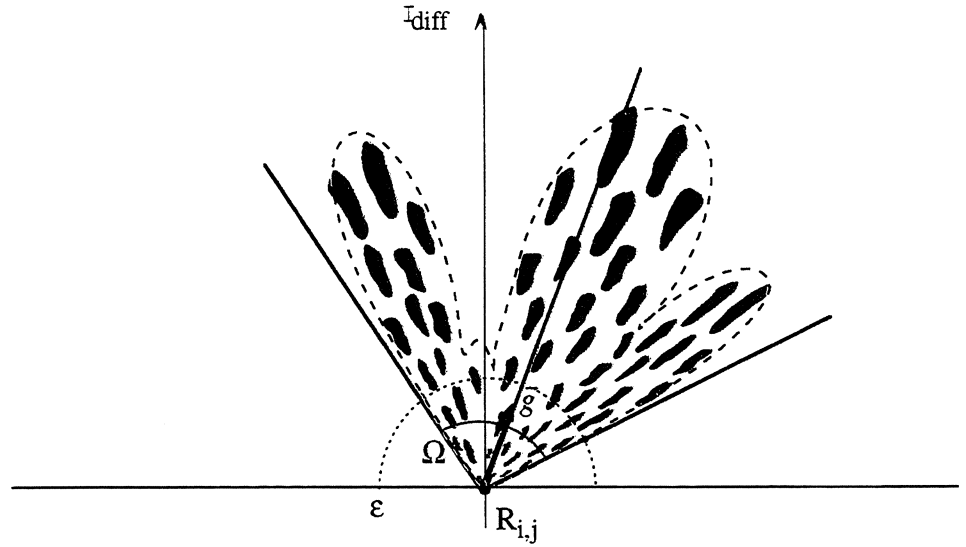
Cette distribution dépend de plusieurs paramètres:

$$I_{\text{diff}}(\bar{u}, R_{i,j}) = f[\rho(R_{i,j}), \xi_{mm}(R_{i,j}), \xi_{\mu m}(R_{i,j}), d(R_{i,j})]$$

Nous avons vu que toutes ces fonctions sont aléatoires (à l'exception de $d(R_{i,j})$, que nous supposons constante) et la plupart d'entr'elles est non-dérivable. $I_{\text{diff}}(\bar{u}, R_{i,j})$ sera donc, dans le cas général, *aléatoire et non-dérivable*.

La non-dérivabilité est une aggravante de la nature aléatoire, car elle signifie en pratique qu'il n'y a aucune corrélation entre un point et ses voisins, et donc qu'il n'est pas possible de *prévoir*, ni même d'estimer, le comportement d'un point en connaissant ses voisins, aussi proches soient-ils.

L'allure de $I_{\text{diff}}(\bar{u}, R_{i,j})$ est du type suivant:



où

$\Omega = (\omega_x, \omega_y)$ est l'ouverture angulaire de l'enveloppe, à l'intérieur de laquelle $I_{\text{diff}} > \epsilon$.

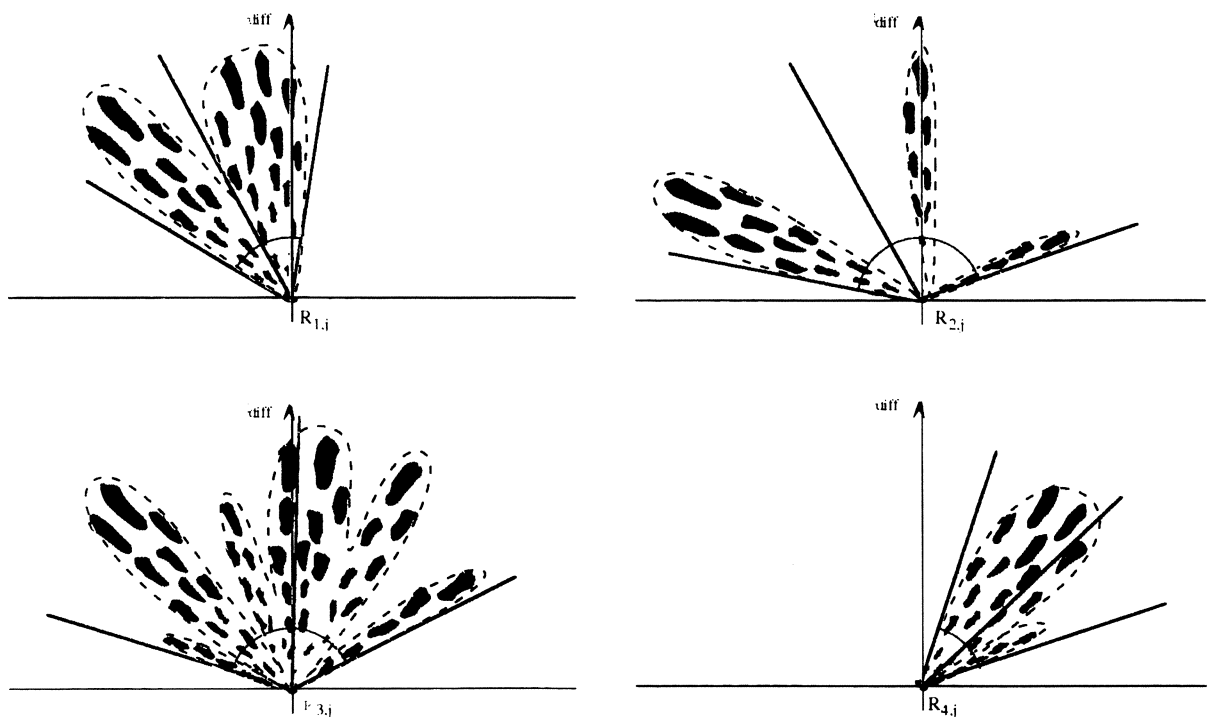
$\bar{g} = (\gamma_x, \gamma_y)$ un vecteur unitaire indiquant la direction du "barycentre angulaire" des lobes.

Le rôle que joue chaque paramètre dans la forme de I_{diff} est, qualitativement, le suivant:

- $\rho(R_{i,j})$ influencent essentiellement le module $|I_{\text{diff}}(\vec{u}, R_{i,j})|$
- $\xi_{mm}(R_{i,j})$ influence fortement $\bar{g}$ et Ω , car elle détermine le nombre et l'orientation angulaire des lobes.
- $\xi_{\mu m}(R_{i,j})$ produit un bruit de speckles à l'intérieur des lobes
- $d(R_{i,j})$ influence essentiellement Ω , et dans une certaine mesure $\bar{g}$. Il détermine également la taille moyenne des speckles.

Un problème important est constitué ici par la totale imprévisibilité de la forme et de l'orientation des lobes, liée essentiellement à la nature de $\xi_{mm}(R_{i,j})$. D'un point à l'autre cette distribution peut changer totalement.

De même, tant $\Omega(R_{i,j})$ que $\bar{g}(R_{i,j})$ sont soumis à des variations discontinues, et ont une excursion très importante. Voici quelle pourrait être la distribution d'intensité pour des points différents, même contigus:



La "signature" de la fissure

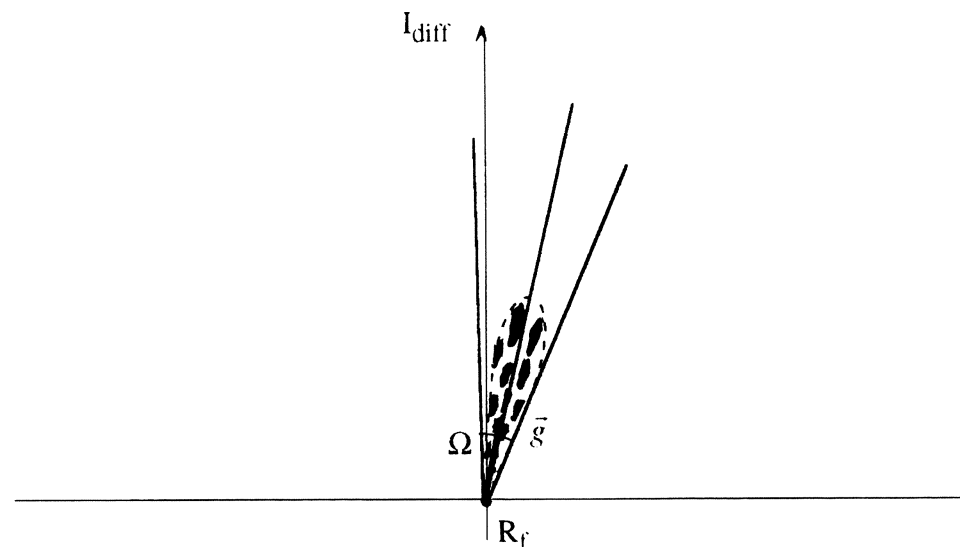
Ce qui différencie un point R_f appartenant à une fissure d'un point R_s appartenant au revêtement sain, ce sont les caractéristiques suivantes:

- ∇ L'effet de diffusion multiple $\chi(R_f)$ est beaucoup plus important que $\chi(R_s)$. Autrement dit, la lumière reste "piégée" dans la fissure.
- ∇ De ce fait, $\rho(R_f) \ll \rho(R_s)$
- ◇ Et donc $I_{\text{diff}}^T(R_f) \ll I_{\text{diff}}^T(R_s)$

Quant à la distribution polaire de la faible intensité rétrodiffusée, elle est caractérisée par:

- ∇ $\Omega(R_f) < \Omega(R_s)$, car la diffusion a lieu dans une direction privilégiée
- ◇ $\vec{g}(R_f) \equiv (0,0)$ tandis que $\vec{g}(R_s)$ est aléatoire sur presque toute la demi-sphère.

La direction privilégiée de diffusion la plus probable est proche de la normale au revêtement, à cause de "l'ombre" produite par les parois de la fissure. Ceci est vrai également dans le cas de fissures larges, où la diffusion provient du fond de la fissure, à condition que le rapport largeur/profondeur soit < 1 .



14.2. Modèles analytiques

Il serait tentant de trouver une formulation analytique pour $I_{\text{diff}}(\vec{u}, R_{i,j})$, mais pour qu'elle soit utile dans ce contexte, elle doit être très *fiable*.

Une considération s'impose d'emblée: vu la nature du problème, une formulation analytique ne peut que fournir une description *statistique*. Or dans notre cas, il faut considérer l'intensité rétrodiffusée par *chacun* des points éclairés, afin de déterminer son éventuelle appartenance à une fissure.

Cette évaluation doit se faire *indépendamment pour chacun de points*, car la fissure est un phénomène *très local* ayant très peu d'influence sur les propriétés statistiques de l'ensemble des points du revêtement.

Pour le choix de la stratégie de détection, une formulation analytique précise du comportement statistique de $I_{\text{diff}}(\bar{u}, R_{i,j})$ n'apportera rien de plus que les considérations qualitatives précédentes, à condition que ces dernières soient validées expérimentalement.

Un modèle analytique peut par contre jouer un rôle dans l'évaluation a priori de la probabilité globale de détection du système, mais là encore une validation expérimentale est nécessaire.

Cette raison n'est pas la seule à nous décourager d'entreprendre une formulation analytique précise. Des travaux théoriques remarquables ont été effectués sur la diffusion par les surfaces rugueuses, notamment par P. Beckmann et A. Spizzichino, F. G. Bass et I. M. Fuks, et J. A. Ogilvy. La plupart de ces théories sont basées sur les hypothèses suivantes:

- ◇ *La dimension des éléments diffusants de la surface rugueuse sont considérés soit beaucoup plus petites soit beaucoup plus grandes que la longueur d'onde incidente λ .*
Ceci est vrai pour $\xi_m(x, y)$ et pour $\xi_{mm}(x, y)$, mais faux pour $\xi_{\mu m}(x, y)$, qui est justement de l'ordre de 2λ . Si nous voulons une représentation fiable, cette approximation n'est pas acceptable.
- ◇ *Le rayon de courbure des éléments diffusants est considéré comme beaucoup plus grand que λ .*
Idem.
- ◇ *Les effets d'ombre sont négligés.¹*
Ces effets pourraient être négligés pour le revêtement sain, mais en aucun cas pour les fissures. Cette approximation est également inacceptable.
- ◇ *La diffusion multiple est négligée¹.*
Idem.
- ◇ *Le calcul porte uniquement sur le champ lointain.*
Cette assumption est acceptable dans notre cas.
- ◇ *La densité des diffuseurs (nombre de diffuseurs par unité de surface) est négligée.*
Idem.
- ◇ *De plus, la réflectivité et la rugosité sont parfois considérés comme dérivables, ce qui n'est pas notre cas, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent.*

Les diverses formulations analytiques diffèrent essentiellement par la modélisation de la rugosité: par des plans tangents infinis (Kirchhoff) ou finis (Rayleigh), par des "boules noyées dans un plan" (Twersky), par des demi-plans espacés aléatoirement (Ament), ou par des facettes planes générées par une chaîne de Markov (Beckmann). On peut ensuite considérer les modèles de diffusion multiple, les effets d'ombre ou les rugosités

¹ Un traitement séparé de cet effet a été développé pour certains modèles.

multiples. Chacun des ces modèles a, bien entendu, ses domaines d'application, ses approximations et ses limites.

Conclusions

Une modélisation réaliste de notre cas, c'est à dire différents types de revêtements routiers éclairés en lumière cohérente serait extrêmement ardue, même en négligeant la phase de l'onde rétrodiffusée¹. Il faudrait en effet assembler deux modèles différents (et aux approximations différentes) pour $\xi_{mm}(x, y)$ et pour $\xi_{\mu m}(x, y)$, et y englober les effets d'ombre et de diffusion multiple.

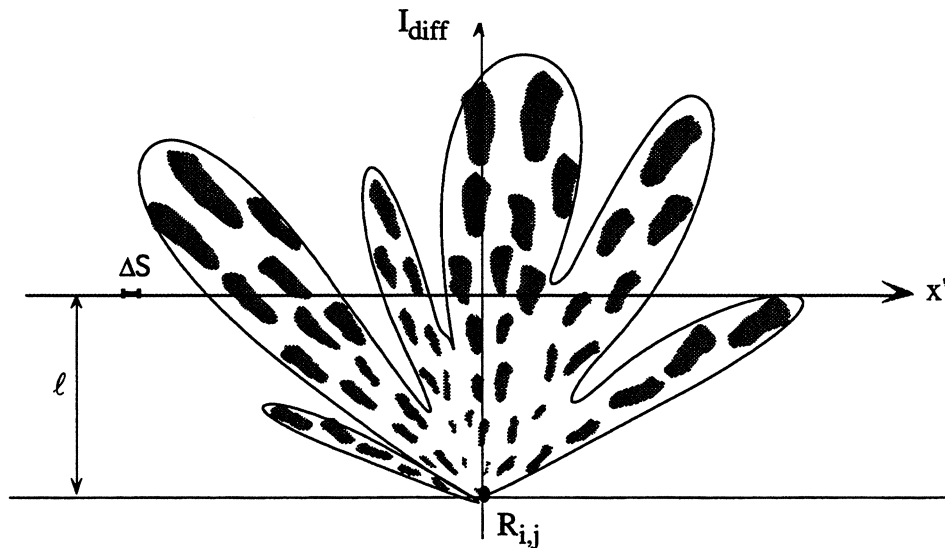
Dans notre cas la difficulté est donc double, car d'une part les approximations de base sont très éloignées de la réalité, et d'autre part aucun des modèles existants ne saurait seul satisfaire notre demande.

Par ailleurs, le développement d'un nouveau modèle ad hoc, dont l'utilité ici serait très relative, ne se justifie pas dans le cadre de ce projet.

Dans ce contexte, une approche expérimentale apparaît donc mieux adaptée à notre problème.

14.3. Approche expérimentale

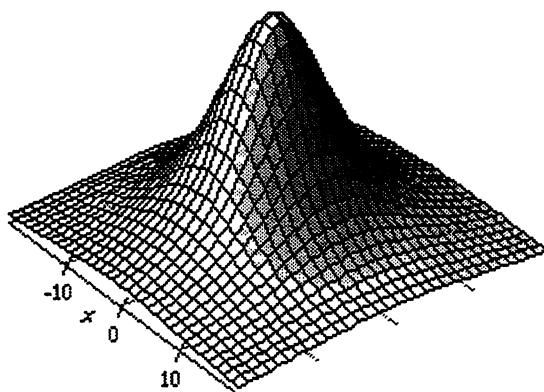
La distribution d'intensité rétrodiffusée a été évaluée de manière expérimentale en déplaçant un détecteur photoélectrique de surface ΔS le long d'une droite $x' // x$ à une distance ℓ du revêtement et de coordonnée $y = \text{const} \neq 0$



¹ S'agissant d'un champ de speckles, nous savons que la distribution spatiale de phase est aléatoire.

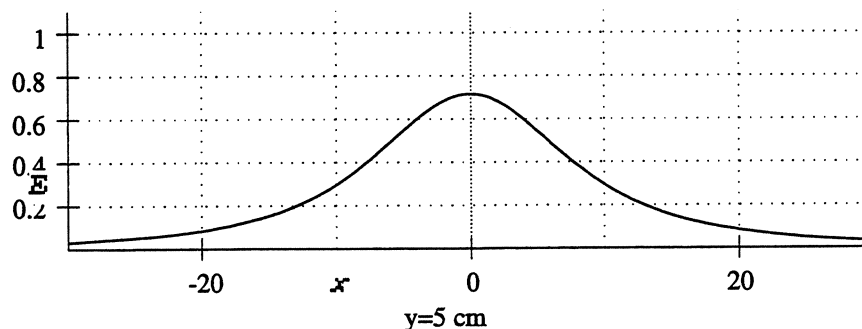
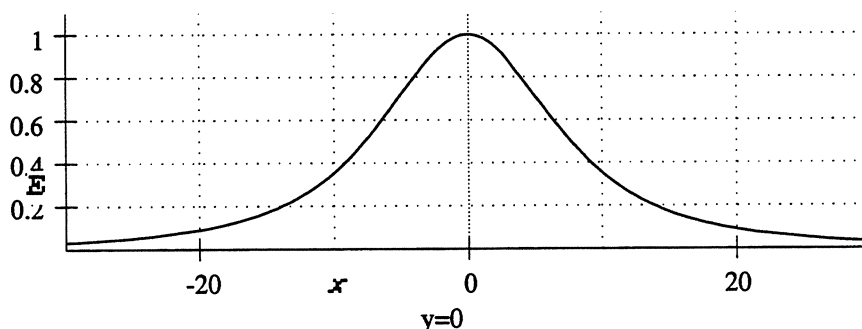
Cette méthode de mesure ne fournit pas la distribution polaire dans l'espace $I_{\text{diff}}(\vec{u}, R_{i,j})$, mais une distribution monodimensionnelle le long d'un axe parallèle au plan moyen du revêtement: $I_{\text{diff}}(x', R_{i,j})$. Cette représentation est mieux adaptée à l'étude du collecteur, qui est, comme nous le verrons dans les prochains chapitres, plat et parallèle au revêtement. Le facteur de correction entre la représentation polaire et celle de la mesure est donné par l'éclairement E , où θ est l'angle que forme la normale à la surface de détection dS par rapport au rayon ($R_{i,j}$, dS) :

$$E = \frac{I_0}{r^2} \cos \theta = \frac{I_0}{y^2 + x^2 + \ell^2} \cos \left[\arctan \left(\frac{\sqrt{y^2 + x^2}}{\ell} \right) \right] \quad [14.5.]$$



Une distribution d'intensité *polaire constante* fournirait donc, avec cette méthode de mesure, une courbe dont l'allure en fonction de x et de y est représentée ci-contre.

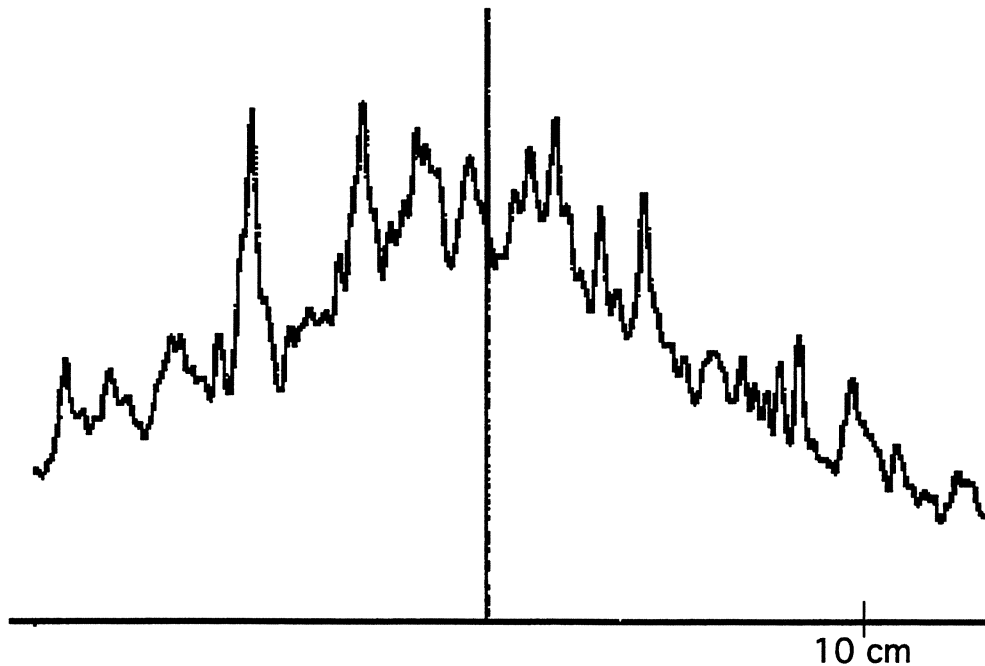
Les courbes ci-dessous, normalisées, illustrent l'allure de la courbe de correction pour $y=0$ et pour $y=5\text{cm}$.



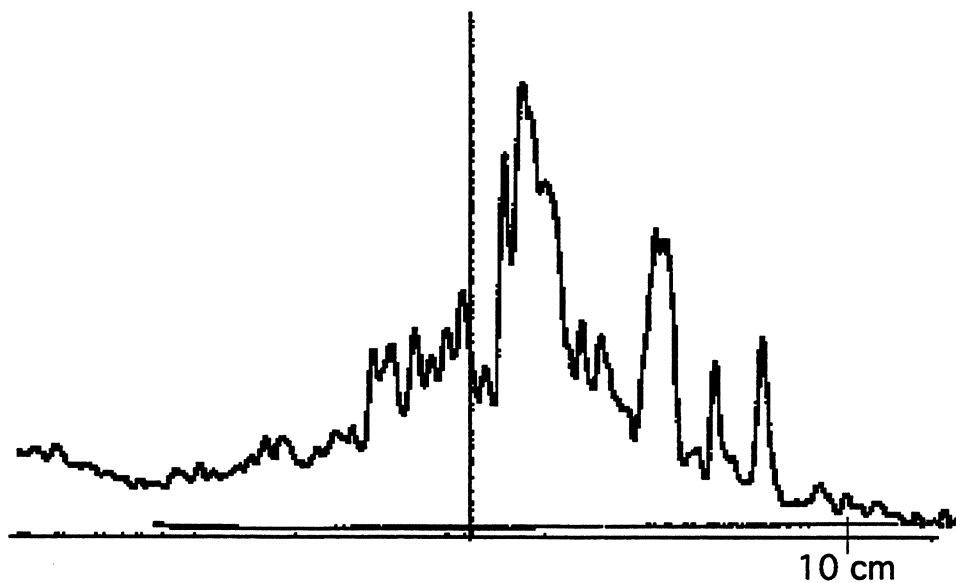
En gardant à l'esprit cette "distorsion" introduite par la méthode de mesure, examinons un échantillon des mesures de $I_{\text{diff}}(x', R_{i,j})$ effectués.

Les différents paramètres du montage sont très proches des conditions d'opération au sein de CREHOS. A titre de comparaison, toutes les mesures reproduites ci-après ont la même échelle, et ont été effectuées avec un laser Argon+, en incidence normale, $y=5$ cm, $\ell=10$ cm.

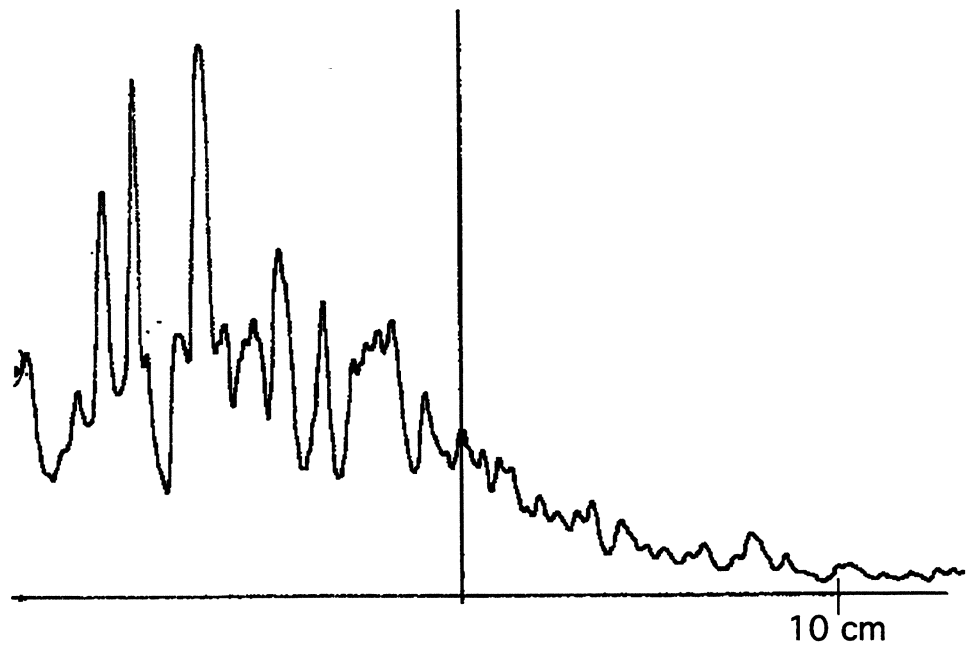
Revêtement bitumineux usé (réel)



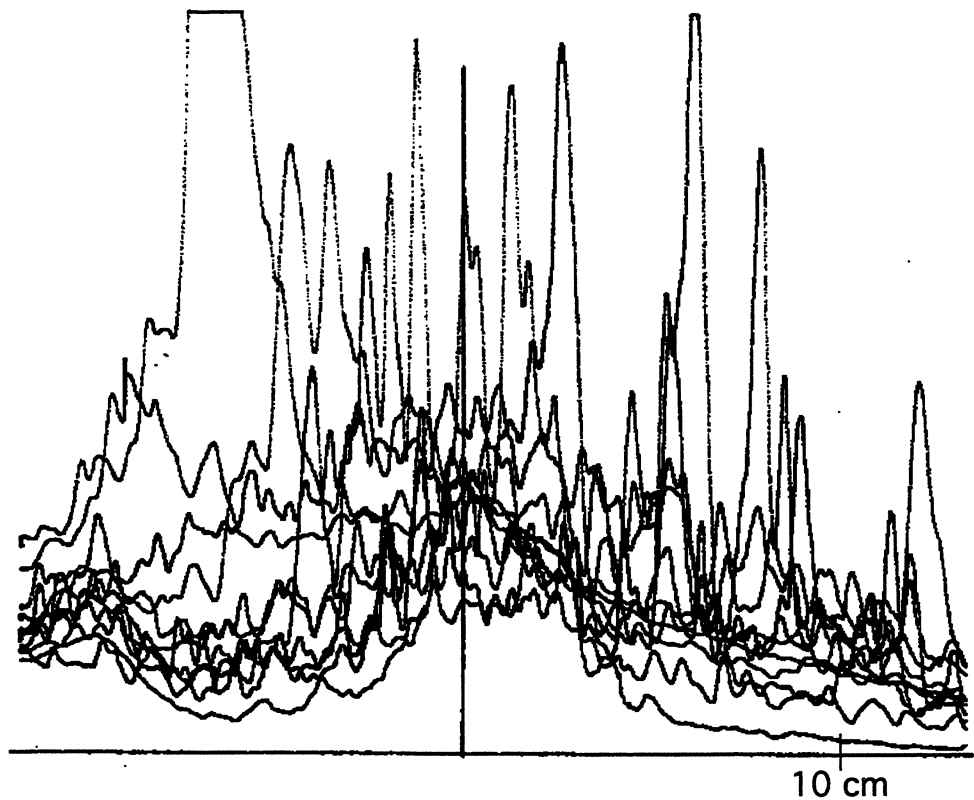
Route saine. Point #1. Ce type de distribution est le plus fréquent. Plusieurs petits lobes partent dans "toutes les directions".



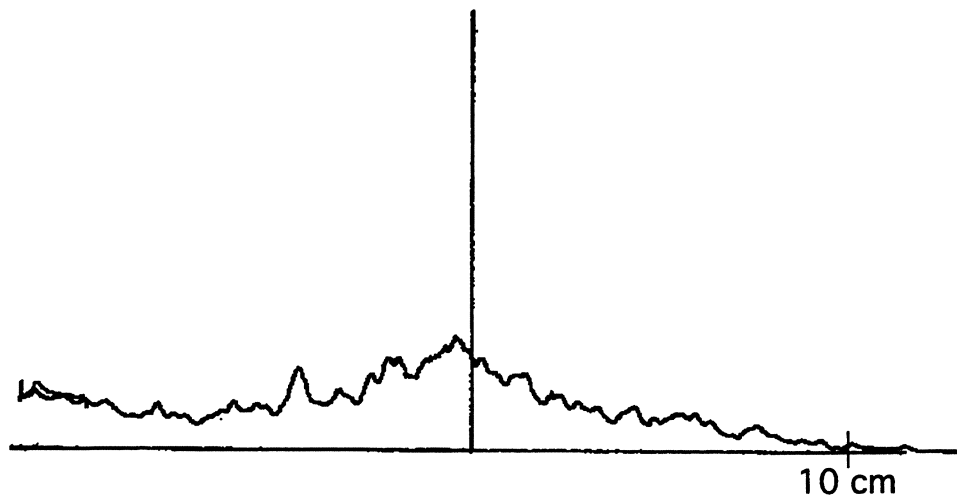
Route saine. Point #2, à 1 mm du point #1. On remarque un lobe plus important vers la droite.



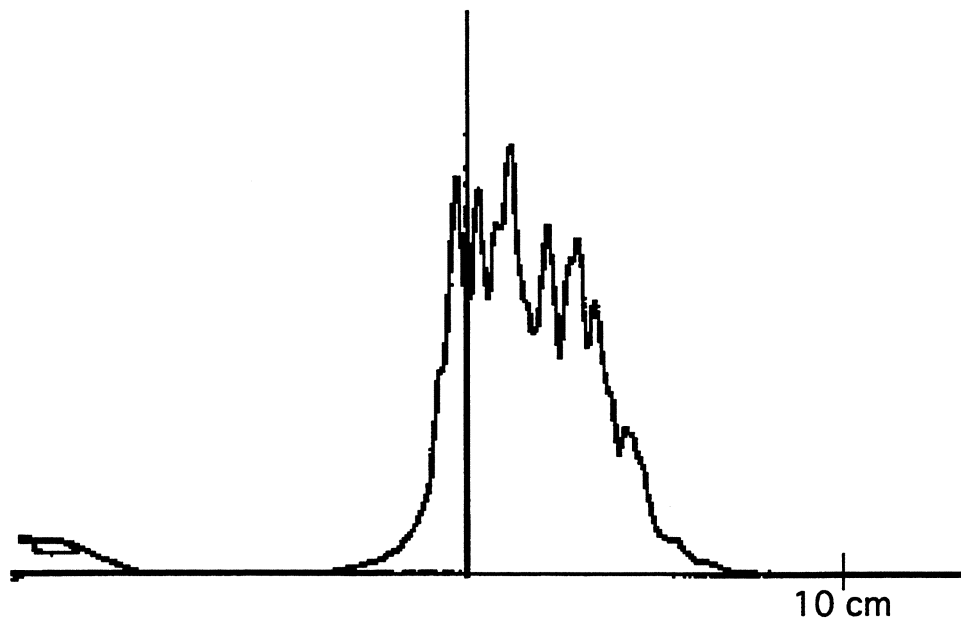
Route saine. Point #3, à 5mm du point #1. Granulat "blanc". On remarque un lobe très marqué sur la gauche.



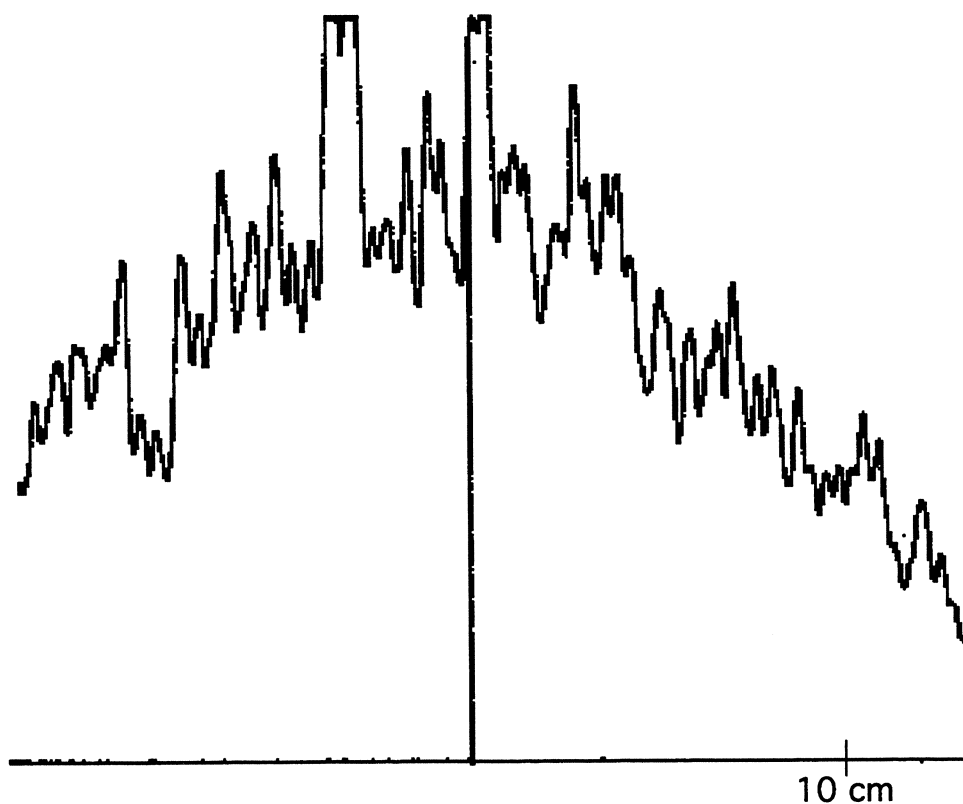
Route saine. Graphe cumulatif sur 10 points dans une zone de 3 cm de diamètre. On trouve des lobes dans toutes les directions.

La fissure (revêtement bitumineux)

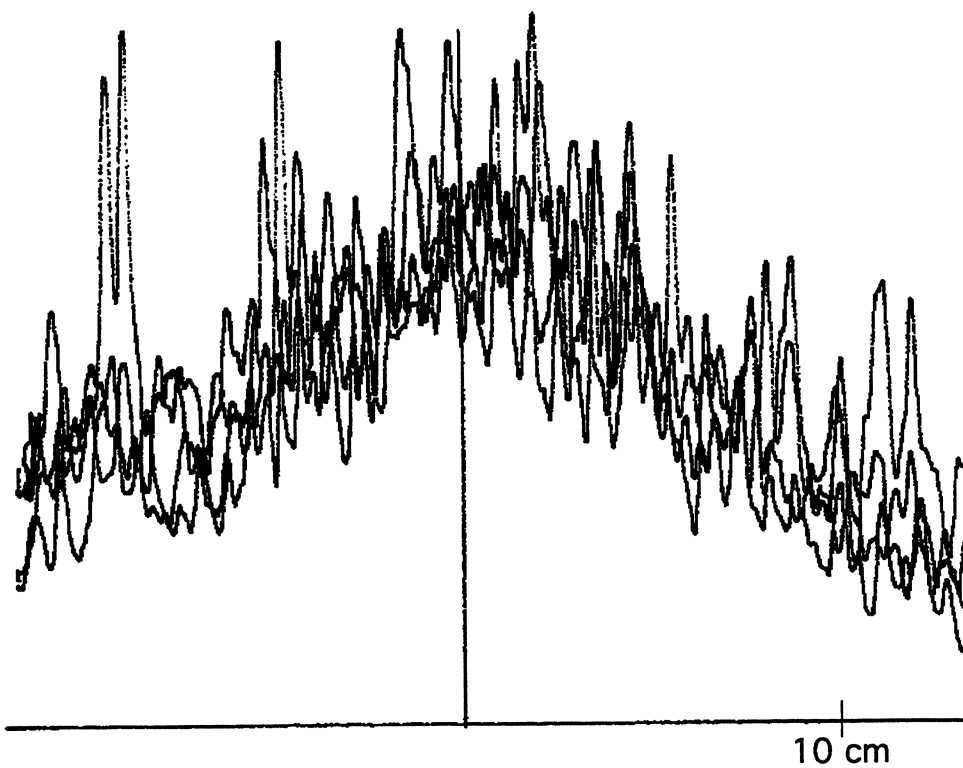
Fissure fine (<1mm). Très peu de lumière est rétrodiffusée.



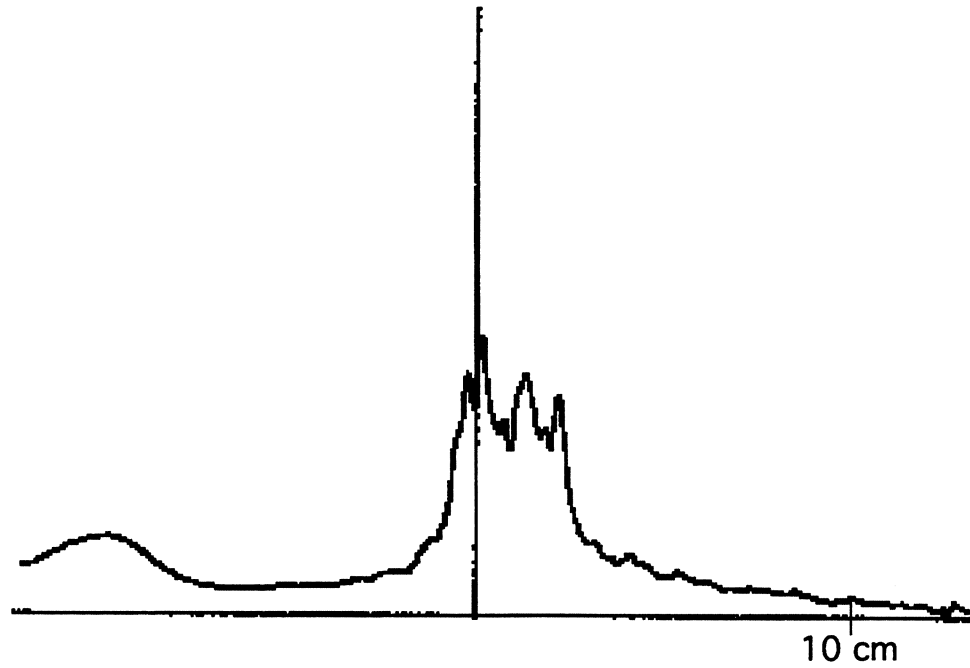
Fissure de 2mm de largeur. Une rétrodiffusion a lieu, mais sous un angle fermé et bien délimité.

Eprouvette de laboratoire en béton (non usé)

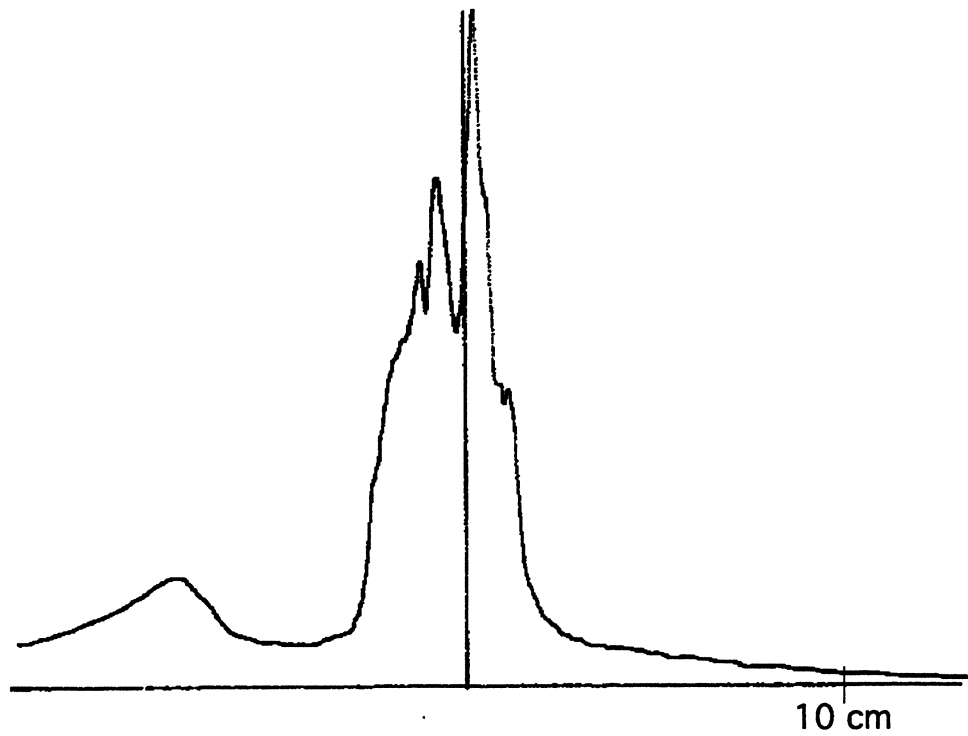
Eprouvette saine. Distribution typique, très fréquente. Le béton étant plus clair que le bitume, le niveau moyen est plus élevé.



Eprouvette saine. Mesure cumulée sur 4 points voisins. Aucune direction privilégiée n'apparaît.

La fissure (béton)

Fissure de 0.3 mm de largeur. Faible intensité rétrodiffusée, très localisée.



Fissure de 0.6 mm de largeur. La rétrodiffusion est importante, mais très localisée.

14.4. Conclusions

- ◆ Compte tenu de la "distorsion" introduite par la mesure linéaire, les résultats sont tout à fait conformes à l'évaluation qualitative du chapitre précédent. Le caractère "extrêmement aléatoire" de l'intensité rétrodiffusée est donc confirmé, tant au niveau de speckles que de $\bar{g}$. Les speckles sont clairement visibles sur les courbes (pics d'intensité et zones sombres).
- ◆ Conformément à [14.5.], $I_{\text{diff}}(x, R_{i,j})$ décroît fortement pour $|x| \gtrsim 15 \text{ cm}$.
- ◆ Il est impossible de définir une zone fixe Δx (et Δy) *restreinte* qui puisse être considérée comme représentative de l'intensité réfléchie pour tous les points.
- ◆ La plus grande partie de $I_{\text{diff}}(x, R_{i,j})$, que l'on peut considérer comme *représentative*, est distribuée *aléatoirement* à l'intérieur d'une *zone étendue* $(\Delta x, \Delta y) \approx 30 \times 30 \text{ cm}$, centrée sur $R_{i,j}$. L'information sur l'appartenance probable de $R_{i,j}$ à une fissure est contenue dans cette zone:

$$I_{\text{diff}}(\Delta x, \Delta y; R_f) \neq I_{\text{diff}}(\Delta x, \Delta y; R_s) \quad \forall R_{i,j} \quad \text{ssi } \Delta x, \Delta y \approx 30 \text{ cm} \quad [14.6.]$$

- ◆ ◆ Malgré ces problèmes, l'intensité rétrodiffusée par une fissure est en général clairement discernable de celle rétrodiffusée par le revêtement sain. *Le mesurable existe.*

La lumière rétrodiffusée par la fissure diffère de celle rétrodiffusée par le revêtement sain dans les paramètres suivants:

- ◇ $I_{\text{diff}}^T(R_f) << I_{\text{diff}}^T(R_s)$
- ◇ $\Omega(R_f) < \Omega(R_s)$
- ◇ $\bar{g}(R_f) \equiv (0,0)$ tandis que $\bar{g}(R_s)$ est aléatoire sur presque toute la demi-sphère.

Ces propriétés constituent la "signature" de la fissure.

15. COLLECTER LA LUMIERE RETRODIFFUSEE

15.1. Le problème

Nous avons vu au chapitre précédent qu'en raison de la rugosité particulière du revêtement routier (notamment bitumineux), il n'existe pas une direction de rétrodiffusion privilégiée, et donc pas de zone de détection restreinte [14.6.]. De plus, en raison de la nature très locale de la perturbation à mesurer, nous ne pouvons nous contenter ni d'une moyenne sur plusieurs points ni d'un échantillonnage spatial.

Cela signifie qu'un détecteur de surface restreinte placé dans une position fixe et pré-définie par rapport aux points éclairés ne saurait fournir une mesure représentative ni de $I_{\text{diff}}^T(R_{i,j})$, ni de $I_{\text{diff}}(\vec{u}, R_{i,j})$, ni de $\Omega(R_{i,j})$ ([14.1.] et [14.2.]), et ne permettrait donc pas de discerner les points appartenant au revêtement sain des points appartenant aux fissures.

Détection optimale

Une stratégie de détection efficace doit être à même de fournir un signal différent pour les points sains et les points appartenant aux fissures, et ceci pour chacun des points indépendamment, et avec un taux d'erreur le plus faible possible. D'après les considérations du chapitre précédent, une stratégie de détection efficace doit donc:

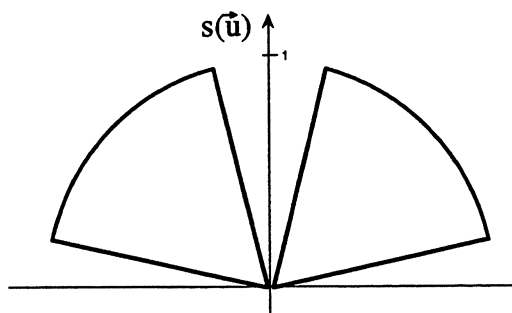
- ◇ détecter l'intensité rétrodiffusée en intégrant sur un Ω le plus grand possible (car les lobes peuvent être orientés dans n'importe quelle direction);
- ◇ être désensibilisée pour les $\vec{g}$ proches de la normale au revêtement (car c'est dans cette direction qu'ont lieu les éventuelles rétrodiffusions indésirées de la part de points appartenant à des fissures).

soit $I_{\text{det}}(R_{i,j})$ l'intensité détectée

détection optimale:

$$I_{\text{det}}(R_{i,j}) = \int_{\omega_1} \int_{\omega_2} s(\vec{u}) \cdot I_{\text{diff}}(\vec{u}, R_{i,j}) d\vec{u} \quad [15.1.]$$

avec ω_1 et ω_2 , les plus grands possibles
 $s(\vec{u})$ un facteur de pondération à l'allure suivante



Le collecteur idéal

Une solution facile à ce problème serait constituée par une surface de détection très étendue, du type cellule photovoltaïque, posée à une dizaine de cm du sol le long de toute la ligne de balayage.

Malheureusement, les détecteurs de ce type sont beaucoup trop lents pour notre application, qui requiert un temps de réaction de l'ordre de la dizaine de ns.

Les détecteurs rapides ayant des surfaces de détection restreintes, il est donc nécessaire de *collecter* la lumière rétrodiffusée. Afin d'optimiser la détection au sens des critères énoncés précédemment ([15.1.]), les caractéristiques requises pour le collecteur sont:

- ◇ Concentrer sur une surface restreinte P (quelques cm²) la lumière émise successivement par une série des sources ponctuelles disposées le long d'une droite de plusieurs m de longueur (2 à 4m).
- ◇ Pour chacune des sources, susceptibles d'émettre des lobes aléatoires de champs de speckles, la collection doit se faire indépendamment de la direction des lobes, qui peut varier dans un angle Ω très ouvert.
- ◇ Maximiser la probabilité qu'un pourcentage constant η de $I_{\text{diff}}^T(R_{i,j})$ soit collecté en P indépendamment du nombre et de l'orientation des lobes et du point source:

$$p [I_{\text{det}}(R_{i,j}) = \eta \cdot I_{\text{diff}}^T(R_{i,j})] \approx 1 \quad \forall R_{i,j} \quad [15.2.]$$

Ce qui revient à dire que ([14.2.]

$$I_{\text{det}}(R_{i,j}) = \eta \cdot \rho(R_{i,j}) \cdot I_{\text{in}} \quad [15.3.]$$

et ne dépendrait donc plus directement de la rugosité mais mettrait essentiellement en évidence les effets de diffusion multiple liés à la fissure.

Remarquons également que la valeur de η n'est pas ici très importante: elle peut même être faible, pourvu que la probabilité p soit élevée. Nous ne cherchons pas à récolter une intensité élevée, mais une intensité significative.

- ◇ Implémenter la pondération $s(\vec{u})$ décrite par [15.1.], pour mettre en évidence la "signature" de la fissure. Ceci implique de filtrer les lobes dont l'orientation est très proche de la normale au revêtement, qui sont généralement dus à une réflexion parasite produite par une fissure. Ce filtrage ne devrait pas trop affecter la mesure, car en général les points de revêtement sain aptes à produire un lobe dans cette direction, produisent de nombreux autres lobes dans toutes les directions.

15.2. La solution proposée

L'élément le plus apte à réaliser simultanément les quatre fonctions optiques décrites ci-dessus est un *collecteur holographique multifacettes*. Il consiste en deux éléments plats de 4m x 20 cm posés de part et d'autre de la ligne de balayage, à une distance d'environ 10 cm du sol (voir §16.2.).

Chacun de ces deux éléments comporte plusieurs milliers de lentilles holographiques, toutes différentes, qui travaillent de manière coopérative de façon à réaliser la fonction optique complexe décrite ci-dessus. Les caractéristiques de ce collecteur peuvent se moduler en jouant sur la taille, la position et la fonction optique de chacune des facettes. L'étude des algorithmes de distribution des facettes permet d'obtenir différents types de pavage, qui offrent une grande souplesse dans stratégies de détection.

Ce collecteur de type nouveau, qui a fait l'objet d'un brevet, peut avoir des applications en dehors du cadre de CREHOS, notamment dans les systèmes de mesure de grandes dimensions et/ou impliquant des surfaces de mauvaise qualité optique (béton projeté, briques, roche, métal non poli, plastiques, papiers divers, etc.).

16. LE COLLECTEUR HOLOGRAPHIQUE MULTIFACETTES

16.1. Les hologrammes multifacettes

Afin de mieux situer cette partie du travail, ouvrons une brève parenthèse de caractère général sur les *hologrammes multifacettes*, ou *éléments optiques holographiques multifacettes*, qui seront abrégés par MFHOE dans la suite. Ces mots désignent

toute structure diffractive dont la fonction optique résulte de l'effet d'ensemble des fonctions optiques réalisées par plusieurs réseaux élémentaires indépendants. Sont considérés indépendants des réseaux délimités par une discontinuité de modulation.

Autrement dit, il s'agit d'éléments optiques holographiques composés de plusieurs facettes distinctes. Le fait d'admettre des discontinuités de modulation est à la fois un avantage et une limitation, car d'une part il n'est plus nécessaire d'assurer la cohérence entre les différents éléments, qui sont donc réalisables individuellement, mais d'autre part, lors de la restitution, leur effet synergique se fait essentiellement en amplitude, car une exploitation en phase deviendrait délicate, voire injustifiée¹. La distribution de phase souvent aléatoire entre les facettes peut au contraire être source de problèmes (interférences indésirables).

Un des pionniers de cette technique a sans doute été le nord-américain S. K. Case, qui dans un article de 1981 proposait l'utilisation d'un hologramme multifacettes pour redistribuer l'intensité d'un faisceau gaussien afin d'éclairer de manière homogène et sans trop de pertes un objet comportant de grands trous².

Les MFHOE peuvent être réalisés par enregistrement analogique direct³, ou calculées et gravées par des techniques de CGH (Computer Generated Holograms). Parmi ces techniques, citons la gravure par faisceau d'électrons (e-beam) et la photo-lithographie, comportant chacune plusieurs variantes (hologrammes binaires à un ou plusieurs niveaux, sur Silicium, sur photorésist, par attaque chimique, par exptaxie, etc.).

Les applications⁴

- ◇ Les applications les plus répandues concernent l'holographie d'affichage (display holograms), notamment les *stéréogrammes holographiques*, statiques ou "animés". De nombreux stéréogrammes holographiques sont

¹ Pour exploiter la phase, il faudrait une cohérence entre les facettes, et d'autres techniques pourraient être mieux adaptées. On peut néanmoins imaginer des applications particulières nécessitant des facettes discontinues coopérant en phase, globalement ou par groupes.

² Lorsque l'on éclaire, par exemple, un objet torique (de face) avec un faisceau divergent, la plus grande partie de l'énergie est perdue dans la zone vide de l'objet: le multifacettes de Case permettait de diriger toute la lumière sur le "bord" du tore.

³ Généralement facette per facette, ou par groupe de facettes.

⁴ La liste qui suit est loin d'être exhaustive et détaillée: elle n'est donnée ici qu'à titre introductif.

réalisés commercialement de manière analogique depuis les années '70. Ces MFHOE connaissent actuellement un regain d'intérêt grâce aux progrès des CGH, notamment dans le rendu tridimensionnel des données provenant de scanners médicaux.

- ◊ Un autre domaine de choix pour l'application des MFHOE est la *connectique* : éléments de fan-out ou de fan-in, distributions de signaux entre unités électroniques ou entre circuits intégrés, etc. Ces MFHOE sont le plus souvent réalisés par des techniques d'optique intégrée.
- ◊ De nombreuses implémentations d'*optical computing* nécessitent également de MFHOE, notamment celles basées sur les réseaux de neurones ou sur des techniques apparentées.
Ces applications, qui font actuellement l'objet de recherches, requièrent parfois des MFHOE rapidement reconfigurables qui sont généralement réalisés par des modulateurs spatiaux de lumière à cristaux liquides (SLM). Les performances optiques des SLM sont pour l'instant assez modestes (essentiellement en termes de résolution spatiale), mais leur évolution récente laisse présager des améliorations considérables.
- ◊ La *lumière structurée* constitue un domaine d'application moins répandu, mais non moins intéressant. Nous trouvons ici des MFHOE pour des systèmes d'éclairage particuliers (tels que celui de S. K. Case cité plus haut), des éléments ad hoc pour instruments de mesure de forme ou de déformation, des composants de base pour systèmes de contrôle de qualité ou pour des systèmes de vision (machines, robotique).
- ◊ Enfin, les MFHOE permettent de réaliser des *fonctions optiques particulières*, souvent complexes et difficiles ou impossibles à réaliser par des techniques conventionnelles. C'est dans cette classe d'applications que se trouve le collecteur pour CREHOS.

Les MFHOE peuvent être classés en deux groupes:

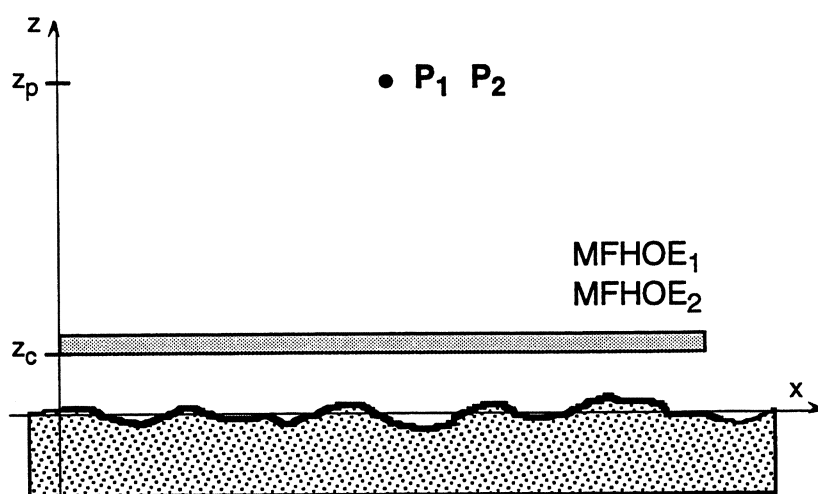
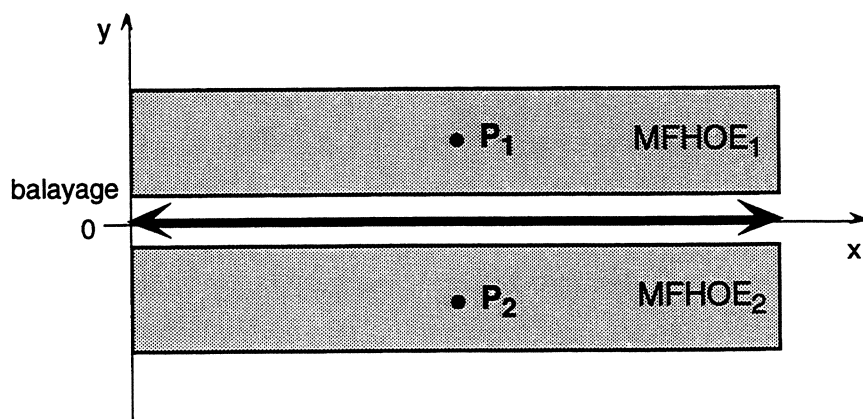
- A- Les MFHOE de petites dimensions, ayant des micro-facettes (connectique, optical computing).
Ils requièrent en général une grande précision d'alignement des facettes et des ondes diffractées. Les techniques de réalisation les mieux adaptées sont les CGH.
- B- Les MFHOE de grandes dimensions, ayant des facettes de l'ordre du mm (stéréogrammes holographiques, lumière structurée, recherche en optical computing, grands éléments dédiés).
Ici une précision d'alignement modeste est généralement suffisante, et les techniques d'enregistrement analogique direct sont bien adaptées (et beaucoup moins onéreuses).

16.2. Principe du collecteur pour CREHOS

Le collecteur multifacettes pour CREHOS, qui rentre typiquement dans le groupe B, est basé sur le principe suivant.

Deux hologrammes multifacettes MFHOE₁ et MFHOE₂ sont placés de part et d'autre de la ligne de balayage, sur toute sa longueur et à une distance

z_c d'une dizaine de cm de la route. Deux détecteurs seront placés en P_1 et P_2 , à une hauteur $z_p(P_1)=z_p(P_2)=60$ cm en dessus du centre de chaque MFHOE.



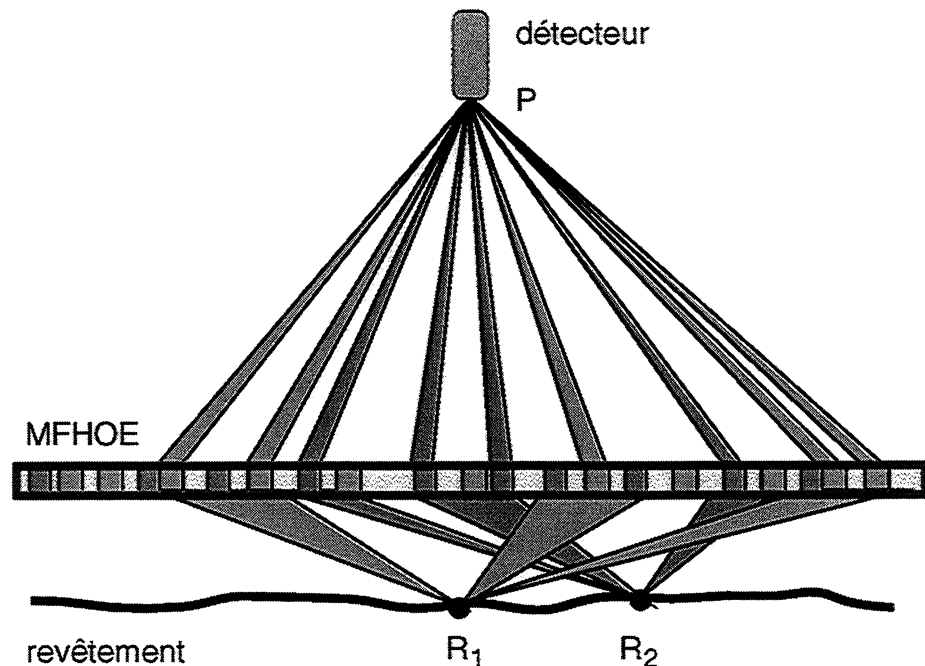
Chaque MFHOE est constitué de plusieurs milliers de facettes (ou HOE élémentaires) de quelques mm de côté et toutes différentes. Chaque facette agit comme lentille holographique hors axe, en faisant l'image d'un point R_i en P_1 ou en P_2 ¹. Il s'agit en quelque sorte d'un "lenslet array" où toutes les lentilles sont hors axe, et toutes le sont selon des angles différents.

¹ Le balayage étant monodimensionnel, et le collecteur agissant de la même façon pour tous les balayages, nous considérerons ici uniquement une série des points le long d'une ligne. $R_{i,j}$ devient donc R_i .

L'idée de base qui régit la distribution de ces HOE élémentaires est la suivante:

La lumière émise par n'importe quel point R_i et arrivant à un endroit quelconque du MFHOE, doit y trouver au moins n facettes aptes à la diffracter en P . Autrement dit, les facettes doivent être distribuées de manière à ce que la lumière, d'où qu'elle vienne et où qu'elle arrive, puisse toujours trouver un certain nombre de "bonnes" facettes qui vont la diffracter en P .

Le dessin ci-dessous illustre ce principe: la lumière rétrodiffusée par le point R_1 est représentée en vert, ainsi que les facettes "bonnes" pour le point R_1 . De même, sont représentés en bleu la lumière émise par R_2 et les facettes "bonnes" pour ce point.

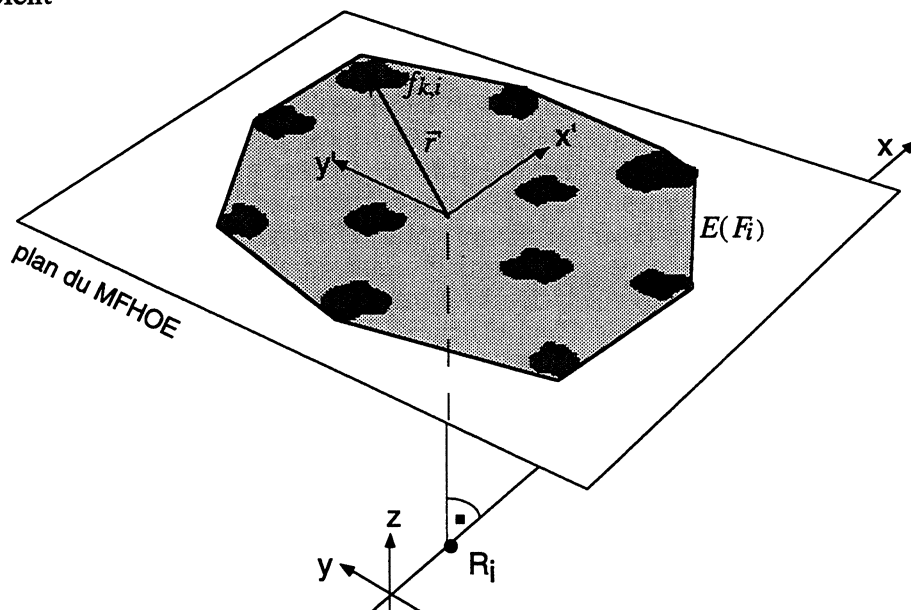


Le problème est de trouver la disposition des facettes qui puisse au mieux approcher les exigences formulées au § 15.1.

16.3. Algorithme de disposition des facettes

L'action des deux MFHOE étant parfaitement symétrique, nous ne considérerons par la suite que l'un d'eux. Définissons d'abord quelques paramètres importants.

Soient



$f_{k,i}$ la surface d'une facette k diffractant en P la lumière provenant du point R_i ;

$\vec{r}(f_{k,i})$ la position (x',y') du centre de la facette $f_{k,i}$ dans un repère lié au MFHOE et centré sur le point R_i ;

F_i afin d'alléger la notation, nous regroupons sous le même symbole F_i trois aspects d'un même objet. Suivant le contexte, F_i sera considérée comme une surface, un ensemble ou une fonction, notamment:

- la *surface* totale occupée par toutes les facettes aptes à diffracter en P la lumière émise par R_i ;

$$F_i = \bigcup_k f_{k,i}$$

- la *famille* des facettes R_i , ensemble qui regroupe toutes les facettes "bonnes" pour R_i ;
- la *fonction de pavage* décrivant la *forme* de F_i , c'est à dire l'arrangement, le "pattern" des facettes $f_{k,i}$;

$E(F_i)$ l'enveloppe de F_i , c'est à dire la plus petite surface convexe qui englobe toutes les facettes $f_{k,i}$.

Tout le problème réside dans la détermination des fonctions de pavage F_i , de manière à satisfaire les critères de détection optimale formulés au § 15.1. Ces critères impliquent des contraintes topologiques, qui vont nous guider dans la détermination du pavage optimal. Examinons-les.

Contraintes de pavage

◆ *L'union de toutes les F_i doit fournir un pavage complet*

On entend par pavage complet un pavage ne présentant ni "trous" ni superpositions de facettes. Des portions inutilisées du MFHOE en réduiraient évidemment le rendement global. Quant aux superpositions, les techniques holographiques permettraient de faire coexister dans une même surface (voir un même volume) différents HOE (réseaux multiples), mais dans notre cas, comme nous le verrons plus loin, cela conduirait à superposer un nombre important de réseaux (10 à 20), ce qui serait préjudiciable à leur efficacité.

◆ *Probabilité de détection $p(R_i) \approx 1$ sur un Ω le plus grand possible (voir chapitres 14 et 15).*

Il faut disposer des facettes sur une surface importante autour de R_i . $E(F_i)$ doit donc être assez étendue. Par ailleurs, suite aux considérations du §14.4., l'intensité collectée par une facette trop éloignée (ayant $|\vec{r}| > |\vec{r}|_{\max}$) serait négligeable. Il serait donc inutile d'implémenter un $E(F_i)$ trop grand.

Définissons $E_{opt}(F_i)$ comme étant l'enveloppe de taille optimale, c'est à dire la plus petite taille garantissant une probabilité élevée de récolter une intensité représentative.

◆ *Le même MFHOE doit fonctionner pour tous les R_i .*

Pour conjuguer ces trois premières contraintes, il faut "mélanger" le long de l'MFHOE les facettes des différentes familles, de manière à ce que les différentes familles "s'emboîtent". Les points R_i se trouvant le long d'une droite parallèle à x , "l'emboîtement" doit se faire par translation le long de x' . Les enveloppes des F_i doivent donc se superposer dans la direction x' sans que les $f_{k,i}$ ne se superposent.

◆ *La probabilité de détection $p(R_i)$ doit être la même pour tout R_i .*

Le collecteur doit répondre de la même façon pour tous les points du revêtement. Cette condition implique que toutes les familles F_i aient la même forme et donc que tous les F_i soient identiques, ou du moins très similaires.

◆ *La fonction de pavage F_i doit implémenter la pondération $s(\vec{u})$ ([15.1.]).*

La pondération $s(\vec{u})$ sur l'intensité collectée par une famille de facettes assure le même poids à chaque lobe, indépendamment de son angle, réalise

un filtrage des lobes proches de la normale au revêtement, et limite la détection à l'ouverture maximale $\Omega_{\max}$. Les fonctions de pavage doivent dans la mesure du possible implémenter cette pondération.

$s(\vec{u})$ est décrite en [15.1.] dans sa forme polaire. Elle peut s'exprimer par le produit d'une fonction constante $c(\vec{u})$ et d'une fonction de masquage $m(\vec{u})$.

$$s(\vec{u}) = c(\vec{u}) \cdot m(\vec{u})$$

avec $c(\vec{u}) = 1$

$$m(\vec{u}) = \begin{cases} 0 & \text{pour } \vec{u} \in \{[(0,0), \Omega_{\min}] \cup [\Omega_{\max}, (\pi/2, \pi/2)]\} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le collecteur multifacettes étant plat et parallèle au revêtement, $s(\vec{u})$ doit être exprimée en coordonnées cartésiennes dans le repère lié au MFHOE, sous la forme de $s(x',y') = c(x',y') \cdot m(x',y')$.

Pour obtenir l'équivalent de $c(\vec{u}) = 1$, la pondération $c(x',y')$ doit ici compenser deux effets: d'une part la fonction d'éclairement E introduite par la géométrie du collecteur ([14.5.]), et d'autre part le coefficient de réflexion R sur l'hologramme, dû à sa nature vitreuse, qui dépend de l'angle d'incidence. La pondération $c(x',y')$, normalisée, peut ainsi garantir un poids uniforme pour tous les lobes.

donc $c(x',y') \propto \frac{1}{E} \cdot \frac{1}{1-R}$ [16.1.]

D'après [14.5.]:

$$\frac{1}{E} = \frac{y'^2 + x'^2 + z_c^2}{c_n} \cos^{-1} \left[\arctan \left(\frac{\sqrt{y'^2 + x'^2}}{z_c} \right) \right] \quad [16.2.]$$

avec $c_n = z_c^2$ une constante de normalisation

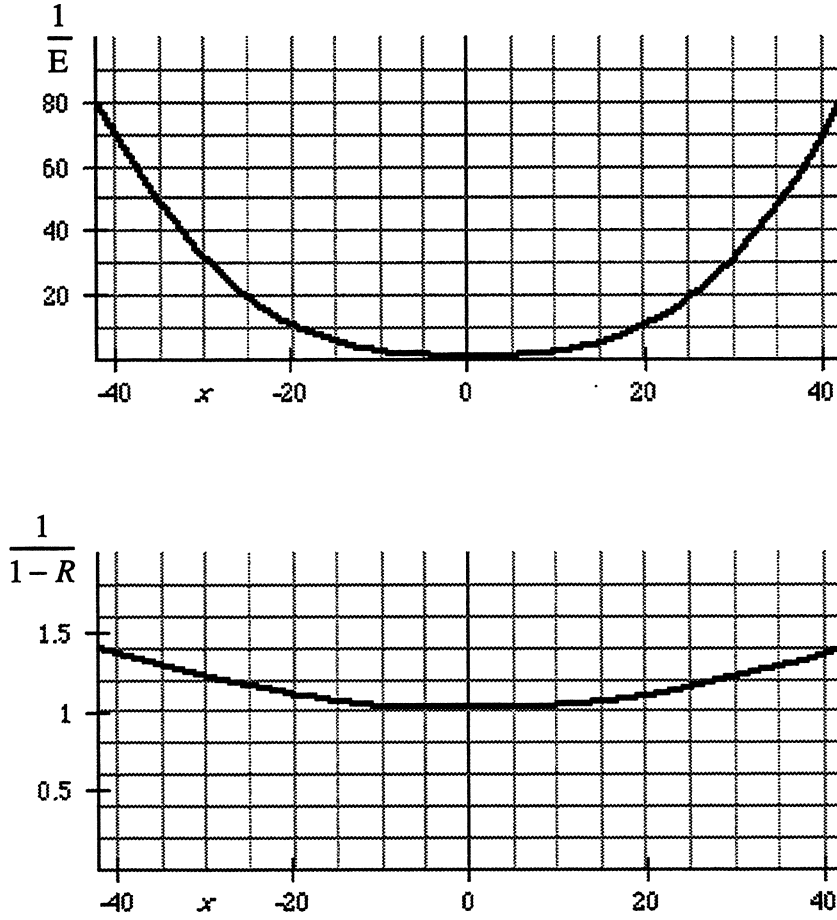
En ce qui concerne le coefficient de réflectivité qui dépend également de la polarisation, il est donné par les formules de Fresnel. Nous considérons ici que la route provoque une dépolarisation aléatoire de la lumière de distribution uniforme, donc

$$R = \langle R \rangle = \frac{1}{2}(R_{\perp} + R_{\parallel}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \right) \quad [16.3.]$$

où θ_i, θ_t resp. l'angle d'incidence et l'angle réfracté

avec $\theta_i = \arctan \left(\frac{\sqrt{y'^2 + x'^2}}{z_c} \right)$ et $\theta_t = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)$

L'allure de $\frac{1}{E}$ et de $\frac{1}{1-R}$ est illustrée ci-dessous, pour $y=0$ et $z_c=10\text{cm}$.



Avec [16.1.], [16.2.] et [16.3.] nous obtenons donc pour la pondération:

$$c(x', y') = \frac{y'^2 + x'^2 + z_c^2}{z_c^2 \cdot \cos(\arctan \theta_i)} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \right) \right]^{-1} \quad [16.4.]$$

avec

$$\theta_i = \arctan \left(\frac{\sqrt{y'^2 + x'^2}}{z_c} \right)$$

$$\theta_t = \arcsin \left\{ \frac{n_1}{n_2} \sin \left[\arctan \left(\frac{\sqrt{y'^2 + x'^2}}{z_c} \right) \right] \right\}$$

Quant à la fonction de masquage $m(x',y')$, elle est déduite directement des résultats expérimentaux du §14.4.

$$m(\vec{r}') = \begin{cases} 0 & \text{pour } |\vec{r}'| \in \{[0, r_{\min}] \cup [r_{\max}, \infty]\} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

avec $\vec{r}' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$

$$r_{\min} = 3 \text{ à } 6 \text{ cm}$$

$$r_{\max} = 15 \text{ à } 20 \text{ cm}$$

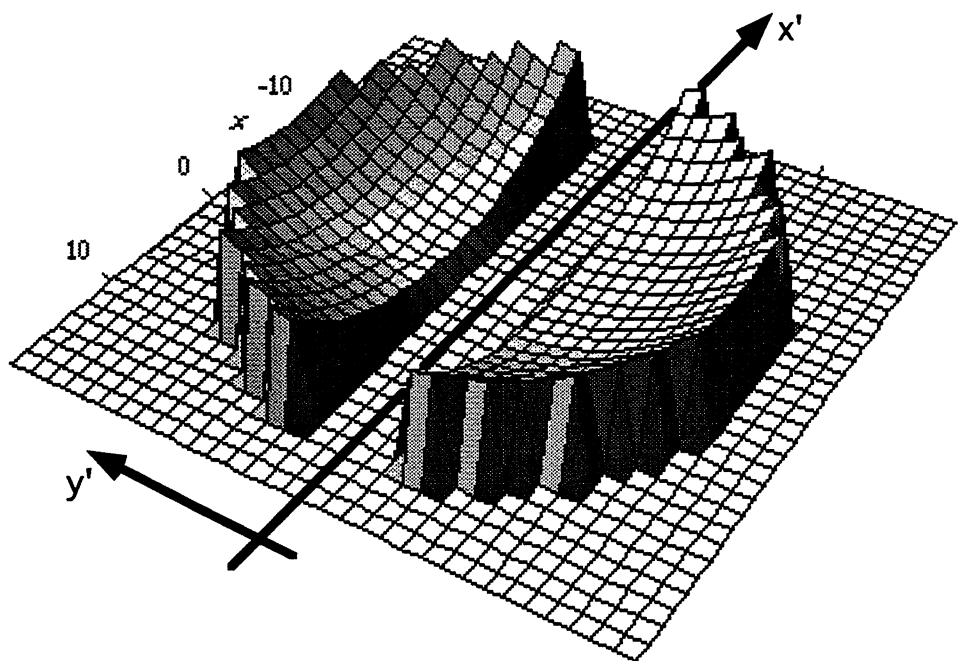
Mais de fait, la géométrie du système balayage+détection nous empêche de placer des facettes à la verticale de la ligne de balayage: toutes les valeurs $y' \approx 0$ nous sont donc interdites (il faut bien que le faisceau de balayage puisse "traverser" le collecteur). Un masquage plus réaliste serait

$$m(\vec{r}') = \begin{cases} 0 & \text{pour } |y'| \in [0, r_{\min}] \\ 0 & \text{pour } |\vec{r}'| \in [r_{\max}, \infty] \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad [16.5.]$$

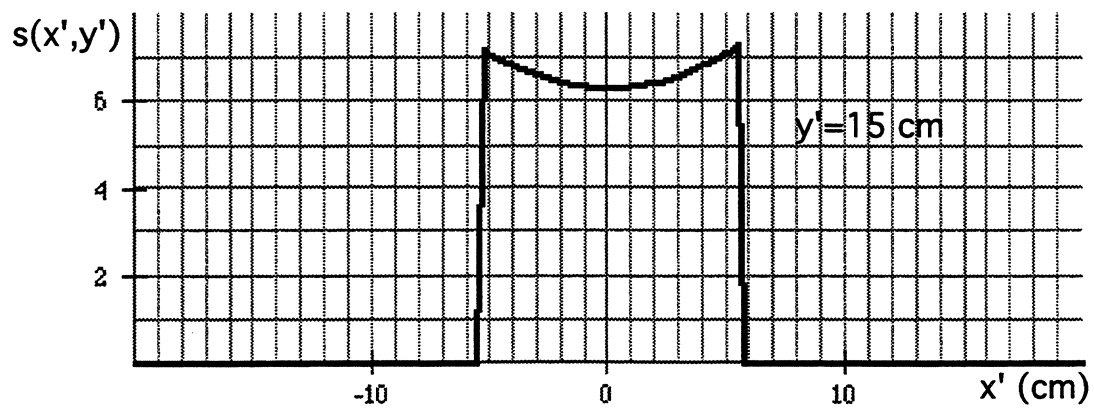
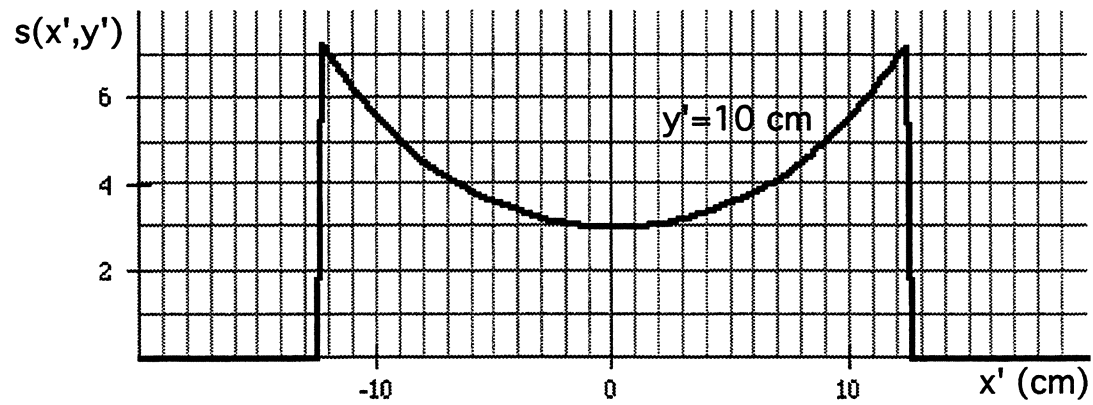
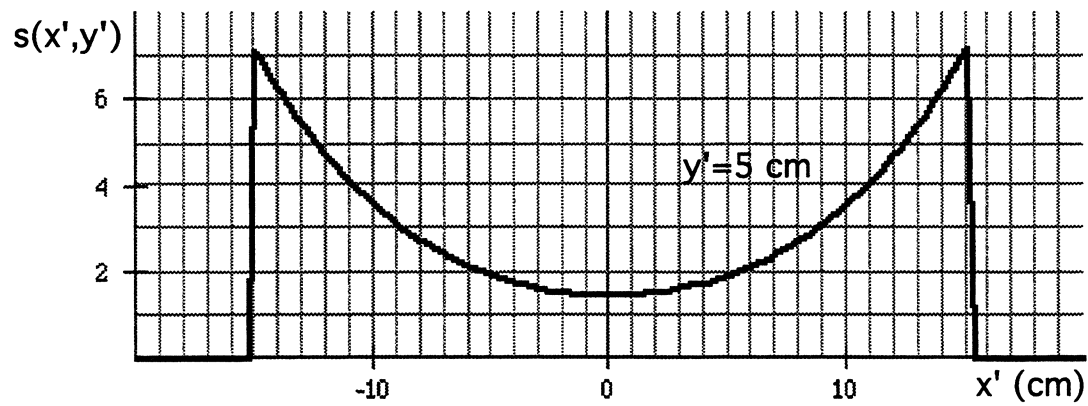
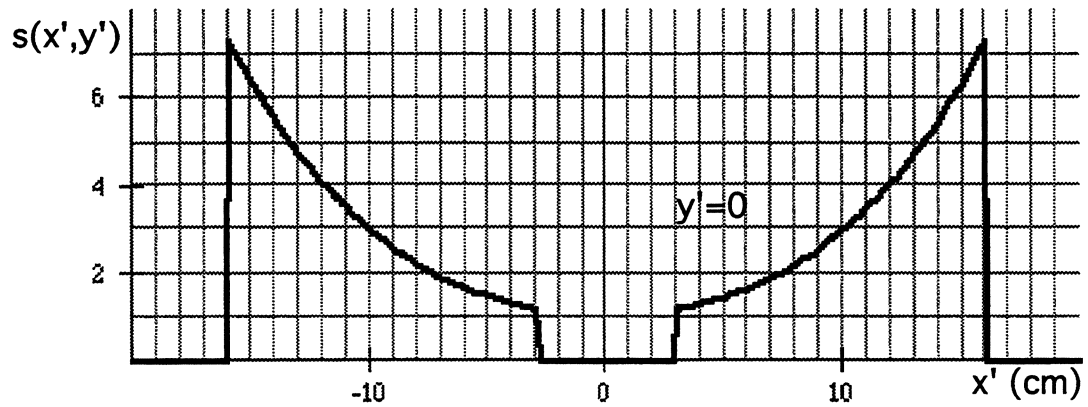
En conclusion, la fonction de pondération (pour 1 point)

$$s(x',y') = c(x',y') \cdot m(x',y') \quad [16.6.]$$

a l'allure suivante ([16.4.] et [16.5.], $z_c=10\text{cm}$):



Numériquement, voici les valeurs que prend $s(x',y')$, (pour $z_c=10$ cm)



Il faut donc que la lumière incident sur le collecteur sous l'angle maximal ait un poids quatre à six fois supérieur à celle y incident sous l'angle minimal. Pour implémenter physiquement cette pondération sur l'MFHOE, qui est un élément passif, il existe une seule alternative:

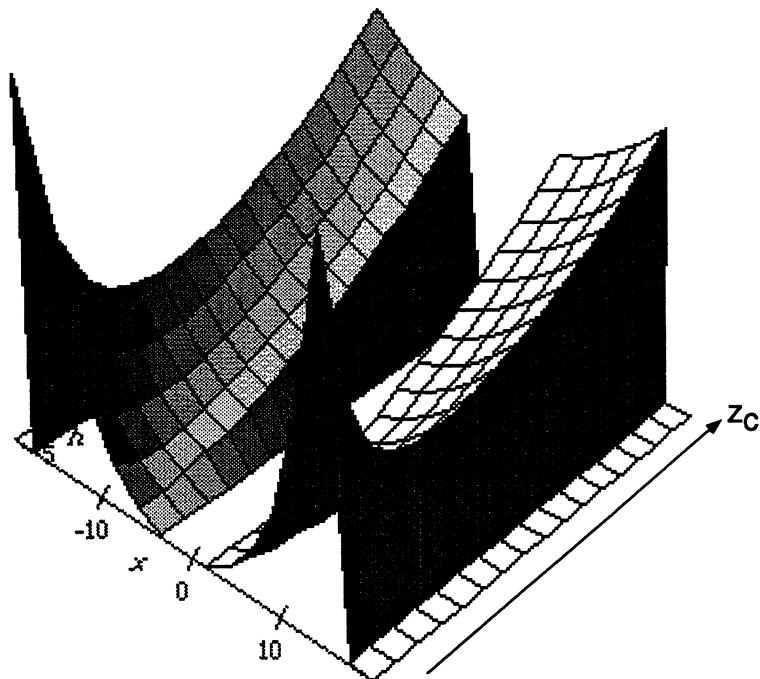
- ◇ ajuster selon $1/s(x',y')$ les rendements de diffraction des facettes distribués uniformément au sein de F_i (en baissant les rendements pour les $\vec{r}'(f_{k,i})$ petits).

ou

- ◇ distribuer au sein de F_i la densité de surface des facettes selon $s(x',y')$, toutes les facettes ayant le même rendement (plus de facettes aux bords de F_i).

La deuxième possibilité est nettement plus attrayante, car elle est d'une part plus facile à réaliser, et d'autre part n'introduit pas de pertes supplémentaires.

Par ailleurs, il est intéressant d'étudier l'allure de $s(x',y')$ pour différents z_c (distance sol-MFHOE). Le graphe ci-dessous représente $s(x',y'=0, z_c)$.



Il existe donc un z_c optimal, qui minimise la compensation nécessaire aux bords externes du masque (ici $x_{\max}=16$ cm).

En posant

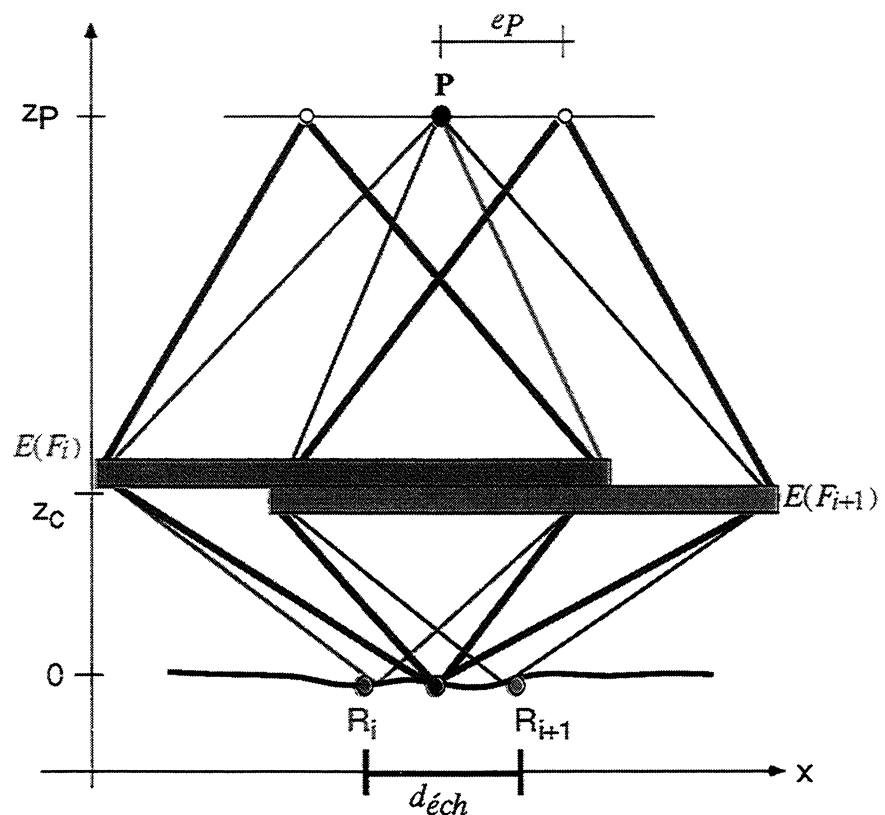
$$\frac{\partial}{\partial z_c} s(x'=16, y'=0, z_c) = 0$$

on trouve $z_c^{\text{optimal}} = 11.22$ cm

◆ *Echantillonnage spatial de R_i .*

Jusqu'ici, le nombre des points R_i , et donc le nombre des sources d'ondes sphériques à collecter se trouvant sur la ligne de balayage, a été considéré comme infini. Bien évidemment, il est impossible de loger sur l'MFHOE un nombre infini de familles de facettes: un échantillonnage spatial des R_i s'impose.

Plus concrètement, à un point R_i correspond sur le collecteur une famille de facettes F_i , et à l'échantillon suivant R_{i+1} correspond F_{i+1} . Un pourcentage η de la lumière émise par R_i et par R_{i+1} est diffracté en P ([15.3.]). Mais tous les points $R_{j,i+1[}$, auxquels ne correspond aucune famille propre, seront diffractés par F_i et par F_{i+1} dans un entourage de P.



Dans le dessin ci-dessus $E(F_i)$ et $E(F_{i+1})$ sont représentées décalées en z pour la clarté du dessin. Elles sont en réalité "emboîtées" au même z .

Soient

$d_{éch}$ la distance d'échantillonnage séparant R_i de R_{i+1} et donc aussi F_i de F_{i+1} ;

ep l' écart maximal de "focalisation" autour de P produit par les $R_{j,i+1[}$;

La distance ep représente donc le *rayon de la surface de détection minimale* ;

η_{coll} Le rendement optique global du collecteur.

En première approximation, l'écart e_P dépend du "grandissement" g :

$$e_P = g \cdot d_{éch}$$

avec
$$g = \frac{z_P - z_c}{z_c}$$

La distance d'échantillonnage $d_{éch}$ va donc être déterminée par la géométrie du montage et par la surface sensible du détecteur, qui fixe e_P . De $d_{éch}$ vont découler la densité des familles F_i et la surface attribuée à chaque famille, dont dépend le rendement du MFHOE:

$$e_P \propto d_{éch} \propto \eta_{coll}$$

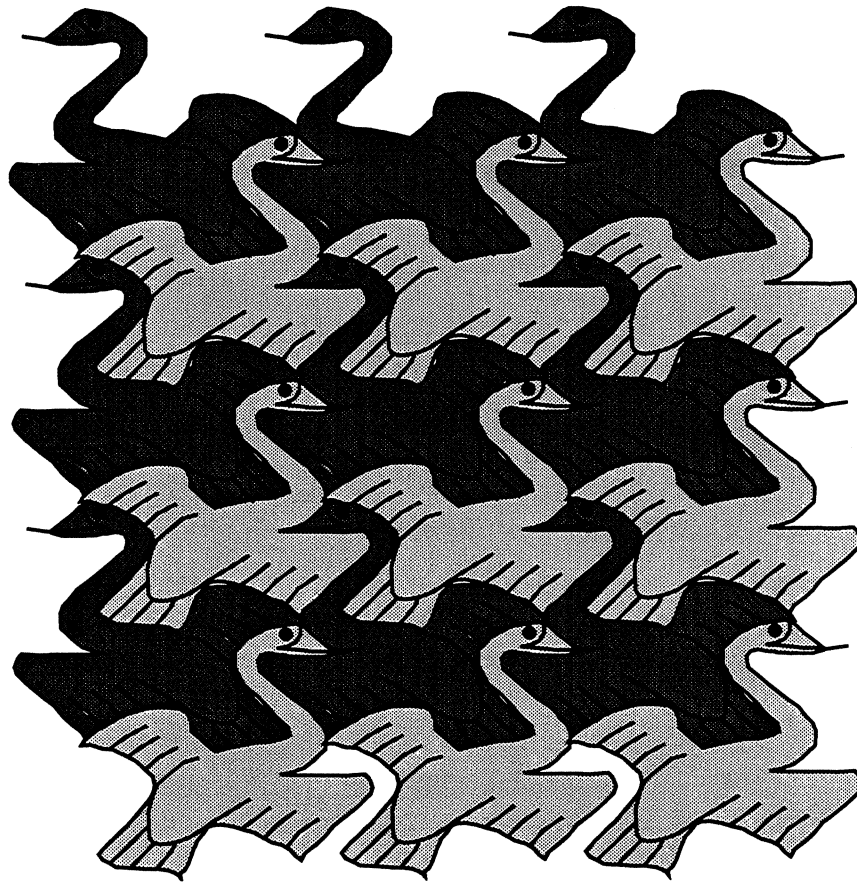
Pour que e_P soit petit, $d_{éch}$ doit l'être aussi, mais le rendement global du collecteur serait alors faible. Il faut donc trouver le bon équilibre entre un échantillonnage acceptable et un rendement global suffisant.

Conclusions

En résumant, il faut trouver une fonction de pavage F_i , c'est à dire une distribution de facettes, une *forme de famille*, telle qu'elle puisse satisfaire simultanément aux contraintes topologiques suivantes:

- ◇ Le pavage global de l'MFHOE $\bigcup_i F_i$ doit être complet;
- ◇ L'enveloppe $E(F_i)$ doit être assez étendue, de l'ordre de 15cm de rayon
- ◇ $\bigcap_i E(F_i) \neq \emptyset$ mais $\bigcap_i F_i = \emptyset$ (donc $\bigcap_{i,k} f_{k,i} = \emptyset$);
(les enveloppes des familles "s'emboîtent" sans que les facettes ne se superposent);
- ◇ $F_i \equiv F_k \forall i, k$ (toutes les familles doivent être identiques ou très similaires);
- ◇ Dans chaque famille, la densité de surface active doit approcher $s(x', y')$ (voir [16.6.]);
- ◇ L'écartement entre les familles $d_{éch}$ est imposé par la géométrie du montage et par la surface du détecteur (typiquement $2 < d_{éch} < 8$ mm);
- ◇ Les R_i se trouvant le long d'une droite parallèle à x , les F_i devront "s'emboîter" par translation selon x' .

Ce type de problème, c'est à dire la recherche d'un pavage complet, récurrent par translation et soumis à des contraintes topologiques, est admirablement illustré par les gravures de l'artiste M. C. Escher (1898 -1972), dont une étude de pavage est reproduite dans l'exemple ci-dessous¹.



Dans cette analogie, la forme de chaque F_i est un cygne. Cela diffère de notre problème simplement en ce que dans notre cas les F_i ne sont pas forcément des surfaces connexes (elles se composent d'une multitude de facettes disjointes), tandis qu'ici les F_i (les cygnes) sont des surfaces connexes.

Nous verrons au paragraphe suivant quelques solutions de pavage, certes moins esthétiques, qui répondent aux contraintes de pavage détaillées dans ce paragraphe.

¹ Dans ce dessin, la contrainte topologique est donnée par le fait que la forme doit être facilement identifiable en un objet connu.

16.4. Recherche des fonctions de pavage

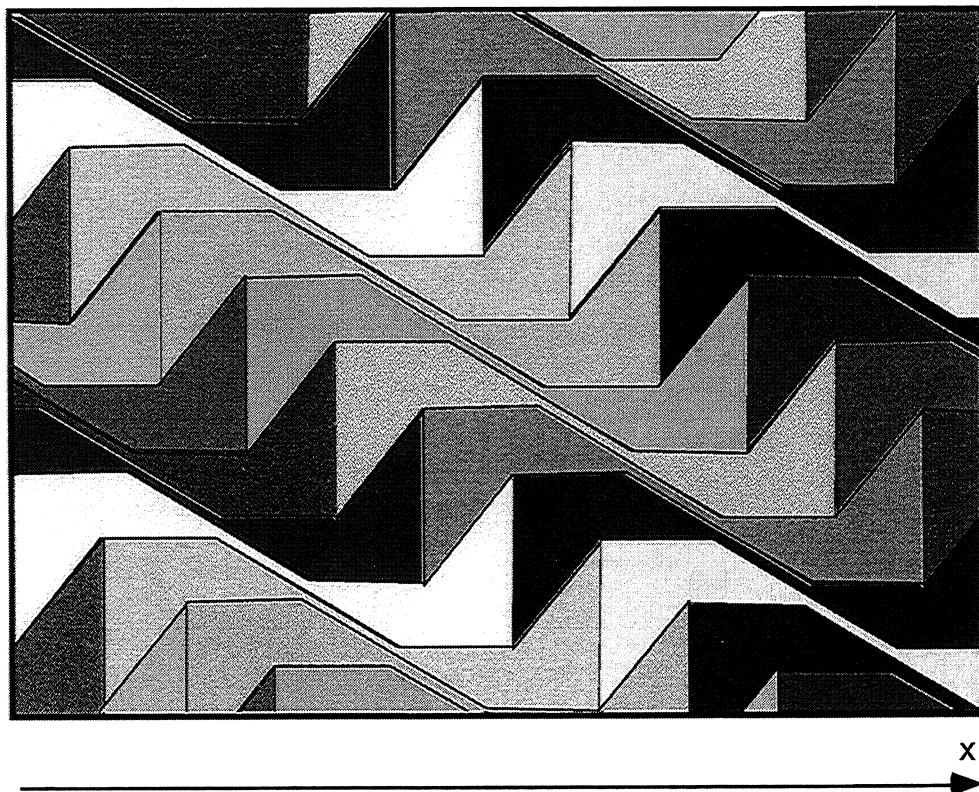
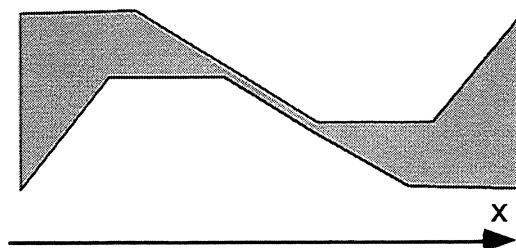
La recherche analytique ou numérique des fonctions de pavage optimales se présente très complexe, essentiellement en raison du nombre très élevé de solutions possibles. De même, la solution consistant en l'évaluation automatique de tous les pavages possibles (ou même d'une partie) n'est pas envisageable, car elle demanderait des années (voir des siècles) de temps de calcul.

Des méthodes basées sur des règles heuristiques aboutissent par contre à des résultats acceptables en un temps très limité.

On peut grouper les solutions F_i en deux groupes: les F_i connexes, et les non-connexes.

♦ Les F_i connexes

Bien que ces surfaces puissent offrir des solutions intéressantes, elles ne seront pas explorées en détail ici, car leur réalisation pratique pose des problèmes plus importants par rapport aux surfaces non-connexes. Nous nous contenterons d'en donner un exemple. Le dessin ci-dessous illustre un pavage à densité variable en x : chaque couleur représente une famille.



♦ Les F_i non-connexes

Cette méthode de pavage, plus souple et d'implémentation plus facile que pour les surfaces connexes, repose sur le principe suivant: F_i est décomposé en n surfaces élémentaires disjointes de forme simple: les facettes.

La brève étude présentée ici est basée sur des facettes élémentaires de forme carrée. Bien entendu, cette méthode peut être étendue à d'autres formes telles que, par exemple, des triangles, des rectangles, des rhomboïdes ou des hexagones, ou à des combinaisons de plusieurs formes différentes.

Examinons l'ensemble des règles heuristiques permettant de trouver facilement des solutions F_i à éléments carrés, en commençant par les pavages à densité uniforme (en négligeant donc la compensation $s(x',y')$).

16.5. Pavages à densité uniforme

La procédure graphique suivante n'est donnée qu'à titre indicatif, et il est bien clair que toute variation ou dérogation à ce modus operandi peut amener à des solutions valables, voire meilleures que les exemples reproduits ci-dessous¹.

Rappelons que les fonctions de pavage doivent "s'emboîter" par translation selon l'axe x' .

Soient

E_x	l'étendue selon x' de l'enveloppe $E(F_i)$;
$d_{éch}$	la distance séparant deux familles F_i et F_{i+1} dans la direction x' (voir §13.3., Conditions de pavage);
Nf	le taux de superposition des familles, c'est à dire le nombre de familles F_i différentes se trouvant sur une même surface du MFHOE de largeur $\Delta x = d_{éch}$;
u	l'unité de mesure de longueur, correspondant à la dimension des facettes.

- ♦ La valeur numérique de E_x et de $d_{éch}$ doit être déterminée sur la base des considérations du §16.3. A titre d'exemple, prenons ici

$$E_x = 12u$$

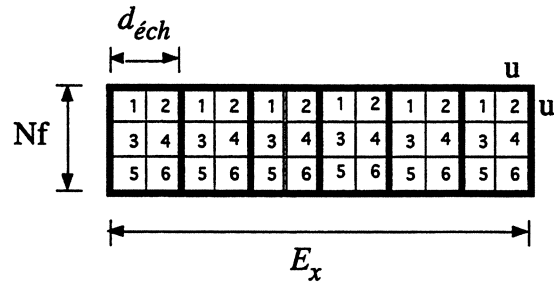
$$d_{éch} = 2u$$

Ces valeurs nous donnent Nf:

$$Nf = \frac{E_x}{d_{éch}} \quad (\text{ici } Nf=6)$$

¹ Pour les raisons amplement mentionnées dans la section A, la nature de ce projet ne consent pas une étude approfondie ni des fonctions de pavage elles-mêmes, ni de la façon de les générer: l'accent est ici sur le principe.

- ◇ Un maillage est construit, composé de Nf cellules de largeur $\Delta x = d_{éch}$ placées côte à côte dans la direction x. La surface de chaque cellule vaut $Nf \cdot u^2$, et contient donc Nf mailles élémentaires.



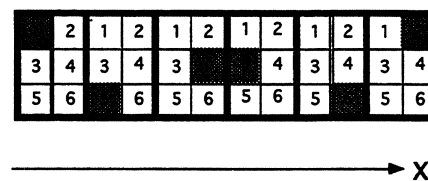
- ◇ Les facettes de la famille doivent être placées dans les cellules, selon les règles suivantes:

- Nf facettes doivent être placées.

- Une facette ne peut pas occuper une maille élémentaire déjà occupée dans une autre cellule.

- La disposition des facettes doit être de nature à approcher au mieux les critères de densité voulus.

Par exemple (densité ~uniforme):



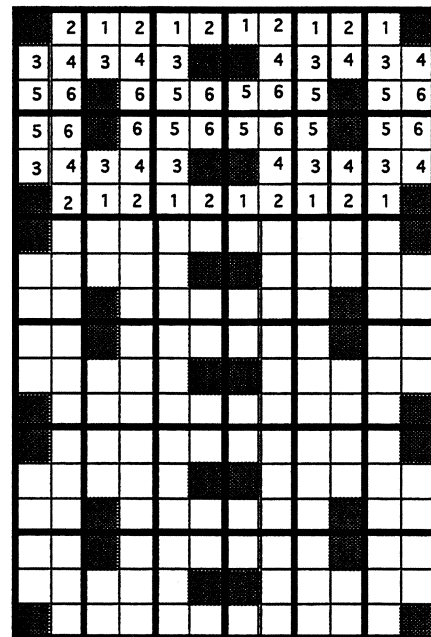
Remarquons qu'il ne faut pas nécessairement placer une facette par cellule: deux (ou plus) facettes peuvent se trouver dans la même cellule, pourvu qu'il y ait d'autres cellules vides.

- ◇ Nous avons ainsi

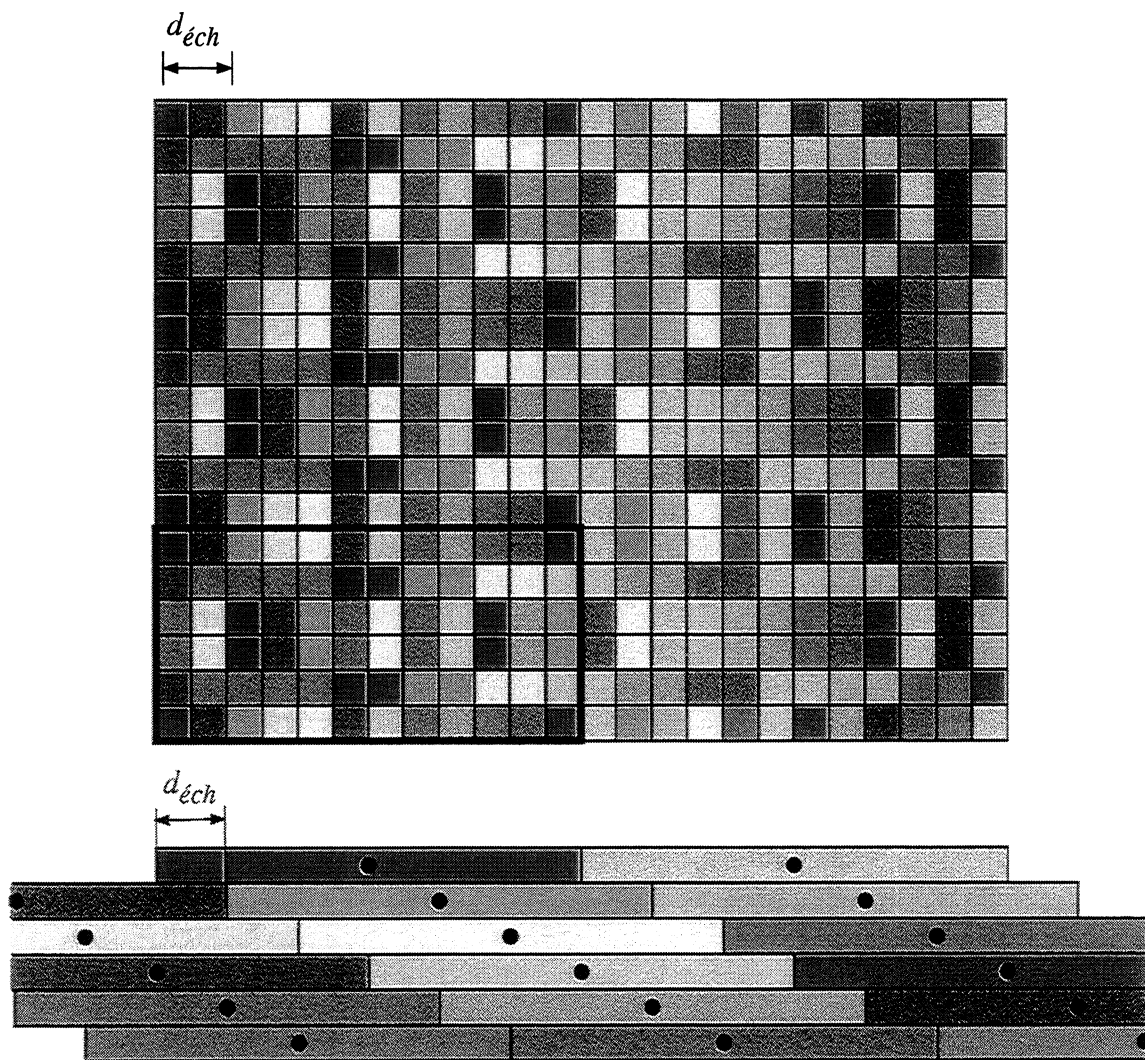
$$n_p = N_f \cdot N_f!$$

possibilités de pavage de base (ici $n_p=4320$), évidemment pas toutes valables du point de vue de la répartition de densité.

Ce pavage de base peut maintenant être reproduit dans la direction y , éventuellement alternativement inversé. Il est également possible d'alterner en " y " différents pavages de base. (Ci-contre: pavage alternativement inversé)

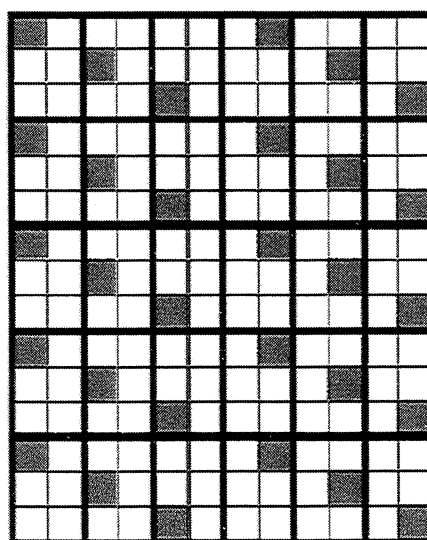


Cette technique de pavage garantit un pavage complet et sans recouvrements de facettes. La translation de $\Delta x = d_{ech}$ (ici $2u$) peut être répétée à l'infini. Le dessin à la page suivante illustre l'emboîtement des familles dans le cas de notre exemple. Chaque couleur représente une famille, les barres horizontales indiquent le "domaine d'action" de chaque famille, et les points noirs les R_j échantillonnés.



Parmi les nombreuses solutions possibles, en voici un autre exemple.

Maillage de base:



Une variante de cette technique consiste à construire N_f cellules de surface $S_c = \Delta x \cdot \Delta y$, avec $\Delta x = d_{éch}$ et Δy libre. Le nombre de facettes à placer selon les règles décrites ci-dessus sera donc S_c .

16.6. Pavage à densité variable

Nous avons vu au §16.3. qu'il serait souhaitable que la densité du pavage de chaque famille puisse approximer au mieux la fonction $s(x',y')$, afin de compenser les effets d'éclairement et de réflexion. Malheureusement, les seuls pavages du type étudié ici permettant d'obtenir une densité variable à la fois en x' et en y' sont des pavages non-complets, car ils comporteraient des "trous".

Bien que je ne puisse pas en fournir la démonstration formelle, il apparaît qu'il n'existe pas de fonction de pavage à densité croissante à la fois selon x' et selon y' , qui puisse "s'emboîter" par translation pure selon une droite parallèle à x' , donnant lieu à un pavage complet d'une surface rectangulaire.

Des solutions peuvent par contre exister pour des emboîtements par translation+rotation, mais apparaissent comme très complexes.

Pour ces raisons, nous étudierons ici uniquement des fonctions de pavage dont la densité varie selon x' et est uniforme selon y' .

Plusieurs variantes sont envisageables pour obtenir un tel pavage. Nous citerons ici une solution simple, obtenue en modifiant légèrement la méthode de recherche de pavages uniformes.

- ◇ De manière analogue à 16.5., considérons un exemple avec

$$E_x = 55u$$

$$d_{éch} = 5u$$

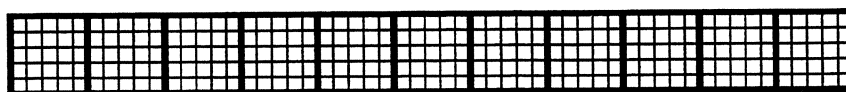
Ce qui nous donne

$$N_f = \frac{E_x}{d_{éch}} = 11$$

- ◇ Un maillage est construit, composé de N_f cellules de largeur $\Delta x = d_{éch}$ placées côte à côte dans la direction x . La surface $S_c = \Delta x \cdot \Delta y \cdot u^2$ de chaque cellule est ici libre.

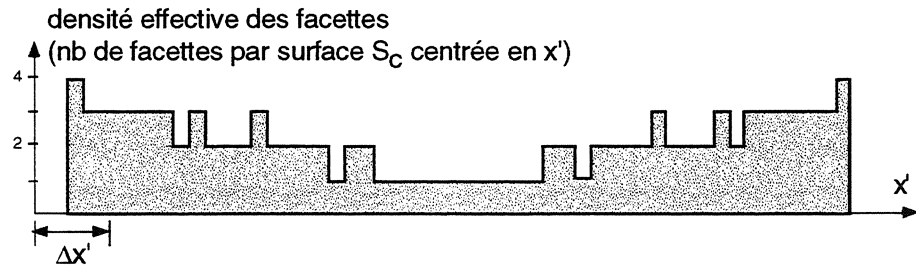
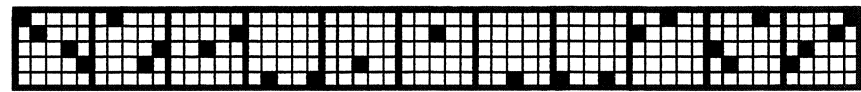
Prenons $\Delta y = 5u$

nous avons donc 11 cellules contenant chacune $S_c = 25$ mailles élémentaires



- ◇ Les facettes de la famille doivent être placées dans les cellules selon les règles suivantes:
- $S_c = \Delta x \cdot \Delta y$ facettes doivent être placées (ici 25).
 - Une facette ne peut pas occuper une maille élémentaire déjà occupée dans une autre cellule.
 - La disposition des facettes doit être de nature à approcher au mieux $s(x')$.

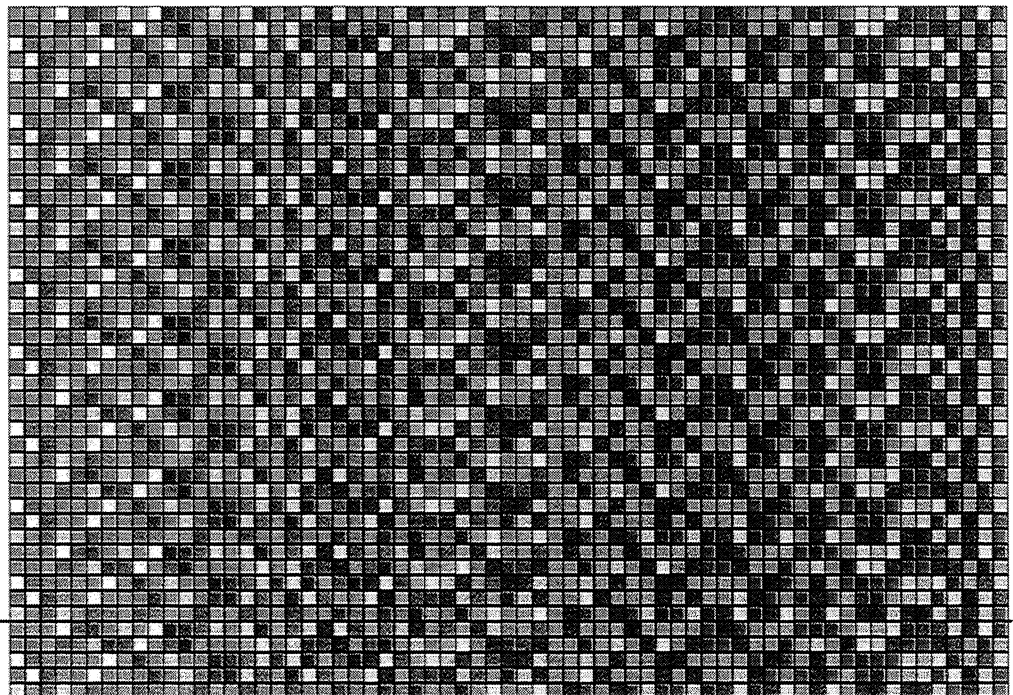
Un exemple de pavage variable en x' est donné dans la figure suivante, avec la courbe de densité correspondante. Le principe en est le suivant: plus une cellule est éloignée du centre, plus elle contient de facettes (selon $s(x')$).



Le nombre de combinaisons de pavage possibles n_p vaut dans ce cas

$$n_p = S_c \cdot S_c! \quad (n_p = 3.8 \cdot 10^{26} \text{ dans notre exemple})$$

- ◇ Le pavage de base est maintenant reproduit dans la direction y' , donnant ainsi lieu à un pavage à densité variable en x' et uniforme en y' . Là encore, toutes les variations sont permises: inversions alternées ou combinaisons de différents pavages de base. Ci-dessous: répétition simple selon "y".

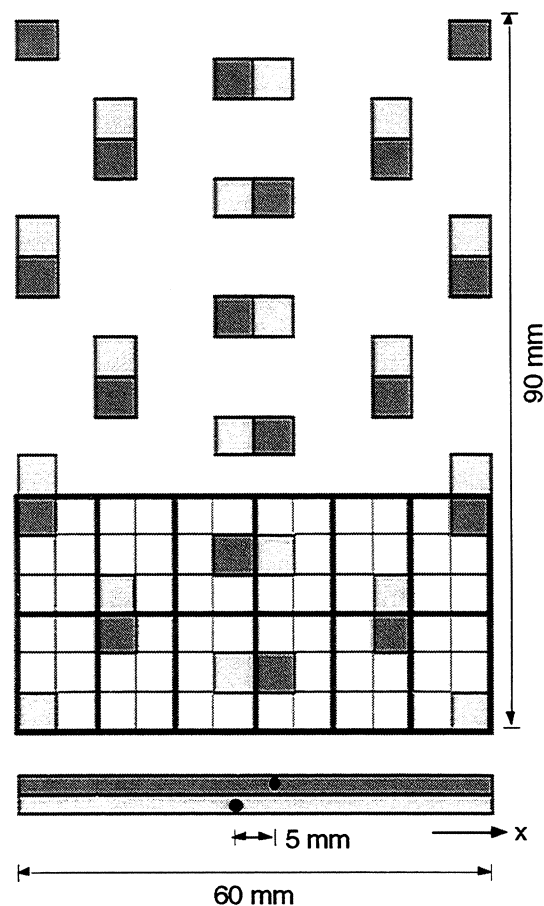
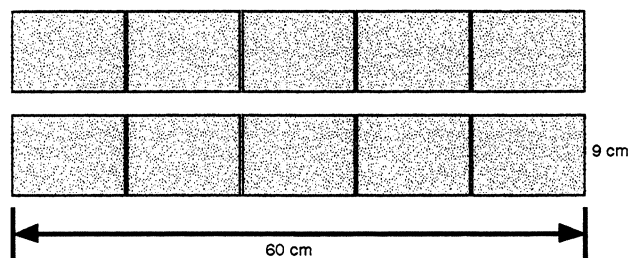


16.7. Réalisations pratiques

Pour un premier test dans CREHOS, seuls des pavages à densité uniforme ont été réalisés, par le biais du robot décrit à la section D. Deux MFHOE jumeaux ont été enregistrés, aux caractéristiques suivantes:

surface totale:	2 fois 600 x 90 mm
taille des facettes:	5 x 5 mm
nombre total de facettes:	2 fois 2160
hauteur du sol:	$z_c=12$ cm
focalisation:	$z_p=72$ cm (à 60 cm du collecteur)
E_x :	60 mm
$d_{éch}$:	5 mm
e_p :	± 12.5 mm

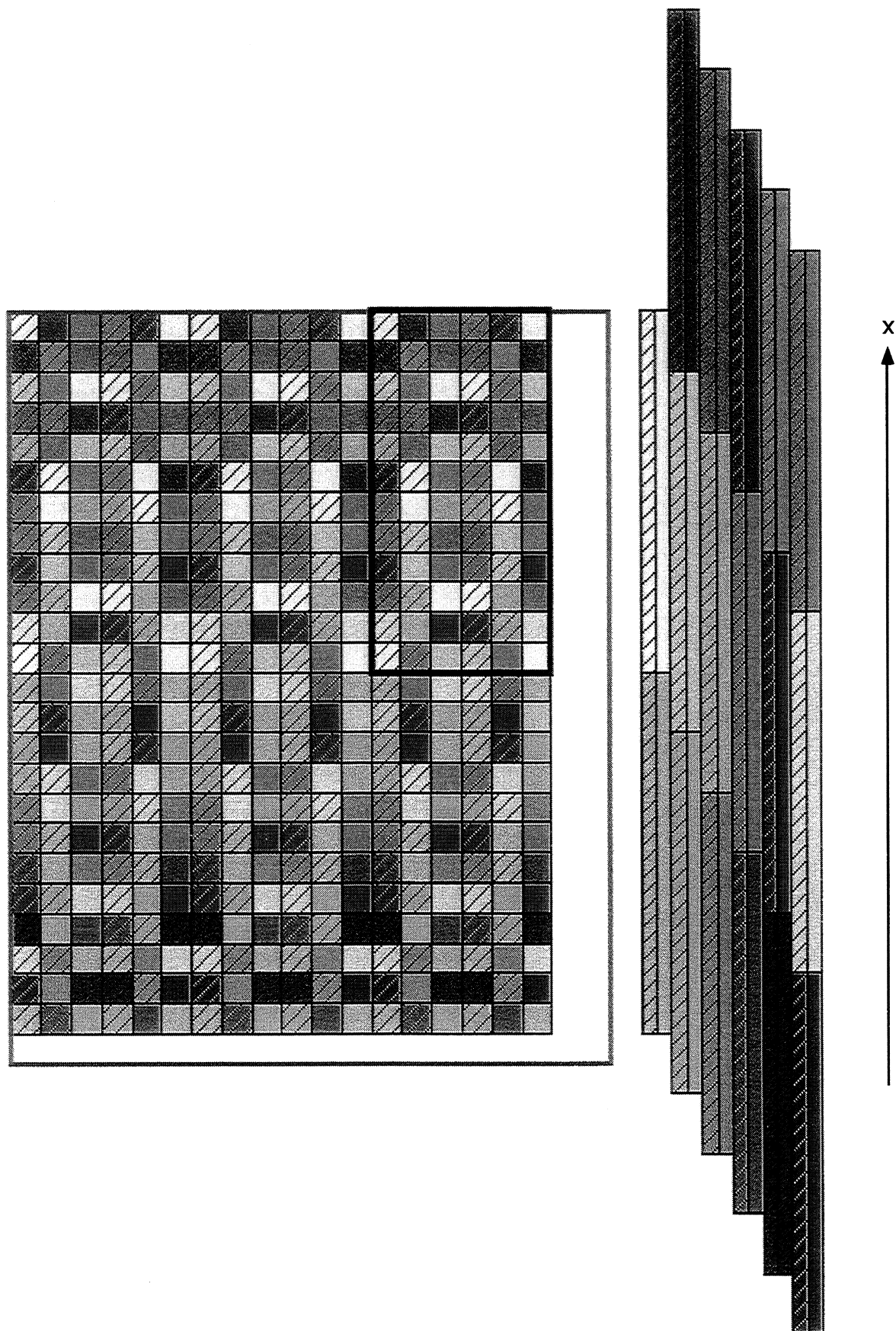
Ils sont constitués de 5 plaques holographiques Agfa 4x5", en gélatine argentique, fixées côte à côte.



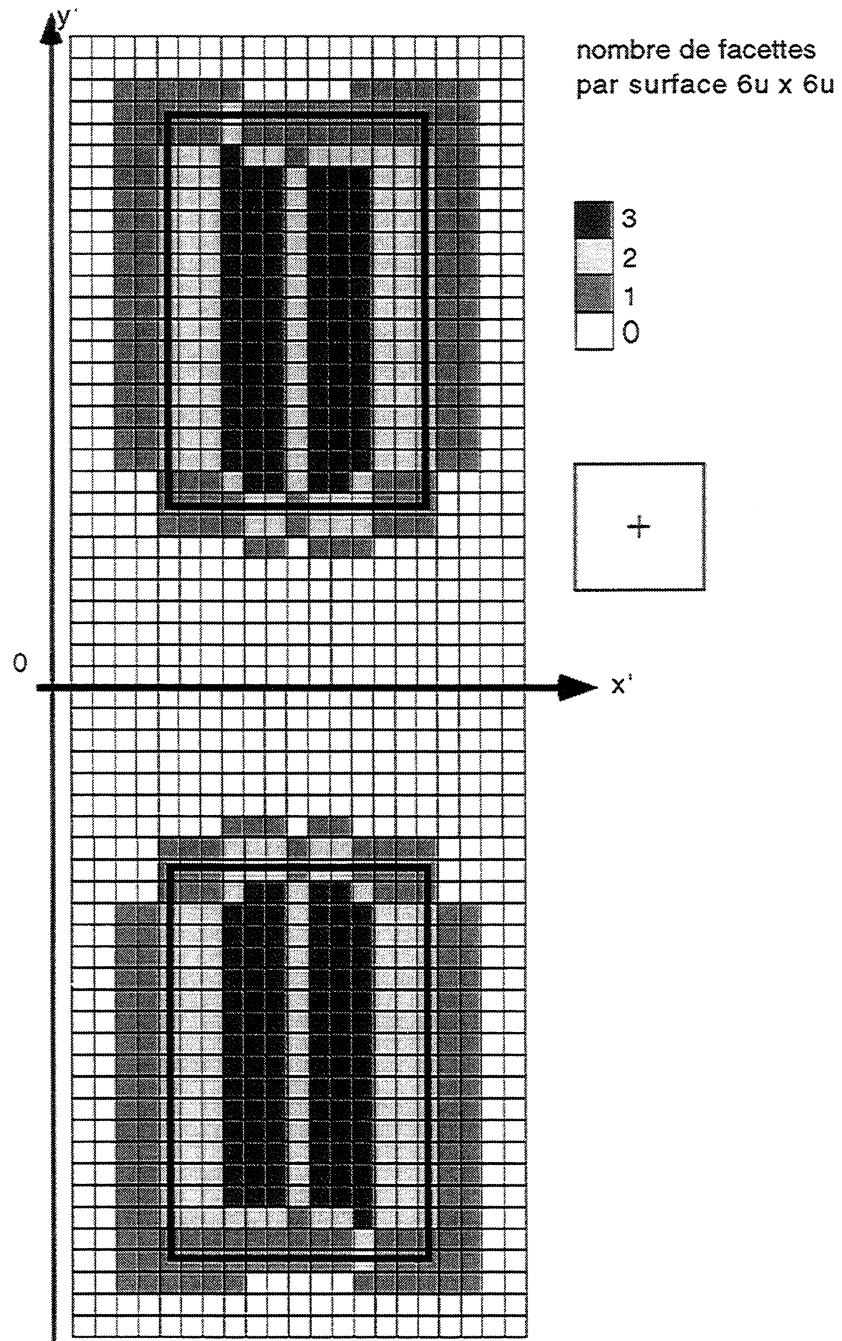
Après avoir testé différents pavages sur des dimensions plus limitées, le pavage choisi est une variante de l'exemple présenté au §16.5. Sur la base de la même disposition, deux familles correspondant à deux R_i successifs sont superposées au même x' . Chaque paire de familles ainsi obtenue est translatée de $\Delta x = 2 \cdot d_{éch} = 10$ mm pour obtenir le pavage complet.

En sacrifiant le rendement optique du collecteur, qui n'est pas un paramètre critique, on arrive ainsi à obtenir une distance $d_{éch}$ d'échantillonnage spatial des points plus faible, et donc une erreur de "focalisation" réduite en P. Avec ce pavage, chaque famille comprend 18 facettes, représentant 8.33% de la surface occupée par la famille. Le taux de superposition N_f est de 12 familles par tranche de largeur Δx .

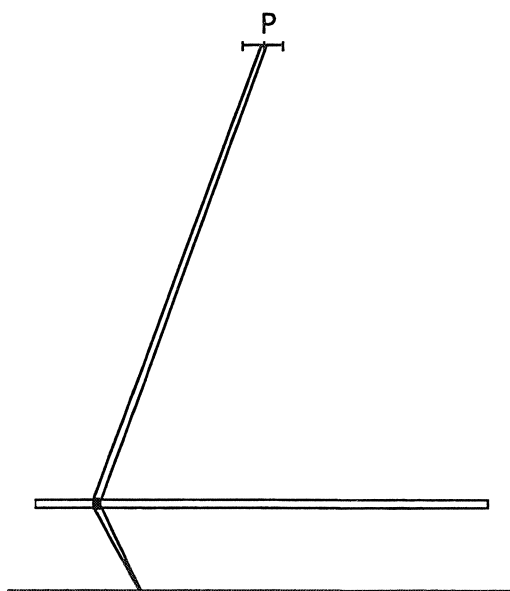
Nous obtenons ainsi le pavage global suivant (sur l'une des cinq plaques):



Les deux familles se trouvant de part et d'autre du balayage nous donnent la densité de facettes suivante:



Cette densité, bien qu'elle n'implémente pas $s(x',y')$, réalise le masquage $m(\vec{r}')$ décrit en [13.5.] (§13.3.), qui diminue la probabilité de collection pour les lobes rétrodiffusés dans une direction proche de la normale au revêtement.

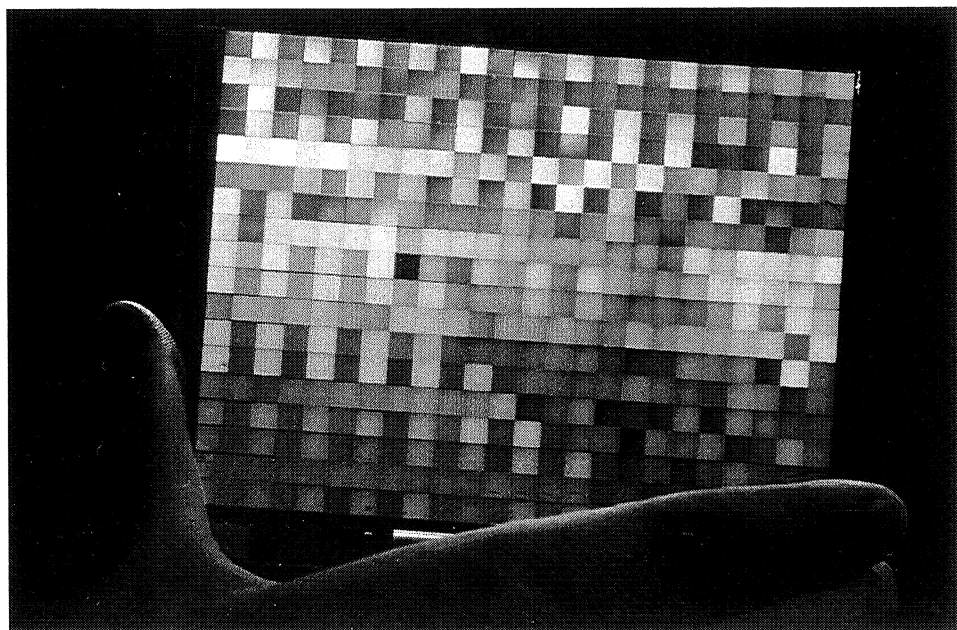


Chaque facette diffracte une onde sphérique en faisceau parallèle orienté vers P (ci-contre dans les proportions exactes). Les angles d'incidence et de diffraction sont différents pour toutes les 2160 facettes. Pour un point R_i donné, les 18 faisceaux parallèles potentiellement produits par les 18 facettes de la famille F_i vont s'intercepter en P, formant un "carré focal" de la dimension des facettes (5mm).

Tous les points non-échantillonnés se trouvant à une distance de $\pm d_{\text{éc}}/2$ autour des R_i vont être "imagés" en un carré se trouvant dans un environnement $\pm e_p$ de P (ici $e_p = 12.5\text{mm}$).

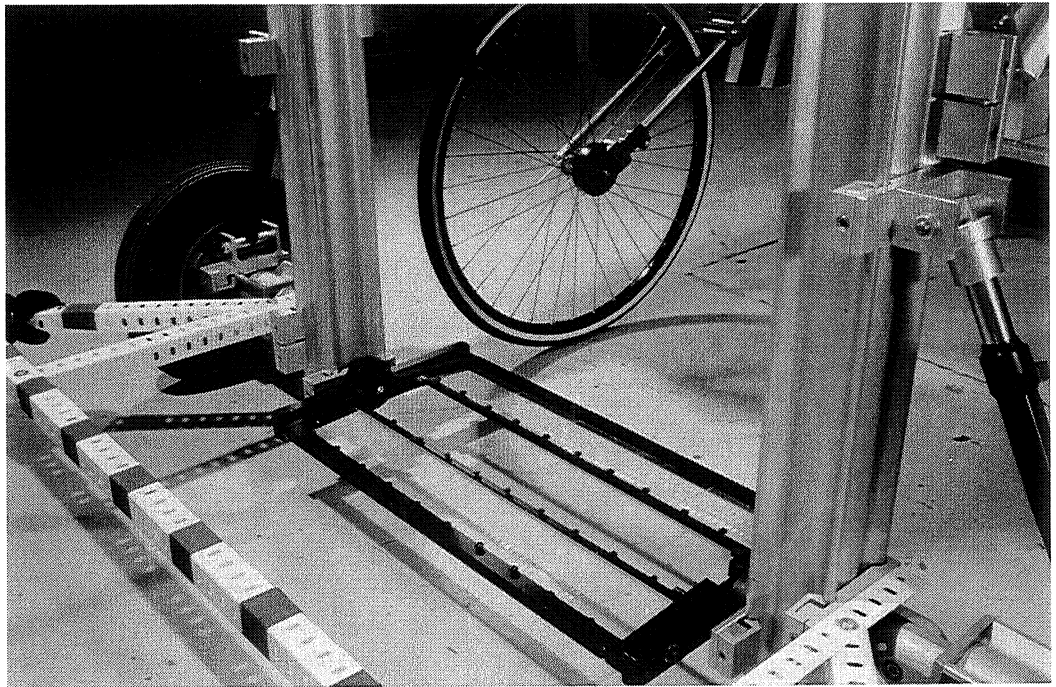
Par contre, la lumière provenant de R_i et diffractée par des facettes n'appartenant pas à la famille F_i va produire dans le plan de P une série de carrés déformés et dans des positions diverses, mais aucun ne se trouvera dans un environnement de P de dimension e_p .

Résultats¹

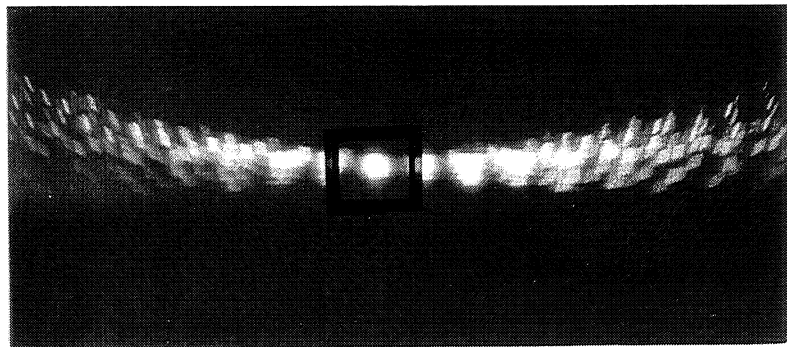


L'une des dix plaques holographiques composant le collecteur, éclairée en lumière blanche (les couleurs n'ont pas de rapport avec celles des schémas).

¹ Les performances du collecteur (et a fortiori celles du dispositif de détection), qui dépendent de l'ensemble du système, seront abordées dans la section F.

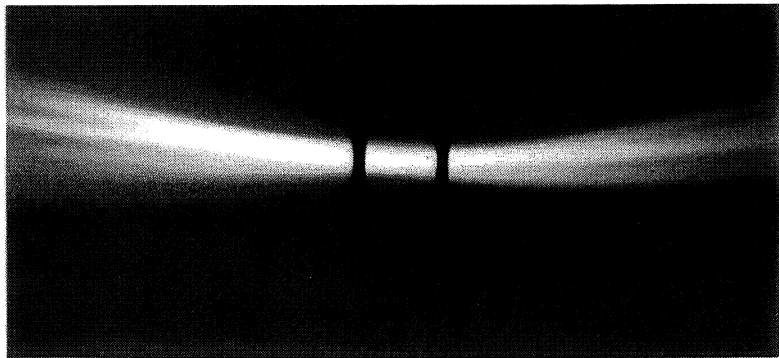


Le collecteur complet de 60 cm de long, installé dans le prototype de CREHOS.



Distribution d'intensité dans le plan du détecteur visualisée par le biais d'un verre dépoli¹. La lumière est émise dans toutes les directions par un seul point R_i , statique (diffuseur blanc). On remarque au centre, dans le cadre noir simulant l'étendue de la surface de détection, le carré résultant de la superposition des 18 faisceaux parallèles issus des 18 facettes de F_i . On remarque également, à l'extérieur du cadre noir, la multitude de faisceaux diffractés par les facettes des autres familles.

¹ Les moyens utilisés pour rendre visible l'intensité diffractée et la technique photographique ne permettent pas d'obtenir des images traduisant la qualité optique réelle de la figure de diffraction. Elles ne sont représentées ici qu'à titre démonstratif.



Nous observons ici le comportement du collecteur lorsque le balayage est en fonction. La photographie intègre dans le temps la figure de diffraction produite par une succession de sources R_i spatialement continues.

16.8. Conclusions.

Un bon pavage résulte d'un équilibre délicat: d'un part la distance d'échantillonnage des points $d_{éch}$ doit être minimisée pour minimiser l'écart ep autour de P , mais d'autre part, si elle est trop faible le taux de superposition des familles est trop élevé. Un taux de superposition élevé signifie des facettes moins denses, et donc une probabilité de détection plus faible pour les lobes étroits, ce qui pourrait fausser la mesure.

Ces techniques de pavage, qui peuvent être appliquées dans différents domaines, mériteraient d'être étudiées de manière approfondie, dans un contexte plus général en dehors du cadre de CREHOS.

Brevet

Un brevet a été déposé, couvrant le principe du collecteur multifacettes et toutes les variantes basées sur "l'emboîtement" spatial de différentes familles.

17. CONVERSION PHOTOELECTRIQUE

La lumière collectée en un voisinage de P par le MFHOE doit être convertie en signal analogique dans le temps. Les caractéristiques du détecteur doivent être les suivantes.

◇ Sensibilité élevée.

L'intensité à détecter en P est très faible, pour des raisons multiples. Suivons le parcours de la lumière jusqu'au détecteur: tout d'abord, la nature mobile de CREHOS empêche l'utilisation d'un laser très puissant, qui aurait consommation de courant trop élevée. Le dispositif de balayage introduit ensuite les premières pertes. La très faible réflectivité ρ du revêtement introduit des pertes très importantes, qui sont d'avantage aggravées par le faible rendement du collecteur holographique. Mais rappelons que ce qui compte ici c'est surtout la *probabilité de détection* de la lumière rétrodiffusée, et pas son intensité absolue.

◇ Temps de réaction très court.

Une fissure de 1mm de largeur "dure" dans le balayage 20 ns. Il faut donc que $Rise\ Time + Fall\ Time < 20\ ns$.

◇ Surface de détection importante.

Nous venons de voir que la lumière est collectée en P avec une excursion de quelques cm. La surface sensible du détecteur doit donc être adaptée à e_p , et de l'ordre de 2 à 5 cm de diamètre.

Sensibilité et surface de détection sont directement liées aux paramètres $d_{éch}$ et E_x du collecteur holographique, paramètres qui en déterminent les performances. Plus le détecteur est grand et sensible, meilleures sont les performances de l'MFHOE.

Les seuls détecteurs offrant à la fois grande sensibilité, vitesse élevée et grande surface sont les photomultiplicateurs (abrégés PM). Les caractéristiques du modèle choisi sont les suivantes (Hamamatsu H1949):

sensibilité de la cathode:	80 mA/W
gain:	$2 \cdot 10^7$
rise time:	1.3 ns
diamètre de la surface de détection:	46 mm

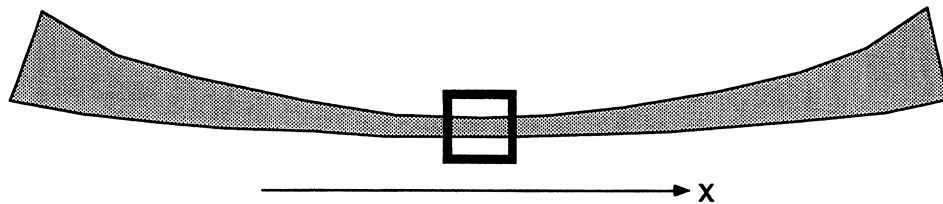
17.1. Optimisation du signal

Comme l'illustre le schéma au §16.2., deux MFHOE collectent la lumière sur deux détecteurs, de part et d'autre de la ligne de balayage. Les deux signaux fournis par les détecteurs sont simplement additionnés, donnant lieu au signal analogique $Sig_{an}(t)$. Un simple réglage dans la géométrie du dispositif peut améliorer considérablement le signal.

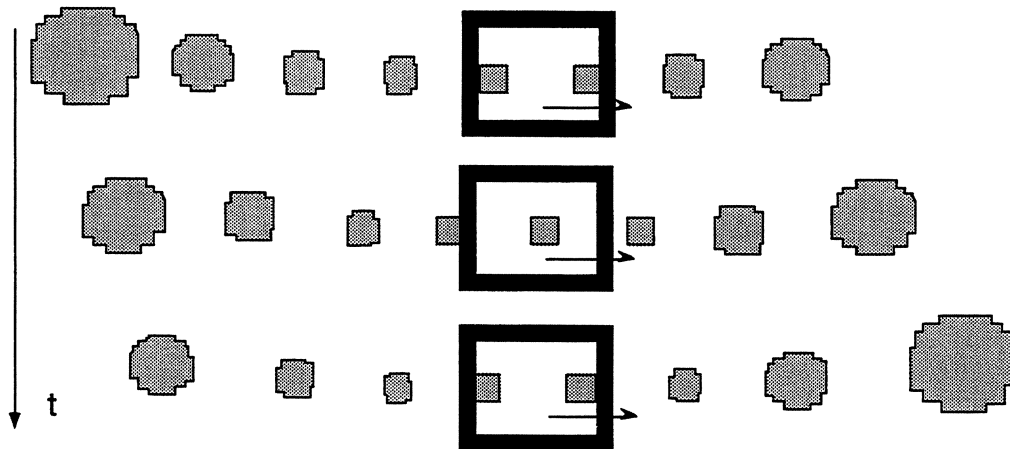
Considérons le cas d'une surface diffusante idéale, c'est à dire

$$I_{\text{diff}}(\vec{u}, R_{i,j}) = I_0 \quad \forall \vec{u} \in [(0, \pi), (0, 2\pi)] \text{ et } \forall R_{i,j}$$

Comme nous venons de le voir au chapitre précédent, l'intensité intégrée dans le temps dans le plan du détecteur se présente schématiquement comme ceci:



En regardant de plus près, à la fois dans l'espace et dans le temps, nous observerions ceci :



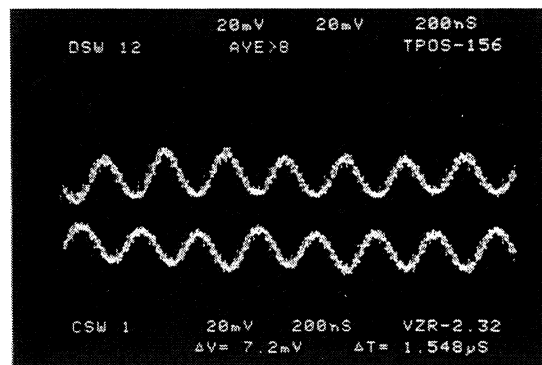
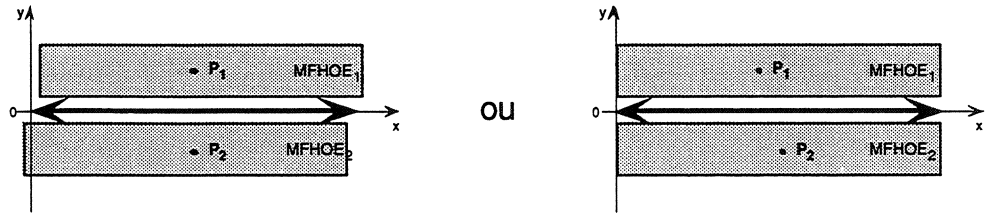
La dimension de la fenêtre de détection doit donc être parfaitement ajustée à la distance séparant les "carrés focaux", de manière à ce qu'un seul d'entr'eux se trouve à la fois dans la fenêtre.

Si cette condition n'est pas remplie (comme c'est le cas dans le dessin ci-dessus), le signal de sortie présente une modulation, traduisant la présence alternée de un ou de deux carrés dans la fenêtre.

En pratique, il est très difficile de respecter strictement cette condition, car la distance entre les "carrés focaux" peut varier légèrement avec les variations de z_c (orniérage, vibrations).

Pour diminuer cette modulation indésirable du signal de sortie, il suffit d'introduire un décalage spatial de $d_{ech}/2$ en x entre les deux détections. Ceci peut être obtenu en décalant les MFHOE, ou bien en décalant les photomultiplicateurs, comme l'illustre le dessin à la page ci-contre.

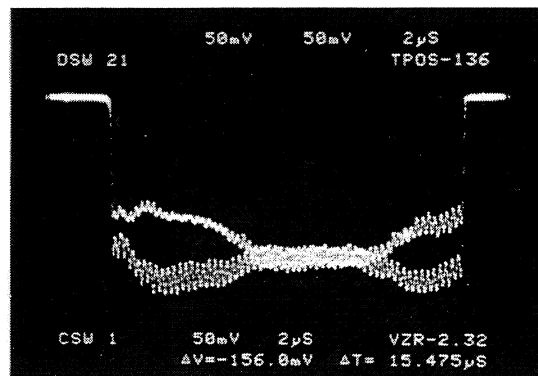
De cette manière, l'apparition de un ou de deux "carrés focaux" dans les deux surfaces de détection intervient de façon alternée. La modulation du signal total, somme des deux, est ainsi réduite.



Les deux signaux ci-contre représentent les sorties des PM (moyenne), décalés de manière à ce que la somme des signaux minimise la modulation.

Les signaux ci-contre ont été obtenus en plaçant un panneau en plastique blanc mat (~diffuseur parfait) à la place du revêtement.

Ce diffuseur permet également de mettre en évidence un autre effet intéressant: l'action combinée des deux collecteurs multifacettes situés de part et d'autre du balayage. Le panneau en plastique blanc servant de diffuseur est en effet légèrement voilé et la lumière n'est donc pas rétrodiffusée uniformément le long de toute la ligne de balayage.



La photographie ci-contre représente la fenêtre de balayage dans les signaux de sortie des deux PM.

Les signaux, superposés, sont inversés (une forte rétrodiffusion correspond à un signal négatif).

Les deux signaux se compensent, ce qui indique que la lumière "perdue" par l'un des multifacettes est collectée par l'autre. Le signal de sortie, constitué de la somme des deux signaux, est donc suffisamment uniforme malgré les irrégularités du diffuseur.

18. MISE EN FORME DU SIGNAL

Afin de pouvoir être traité de manière numérique par les étages supérieurs du système, le signal $Sig_{an}(t)$ est binarisé¹. Le signal résultant est $Sig_{bin}(t)$.

$Sig_{bin}(t)$ ne doit contenir que l'information utile: il doit mettre en évidence les t pour lesquels le balayage se trouve sur un point censé appartenir à une fissure, et donc les t pour lesquels $Sig_{an}(t)$ est beaucoup plus faible que sa valeur moyenne.

Soit

$$Sig_{bin}(t) = \begin{cases} vrai & \text{si } Sig_{an}(t) < \sigma \\ faux & \text{si } Sig_{an}(t) \geq \sigma \end{cases}$$

Pour des raisons de clarté graphique, nous prendrons par la suite la valeur 1 comme valeur de vérité.

Pour le premier prototype de CREHOS, $Sig_{bin}(t)$ a été obtenu simplement en seuillant $Sig_{an}(t)$ avec un σ introduit manuellement par un potentiomètre. Ce dispositif a donné entière satisfaction au niveau des essais de laboratoire, mais cet étage du dispositif mérite sans doute un développement plus poussé, car il constitue un point très sensible pour le bon fonctionnement de tout le système. Les deux principaux problèmes sont les suivants.

- ◇ Le rapport signal/bruit est faible.

La distance séparant les minima de $Sig_{an}(t)$ dus aux différents bruits et les minima dus à la présence d'une fissure est parfois assez petite. Cela demande d'une part une intervention sur $Sig_{an}(t)$ pour les séparer d'avantage (par exemple une amplification exponentielle), et d'autre part un ajustage très fin de σ .

- ◇ Le seuil σ optimal varie avec le revêtement.

L'amplitude moyenne de $Sig_{an}(t)$, et la valeur moyenne des minima indiquant des fissures dépendent de beaucoup de facteurs, notamment le type de revêtement, son état local d'usure, ou la présence de lumière parasite. Le seuil σ devrait pouvoir s'adapter automatiquement aux caractéristiques locales du revêtement.

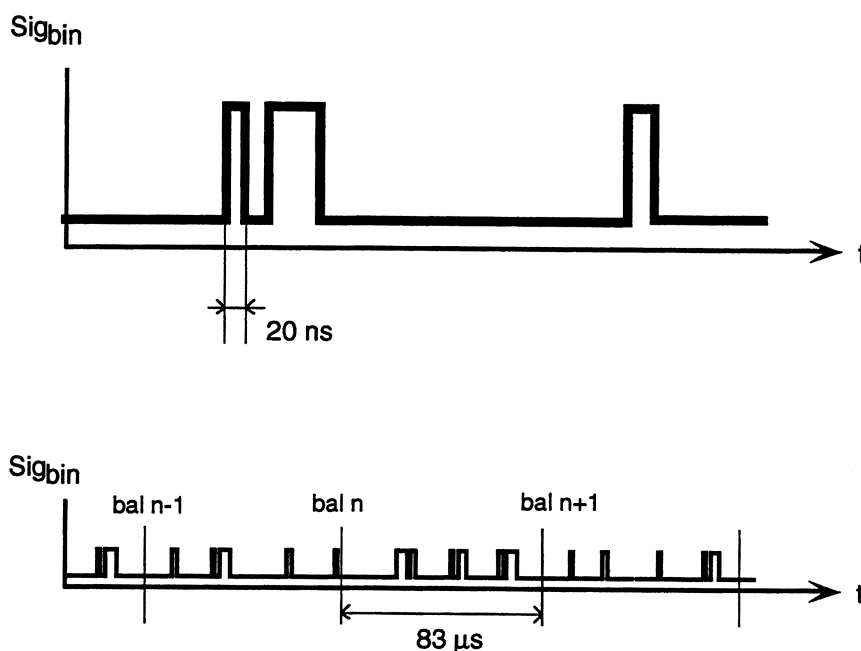
- ◇ Les composantes spectrales du bruit et du signal à seuiller sont du même ordre.

La solution à ces problèmes n'est pas de plus faciles, mais doit exister, car sur la trace de l'oscilloscope les fissures sont clairement identifiables à l'oeil.

¹ Cette opération augmente la valeur symbolique du signal et réalise un filtrage sémique. Voir § 13.2.

18.1. Le signal de sortie

Les caractéristiques temporelles de $\text{Sig}_{\text{bin}}(t)$ sont schématisées ci-dessus¹.



Le bruit

$\text{Sig}_{\text{bin}}(t)$ n'indique pas les points appartenant aux fissures, mais les points ayant une *probabilité élevée* d'appartenir à des fissures. Ceci en raison du bruit que l'on pourrait qualifier de *bruit sémique*. En effet, l'ensemble des impulsions contenues dans le signal ne correspond pas forcément à l'ensemble des *sèmes* qu'il est censé représenter. D'une part des sèmes peuvent être perdus, et d'autre part on peut trouver des impulsions qui ne sont pas des sèmes. Ceci à cause de deux types de bruit: un *bruit de détection* et un *bruit propre* du revêtement.

◇ Bruit de détection

Il se peut, pour des raisons tant optiques qu'électroniques², que le système génère dans le signal $\text{Sig}_{\text{bin}}(t)$ des impulsions surnuméraires ne correspondant à aucune information physique au niveau de la route. Elles peuvent être produites par des lobes de rétrodiffusion échappant au collecteur ou par des erreurs de seuillage.

¹ Nous négligeons ici le "temps mort" du balayage, qui n'a pas d'influence sur la position temporelle des impulsions ni sur leur largeur.

² Introduites par exemple par une erreur de seuillage induite par un bruit important sur le signal $\text{Sig}_{\text{an}}(t)$.

De même, une impulsion significative peut être perdue. Si ce dernier cas n'est pas dramatique au niveau de l'interprétation, il n'en va pas de même pour le premier. En effet une impulsion manquante ferait interpréter une longue fissure comme deux fissures plus courtes et se suivant, ce qui revient pratiquement au même. Par contre, des impulsions surnuméraires pourraient conduire à considérer un revêtement en plus mauvais état qu'en réalité.

Ce bruit dépend essentiellement des caractéristiques du collecteur. Il peut donc, potentiellement, être atténué.

◇ Bruit propre au revêtement

Un tout autre type de bruit est constitué par toutes les altérations du revêtement réellement absorbantes, qui seraient détectées par le système mais qui ne sont pas des fissures, telles les joints de pont, les nids de poule, les bouches de canalisation, etc. Ce bruit cause l'apparition d'impulsions surnuméraires dans $Sig_{bin}(t)$ (des "faux sèmes").

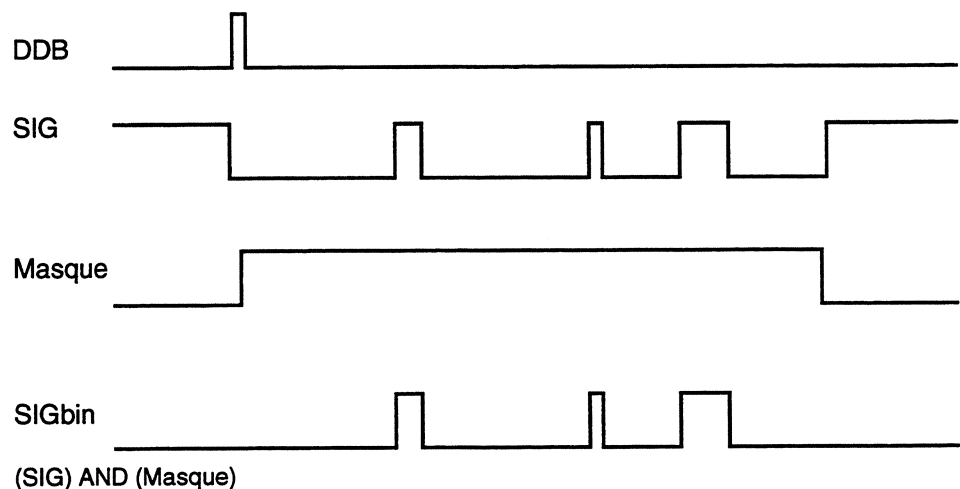
Ce bruit ne peut dans aucun cas être supprimé dans cet étage du système. Nous verrons par contre dans la section E la manière de s'en affranchir.

C'est qu'après filtrage de ces bruits qu'un groupe supposé représenter une fissure peut être *reconnu* comme telle.

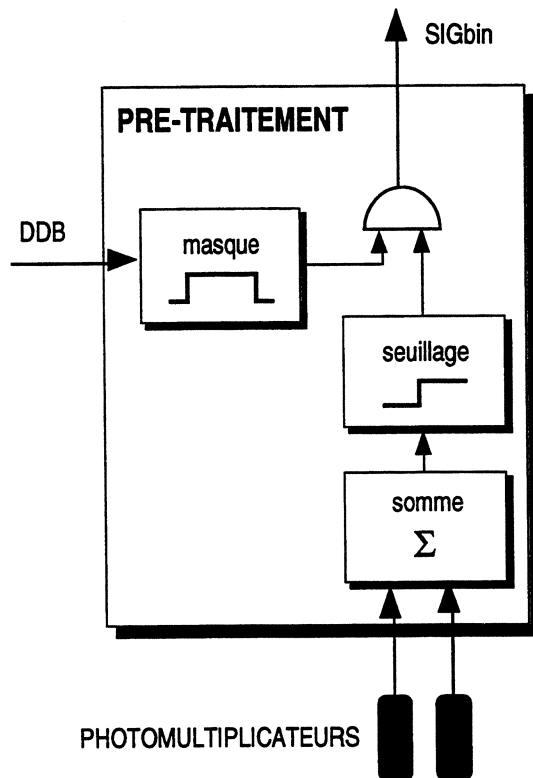
Masquage

En pratique, le signal seuillé (SIG dans le chronogramme ci-dessous) prend la valeur *vrai* aussi pendant les "temps morts" du balayage, aux extrémités du signal, ce qui constitue une information parasite. Afin de l'éliminer, une "fenêtre de masquage" est générée à partir de DDB. Ce masque vient multiplier (AND) le signal SIG, de manière à ce que le signal de sortie Sig_{bin} ne contienne que les impulsions significatives.

Le chronogramme ci-dessous illustre l'action du "masque".



18.2. Conclusions



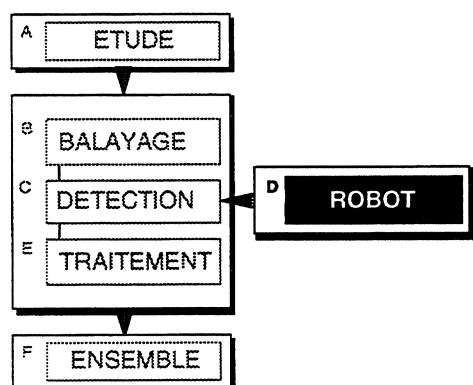
L'organisation des signaux est résumée dans le schéma ci-contre.

La mise en forme du signal est, jusqu'à présent, la dernière d'une série d'étapes et de transformations. Le bon fonctionnement de chacune de parties étant intimement lié à toutes les autres parties, une évaluation globale des différents organes du système et les résultats obtenus feront l'objet d'une section ad hoc, la section F.

Section D

LE ROBOT

pour l'enregistrement automatique d'hologrammes multifacettes analogiques



Cette section présente une machine qui permet de réaliser rapidement et à faible coût des éléments optiques holographiques multifacettes (MFHOE) de grandes dimensions (8x10", facettes de quelques mm²). Les hologrammes sont obtenus par enregistrement analogique direct grâce à deux fibres PM monomode positionnées dans l'espace par des articulations mécaniques. Ce robot, bien que destiné principalement à l'enregistrement du collecteur pour CREHOS, permet de réaliser différents types hologrammes multifacettes pour des applications très variées.

19. Introduction	145
19.1. Motivations	145
19.2. Spécifications requises	146
19.3. Structure globale	147
20. Structure mécanique	153
20.1. Cadre rigide	153
20.2. Masque	153
20.3. Plaque de base	159
20.4. Tourelle porte-plaque	161
20.5. Positionnement de l'onde de référence	165
20.6. Positionnement de l'onde objet	167
21. Dispositif optique	171
21.1. Système à fibres optiques	171
21.2. Stabilisation de phase	171
21.3. HOE pour l'onde objet	172
21.4. Possibilités de mouvement des ondes	173
22. Electronique de commande	175
23. Programmes de contrôle	177
24. Un exemple de séquence d'enregistrement	179
25. Quelques exemples de MFHOE réalisables avec le robot	181
26. Conclusions	185

19. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet CREHOS, j'ai été amené à réaliser une machine à ma connaissance unique. Il s'agit d'une structure articulée programmable dédiée pour l'enregistrement automatique d'hologrammes multifacettes analogiques, que nous appellerons par commodité "le robot". Le robot a été développé dans le but premier de réaliser le collecteur holographique multifacettes décrit dans la section C, mais permet également une utilisation plus générale. Sa conception et sa réalisation constituent un véritable projet dans le projet, non seulement en termes de temps, mais également en ce qui concerne les solutions partiellement innovatrices qu'il a fallu mettre au point, afin de surmonter les très nombreux problèmes, essentiellement de nature mécanique et optique¹.

Dans le cadre de ce document, une description exhaustive de ce travail, qui pourrait à lui seul faire l'objet d'une thèse, prendrait une place disproportionnée: je me limiterai donc à en décrire les aspects les plus significatifs. Ce sujet a fait l'objet d'une publication SPIE (voir bibliographie).

Signalons également qu'en raison du contexte dans lequel le robot a été développé (part d'un projet plus ample et pas projet indépendant), plusieurs choix pratiques ont été faits en fonction de la minimisation des coûts plutôt qu'en fonction de l'optimisation des performances.

19.1. Motivations

L'étude du collecteur pour CREHOS, comme nous venons de le voir dans la section précédente, a abouti à la conception de deux hologrammes multifacettes (MFHOE), chacun d'une surface de 1 à 4 mètres sur une dizaine de cm, et comportant plusieurs milliers d'hologrammes élémentaires différents, voire plusieurs dizaines de milliers. Ceci pose un problème de réalisation. Examinons les différentes possibilités.

◇ CGH (Computer Generated Hologram)

Le MFHOE peut être calculé par ordinateur et tracé par faisceau d'électrons (e-beam) ou par des techniques photolithographiques.

Au début de ce projet, les installations disponibles, notamment au CSEM de Neuchâtel, ne permettaient de graver que des surfaces très restreintes, de l'ordre 25 cm². Il aurait donc fallu calculer, graver et juxtaposer jusqu'à 320 éléments, tous différents. Coût approximatif (optimiste): 4 MFr. Cette solution a été donc abandonnée.

◇ Enregistrement analogique

Pour un MFHOE de ces dimensions, l'enregistrement analogique direct est sans doute une solution bien adaptée, mais vu le très grand nombre de facettes différentes, il doit se faire de manière automatique. Bien entendu, la solution plus simple et performante consisterait dans l'achat de deux bras

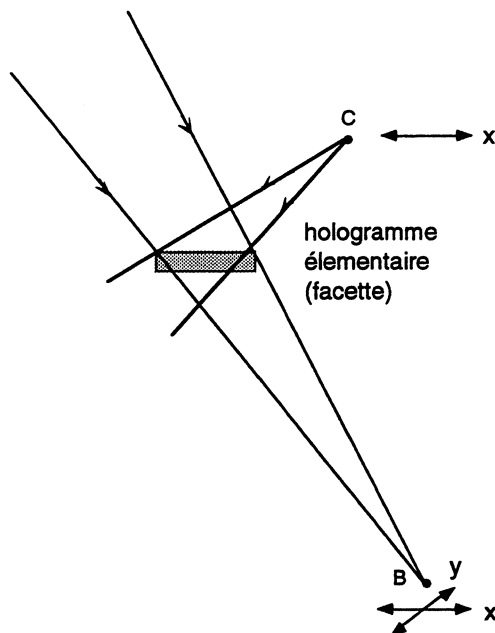
1 Problèmes mécaniques parfois engendrés par le souci de contenir les coûts de réalisation.

robotisés disponible sur le marché (2 fois 6 degrés de liberté). Mais, compte tenu des exigences de précision et surtout de stabilité requises par cette application, leur coût serait disproportionné dans le cadre de ce projet. De plus, un robot industriel nécessiterait de toute façon des travaux d'adaptation. Le seul choix raisonnable dans le cadre de ce projet est de construire nous-mêmes la machine qui à son tour réalise l'hologramme pour CREHOS. De plus, un tel robot a également l'avantage de doter l'Institut d'un nouvel outil, unique de surcroît, ouvrant des perspectives dans plusieurs domaines d'application différents.

19.2. Spécifications requises

Rappelons qu'un hologramme analogique s'obtient par l'exposition d'une plaque photosensible haute résolution à deux ondes cohérentes (issues du même laser). La plaque est ensuite développée par des procédés chimiques analogues à ceux utilisés en photographie. La position et la forme des deux ondes d'enregistrement, appelées onde objet et onde de référence, déterminent les caractéristiques optiques de l'hologramme. Pour obtenir un hologramme de bonne qualité il est impératif de garantir:

- ◇ la cohérence des deux ondes, ce qui implique que la différence de parcours des deux ondes soit toujours plus petite que la longueur de cohérence du laser.
- ◇ la stabilité de phase entre les ondes pendant l'exposition, qui nécessite essentiellement une excellente stabilité mécanique du montage (quelques dizaines de nm), et une stabilité thermique le long des parcours optiques.



Afin d'enregistrer le collecteur multifacettes pour CREHOS, le robot doit pouvoir éclairer chacune des facettes avec une onde convergente focalisée en un point B, que nous appellerons onde objet, et une onde divergente issue de C, qui sera appelée l'onde de référence (voir schéma ci-contre¹).

Les sources des deux ondes se trouvent du même côté de la facette (hologramme en transmission).

Pour chacune des facettes, et dans les repères qui leur sont liés, les points C et B occupent des positions différentes.

¹ Ce dessin, par rapport aux schémas du MFHOE pour CREHOS décrit dans la section C, est renversé: les points C de chaque facette représentent les points de balayage sur la route, et B est le point où sera placé le photomultiplicateur. Cette orientation correspond à la position de travail du robot.

La source C de l'onde de référence doit pouvoir être positionnée selon un axe x' , et le point de focalisation B doit être positionné selon deux axes x, y ¹.

Fait intéressant, la position de B serait constante si exprimée dans le repère lié à la plaque complète, support de plusieurs centaines de facettes. Autrement dit, à la restitution, toutes les facettes se trouvant sur une même plaque vont focaliser les ondes provenant d'une série de points C en un même point B. Cette propriété géométrique sera mise à profit pour simplifier les mouvements du robot.

La position verticale z de B et de C est par contre constante pour toutes les facettes.

Etant donnée la structure par *familles* de facettes de l'MFHOE pour CREHOS (voir §16.3.), il serait intéressant que le robot puisse enregistrer, lors d'une exposition unique, un groupe de facettes simultanément. Ces facettes à exposer se trouvent sur une portion relativement étendue de la plaque photosensible, et peuvent avoir des coins communs.

Par ailleurs, les grandes dimensions à la fois de l'hologramme global et des facettes² rendent inutile une précision de positionnement extrême: des erreurs de position sur les facettes de l'ordre de 1/10 de mm sont tout à fait acceptables. De plus, pour revenir à l'utilisation prévue pour nos MFHOE, l'aspect aléatoire de la route et la grande surface des photomultiplicateurs font en sorte que l'on peut tolérer, à l'enregistrement, une légère erreur sur la position des faisceaux.

19.3. Structure globale

Le robot est dimensionné pour enregistrer deux tailles de plaques holographiques: 101.6 x 127 mm (4 x 5") et 203.2 x 254 mm (8 x 10"). Son principe de fonctionnement peut se résumer de la manière suivante.

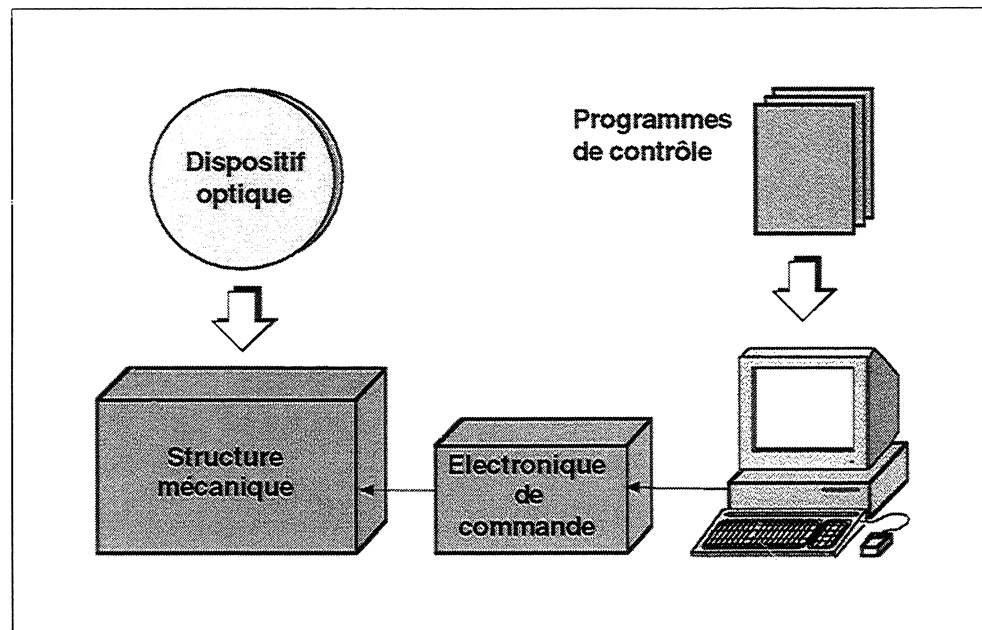
Dans l'obscurité, une plaque photosensible est positionnée par rapport à un masque, de manière à en sélectionner la portion à exposer, et les ondes objet et référence sont réglées dans les positions choisies (voir §19.2.).

La portion de plaque est ensuite exposée, et l'opération recommence pour une autre portion de la plaque. Les ondes lumineuses sont fournies par deux fibres optiques tenues par des bras articulés.

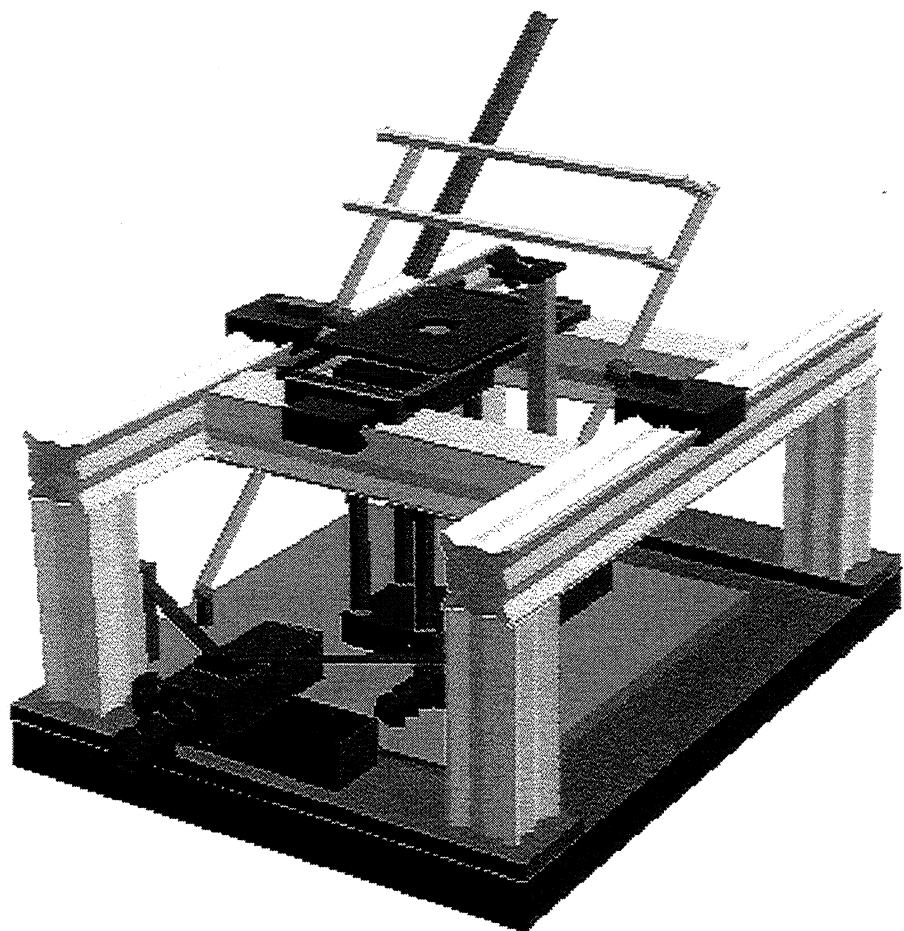
Vu de manière globale, le robot comporte quatre parties, qui relèvent de l'optique, de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique. Chacune des parties, dont organisation est illustrée par le schéma à la page suivante, sera traitée indépendamment dans les chapitres qui vont suivre.

¹ Le robot pouvant être considéré comme un projet "extérieur au système CREHOS", les repères x, x', y, z utilisés pour le décrire ne doivent pas être confondus avec les repères propres à la route utilisés dans les autres sections.

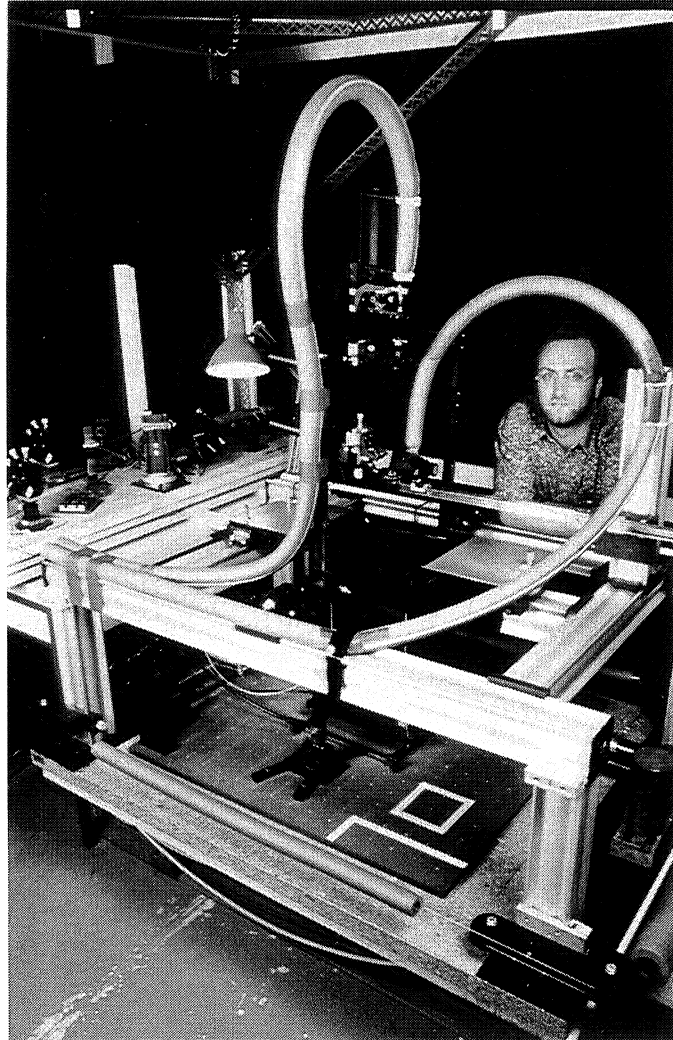
² Des facettes de quelques mm² sont très grandes comparées à celles de quelques μm² utilisées dans d'autres applications.



Pour mieux situer les descriptions détaillées qui vont suivre, il est opportun de considérer d'abord l'aspect global de cette machine, notamment en ce qui concerne sa structure mécanique, illustrée ci-dessous.



La partie mécanique articulée est installée dans une chambre noire, où se trouve également une table optique. Les dispositifs électriques et électroniques d'alimentation et de commande sont par contre à l'extérieur de la chambre noire.

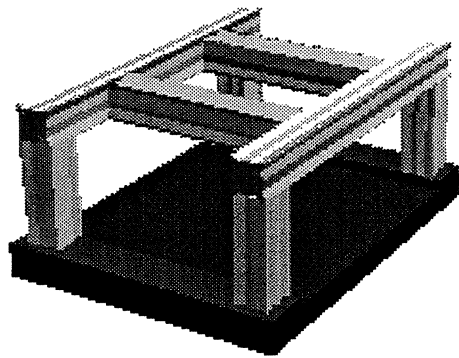


Quant aux degrés de liberté mécaniques, le robot en possède 4 effectifs (trois moteurs pas à pas et un électro-aimant on/off), mais huit autres mouvements sont dérivés mécaniquement à partir de ceux-ci par le biais de plusieurs articulations, (voir chapitre suivant).

20. STRUCTURE MECANIQUE

La conception et le dessin des détails des différents éléments de la structure mécanique, ainsi que la supervision de l'assemblage, ont fait l'objet d'un projet de semestre et d'un projet de diplôme pour un étudiant en Microtechnique, Grégoire Perregaux. Me reviennent la conception globale et la conception détaillée des éléments décrits ci-dessous¹ (et parfois leur réalisation matérielle).

20.1. Cadre rigide



Le robot repose sur une plaque de marbre de 1.20 x 1.60 m (planéité 5 μ m), isolée du plancher par le biais de six chambres à air.

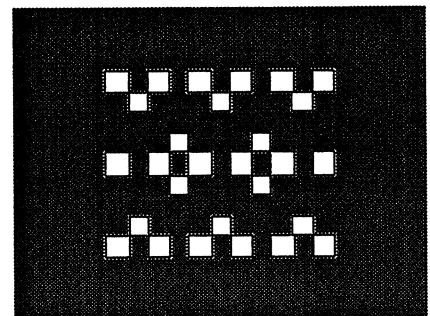
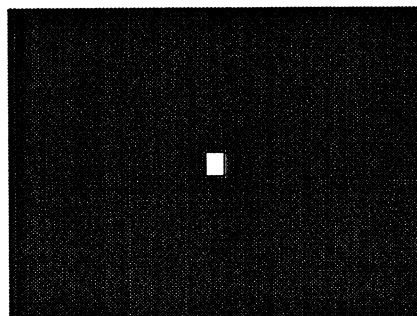
Sur le marbre, qui représente le plan de référence, est montée une structure rigide en bancs Micro-Contrôle X95, comme l'illustre la figure ci-contre.

C'est sur cette structure que sont fixés, par le biais de cavaliers, tous les autres éléments.

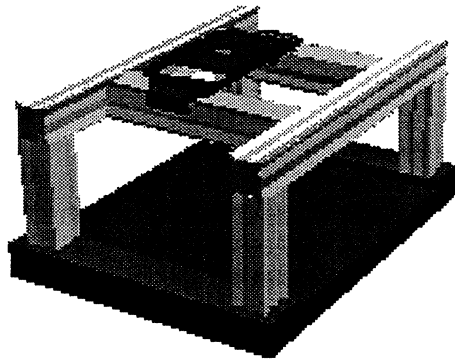
20.2. Masque

Le masque a la fonction de permettre d'exposer une zone de la plaque photosensible tout en empêchant l'exposition des autres zones, qui seront exposées à un autre moment.

La zone exposée est, dans le cas le plus simple, une fenêtre carrée, de 1 à 10 mm de côté, dans un fond opaque, mais peut également être formée d'un *groupe* de plusieurs fenêtres disjointes, ce qui permettrait d'enregistrer simultanément une *famille* de facettes.



¹ A l'exception de la conception de détail du parallélogramme déformable du §20.6.



Le masque doit pouvoir être positionné par rapport à la plaque photosensible, afin d'en choisir les zones à exposer. Ici le masque est *fixe* et c'est donc la plaque photosensible qui est mobile.

Le masque est fixé rigidement à la structure, horizontalement, mais il est amovible et réglable sur six degrés de liberté par des vis micrométriques.

Un bon masquage est un facteur déterminant pour la qualité des enregistrements, mais réaliser un bon masque n'est pas un moindre problème: d'une part, il devrait éviter d'introduire des ombres ou autres effets parasites (réflexions, diffraction), et d'autre part il doit délimiter la zone exposée de manière précise (pas de "bavures" en dehors de la fenêtre).

Malheureusement, ces deux problèmes ont des solutions apparemment contradictoires: ombres et réflexions peuvent être réduites en utilisant un masque très mince (et donc flexible), et les "bavures" éliminées par un très bon contact entre les bords de la fenêtre et la plaque photosensible (donc masque rigide). Quant à la diffraction par les bords de la fenêtre, il est impossible de l'éliminer. Examinons maintenant quelques solutions envisageables.

Masque photographique en verre

Une solution simple consisterait à réaliser un masque photographique sur une plaque photosensible semblable (ou identique) à la plaque à exposer, c'est à dire une plaque de verre avec une couche de gélatine. On pourrait utiliser des plaques de type *Agfa Contour*, dont la réponse est quasiment binaire, pour obtenir une délimitation précise des fenêtres¹.

Un masque de ce type aurait deux inconvénients majeurs: d'une part la réfraction dans l'épaisseur de verre (qui pourrait atteindre plusieurs mm pour un masque rigide) introduirait un important décalage dans la position des facettes (décalage qui de surcroît varierait selon la position des facettes), et d'autre part les nombreuses réflexions, toujours causées par l'épaisseur de verre du masque, produiraient des importantes interférences parasites². Une couche de liquide d'indice résoudreait partiellement ce dernier problème, mais compliquerait le déplacement relatif entre plaque et masque. Le masque en verre est donc à écarter.

-
- ¹ Ces plaques, après développement, deviennent complètement opaques dès que l'énergie d'exposition dépasse un certain seuil, et restent transparentes sinon (pas de gris). La transition entre deux zones est de surcroît très "nette".
 - ² Notamment entre la plaque à exposer et les deux faces du masque, et entre les deux faces du masque elles-mêmes.

Masque fléchi de S. K. Case

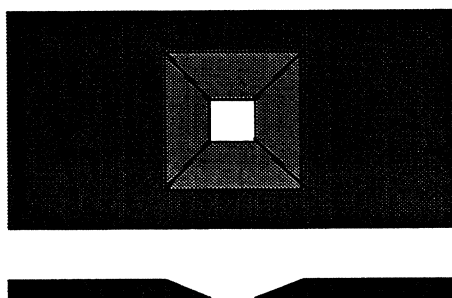
Ce masque, proposé par S. K. Case en 1981, est constitué d'une feuille métallique très mince et complètement opaque, dans laquelle est pratiquée une ouverture. Le bon contact avec la plaque est assuré localement par une flexion de la feuille.



Cette solution est intéressante dans le cas d'une fenêtre unique, mais est inapplicable à un masque complexe, composé de plusieurs fenêtres. Par ailleurs, le positionnement précis d'un tel masque me paraît assez délicat.

Masque en biseau

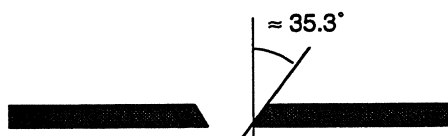
Un bon masque serait constitué par une plaque métallique épaisse, rigide et rectifiée précisément, dans laquelle seraient pratiquées les ouvertures souhaitées, et dont les bords seraient usinés en biseau. Cette solution, bien que potentiellement réalisable, a été écartée en raison de difficultés d'usinage.



Un fraisage précis serait en effet délicat pour des groupes de fenêtres de 1 mm de côté, pouvant avoir des coins communs. Quant à l'usinage par laser, les entreprises que nous avons contactées n'étaient pas en mesure de réaliser les biseaux à des coûts raisonnables¹.

Masque en silicium

Le masque en biseaux décrit ci-dessus pourrait être réalisé dans un wafer de Silicium monocristallin par attaque anisotrope profonde. En orientant convenablement les plans cristallins, il serait possible d'obtenir des ouvertures carrées, avec des biseaux de 35.26 degrés². Ce masque serait réalisable à l'EPFL-IMO, mais nous avons écarté cette solution, du moins provisoirement, en raison de problèmes de temps.



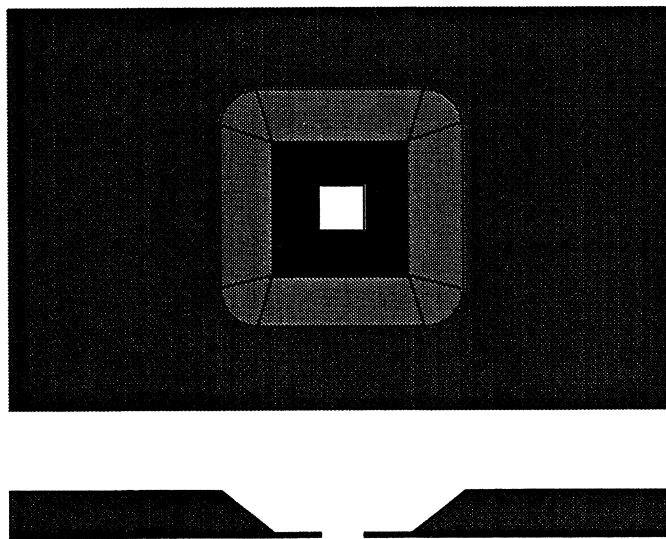
L'étude, la réalisation des masques photolithographiques, les tests et la disponibilité des installations auraient nécessité plusieurs mois, trop dans le contexte de CREHOS.

- ¹ Dans les machines disponibles, le faisceau laser est normal au plan de travail: pour usiner précisément les quatre biseaux de chaque fenêtre carrée, il faudrait construire une pièce de positionnement assez complexe.
- ² Cette valeur correspond au plan (111) du réseau cubique bcc du Si.

Feuille mince tendue et collée

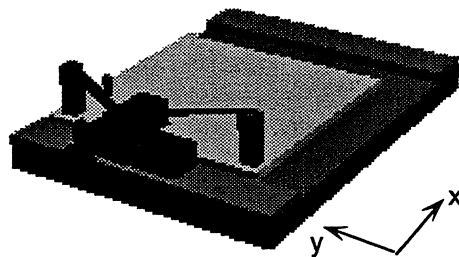
La solution retenue, qui réunit faible coût, réalisation rapide et performances suffisantes, est en effet une combinaison des deux premières: une ou plusieurs ouvertures sont usinées au laser dans une feuille d'acier de 0.1 mm d'épaisseur et cette feuille, tendue, est ensuite collée sur une plaque épaisse rectifiée comportant une seule grande ouverture en biseau (45°). Un seul masque expérimental a été réalisé pour le moment, avec une fenêtre carrée de 5 mm de côté. Ce masque donne entière satisfaction, compte tenu de la précision requise par le collecteur CREHOS.

Ce masque est fixe et rigide: c'est donc la plaque photosensible qui doit assurer le bon contact, en compensant des éventuelles erreurs d'alignement.



20.3. Plaque de base

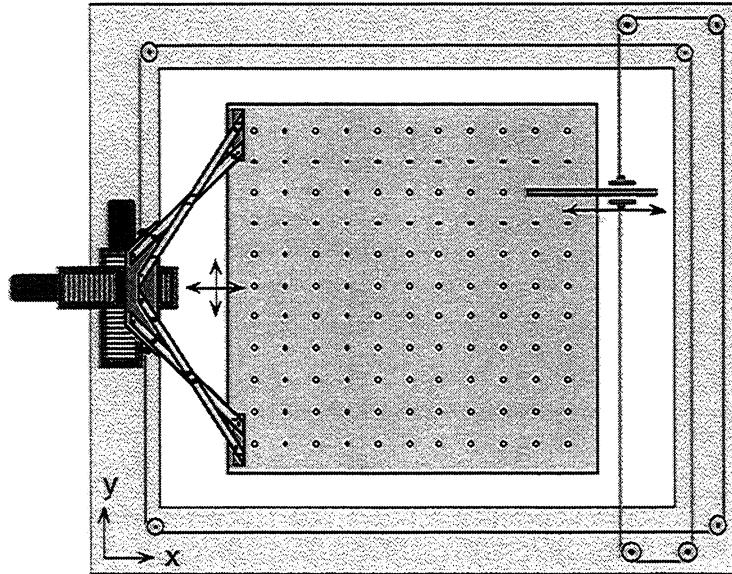
Sur le marbre de référence est posé un élément-clé du robot: c'est ce que nous allons appeler la *plaque de base*. Il s'agit d'une plaque en aluminium rectifiée, de 1 x 1 m, avec un maillage régulier de trous taraudés.



Cette plaque, à laquelle seront fixés tous les autres éléments, possède deux degrés de liberté x et y par rapport au plan de référence. Son mouvement est assuré par deux moteurs pas à pas (5 μm)¹. Lors des mouvements, la plaque de base est sustentée par un coussin d'air.

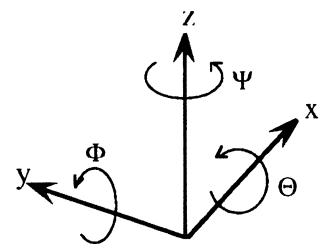
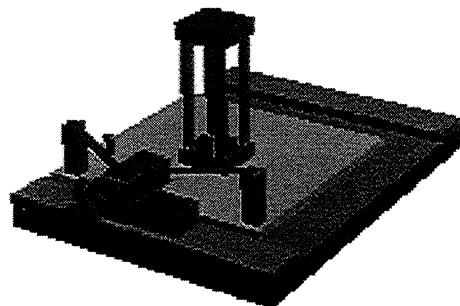
¹ Ces moteurs, étant inséparables, ne sont pas optimaux dans ce cas. Leur seul avantage, non négligeable, a été d'être disponibles à l'Institut, ainsi que leur commande électronique.

La transmission du mouvement entre les moteurs x , y , se fait par le biais d'une sorte de trapèze rigide¹. Cette fixation en porte-à-faux, outre qu'elle use les platines, introduit des vibrations indésirables lors des accélérations en y , préjudiciables pour la précision de positionnement. Ce double problème est corrigé par deux câbles en acier et des poulies fixées au cadre rigide, comme l'illustre le dessin² ci-dessous. La plaque de base, qui peut supporter des charges importantes, va donc entraîner dans ses mouvements x , y tous les composants qui y seront fixés.



20.4. Tourelle porte-plaque

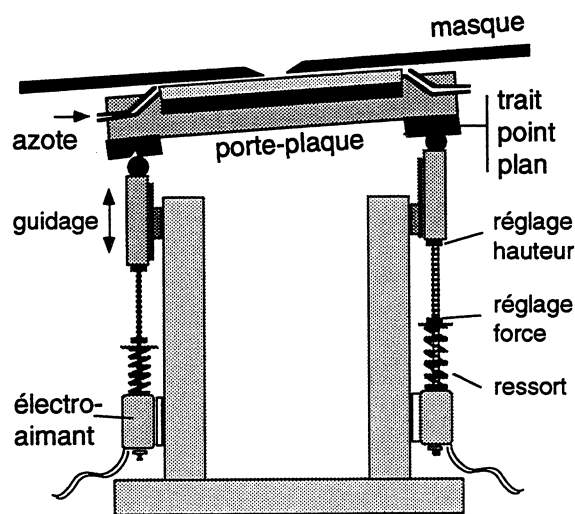
Le porte-plaque photosensible est fixé sur la plaque de base; c'est par les mouvements de cette dernière que la plaque photosensible sera positionnée par rapport au masque, fixe. Cet élément se compose de deux parties (en rouge dans le dessin) : le porte-plaque proprement dit et la tourelle de fixation.



- 1 La forme un peu étrange de cette pièce est dictée par l'exiguïté de la place disponible, compte tenu des déplacements et des extensions futures. Par ailleurs, son comportement mécanique a été simulé par éléments fins, afin d'en minimiser les déformations.
- 2 Ce système, sûrement peu élégant, a néanmoins permis d'économiser 25 à 35 kFr (nouveaux moteurs, commande et mécanique).

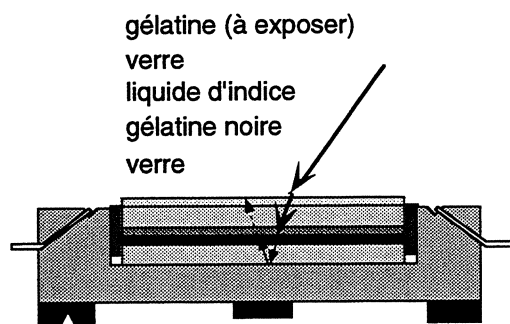
La tourelle doit satisfaire en premier lieu aux trois exigences mécaniques suivantes: garantir au porte-plaque une bonne précision de positionnement en x , y et Ψ (voir dessin précédent), assurer à la plaque photosensible un bon contact avec le masque lors de l'exposition, et permettre de séparer la plaque du masque lors des déplacements (pour éviter de rayer la gélatine). Afin d'assurer un bon contact, le porte-plaque doit exercer une légère pression contre le masque, et doit être souple en z , Θ et Φ (voir dessin précédent), pour s'adapter aux défauts d'alignement du masque.

De plus, la hauteur de la tourelle et la pression exercée par la plaque sur le masque doivent pouvoir se régler, et il serait souhaitable que le porte-plaque proprement dit soit aisément amovible (pour des préparations particulières ou pour des nettoyages). Une solution simple est la suivante:

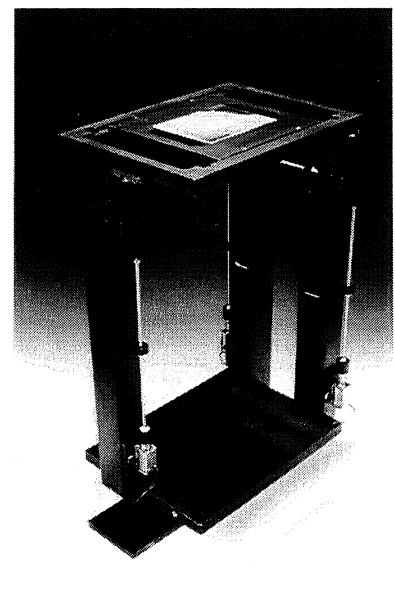


La tourelle est formée de trois pieds au sommet desquels sont fixées trois billes d'acier: le porte-plaque est posé sur ces trois billes par un système trait-point-plan, et comprend notamment une plaque noire anti-réflexions¹ et deux buses à azote pour aider à "décoller" la plaque du masque².

La plaque photosensible est maintenue à la fois par un effet de capillarité produit par le liquide d'indice (huile) et par des lamelles métalliques latérales.



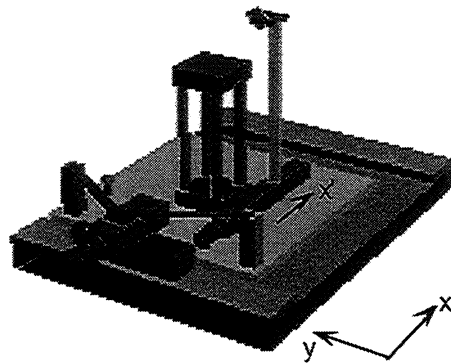
Lorsque hauteur et tension des ressorts sont convenablement réglés, il suffit d'alimenter les électro-aimants (et de souffler l'azote) pour baisser la plaque photosensible et la séparer ainsi du masque d'environ 2 mm.



- ¹ Cette plaque noire n'est rien d'autre qu'une plaque photographique identique à celle à exposer, qui a été surexposée et développée: on assure ainsi une bonne compatibilité des indices de réfraction.
- ² Plaque et masque étant de bonne planéité, ils ont la fâcheuse tendance à "coller" ensemble.

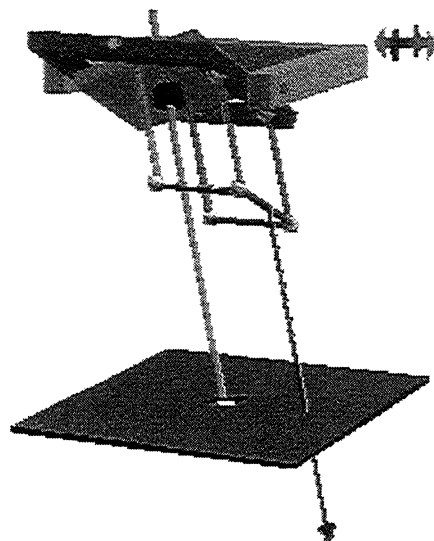
20.5. Positionnement de l'onde de référence

Une fibre optique, qui porte l'onde de référence, est fixée sur un troisième moteur de translation x' , qui repose sur la plaque de base et dont l'axe est parallèle à x . En l'absence de mouvements de ce moteur, la fibre subit donc les mêmes translations x,y que la plaque photosensible.



Le mouvement de ce troisième moteur x' permet en plus de positionner la fibre par rapport à la plaque photosensible. Bien entendu, il faut également assurer que, dans toutes les positions, l'onde objet est dirigée vers le centre du masque, ce qui rend nécessaire de doter le support de la fibre de deux degrés de rotation.

Au lieu de motoriser ces deux rotations, et de les asservir aux mouvements du tout, nous avons choisi une solution plus "artisanale" bien plus simple.

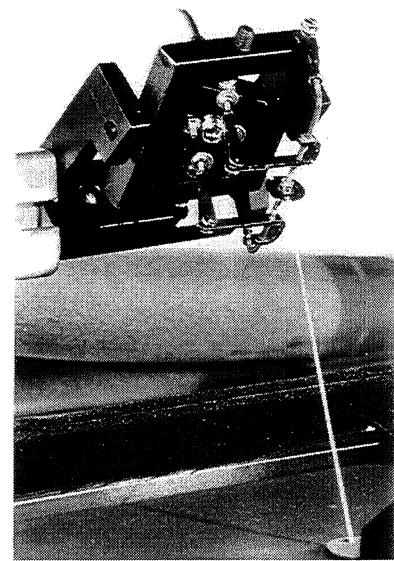
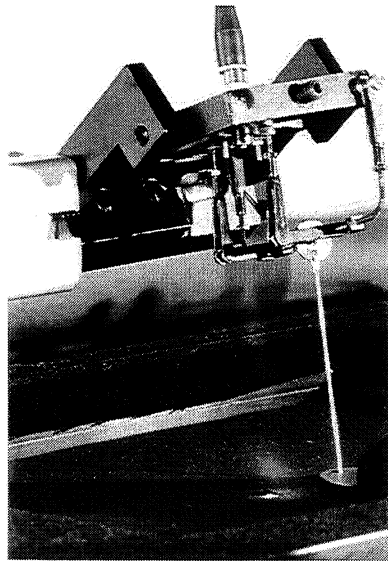


La fibre est fixée sur une double bascule qui est maintenue orientée vers le masque grâce à un petit parallélogramme déformable et un fil tendu par un poids.

Le fil, qui glisse dans un trou près de la fenêtre dans le masque, applique ainsi à la bascule une force constante et toujours dirigée vers la fenêtre, en assurant la correcte orientation de la fibre.

Cette solution, qui offre une précision suffisante dans ce contexte, a permis un gain de temps et une économie de moyens considérables.

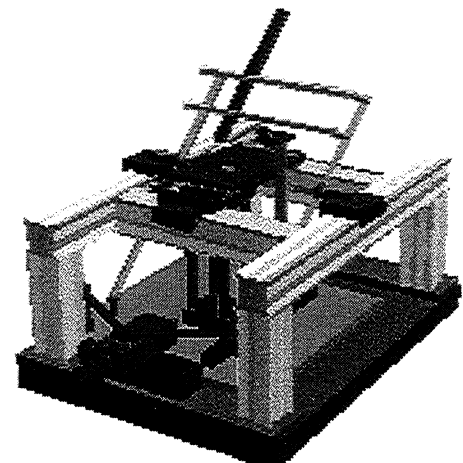
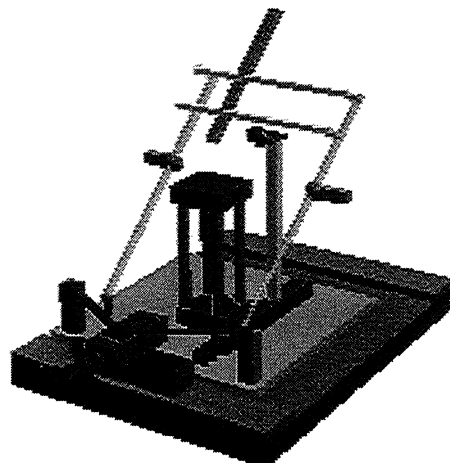
Les deux photographies à la page suivante reproduisent ce système de fixation dans deux positions différentes.



Nous remarquons que, bien que la position et l'orientation du dispositif changent, le faisceau laser reste orienté vers la fenêtre d'exposition.

20.6. Positionnement de l'onde objet

Un petit banc optique X25 supporte la fiche de sortie d'une deuxième fibre optique qui véhicule l'onde objet, ainsi que quelques éléments optiques pour la mise en forme de l'onde. Ce petit banc (en orange dans le dessin) est positionné dans l'espace par le biais d'un dispositif mécanique articulé, qui dérive ses mouvements des mouvements de la plaque de base. Il s'agit d'un parallélogramme déformable (en jaune) fixé à la fois à la plaque de base et à la structure rigide.

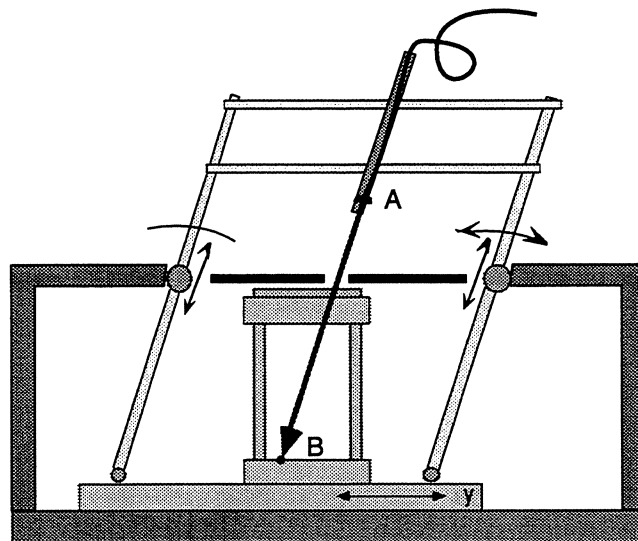


Les articulations de cette structure mobile sont conçues pour éviter les problèmes de surguidage, mais il serait trop long ici d'en donner le détail.

Examinons les mouvements de ce parallélogramme, ou plutôt de l'axe optique qu'il porte, lors des mouvements x, y de la plaque de base. Ce mouvement est plus facilement décrit par rapport au référentiel (x', y') lié à la plaque de base, et donc aussi à la plaque photosensible.

En nous référant au dessin ci-dessous, considérons le segment de l'axe optique qui va de la sortie de la fibre (point A), à son intersection avec la plaque de base (point B): dans le repère mobile (x', y') , la distance AB est constante, le point B est fixe, et le point A décrit une sphère centrée en B. De plus, le segment AB passe toujours par le centre du masque (qui dans le repère (x', y') , n'est pas fixe).

Autrement dit, on peut former un faisceau qui, en éclairant toujours le centre du masque, reste focalisé en un point B fixe par rapport à la plaque holographique, et ceci pour toutes les positions x, y , donc pour toutes les facettes. La position du point B peut être réglée avant l'enregistrement. Dans le repère absolu (x, y) , le petit banc optique qui porte l'onde objet possède *virtuellement* 5 degrés de liberté $(x, y, z, \Theta \text{ et } \Phi)$ ¹.



¹ Au sens que s'il fallait réaliser ces mouvements avec un bras robotisé, celui-ci devrait posséder 5 degrés de liberté.

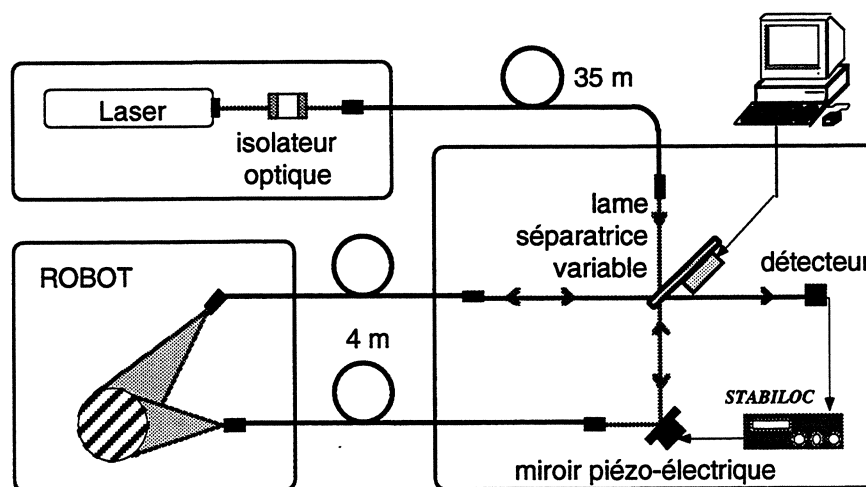
21. DISPOSITIF OPTIQUE

21.1. Système à fibres optiques

Le laser utilisé est un Ar^{++} à 514 nm avec étalon, ayant plusieurs mètres de longueur de cohérence. Pour des raisons logistiques et d'encombrement, il ne se trouve pas à proximité du robot: le faisceau y est amené par une fibre optique monomode à conservation de polarisation de 35 m de long. La fibre aboutit sur une table isolée mécaniquement, qui se trouve juste à côté du robot et accueille également le montage proprement optique. De cette table, les faisceaux objet et référence sont amenés sur leurs supports respectifs par deux fibres monomode à conservation de polarisation de 4 m de long, isolées thermiquement. Le montage optique qui se trouve sur la table comprend également une lame séparatrice variable, un obturateur général et deux obturateurs indépendants sur les deux faisceaux, le tout piloté par ordinateur.

21.2. Stabilisation de phase

L'inconvénient principal dans l'utilisation de fibres en holographie est leur extrême sensibilité aux perturbations mécaniques et thermiques, notamment en phase, qui peut se traduire par une instabilité des franges d'interférence pendant l'exposition. Pour y pallier, un dispositif de stabilisation de phase active a été mis en place. Par une fine déposition métallique au bout des deux fibres, une partie de la lumière est renvoyée sur la lame séparatrice, qui recombine ces deux réflexions¹. Leur interférence, qui rend compte des perturbations instantanées intervenues sur le parcours (allée et retour) est utilisée pour piloter un miroir monté sur un cristal piézo-électrique qui se trouve sur l'un de bras: on peut ainsi compenser instantanément le déphasage relatif entre les deux ondes à la sortie des fibres².



- ¹ Le fait d'utiliser pour recombinaison les faisceaux la même lame qui a servi à les séparer garantit que les deux faisceaux retour ont la même intensité, et donc un bon contraste de leur interférence.
- ² Du fait que la perturbation mesurée est, en effet, double (aller-retour), il faut veiller à placer le miroir piézo-électrique de manière à ce qu'il ne compense, à la sortie des fibres, que la moitié du déphasage mesuré en amont.

En pratique, ce système, bien qu'efficace du point de vue de la stabilisation de phase, n'est pas toujours souhaitable, en raison des importantes pertes qu'il introduit. La puissance du laser étant limitée, il est parfois plus intéressant d'avoir des franges légèrement instables mais des temps d'exposition courts que l'inverse¹.

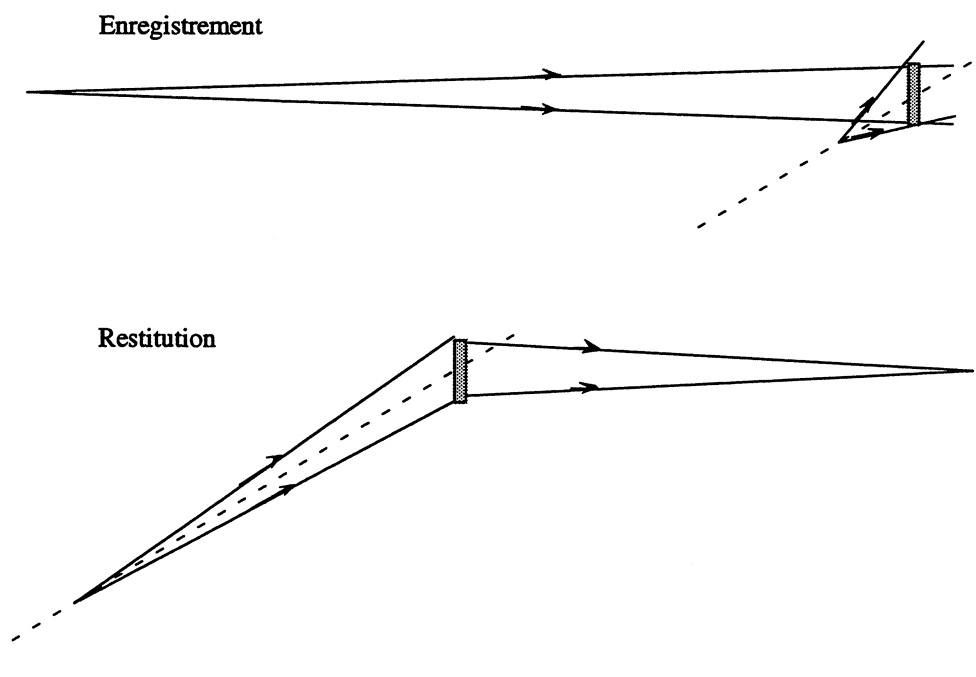
21.3. HOE pour l'onde objet

Dans le cas où l'on voudrait enregistrer simultanément une *famille* de facettes, cela nécessiterait une onde objet convergente de dimensions importantes, avec une pupille d'environ 20 cm de diamètre. L'optique servant à former cette onde devrait être placée sur le petit axe supporté par le parallélogramme déformable décrit plus haut ("positionnement onde objet").

Or, une lentille de 20 cm de diamètre poserait des problèmes considérables de poids et d'encombrement (et de prix). Ce problème peut être résolu par un HOE.

Ne disposant d'une lentille ni d'un miroir ayant les bonnes dimensions et la bonne focale, susceptible d'être "copiée" par les techniques holographiques habituelles, nous avons procédé de la façon suivante.

L'HOE est enregistré avec le montage ci-dessous, qui ne nécessite pas d'éléments de grandes dimensions. La restitution avec une onde de référence différente fournit l'onde convergente souhaitée. Bien entendu, la qualité de l'onde restituée est affectée par des aberrations, mais reste suffisante pour cette application.

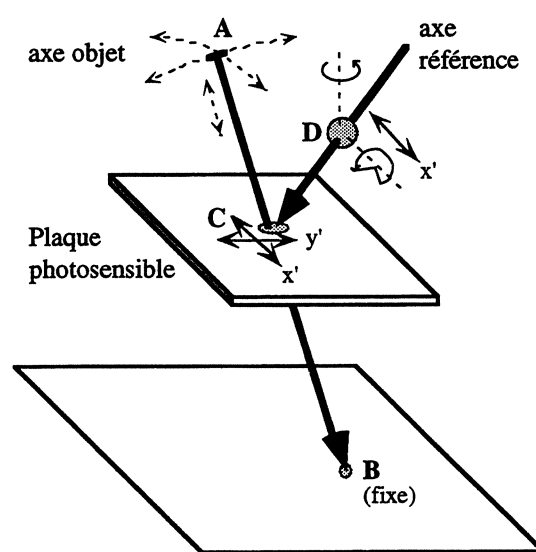


¹ Le mauvais rendement énergétique du système est imputable à la qualité de la réflexion en bout de fibre. S'agissant ici simplement d'un essai, la métallisation n'a pas été faite avec beaucoup de soin. De nombreuses techniques existent qui permettraient sûrement d'obtenir de très bons résultats. Ici, j'ai estimé que le gain de qualité sur les hologrammes obtenus, par rapport à la méthode non stabilisée, n'aurait pas valu les efforts nécessaires.

Cet HOE à été étudié et réalisé dans le cadre d'un projet de diplôme par un étudiant de l'Ecole Technique de Buchs (SG), Daniele Graber, en collaboration avec le Prof. Jütz. Les résultats obtenus ont été assez bons, mais pour l'instant l'HOE n'a pas été utilisé sur le robot, pour des raisons logistiques diverses.

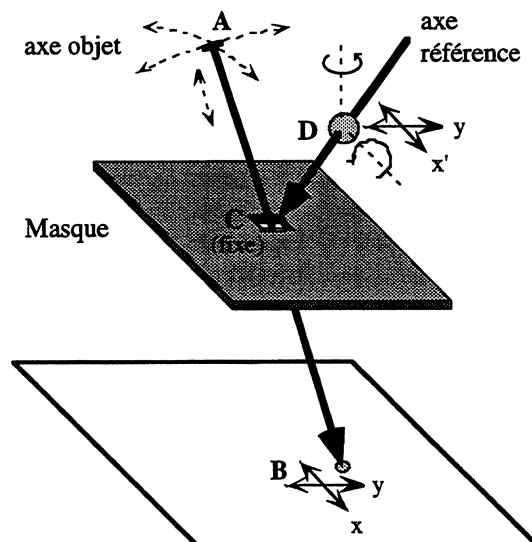
21.4. Possibilités de mouvement des ondes

En raison de la relative complexité des mouvements du robot, il convient de résumer les mouvements possibles pour les deux ondes, par rapport à la plaque photosensible et par rapport au masque.



Dans un repère (x', y') lié à la plaque photosensible, le point C d'intersection des deux ondes peut être choisi en x' et y' . Le point B visé par l'onde objet est fixe (mais réglable), et la distance AB est constante. La source de l'onde de référence a un seul degré de liberté en x, et donc la distance DC varie suivant la position de D. La hauteur z des points B, C et D est fixe.

La source de l'onde objet, A, bouge en x, y et z, décrivant une sphère centrée en B.



Dans un repère (x, y) lié au masque, par contre, c'est le point C d'intersection des ondes qui est fixe, et correspond évidemment à la fenêtre. La source de la référence D a ici deux degrés de liberté x et y, et la distance CD varie.

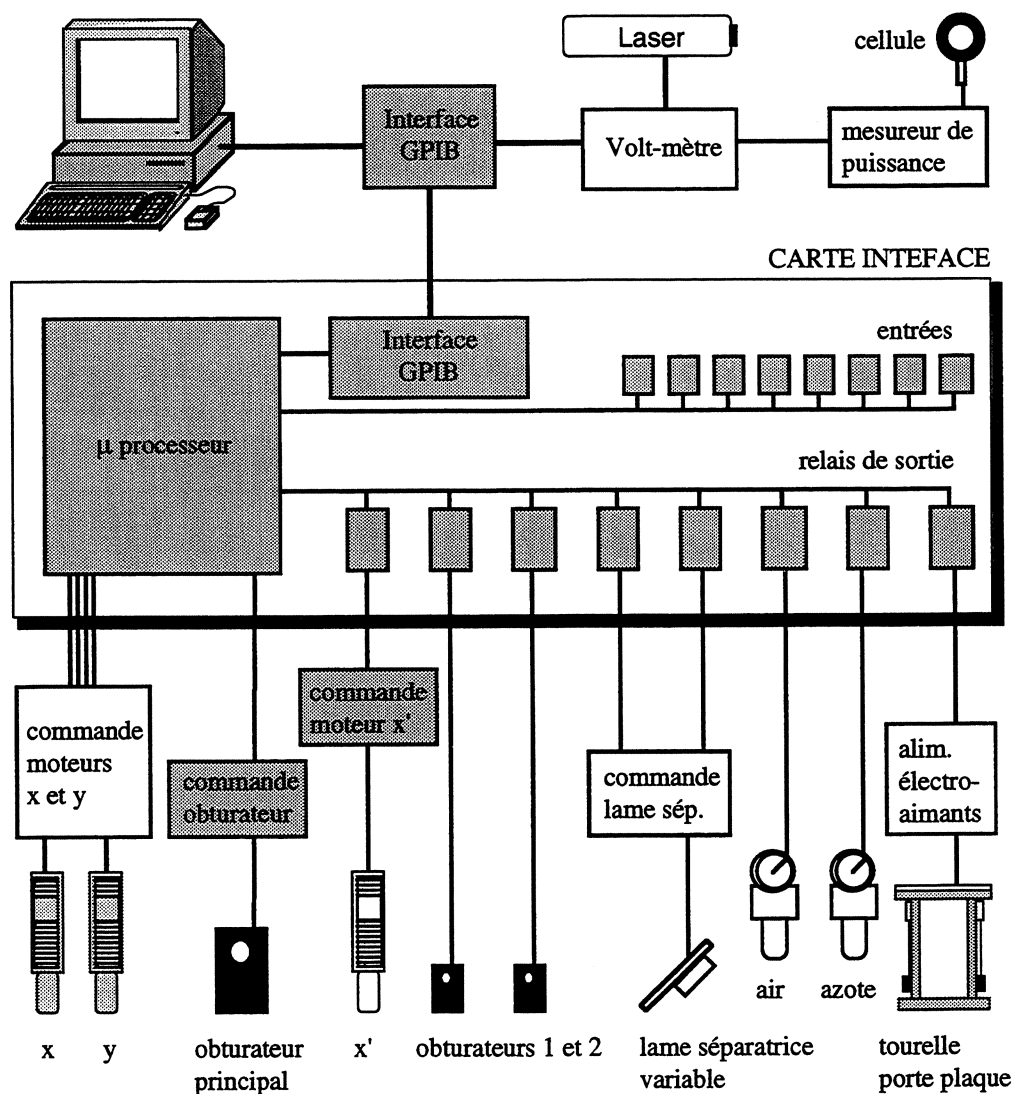
Le point visé par l'onde objet se déplace en x, y, et la distance AB est toujours constante.

Soulignons en outre que les mouvements en y de B et de D sont rigidelement liés.

En outre, pour des applications autres que le collecteur pour CREHOS, il est toujours possible de fixer les bancs optiques sur la structure de manière à ce qu'ils ne soient pas affectés par les mouvements de la plaque de base.

22. ELECTRONIQUE DE COMMANDE

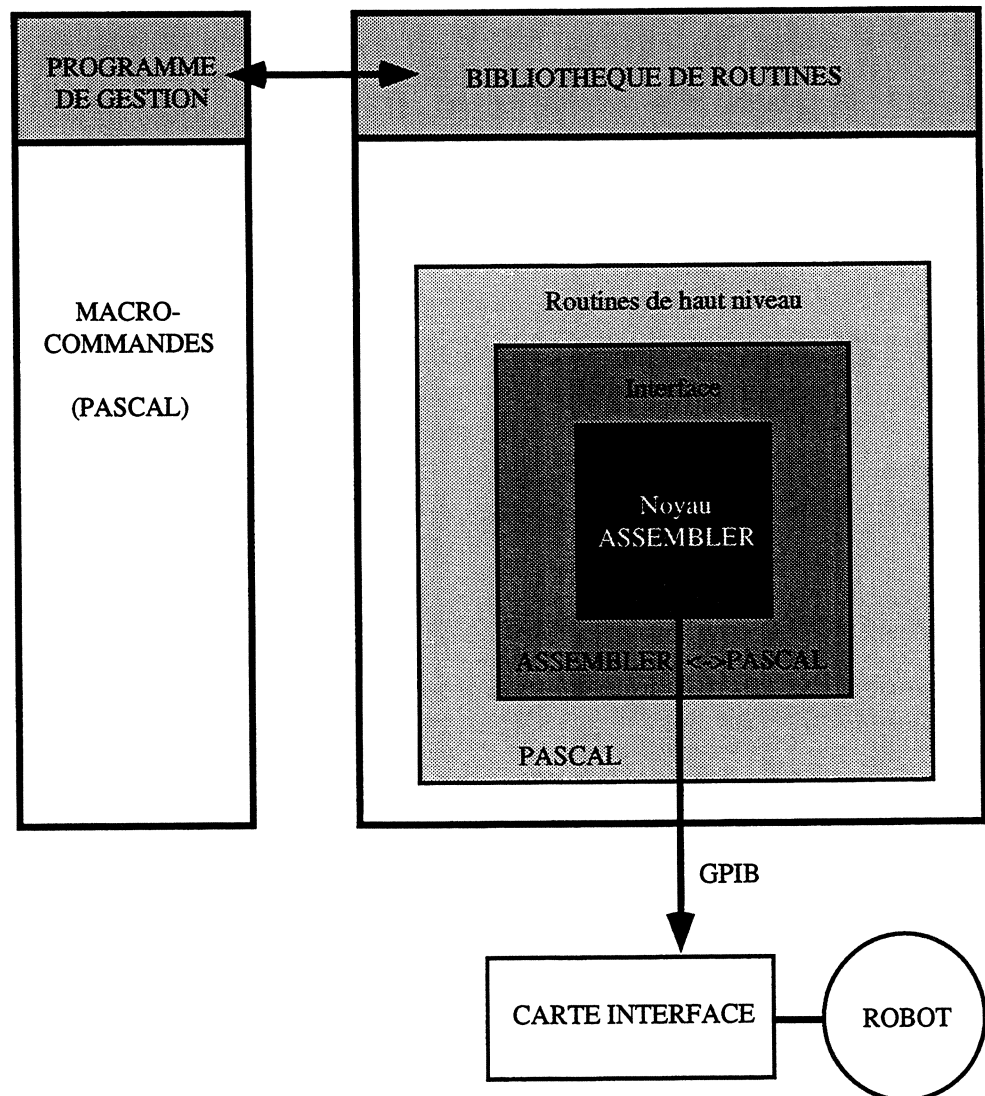
L'électronique de commande a été réalisée à l'IMAC, en raison de la relative hétérogénéité des dispositifs à gérer. L'élément central est une carte d'interface gérée par le protocole de communication GPIB (IEEE). Sa conception détaillée et sa réalisation ont fait l'objet d'un projet de semestre pour un étudiant en informatique, Karim Berrah. Ci-dessous, une vue schématique du dispositif électronique global (en gris, les dispositifs réalisés à l'IMAC). La puissance de sortie du laser peut être suivie grâce à un capteur intégré au laser, et la cellule photoélectrique pour la mesure d'intensité peut être placée à différents endroits du montage, notamment pour effectuer des réglages automatiques du robot avant l'exposition.



23. PROGRAMMES DE CONTROLE

La partie logicielle du contrôle du robot comprend quatre niveaux de langage. Le premier niveau, le plus "profond", est constitué par les routines de communication en Assembler, interfacées vers Pascal par les routines du deuxième niveau. Dans le troisième niveau nous trouvons les routines correspondant à des macro-commandes pour le robot: la bibliothèque qu'elles constituent est en effet le langage évolué propre au robot. Le dernier niveau, le plus évolué, est enfin constitué par le séquencement des macro-commandes (en Pascal). Ces macro-commandes peuvent être simples ou impliquer plusieurs opérations.

Le travail de conception et d'organisation des différents niveaux, ainsi que la programmation du noyau de gestion et de certaines macro-commandes ont été confiés à un étudiant en informatique, Alexandre Wagner, sous la forme de projet de semestre et de mandat d'assistant-étudiant.



Liste des commandes

Pour avoir une idée plus concrète, voici la liste des commandes disponibles. Dans la plupart des cas, leur fonction se déduit aisément de leur nom; la fonction des commandes composées, par contre, apparaîtra plus clairement dans le chapitre suivant.

Commandes simples

AIR_ON
AIR_OFF
AZOTE_ON
AZOTE_OFF
LAM_AV
LAM_AR
LAM_STOP
OBT_ON
OBT_OFF
PLATE_DWN
PLATE_UP
RAY1_ON
RAY1_OFF
RAY2_ON
RAY2_OFF
READ_PWR
STEP_X
STEP_Y

Commandes composées

MOVE_X (STEPS:INTEGER)
MOVE_Y (STEPS:INTEGER)
MOVE_W (STEPS:INTEGER)¹
SET_W
CHECK_PWR
EXPOSE (TEXP:LONGINT)

PARAM
INIT_ROBOT
PRE_START
AFF_DELTA
AFF_TIME
MAKEH
HOME
DISCHRG

¹ Le moteur W correspond à l'axe x'.

24. UN EXEMPLE DE SEQUENCE D'ENREGISTREMENT

Supposons de vouloir enregistrer un MFHOE comportant $N \times M$ facettes. Dans les hologrammes multifacettes qui nous intéressent ici, à chaque facette correspond une position différente de l'onde de référence, autrement dit du moteur W (axe x') : avant l'enregistrement un fichier contenant les $N \times M$ positions de W est créé.

La partie optique est ensuite réglée, ce qui peut être fait, du moins partiellement, de manière automatique. Un programme permet notamment de régler automatiquement la lame séparatrice afin d'obtenir au niveau de la plaque un rapport donné entre l'intensité des deux ondes (typiquement 1:5, 1:6). On pourrait également constituer un fichier contenant les positions de la lame séparatrice pour chaque facette¹ (ce qui n'a pas été nécessaire dans notre cas).

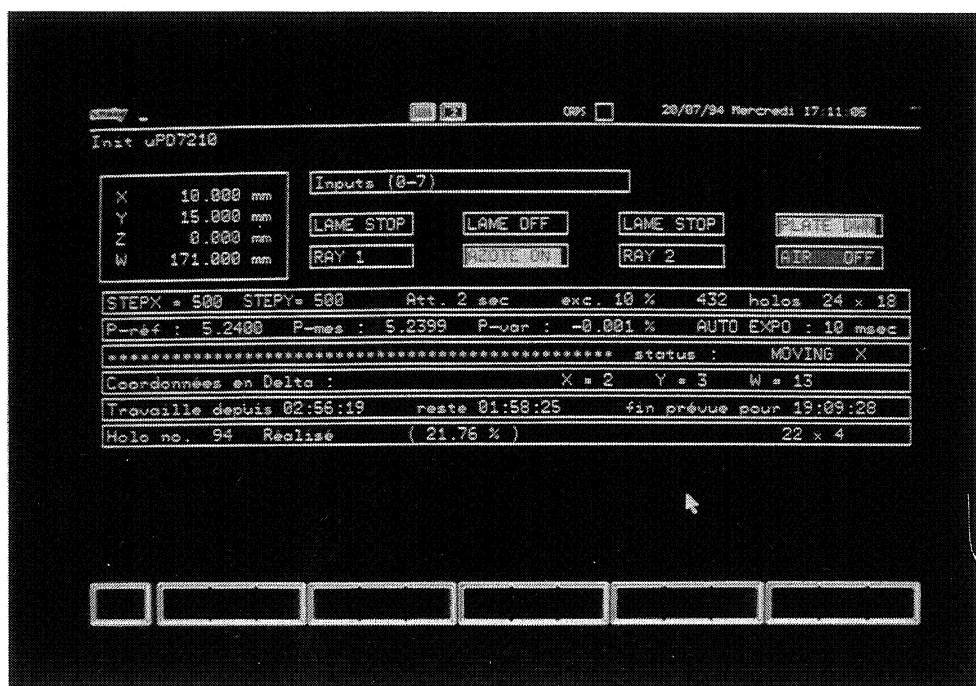
De manière schématique, la structure de la séquence d'enregistrement est la suivante.

PARAM		permet à l'opérateur de définir différents paramètres propres à l'enregistrement;
INIT_ROBOT		initialise l'électronique et teste la communication GPIB;
PRE_START		met le robot dans l'état "chargement de la plaque photosensible" donne une check-list des points à vérifier et, une fois la plaque en place, se met dans l'état "prêt à commencer la séquence";
REPETER $N \times M$ fois		boucles permettant de parcourir la plaque;
	AZOTE_ON	le jet d'azote aide la séparation plaque / masque;
	PLATE_DWN	baisse le porte-plaque;
	AZOTE_OFF	déclenche le jet d'azote;
MOVE_X/Y	AIR_ON	enclenche le coussin d'air sous la plaque de base;
	STEP_X/Y	positionne le moteur X ou Y (selon les cas) pour placer la prochaine facette sous le masque;
	AIR_OFF	supprime le coussin d'air;
	PLATE_UP	remonte le porte-plaque;
SET_W		lit le fichier des positions de W et place le moteur x' dans la position correspondant à la facette actuelle.;

¹ Ceci pourrait compenser les variations du rapport des flux dues aux variations géométriques du montage.

MAKEH	<	WAIT	attend quelques secondes, afin que le montage se stabilise mécaniquement
		CHECK_PWR	mesure la puissance du laser et calcule le temps d'exposition. Donne des alarmes en cas de puissance insuffisante.
		EXPOSE(nm)	ouvre l'obturateur principal pendant le temps calculé (quelques dizaines de ms)
AFF_DELTA			affiche à l'écran l'état complet du robot
AFF_TIME			affiche des statistiques concernant les temps d'exécution, et prévoit l'heure à laquelle la séquence se terminera ¹ .
FIN des répétitions			
DISCHRG			met le robot dans l'état "prêt au déchargement de la plaque", et émet une alarme.
FIN du programme.			

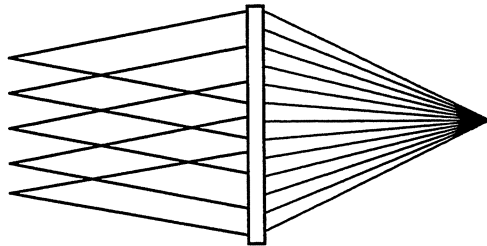
Rappelons que pour des raisons de clarté, ne figurent dans cet exemple que les étapes principales. Le programme réel comprend en effet un bon nombre de routines de vérification, de correction des réglages durant la séquence, de mise à jour des différents paramètres, des éventuelles interventions de l'opérateur, etc.



¹ Autre routine simple mais très utile, surtout lorsque la séquence, qui peut durer plusieurs heures, est lancée le soir, pour bénéficier d'un environnement mécaniquement calme.

25. QUELQUES EXEMPLES DE MFHOE REALISABLES AVEC LE ROBOT

Collecteurs spéciaux

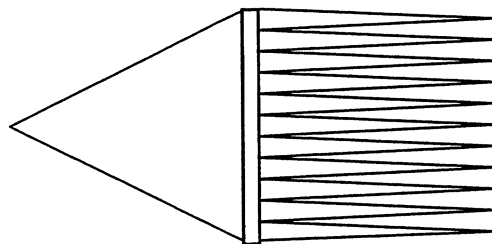


C'est la vocation principale du robot, ce pourquoi il a été conçu. Nous ne nous attarderons pas sur ce type d'hologramme car il est amplement décrit dans la section C. Bien entendu, on peut envisager d'autres collecteurs que celui pour CREHOS, réalisant des fonctions optiques différentes.

Lumière structurée

Pour des applications dans le domaine des systèmes de vision ou de la mesure de forme, il est parfois utile d'éclairer la scène par de la lumière structurée. Il existe différentes techniques pour produire cet éclairage structuré, parmi lesquelles se trouvent les éléments optiques holographiques.

Dans ce contexte, les HOE multifacettes occupent une place de choix, en raison de la grande souplesse de structures lumineuses qu'ils offrent.



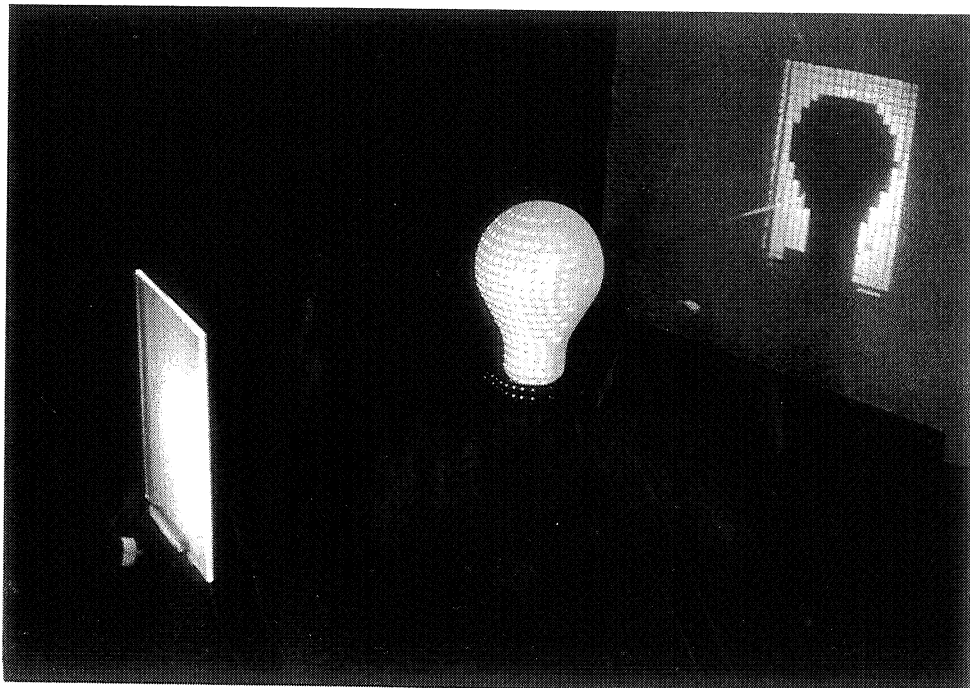
Nous nous limiterons ici à un seul exemple, qui a été réalisé avec le robot à titre d'essai: il s'agit d'un hologramme qui, éclairé par un faisceau divergent, produit une matrice de 500 points (20 x 25), sur une surface de 10 x 12.5 cm.

Il est important de souligner que dans ce cas (référence divergente) toutes les facettes sont différentes, ce qui rend nécessaire l'emploi du robot pour les enregistrer. Il serait plus facile d'enregistrer un MFHOE demandant un éclairage parallèle, car dans ce cas toutes les facettes seraient identiques, et on pourrait se passer du robot, mais les dimensions de l'hologramme (et de la matrice de points) seraient limitées par le diamètre de la lentille nécessaire à produire le faisceau parallèle de restitution. Avec le robot on peut par contre envisager des matrices de 50 x 40 cm¹, ce qui permettrait l'étude d'objets de taille respectable.

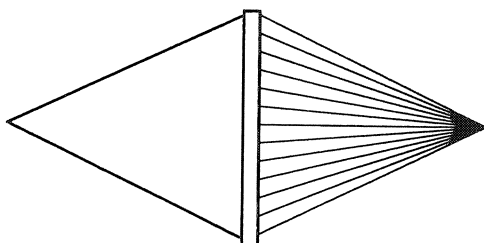
La photo à la page suivante nous montre l'MFHOE de test qui a été réalisé, éclairant une ampoule. Il est intéressant d'observer l'ombre de l'ampoule, qui se trouve discrétisée.

¹ En juxtaposant quatre plaques de 25 x 20 cm.

Cet effet pourrait d'ailleurs être exploité pour réaliser un système très rapide de reconnaissance de formes, entièrement optique¹ (pour un nombre limité de formes simples).

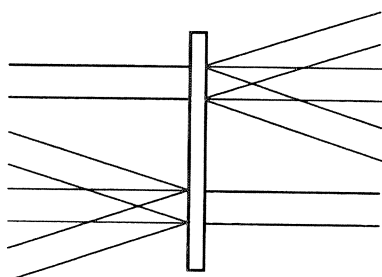


Lentilles de grandes dimensions



Le robot permet de réaliser des "lentilles" jusqu'à 50 x 40 cm, ayant une longueur focale de l'ordre de 500 mm. Leur encombrement, leur poids et leur coût seraient très inférieurs à leur équivalent réfractif, mais leur qualité serait sans doute très modeste.

Séparations / recombinaisons multiples (fan-out ou fan-in)



Des éléments utiles et faciles à réaliser avec le robot (directement ou en deux étapes) seraient de séparateurs à N faisceaux. L'angle de chaque faisceau diffracté pourrait être choisi arbitrairement, et le même type d'élément pourrait être utilisé pour les recombinaison.

¹ On pourrait y parvenir en plaçant derrière l'objet deux couches (au moins) de MFHOE opportunément conçus, afin d'implémenter un algorithme neuronal non-adaptif dont la phase d'apprentissage aurait préalablement été simulée sur ordinateur.

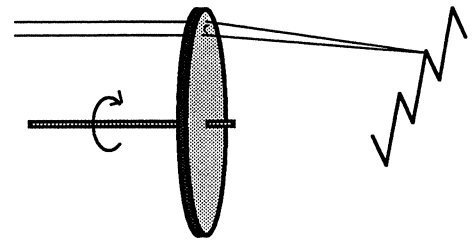
Hologrammes de caractérisation

La possibilité du robot de varier le rapport des flux et le temps d'exposition d'une facette à l'autre permettrait d'enregistrer des hologrammes destinés à étudier statistiquement l'influence exacte de ces paramètres sur la qualité de l'hologramme, notamment en ce qui concerne le rendement de diffraction.

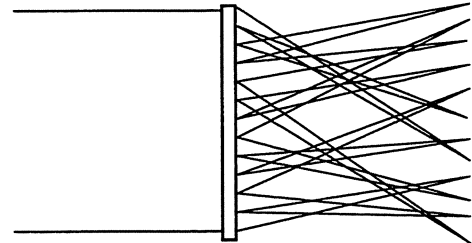
Les facettes se trouvant sur le même support, on bénéficierait ainsi d'une bonne homogénéité des procédures chimiques de développement. Le robot pourrait également être utilisé lors de la restitution pour mesurer automatiquement le rendement de chaque facette¹.

Les MFHOE suivants ne seraient pas réalisables par le robot à l'heure actuelle, mais ils le seraient une fois installées les extensions prévues, consistant notamment en trois "vrais" degrés de liberté supplémentaires (un degré y' sur l'onde de référence et deux degrés x'' , y'' sur le point B).

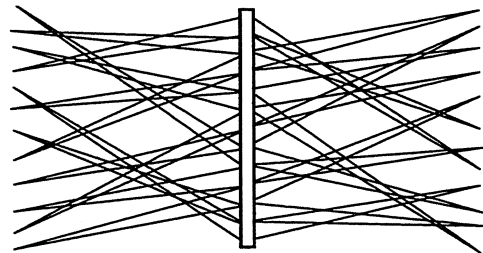
Scanners arbitraires



Connectique (recherche²)



Optical computing (recherche³)



- ¹ Cette mesure pourrait d'ailleurs se faire également sur différentes zones d'un hologramme quelconque, pas forcément multifacettes.
- ² Les applications de ces MFHOE seraient limitées à des expériences de recherche en raison des grandes dimensions des facettes et de leur modeste précision. Ils seraient par contre très avantageux sur le plan économique.
- ³ Idem.

Dispositifs de sécurité / authentification

Il est envisageable de développer des sortes de "clés" ou de marques d'identification basées sur un hologramme multifacettes. Un deuxième multifacettes permettrait de les authentifier.

26. CONCLUSIONS

Le robot, malgré son faible coût de réalisation et des solutions mécaniques parfois "artisanales", donne des résultats très satisfaisants. Ses principaux atouts sont notamment:

- La possibilité de réaliser des éléments optiques holographiques multifacettes de grandes dimensions: plaques photosensibles jusqu'à 25 x 20 cm, pouvant être juxtaposées.
- Très faible coût de réalisation de chaque MFHOE: si on exclut l'amortissement du robot et le salaire de l'opérateur, chaque plaque revient à une vingtaine de francs.
- Bref délai de réalisation de chaque MFHOE: un jour suffit pour régler le robot, créer le fichier des positions des ondes, exposer la plaque et la développer¹.

Les inconvénients de cette machine sont par contre les suivants:

- Ce robot n'est pas, du moins à l'heure actuelle, universel. Les types d'hologrammes réalisables sont limités par la liaison mécanique entre certains degrés de liberté. La structure est néanmoins conçue en prévision d'extensions qui supprimeraient cette limitation.
- La précision de positionnement des ondes et des facettes, bien que largement suffisante pour nos applications, reste modeste sur le plan général (de l'ordre de 100 μ m). Pour cette raison, et à cause des techniques de masquage, la taille minimale des facettes se situe autour de 1mm².

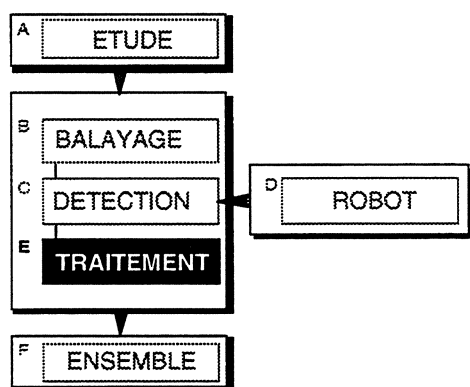
Comme nous venons de le voir au chapitre précédent, les applications possibles de cette machine sont variées, et dépassent du cadre strict du projet CREHOS. Cependant, le résultat principal obtenu avec ce robot est, de manière générale, un collecteur holographique pour systèmes de balayage sur surfaces de mauvaise qualité optique. Ce collecteur est amplement présenté dans la section C.

¹ Ce qui signifie qu'en l'espace d'une journée, nous pouvons tester une nouvelle configuration de facettes. Ceci est loin d'être le cas avec des techniques plus sophistiquées, qui nécessitent souvent des temps de calcul, de programmation ou de réalisation de masques de plusieurs semaines, voire plusieurs mois.

Section E

LE TRAITEMENT

Reconnaissance des fissures en temps réel par processeur parallèle *ad hoc*.



Cette section est consacrée à l'étude du dispositif électronique permettant de traiter l'énorme débit d'information produit par le système. Le dispositif proposé, qui constitue l'une des innovations apportées par ce projet, reconnaît les fissures et mémorise l'information comprimée. Ces opérations sont effectuées *en temps réel*, entre deux balayages, par un algorithme parallèle implémenté sur des unités électroniques spécialement conçues à cet effet. L'algorithme a été testé par simulation et partiellement implémenté sur des cartes électroniques.

27.	Le rôle du système de traitement	189
28.	Le problème	191
28.1.	Corréler les impulsions	192
28.2.	Reconnaître les fissures	192
28.3.	Comprimer l'information	193
28.4.	Mémoriser	194
29.	La solution: traitement parallèle	195
29.1.	Principe	195
29.2.	L'algorithme de base	196
29.3.	Analyse et mémorisation	200
29.4.	Cas particuliers	205
29.5.	Positionnement	205
29.6.	Format de sortie des données	209
30.	Programme de simulation	211
30.1.	Interface graphique	213
30.2.	Interface utilisateur	215
30.3.	Génération aléatoire des fissures	215
30.4.	Génération des signaux	216
30.5.	Simulation de la mémoire tampon	216
30.6.	Simulation des suiveurs	216
30.7.	Lecture des suiveurs	222
30.8.	Résultats	222
31.	Implémentation électronique	225
31.1.	La carte tampon	226
31.2.	Les suiveurs	228
32.	Conclusions	229

27. LE RÔLE DU SYSTÈME DE TRAITEMENT

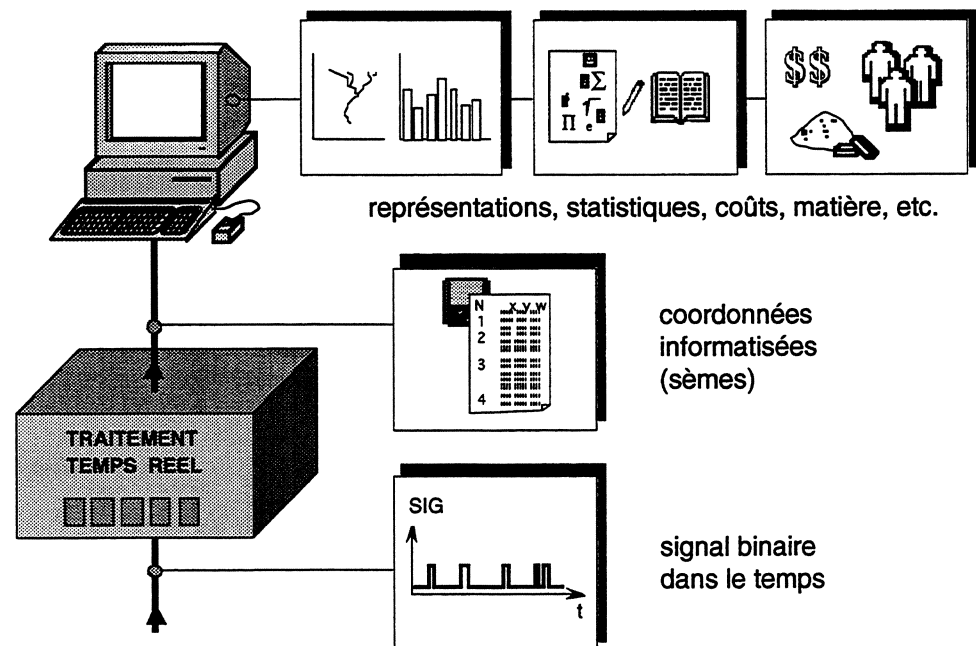
Cette section décrit un des points-clé du concept de CREHOS: un algorithme de reconnaissance des fissures en temps réel, obtenu par un traitement parallèle de l'information. Il s'agit de l'une des innovations apportées par ce projet et dont les applications peuvent s'étendre au-delà du strict domaine des fissures routières.

Le développement de cette partie du projet s'est fait avec le concours d'un étudiant en microtechnique, Bertrand Gros, qui, dans le cadre d'un projet de semestre, a développé le premier prototype (simplifié), tandis que le développement poussé de ce dispositif électronique a été confié à l'ing. Alexandre Micsiz, de l'IMAC. Me reviennent les principes, les schémas de base et le programme de simulation.

Examinons comment évolue l'information au sein de ce dispositif. Après avoir traversé les différents étages du système, l'information d'entrée se trouve codée sous la forme d'un signal $Sig_{bin}(t)$ constitué d'un train d'impulsions binaires dans le temps.

Il s'agit ici de l'*interpréter*, autrement dit de faire franchir à cette information un saut de *valeur symbolique* important: l'information de sortie sera une liste de *paquets de valeurs numériques*, où chaque paquet décrit un objet qui a été *identifié* comme fissure.

L'information codée sous cette forme, pourra aisément être soumise à toutes sortes de traitements ou de représentations, qui, par le biais d'informations et de connaissances additionnelles, en accroîtra davantage la valeur symbolique, de manière plus ciblée par rapport à son utilisation¹.



¹ Représentations graphiques, statistiques détaillées, estimations des coûts de réparation, durée, nombre d'ouvriers à engager sur le chantier, quantité de bitume nécessaire, etc.

28. LE PROBLEME

La grande difficulté à surmonter est ici l'énorme débit d'information à traiter: l'analyse de chaque mm² d'une bande de 4m de largeur à une vitesse de 43.2 km/h produit 48 mio de points par seconde, et ceci pendant 8 heures¹.

L'information de chaque point, codée sur deux niveaux, représente presque 5.72 MBytes/s, ce qui donne un total, sur 8 heures de mesure, d'environ 161 Gbytes. Dans ces conditions, il est exclu de mémoriser la totalité du signal pour le traiter a posteriori, d'autant plus que les *sèmes* représentent une partie infime de ce signal².

Il faut donc traiter le signal en *temps réel*: la plus grande partie du traitement (et si possible *tout* le traitement) doit se faire au fur et à mesure de la progression du relevé, autrement dit entre un balayage et le suivant. Cela afin que seul *le noyau minimal de sèmes utiles et suffisants* soit enregistré sur le support de mémorisation.

Soulignons qu' *identifier le noyau minimal de sèmes utiles et suffisants* revient de facto à résoudre tout le problème du traitement. Pour minimiser la quantité d'information sans trop de pertes de fidélité ni de valeur symbolique, il faut la situer dans un *contexte*³ et c'est précisément la construction de ce contexte, c'est à dire l'établissement des relations entre les données isolées, qui constitue le coeur du problème.

En pratique, pour déterminer si une partie du signal est un sème, il est nécessaire de comprendre si elle appartient à une fissure, ce qui implique la construction préalable du contexte "fissure", sur la base des autres parties du signal. Par rapport à ce contexte "fissure" il sera également possible de déterminer si un sème identifié comme tel est *utile* ou ne l'est pas, c'est à dire s'il appartient ou non au noyau minimal permettant de coder la fissure en garantissant une fidélité raisonnable.

Le problème principal est ici le temps très court disponible pour réaliser cette opération: dans le pire des cas, celui de deux fissures de 1 mm de largeur séparées de 1 mm, le système devra traiter deux impulsions de 20 ns de durée et espacées de 20 ns. Le temps qui sépare un balayage du suivant est par contre constant: 83 ms.

Le traitement englobe en effet quatre opérations différentes: corrélérer les impulsions, reconnaître les fissures (en filtrant le bruit), comprimer l'information et la mémoriser sur un support permanent. Examinons-les plus en détail.

¹ Rappelons que ce débit est comparable à 5.5 pages A4 à 300 DPI par seconde, bien que cette valeur soit à prendre à titre indicatif, car ici le problème n'est pas le même qu'en bureautique, où chaque pixel est significatif. Dans le pire des cas, c'est à dire plusieurs fissures de 1 mm très rapprochées, le système doit néanmoins être à mesure de suivre, pendant un temps limité, un débit de cet ordre.

² Les notions de *sème*, *valeur symbolique* et de *fidélité* sont définies dans la section A, §. 6.1., page 35.

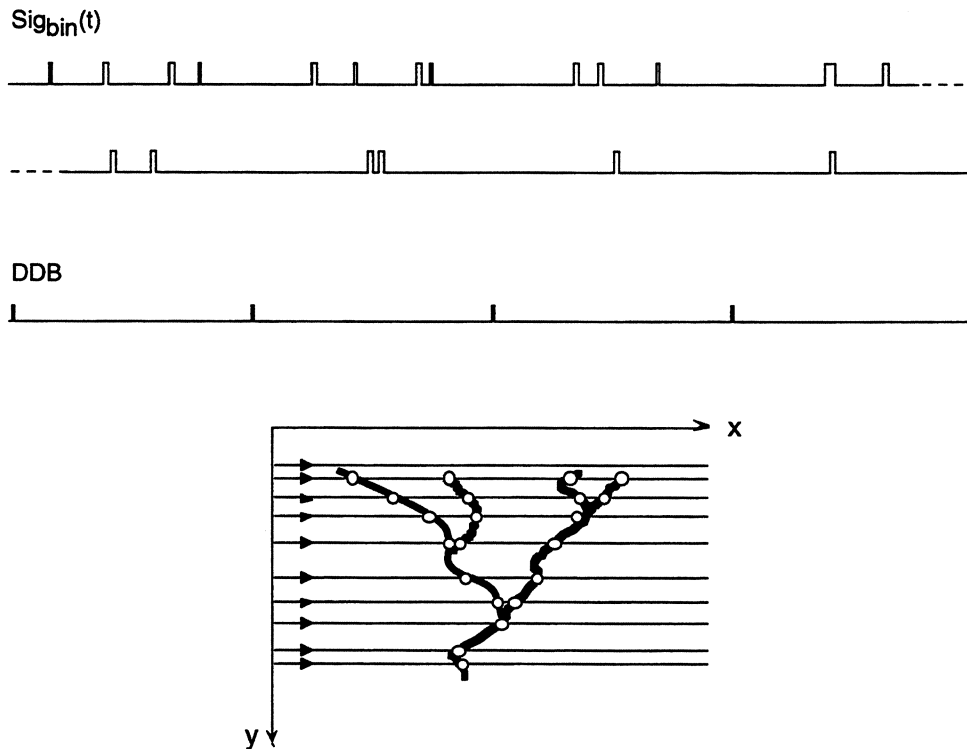
³ Dans le sens étymologique de "tisser avec".

28.1. Corréler les impulsions

Le système de traitement reçoit un train d'impulsions de largeur irrégulière et séparées par des intervalles irréguliers. Sa première tâche est d'établir des corrélations entre ces impulsions apparemment "chaotiques", ce qui est un premier acte d'interprétation. Plus précisément, il faut trier les impulsions et les classer dans différents groupes, chaque groupe devant représenter une fissure.

Cette opération est compliquée non seulement par le fait que la taille de ces groupes peut être très variable, mais surtout par la totale décorrélation entre les groupes, car le début, la longueur et la fin de chaque fissure ne sont pas corrélés à ceux des autres fissures, ce qui implique la possibilité de toutes sortes de superpositions temporelles des groupes.

A titre d'exemple, le signal ci-dessous correspond à la fissure simple représentée plus bas (signal sans bruit).



28.2. Reconnaître les fissures

L'opération de corrélation ne suffit pas à identifier une fissure, il faut encore filtrer les *bruits sémiques*, qui pourraient conduire à interpréter des groupes d'impulsions de manière erronée. Ces bruits, décrits au §18.1. (page 140), résultent du *bruit de détection* et du *bruit propre* du revêtement. Ils se traduisent au niveau de $\text{Sig}_{\text{bin}}(t)$ par des impulsions surnuméraires ("faux sèmes") ou par des impulsions manquantes (perte de sèmes).

◇ *Sèmes perdus*

Tant que le bruit de détection reste faible, la perte de quelques impulsions n'affecte pas la valeur symbolique de l'information. En effet cette erreur peut conduire à interpréter une longue fissure comme deux (ou plus) fissures se suivant, ce qui n'affecte que très peu l'évaluation de la dégradation.

◇ *"Faux sèmes" surnuméraires*

Cette erreur, si elle n'est pas corrigée, peut avoir des conséquences plus importantes. Globalement, elle peut conduire à évaluer un tronçon comme étant en plus mauvais qu'en réalité et, localement, elle peut fausser l'interprétation de la forme et de l'orientation des vraies fissures.

En conclusion, il faut grouper les impulsions en les corrélant dans le temps, et *reconnaître* les fissures au sein de ces groupes. Une fissure ramifiée en n branches peut être interprétée comme n fissures simples.

28.3. Comprimer l'information

Avec un véhicule circulant à 43.2 km/h¹, l'échantillonnage "naturel" introduit par le balayage, produit pour une fissure de 1m de "longueur"² un ensemble de 3000 valeurs numériques, (x,y et largeur de chaque impulsion). Toutes ces valeurs ne sont pas utiles.

Le système doit avoir une résolution de 1mm pour identifier et séparer des fissures fines, mais il n'est pas nécessaire que chaque mm² de fissure soit mémorisé. Une légère erreur est en effet tolérable sur la forme de la fissure, ce qui nous permet de tirer parti du fait que, statistiquement, les fissures sont non seulement filaires, mais souvent presque rectilignes, ou du moins décomposables en peu de segments "rectilignes".

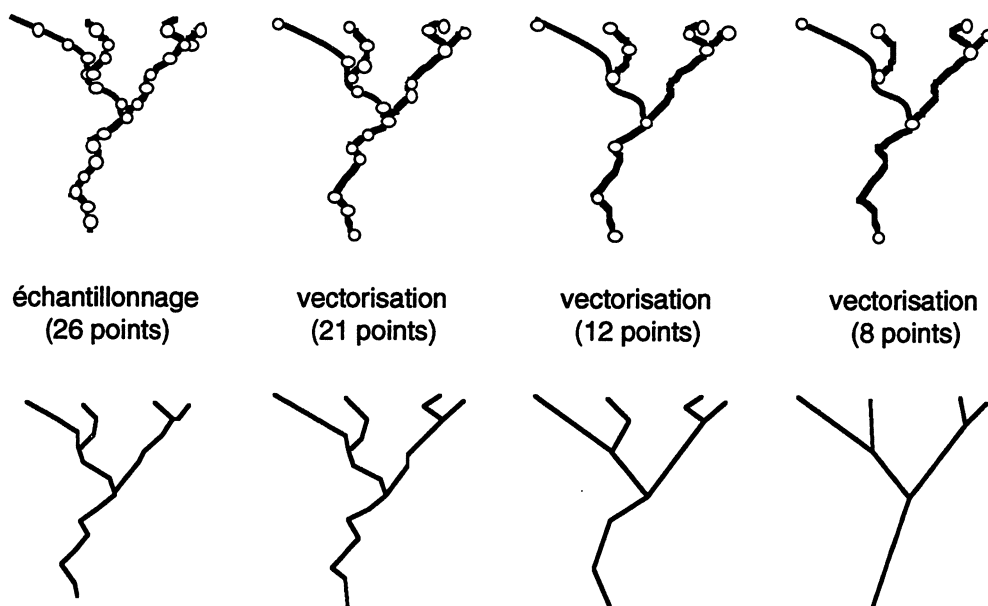
Une première possibilité pour réduire le nombre de sèmes à mémoriser est l'échantillonnage spatial de la fissure dans la direction y: parmi les sèmes reconnus comme tels, seul un chaque $n_{éch}$ est mémorisé. Une solution plus intéressante consiste en la *vectorisation* de la fissure: les seuls sèmes mémorisés sont le début et la fin de la fissure ainsi que les points correspondant à des changements de pente significatifs, avec un facteur de vectorisation à définir^{3,4}. Cette dernière technique permet de diminuer considérablement le nombre de sèmes à enregistrer en minimisant les pertes de fidélité (voir dessin à la page suivante). Dans le cas le plus favorable, celui d'une fissure rectiligne, deux coordonnées de position suffisent pour la décrire, indépendamment de sa longueur.

¹ Cette vitesse, qui correspond à 12 m/s, donne lieu à 1 balayage par mm de route. Nous l'utiliserons dans ce chapitre comme vitesse de référence, mais en gardant à l'esprit qu'en pratique elle pourrait varier entre 10 et 120 km/h sans trop affecter la qualité de la mesure.

² Projection en "y" de la longueur.

³ Le changement de pente n'est ici qu'un critère intuitif: nous verrons que, mathématiquement, d'autres critères de vectorisation sont mieux adaptés.

⁴ Rappelons qu'ici l'information à traiter n'est pas une *image*, mais une série de coordonnées .



La *vectorisation* permet d'obtenir le *noyau minimal des sèmes utiles et nécessaires*, mais est d'implémentation plus complexe. L'échantillonnage fournit par contre une solution moins intéressante, mais d'implémentation bien plus simple.

Quant à la largeur, qui est un paramètre qui change peu le long de la fissure, elle pourrait également être vectorisée, et pas forcément aux mêmes points de vectorisation de forme. Dans le meilleur des cas, celui d'une fissure de largeur constante, une valeur suffirait.

28.4. Mémoriser

Comme nous l'avons vu dans la section A, le résultat final de la mesure doit être mémorisé sous une forme compacte, "*self-consistent*," facilement accessible et compatible avec les futures banques de données européennes.

Pour répondre à ces exigences, la dernière étape du traitement doit conserver l'information aussi brute et détaillée que possible, afin de permettre une grande souplesse d'analyse.

La forme de mémorisation choisie est un fichier sur disque dur amovible (SY-Quest) contenant la liste des coordonnées vectorisées de toutes les fissures détectées, exprimées de préférence dans un repère absolu (cartes d'état major) et optimisées¹.

Cet état de l'information correspond à la valeur symbolique la mieux adaptée à l'archivage, car à partir de ce niveau, toute augmentation de valeur introduit une perte de fidélité irréversible.

¹ Notamment au niveau des coordonnées y, qui peuvent être exprimées de manière relative à la première coordonnée de la fissure, absolue.

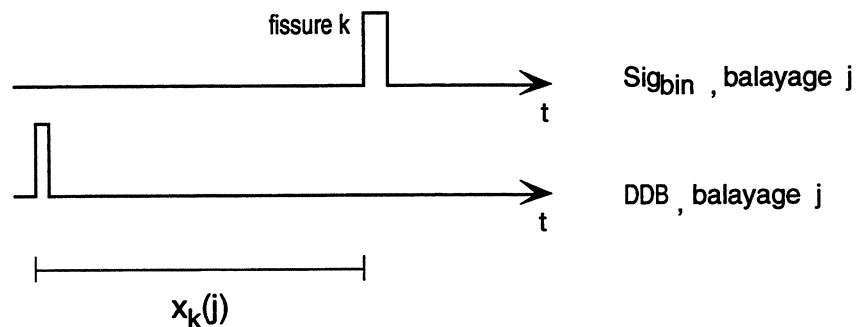
29. LA SOLUTION PROPOSEE: TRAITEMENT PARALLELE

29.1. Principe

Le principe du traitement proposé repose sur l'utilisation de la connaissance a priori "*les fissures sont de forme filaire*".

Considérons d'abord le cas simple d'une seule fissure par balayage.

Soient



$x_k(j)$ une valeur numérique indiquant l'intervalle de temps séparant l'impulsion de début de balayage (DDB) de l'impulsion produite par la fissure k dans le balayage j . Nous appellerons $x_k(j)$ la *coordonnée temporelle* de l'impulsion¹;

$L_k(j)$ une valeur numérique indiquant la largeur de l'impulsion K dans le balayage j ;

$\Delta_{\max}$ une valeur numérique constante indiquant un intervalle de temps.

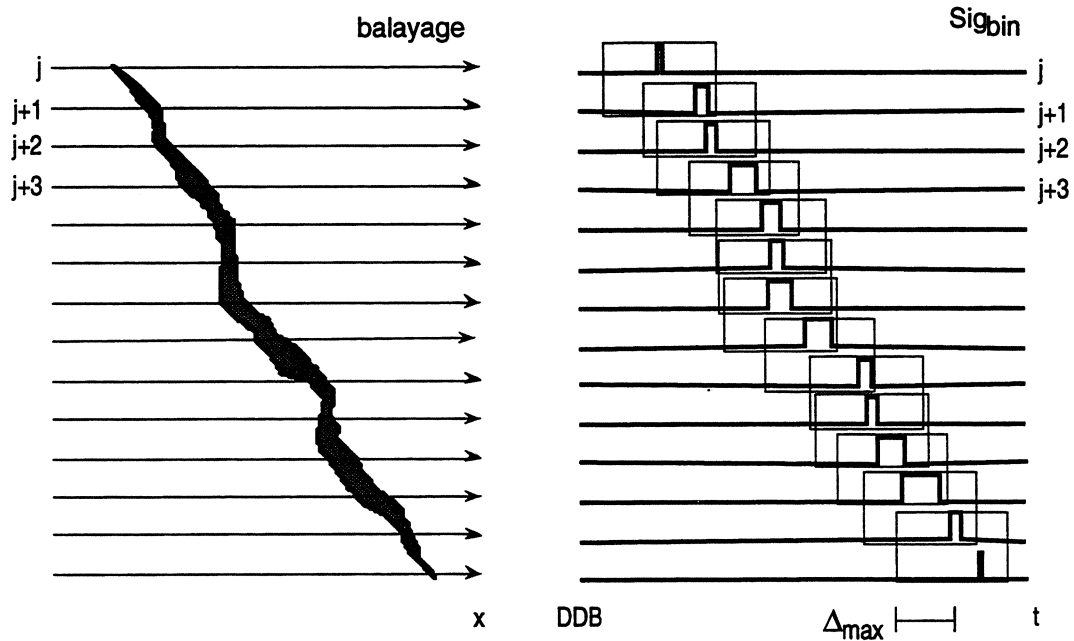
La forme filaire de la fissure se traduit au niveau de $\text{Sigbin}(t)$ par la propriété suivante:

$$|x_k(j) - x_k(j-1)| \leq \Delta_{\max} \quad [29.1.]$$

Dans deux balayages successifs, les coordonnées temporelles de deux impulsions *appartenant à la même fissure* sont très proches. Connaissant la coordonnée de l'impulsion dans une ligne balayage, on peut donc former une fenêtre temporelle de largeur $\pm \Delta_{\max}$ dans laquelle on s'attend à trouver l'impulsion suivante.

¹ Cette coordonnée temporelle correspond à la coordonnée spatiale x de la fissure sur la route. En raison de la nature circulaire du balayage, cette correspondance n'est pas linéaire, mais peut être approximée comme telle.

De cette façon on peut *suivre* une fissure, dans une bande la largeur $2\Delta_{\max}$, que nous appellerons "*la fenêtre de poursuite*". Ce principe est illustré par le schéma ci-dessous.



- ◆ Nous appellerons un *suiveur* une unité électronique réalisant cet algorithme de suivi d'une fissure.

29.2. L'algorithme de base

Considérons maintenant le cas plus réaliste suivant:

- ◇ Il faut traiter plusieurs fissures indépendantes par balayage (voire plusieurs dizaines).
- ◇ Cette opération doit se faire en *temps réel*, c'est à dire entre un balayage et le suivant.
- ◇ Le temps séparant les impulsions est très court: 20 ns dans le pire des cas.

Le problème devient dans ce cas plus complexe. La solution proposée, basée sur le principe [29.1.] est fondée sur les considérations suivantes:

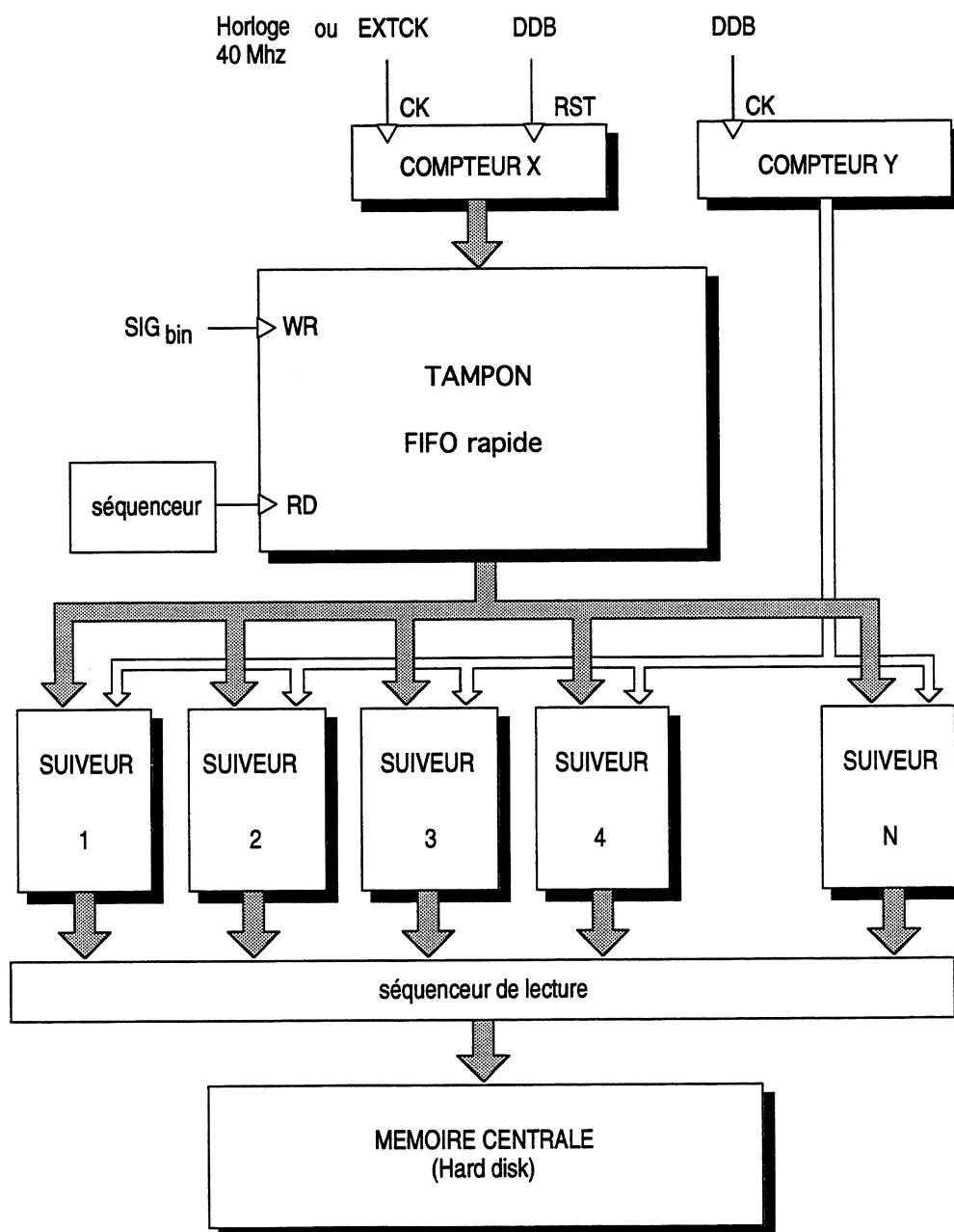
- 1◆ A chaque impulsion k de $Sigbin(t)$ du balayage j sont associés une coordonnée temporelle $x_k(j)$ et une valeur de largeur $L_k(j)$.
- 2◆ Plusieurs *suiveurs* doivent travailler en parallèle, chacun suivant une seule fissure selon l'algorithme [29.1.] .
- 3◆ Tous les *suiveurs* reçoivent toutes les coordonnées $x_k(j)$. Il appartient à chacun d'eux, individuellement, de décider si une coordonnée lui incombe.
- 4◆ Le temps de traitement ne doit pas dépendre du nombre de *suiveurs*.
- 5◆ Le temps séparant deux impulsions successives vaut au minimum 20 ns. Le temps séparant deux balayages successifs, par contre, vaut toujours 83 μ s.

La considération 5♦ a des conséquences intéressantes. Un intervalle de temps de 20 ns, pour un processeur courant, est très court: il permet tout au plus d'exécuter une seule opération simple. Il est donc exclu de pouvoir exécuter un algorithme en ce laps de temps.

Par contre, l'intervalle de 83 μ s séparant deux balayages permet d'effectuer 3320 opérations simples (horloge 40 Mhz), ce qui est largement suffisant pour implémenter l'algorithme de suivi. Le fait que chaque suiveur ne suive qu'une fissure à la fois (2♦) implique que le temps séparant deux impulsions *destinées au même suiveur* est justement de l'ordre de 80 μ s. La seule opération qui doit se faire très vite est donc la conversion des impulsions en coordonnées de position et la mémorisation de ces dernières.

Cette opération peut être séparée de la procédure de suivi par l'enregistrement préalable des coordonnées dans une mémoire TAMPON, constituée d'une FIFO rapide.

- ♦ L'algorithme proposé est schématisé ci-dessous.



Le fonctionnement de principe de l'algorithme est le suivant (voir dessin à la page précédente).

- ◇ Deux compteurs sont utilisés pour générer les coordonnées x et y ¹. Le compteur x est incrémenté par une horloge ou par le signal EXTCK, et est remis à zéro à chaque début de balayage par le signal DDB. Rappelons que EXTCK (4000 impulsions par balayage) et DDB sont fournis par le dispositif de balayage (section B, chapitre 11.).
- ◇ Le compteur " y " est mis à zéro au début de la mesure et incrémenté à chaque balayage, par DDB².
- ◇ Lors d'une impulsion sur Sig_{bin}, le contenu du registre x est mémorisé dans le FIFO Tampon. Cette opération est la seule qui doit se faire très rapidement (<20 ns) et qui nécessite donc des composants électroniques très rapides.

A la fin de la ligne de balayage j , se trouvent dans le Tampon toutes les coordonnées $x_k(j)$ des impulsions présentes.

Indépendamment de la position des impulsions, nous avons maintenant environ 80 μ s pour soumettre ces coordonnées aux suiveurs.

- ◇ Le Tampon est vidé vers les suiveurs, qui sont schématisés à la page ci-contre. Le rythme de transfert des coordonnées, relativement lent, est ajusté à la vitesse des suiveurs. Chaque coordonnée est présentée *en même temps* à tous les suiveurs qui, *en travaillant en parallèle*, décident de leur attitude face à la coordonnée.

Chaque suiveur a trois possibilités de base devant la coordonnée x qui lui est présentée:

- la reconnaître comme appartenant à la fissure suivie,
- la considérer comme le début d'une nouvelle fissure,
- la négliger.

Dans les deux premiers cas, les coordonnées x et y sont mémorisées dans un FIFO interne au suiveur, après un traitement de filtrage du bruit, d'échantillonnage ou de vectorisation³.

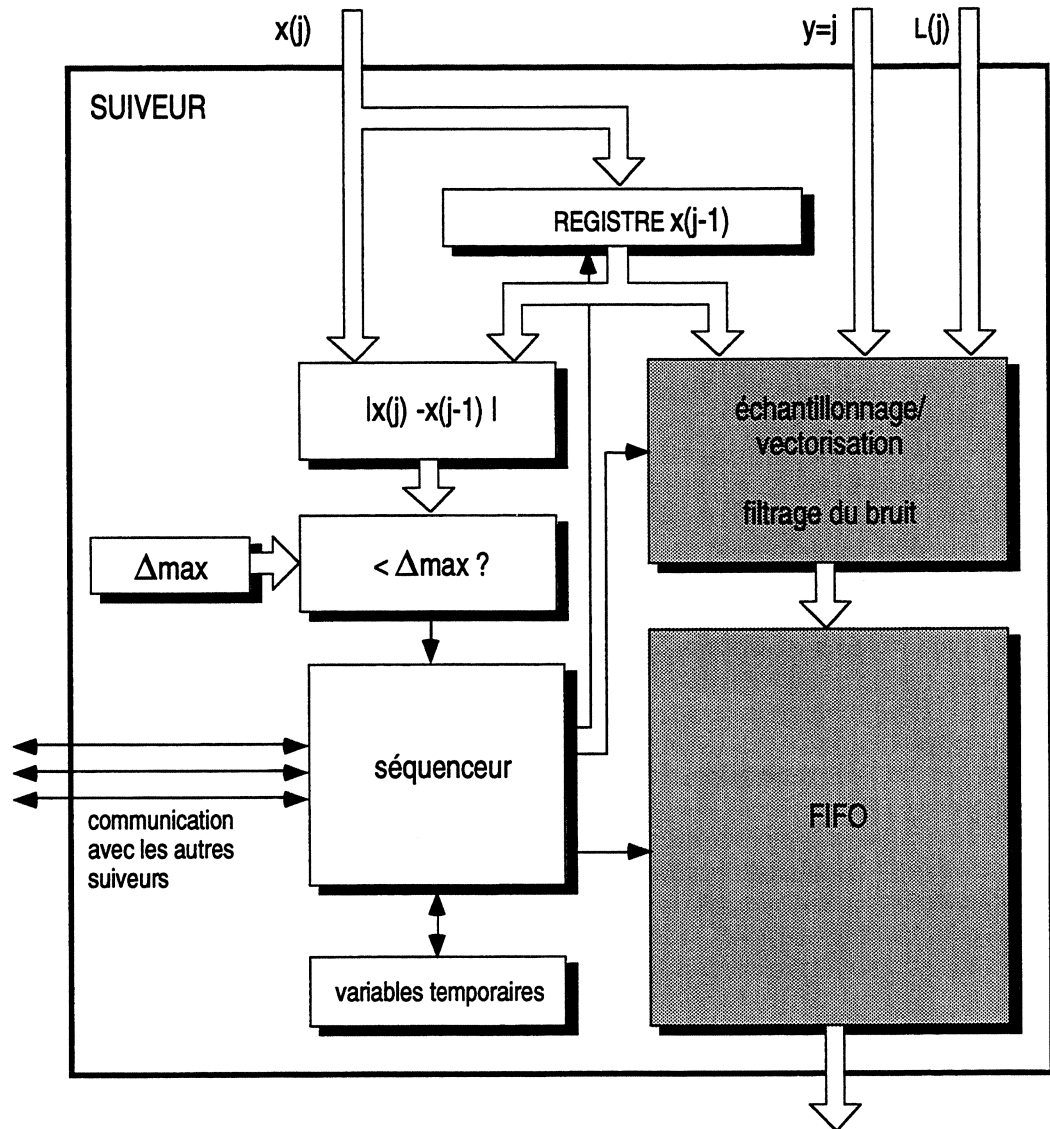
- ◇ Une fois la fissure terminée, le contenu du FIFO interne du suiveur peut être transféré dans une mémoire centrale. Le traitement est terminé, et l'information se trouve codée dans sa forme définitive.

¹ Un troisième compteur, qui n'est pas représenté dans le schéma, est dédié au codage de la largeur de l'impulsion (et donc de la fissure). La largeur ne jouant pas de rôle déterminant dans l'algorithme, elle ne sera pas traitée ici.

² En pratique, la coordonnée " y " est générée sur la base du balayage et d'une roue codeuse entraînée par le véhicule. Pour simplifier la description, supposons ici que la vitesse du véhicule est constante à 43.2 km/h (un balayage chaque mm).

³ Ces traitements seront examinés ci-après et le comportement global des suiveurs sera décrit en détail au prochain chapitre.

De manière schématique, un suiveur est organisé de la façon suivante:



Le suiveur est divisé en deux parties: la partie consacrée au suivi proprement dit, et la partie analyse et mémorisation (en gris dans le schéma).

Examinons le mode de fonctionnement de suivi d'une fissure en cours. Dans ce cas, il se trouve dans le registre $x(j-1)$ la coordonnée de la fissure retenue lors du balayage précédent. Une nouvelle coordonnée $x(j)$ est présentée puis comparée à l'ancienne coordonnée $x(j-1)$. Si leur différence est plus petite que Δ_{max} (la largeur de la "fenêtre de poursuite"), la nouvelle coordonnée appartient à la fissure suivie¹. Dans ce cas, la valeur du registre $x(j-1)$ est remplacée par $x(j)$, et $x(j)$, y et $L(j)$ sont transmis à la partie analyse et mémorisation.

¹ Comme nous le verrons plus loin, d'autres conditions doivent être remplies (sur les variables de communication et sur les variables temporaires) pour que l'impulsion soit effectivement prise en charge par le suiveur.

29.3. Analyse et mémorisation des fissures suivies

La partie analyse et mémorisation de chaque suiveur effectue deux types d'opérations: l'échantillonnage ou la vectorisation de la fissure et le filtrage du bruit. Echantillonnage ou vectorisation ont pour but de comprimer l'information, afin de minimiser le nombre de sèmes à mémoriser (voir §28.3.). Le filtrage du bruit sémique évite la mémorisation de "faux sèmes" inutiles.

Echantillonnage de la fissure

L'échantillonnage des coordonnées de la fissure est d'implémentation très simple. Au début d'une nouvelle fissure, un compteur est chargé avec la valeur $n_{\text{échant}}$ et la première coordonnée est mémorisée dans le FIFO. Les coordonnées valides suivantes sont négligées, mais le compteur est décrémenté: lorsqu'il atteint 0, la coordonnée est mémorisée et le compteur rechargé. De cette manière, seule une coordonnée valide chaque $n_{\text{échant}}$ est enregistrée¹.

Comme nous l'avons vu au §28.3., ce traitement n'est pas optimal, mais permet d'obtenir un résultat intéressant avec des moyens très réduits.

Vectorisation de la fissure

La vectorisation permet une meilleure compression d'information que l'échantillonnage, mais au prix d'une implémentation plus complexe.

Différents algorithmes sont envisageables. Nous proposons ici un algorithme réunissant des bonnes performances et une complexité d'implémentation réduite.

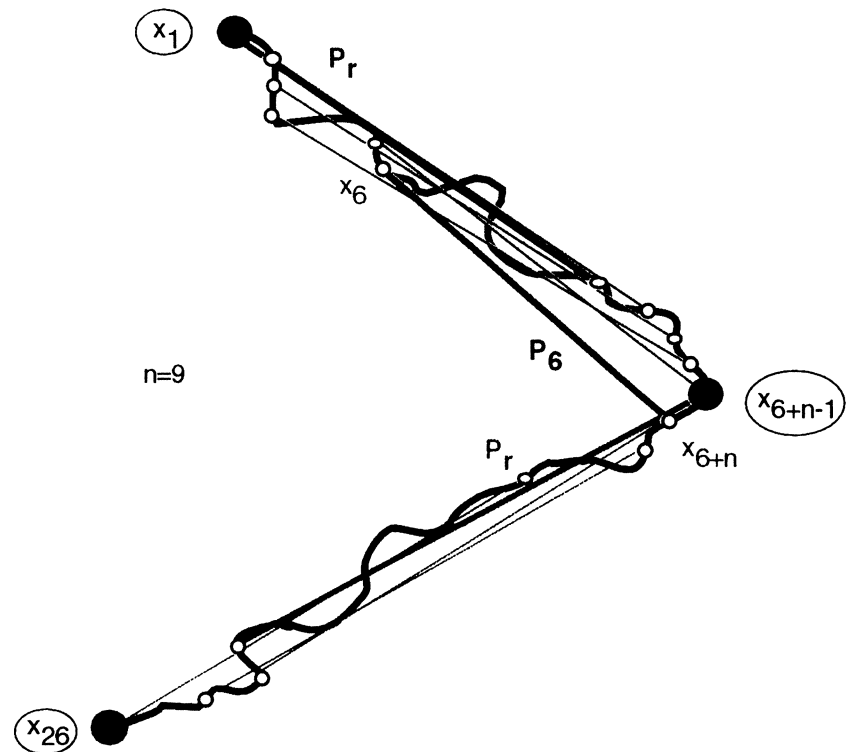
Le principe de cet algorithme consiste à tracer (virtuellement) un segment entre le premier point de la fissure et un point se trouvant $n=n_{\text{vect}}$ balayages plus loin (x_1, x_n). La pente de ce segment devient la pente de référence P_r (voir dessin à la page ci-contre).

Des segments sont formés avec les paires de points successives (x_i, x_{i+n} avec $i=2,3,4, \text{etc.}$) et leurs pentes P_i sont comparées à la pente de référence P_r . Cette opération se poursuit tant que la différence entre P_i et P_r reste petite.

Dès que $|P_i - P_r|$ dépasse un "seuil de tolérance" ΔP , le point x_{i-1} est mémorisé dans le FIFO. La pente P_{i-1} (x_{i-1} et x_{i-1+n}) devient la nouvelle pente de référence et l'opération est répétée à partir de x_{i-1} avec des nouvelles paires de points.

Dans l'exemple schématisé à la page ci-contre, $n=n_{\text{vect}}=9$ et le $(6+n)$ ème point est celui qui marque le changement de direction. P_6 (en bleu, gras) est donc la première pente qui s'écarte sensiblement de P_r (en rouge, gras). dans cet exemple la fissure a été vectorisée en trois points: x_1, x_{14} (x_{6+n-1}) et x_{26} .

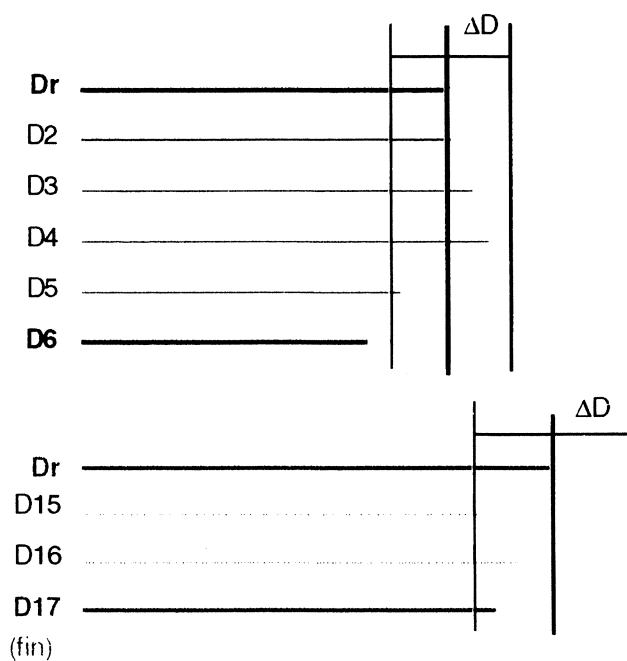
¹ Le cas particulier de la dernière coordonnée est traité au ch 30.



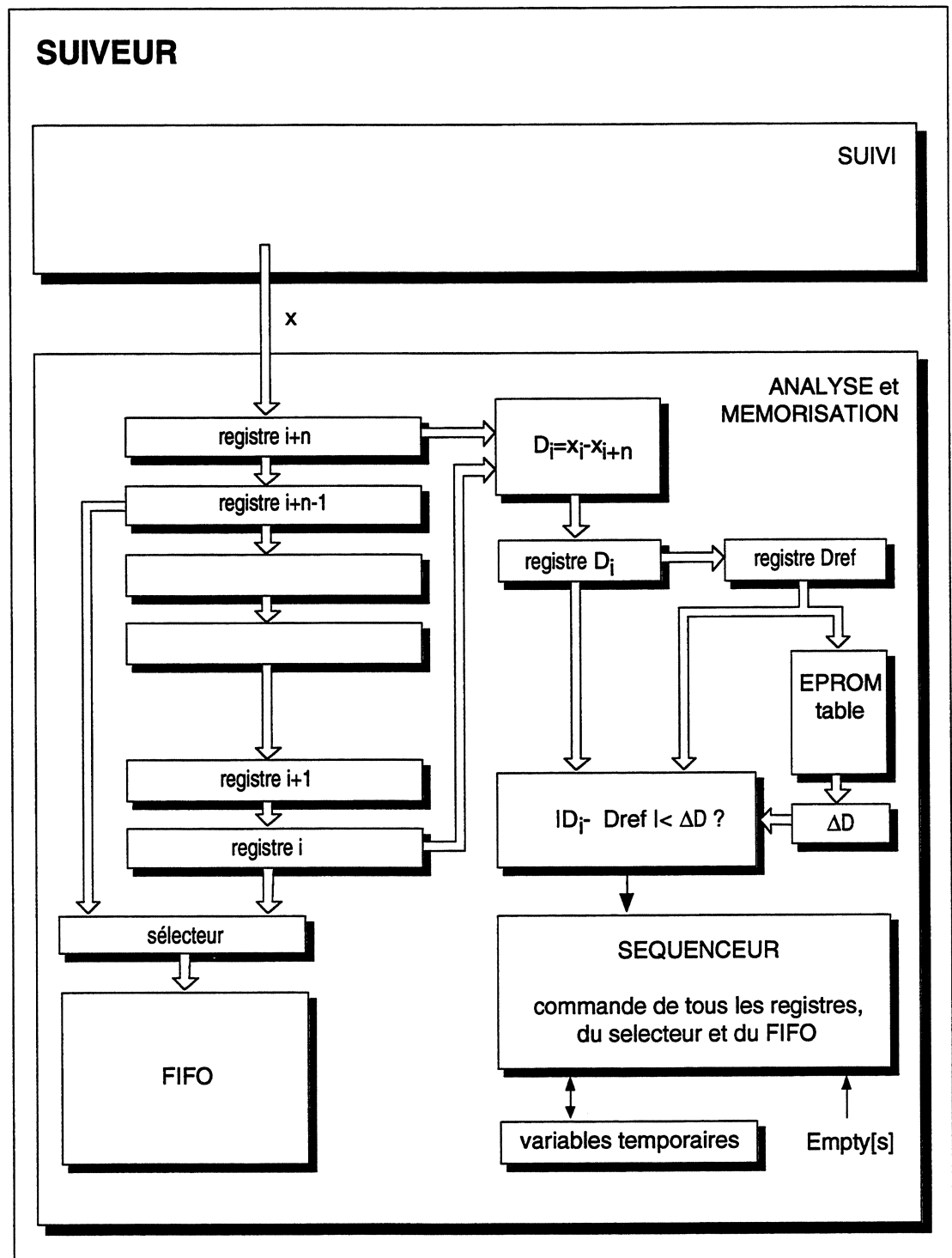
En supposant que l'incrément dy entre les lignes de balayage est constant, la comparaison des pentes P_i se résume à la comparaison des projections x_i , que nous appellerons les D_i . L'algorithme doit donc traiter que les valeurs entières $D_k = x_k - x_{k+n}$.

Dans ce cas, où ne sont traitées que les projections x , le seuil de tolérance ΔD ne doit pas être constant (comme l'était ΔP pour les pentes), mais devient fonction de $D_k = x_k - x_{k+n}$. Cette dépendance n'est pas linéaire (cosinus).

Ci-dessous, le même exemple traité avec les projections D_i .



Cet algorithme d'analyse peut être implémenté par un circuit du type suivant (afin de simplifier le schéma, les traitements des coordonnées "y" et de la largeur ne sont pas représentés):



Les n premières coordonnées x , déjà reconnues comme appartenant à la même fissure par la partie suivi, sont empilées dans n registres.

La première coordonnée (début de fissure) est mémorisée dans le FIFO. La première "pente" $D_1 = x_1 - x_{1+n}$ devient la référence D_{ref} .

A partir de D_{ref} est calculé le seuil de tolérance ΔD , par le biais d'une table¹.

Lorsqu'une nouvelle coordonnée apparaît, la pile des x est décalée vers le bas, (l'ancien x_i est perdu) et un nouveau $D_i = x_i - x_{i+n}$ est calculé. La valeur absolue de la différence entre D_i et D_{ref} est comparée à ΔD :

Si $|D_i - D_{ref}| > \Delta D_{ref}$ le registre x_{i+n-1} est transféré dans le FIFO et dans x_i . La pile est vidée à l'exception de x_i . Les $n-1$ prochaines coordonnées sont attendues. Une fois la pile à nouveau pleine, un nouveau $D_i = x_i - x_{i+n}$ et un nouveau ΔD , sont calculés. La séquence recommence.

Si $|D_i - D_{ref}| \leq \Delta D_{ref}$ Aucune coordonnée n'est enregistrée dans le FIFO. Lors de la coordonnée suivante, la pile est décalée vers le bas (x_i est perdu).

Ces opérations sont répétées tant que la partie suivi ne détecte pas une fin de fissure. A ce moment, x_{i+n} est mémorisé dans le FIFO.

La gestion de cet algorithme peut être confiée à un microprocesseur, mais cela n'est pas nécessaire.

Les performances de l'algorithme dépendent d'un choix judicieux de n_{vect} et de ΔD . Un réglage adaptatif de ces deux paramètres est envisageable. Par ailleurs, des variantes de cet algorithme, aux performances différentes, peuvent simplifier l'implémentation.

Filtrage du bruit

Avec l'algorithme de base (§29.2.), le traitement du bruit sémique est particulièrement simple.

La correction des impulsions manquantes, tant qu'elles ne sont pas excessivement nombreuses, peut être négligé. Leur reconstitution a posteriori reste toujours possible².

Quant aux impulsions surnuméraires, elles peuvent être éliminées en introduisant dans la partie analyse des suiveurs un test sur la longueur minimale d'une fissure: si les impulsions ne sont pas corrélées sur un

¹ Rappelons que ΔD , ne varie pas linéairement avec D_{ref} , et il serait inopportun ici d'implémenter un algorithme de calcul du cosinus.

² Cette opération, effectuée sur le fichier final, consiste à fusionner la fin d'une fissure avec le début d'une autre dans le cas où ces deux valeurs sont proches.

nombre minimum de balayages, elles ne sont pas mémorisées. L'implémentation de ce test est très simple (compteur), et peut être intégré à l'algorithme de vectorisation.

Ce type de filtrage implique l'utilisation de suiveurs supplémentaires, car un suiveur détectant un bruit n'est pas disponible pour suivre une vraie fissure.

Pour pouvoir détecter N fissures par balayage, il faudra donc disposer de $N+b$ suiveurs, b représentant le nombre moyen de "faux sèmes" par balayage.

29.4. Cas particuliers

Fissures transversales

Un cas particulier est représenté par les fissures orientées parallèlement à la ligne de balayage, qui produisent une impulsion très large sur peu de balayages (1 dans le pire des cas).

La détection de ce type de fissure nécessite un suiveur spécialisé, qui vérifie la largeur maximale des impulsions et, lorsque celle-ci dépasse une valeur $L_{\max}$, génère dans son FIFO des coordonnées corrigées, dans le même format que les autres suiveurs.

Faïençage

Lorsqu'un revêtement présente un très grand nombre de fissures par unité de surface (faïençage), le nombre de suiveurs disponibles peut être dépassé. Dans ce cas, les dernières impulsions d'une ligne ne seraient pas traitées.

Par ailleurs, lorsque le revêtement est faïencé, il devient inutile de connaître la forme exacte de chacune des ramifications. L'information utile est dans ce cas le *taux* de faïençage (densité des fissures par unité de surface).

Pour traiter ce problème, il suffit de compter les impulsions présentes dans une ligne de balayage: si celles-ci sont plus nombreuses que les suiveurs disponibles, le système ne mémorise que le nombre d'impulsions.

29.5. Positionnement

Positionnement local relatif

◆ *Forme de la fissure*

Pour relever la *forme* des fissures, il est nécessaire de connaître les coordonnées des points qui les composent avec une bonne précision tant selon x que selon y . La précision *locale* de positionnement doit être de l'ordre de 1mm (voir sec A §4.1. page 24).

La saisie précise des coordonnées x ne pose pas de problèmes, car elle dépend uniquement de la stabilité de la fréquence de balayage¹. Le dispositif de balayage, synchronisé par un oscillateur à cristal, est suffisamment stable pour garantir une précision de positionnement selon x inférieure au dixième de mm.

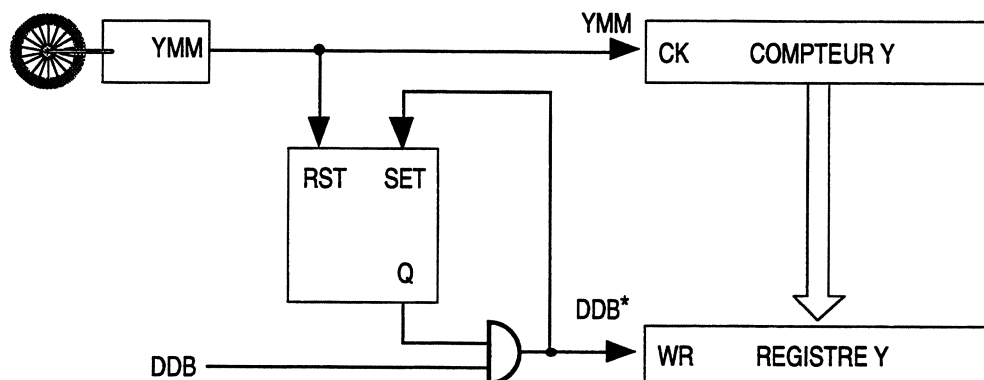
Par contre, le positionnement précis selon "y" est plus délicat, car tributaire de la vitesse du véhicule. Jusqu'à présent, nous avons supposé que la vitesse est constante et que le compteur des coordonnées "y" est incrémenté à chaque début de balayage DDB. Cette approximation, introduite dans le seul but de simplifier la description des schémas de principe, est en effet très grossière et n'est valable que si le véhicule circule à une vitesse constante de 43.2 km/h.

- ◊ Lorsque la vitesse du véhicule est inférieure à 43.2 km/h (voire à l'arrêt), la fissure est *suréchantillonnée* selon y: des lignes de balayages inutiles sont traitées. De plus, si le compteur de la coordonnée "y" était incrémenté par le seul DDB, l'erreur de positionnement selon "y" augmenterait de façon cumulative et conduirait à des interprétations erronées de la forme de la fissure. La forme des fissures mesurées serait dilatée dans la direction "y".
- ◊ Lorsque la vitesse du véhicule est supérieure à 43.2 km/h, la fissure *n'est pas* sous-échantillonnée, car ses fréquences spatiales significatives sont bien inférieures à 1/6mm (2). Les fréquences spatiales de cet ordre seraient d'ailleurs filtrées par l'algorithme de vectorisation. Mais ici aussi, si le compteur de la coordonnée "y" était incrémenté par le seul DDB, les coordonnées "y" relevées seraient erronées (fissures trop courtes).

Un signal additionnel, lié à la route, permet de pallier à ces inconvénients. Ce signal, qui sera appelé YMM, est fourni par une roue de vélo calibrée munie d'un codeur de tours (Peisler).

YMM fournit une impulsion chaque 1 mm de route parcouru.

La combinaison de YMM et de DDB doit éviter le suréchantillonnage et doit assurer un état réaliste du registre de position y. La solution proposée est schématisée ci-dessous.

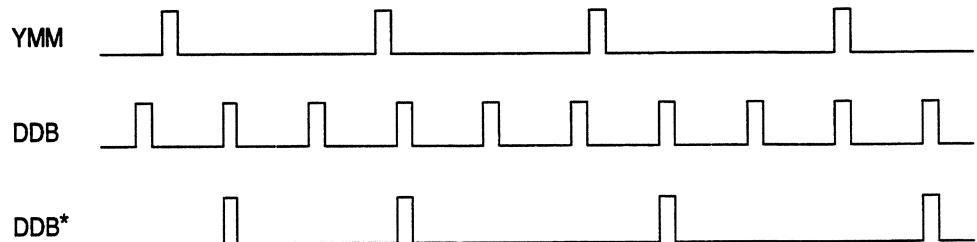


¹ L'unité de traitement est synchronisée sur le dispositif de balayage.

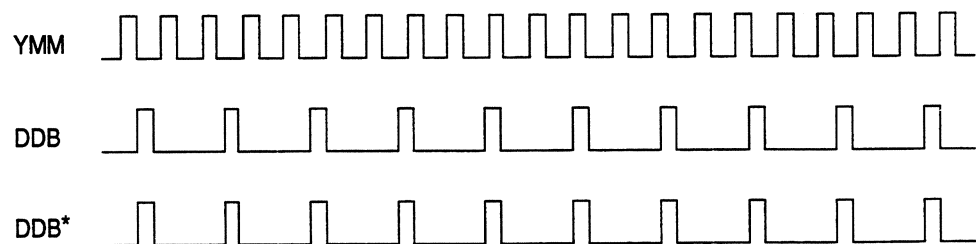
² Un véhicule circulant à 130 km/h produirait un échantillonnage spatial selon "y" de 3 mm.

Ce dispositif permet d'une part de ne prendre en compte qu'une impulsion DDB par tour de roue, et garantit d'autre part que l'état du compteur "y" est toujours conforme à la distance parcourue, tout en évitant que son état change durant une ligne de balayage. Ceci est illustré par les chronogrammes suivants.

Vitesse véhicule < 43.2 km/h



Vitesse véhicule > 43.2 km/h



◆ Position de la fissure

Contrairement à la *forme* de la fissure qui nécessite une précision millimétrique, la *position* de la fissure sur la route peut être affectée d'une erreur plus importante, notamment selon "y" (voir section A, §4.1.). A première vue, la position fournie par la roue codée pourrait être suffisante, mais elle présente quelques inconvénients:

- les imprécisions de positionnement sont cumulées le long du parcours; la précision est donc bonne au début de la mesure mais elle se dégrade au fur et à mesure de la progression;
- l'erreur de positionnement est aggravée par les inévitables écarts du véhicule à la trajectoire de mesure (arrêts sur le bas côté, demi-tours, etc.); pour les éviter, un opérateur devrait effectuer des RESET manuels et noter périodiquement des repères (numéro du tronçon, numéro du km, sortie d'autoroute, panneau, etc.);
- les coordonnées "y" mémorisées n'auraient une signification que par rapport aux repères notés séparément, et ne pourraient donc pas être archivées telles quelles (les fichiers ne seraient pas "self-consistent").

La roue de vélo, dont les performances sont excellentes pour la mesure de *forme* des fissures, ne fournit pas, à elle seule, la solution optimale aux problèmes de mesure de *position* des fissures.

Positionnement global absolu par GPS

La solution la plus intéressante au problème du positionnement des fissures est représentée par un système combiné roue codeuse + GPS.

Le système GPS (Global Positionning System) est un dispositif de repérage absolu par satellite: grâce à la comparaison des signaux émis par au moins quatre des dizaines de satellites GPS en orbite permanente, un récepteur portatif est en mesure de se positionner avec une précision d'une trentaine de mètres¹ (de 15 à 80 m, selon les conditions).

Ce dispositif, peu encombrant et peu onéreux, fournit la position absolue en méridiens, parallèles et altitude. Une table interne permet également de transformer ces données en coordonnées topographiques de carte d'état major (adaptées à différents pays, dont la Suisse).

Le principe d'utilisation de ce système dans le cadre de CREHOS est le suivant:

- ◇ le dispositif de traitement mémorise les coordonnées des fissures sur la seule base de l'état de la roue codée;
- ◇ indépendamment du traitement, chaque 10 secondes sont mémorisées dans un fichier l'état de la roue et les coordonnées GPS (2880 saisies pour 8h de mesure);
- ◇ les coordonnées de position des fissures mémorisées sont traitées et corrigées a posteriori sur la base de ce fichier.
Cette opération peut être effectuée en cours de mesure par un dispositif approprié, ou plus simplement en fin de mesure.

Ce dispositif présente les avantages suivants

- ◇ Aucune nécessité de relever des repères (à la rigueur même pas le "nom" du tronçon)
- ◇ Aucun RESET de la roue codée.
- ◇ Possibilité pour le véhicule d'effectuer toutes sortes de manoeuvres et de détours sans interrompre ni affecter la mesure.
- ◇ Mesure entièrement automatique.
- ◇ Fichier final "self-consistent".
- ◇ Possibilité de fournir des représentations de l'état de fissuration directement superposées à des cartes d'état major.

¹ Par ailleurs, la précision de ce dispositif, qui pourrait être inférieure au mètre, est volontairement limitée par les États-Unis, qui gèrent le réseau de satellites, pour des raisons militaires. A l'aide de plusieurs récepteurs et par des mesures différentielles, il est néanmoins possible de porter la résolution en dessous de 1 m, mais dans notre cas cela n'est pas nécessaire.

29.6. Format de sortie des données

Après l'acquisition et l'analyse des fissures réalisées par le dispositif de traitement et après la correction des coordonnées "y" effectuée sur la base des coordonnées fournies par la roue et par le GPS, le coordonnées définitives des fissures sont mémorisées dans le format suivant:

EN TETE DE FICHIER
DATE de la mesure
HEURE du début de la mesure
HEURE de la fin de la mesure
X _{ABS} , Y _{ABS} du début de la mesure
X _{ABS} , Y _{ABS} de la fin de la mesure
DISTANCE PARCOURUE (longueur du tronçon)
Données générales (nombre de fissures détectées, longueur totale de fissuration, etc.)

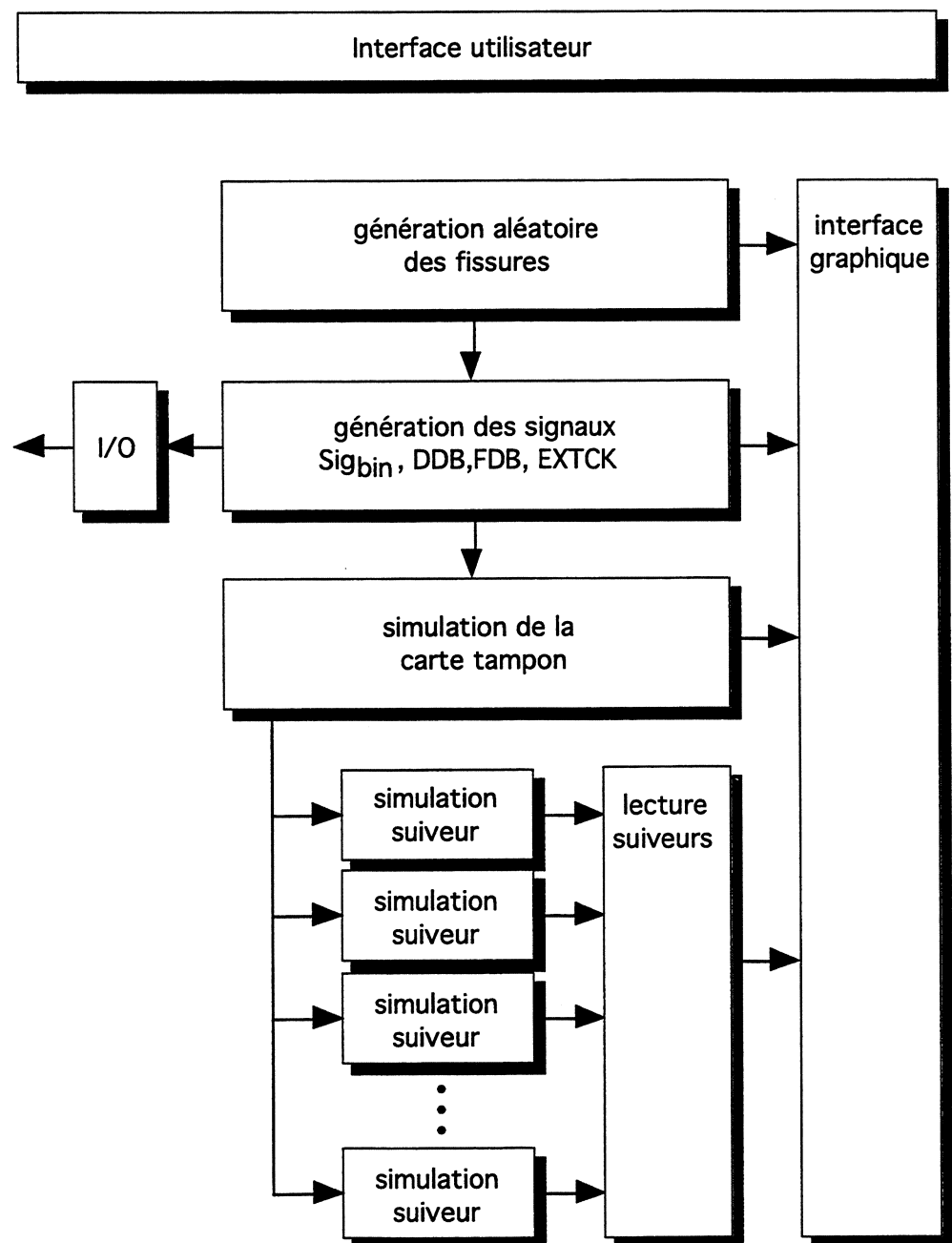
ID	numéro de fissure	
X1 _{ABS}	Y1 _{ABS}	
X1 _{REL}	Y1 _{REL}	L1 _{REL}
X2 _{REL}	$\Delta Y2_{REL}$	L2 _{REL}
X3 _{REL}	$\Delta Y3_{REL}$	L3 _{REL}
...	...	...
X _n _{REL}	ΔY_{nREL}	L _n _{REL}
ID	numéro de fissure	
X1 _{ABS}	Y1 _{ABS}	
X1 _{REL}	Y1 _{REL}	L1 _{REL}
X2 _{REL}	$\Delta Y2_{REL}$	L2 _{REL}
X3 _{REL}	$\Delta Y3_{REL}$	L3 _{REL}
...	...	...
X _n _{REL}	ΔY_{nREL}	L _n _{REL}

Ce format d'archivage permet une grande souplesse dans les traitements ultérieurs auxquels ces données sont destinées.

30. PROGRAMME DE SIMULATION

L' algorithme proposé au chapitre précédent a été évalué par simulation. Le programme, écrit en Turbo Pascal, permet également de générer sur un port PIO les signaux TTL Sig_{bin}, DDB, FDB et EXTCK qui serviront à tester les unités électroniques.

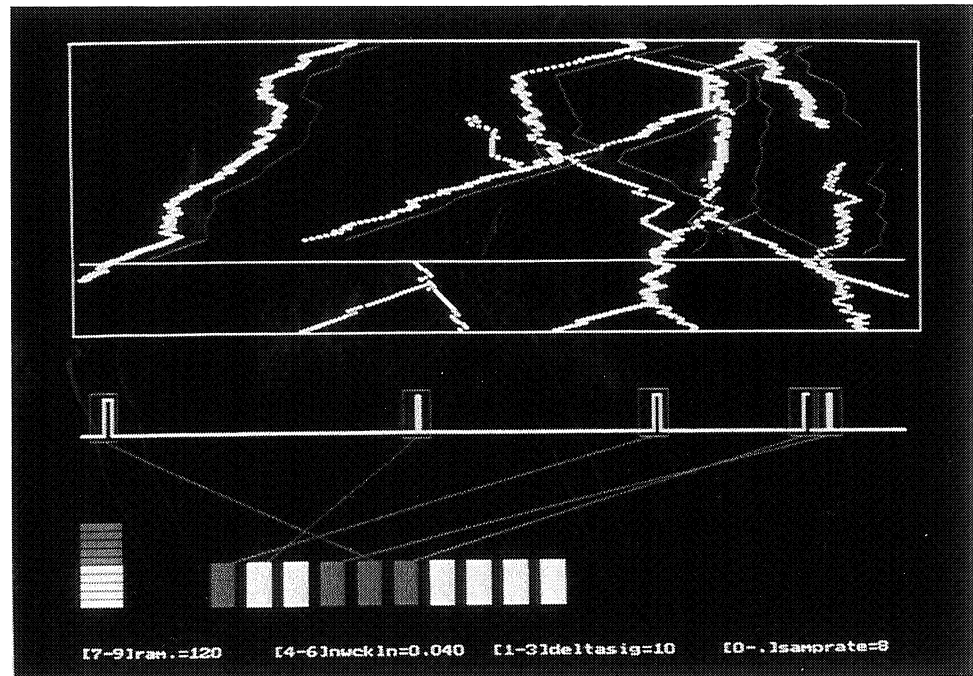
La structure du programme est schématisée ci-dessous. Le programme principal, très simple, résulte du fléchage du schéma; les différentes unités requièrent par contre une brève explication.



30.1. Interface graphique

Ces routines gèrent la présentation graphique des résultats fournis par les différentes unités. Le contrôle visuel est l'outil principal d'évaluation de l'algorithme.

La fenêtre graphique se présente de la manière suivante.



Dans le haut de l'image se trouve la "fenêtre d'observation du revêtement fissuré". Le revêtement défile verticalement dans cette fenêtre, simulant la progression du véhicule.

- ◇ Nous appellerons un *pas* le défilement (scroll) de un pixel vers le haut de l'image contenue dans cette fenêtre.

A l'intérieur de la fenêtre d'observation, nous trouvons en blanc les fissures à reconnaître et, en rouge et décalées vers la droite, les fissures telles que l'algorithme les a reconnues (le décalage est introduit volontairement pour des raisons de visibilité).

La ligne verte dans la fenêtre d'observation correspond à la ligne de balayage.

Au milieu de l'image, en jaune, est représenté le signal Sig_{bin}.

En bas à gauche est visible le tampon, dont les registres pleins s'affichent en rouge et les vides en bleu.

A sa droite sont représentés les suiveurs (ici 10). Ces derniers prennent la couleur rose lorsqu'ils commencent à suivre une nouvelle fissure, rouge lorsqu'ils continuent à la suivre, et bleue s'ils sont inactifs.

Les lignes rouges entre les suiveurs et Sig_{bin} indiquent l'impulsion prise en charge par chaque suiveur actif, ainsi que la largeur de la "fenêtre de poursuite".

30.2. Interface utilisateur

Cette unité contient les routines permettant de définir l'ensemble des paramètres réglant la simulation et l'affichage. La plupart d'entre eux peuvent être changés pendant l'exécution du programme.

30.3. Génération aléatoire des fissures

Ces routines génèrent de manière ininterrompue des séries de pixels correspondant à des lignes transversales de revêtement. Le défilement (scroll) de ces lignes simule le déplacement du véhicule. Les pixels ne peuvent prendre que deux valeurs (noir ou blanc) et leur génération se fait de façon à ce que le défilement des lignes fasse apparaître des "fissures", qui sont "observées" dans une fenêtre de 200 lignes x 600 pixels.

La forme des fissures est générée par des algorithmes aléatoires, qui *n'ont pas l'ambition de simuler des fissures réelles*. Le principe est le suivant: à chaque ligne et pour chaque fissure présente, un petit groupe de pixels contigus sont créés; ils représentent la nouvelle coordonnée x et la nouvelle largeur de la fissure et leurs écarts (en x et en largeur) par rapport à la ligne précédente sont tirés aléatoirement selon des critères divers.

Dans l'ensemble, la création aléatoire des fissures est contrôlée par les paramètres suivants:

- nombre maximal de fissures par ligne
- probabilité de création de nouvelles fissures (densité)
- distance maximale entre anciens et nouveaux pixels (orientation angulaire maximale de la fissure)
- longueur minimale et maximale des fissures
- largeur minimale et maximale des fissures
- direction de la fissure
- probabilité de changement de direction
- largeur de la fissure
- probabilité de changement de largeur
- probabilité de ramification
- probabilité de changement de la probabilité de ramification
- probabilité de fusion entre deux fissures disjointes

Remarques:

- ◇ L'évolution de chaque fissure est indépendante de celle des autres.
- ◇ Une fissure inclinée peut être formée de pixels disjointes.
- ◇ Cet algorithme ne crée pas de fissures très inclinées, ni a fortiori horizontales.

30.4. Génération des signaux

Cette routine crée le signal Sig_{bin} , en lisant l'état des pixels sur la ligne de balayage dans la fenêtre d'observation (de gauche à droite). Sig_{bin} est dessiné de gauche à droite, comme sur un écran d'oscilloscope. L'état de cette ligne change donc à chaque *pas*.

La version actuelle du programme n'introduit aucun bruit sur le signal.

Le signal Sig_{bin} est également adressé sur un port de sortie, avec les signaux DDB (Début du balayage), FDB (fin du balayage) et EXTCK (horloge). Ces derniers sont facilement générés, respectivement, au début et à la fin de la lecture de la ligne, et à la lecture de chaque pixel dans cette ligne.

Ce programme peut donc fournir les signaux TTL "parfaits" servant à tester le dispositif électronique (voir chapitre 31).

30.5. Simulation de la mémoire tampon

A chaque *pas* correspond un nouvel état de Sig_{bin} , qui comporte plusieurs impulsions (une par fissure). A chacune des impulsions de Sig_{bin} sont associées une coordonnée de position x , une coordonnée de position " y " et une largeur. La coordonnée de position x est le nombre de pixels qui séparent le "flanc montant" de Sig_{bin} de l'origine (à gauche), la coordonnée de position " y " est ici le numéro du *pas* et la largeur est le nombre consécutif de pixels qui composent l'impulsion.

A chaque *pas* ce paquet de *valeurs numériques* (deux par impulsion + la coordonnée " y " commune à toutes les impulsions) est mémorisé dans une matrice qui simule le FIFO. Cette matrice est effacée et réécrite à chaque *pas*.

30.6. Simulation des suiveurs

Cette unité est le coeur de la simulation: l'algorithme développé ici servira de base à l'implémentation électronique. L'algorithme de suivi et d'identification des fissures doit être le plus simple possible, afin d'en faciliter l'implémentation électronique sur un grand nombre de suiveurs. Le nombre de variables nécessaires doit donc être minimisé en privilégiant les variables booléennes, car leur implémentation électronique est plus simple (signaux TTL).

Le programme, tout en étant séquentiel, doit simuler des suiveurs qui travaillent en parallèle. Cela ne pose pas de problèmes majeurs, à condition d'être attentif au séquençement de la mise à jour des variables principales.

A ce stade de la simulation la matrice simulant le FIFO Tampon contient n paires de valeurs correspondant à la coordonnée x et à la largeur des n impulsions présentes sur une "ligne de balayage" et une coordonnée " y " commune. Afin de ne pas surcharger la description, nous ne présenterons ici que le traitement des coordonnées x , qui est à la base de l'algorithme. Une fois les coordonnées x traitées correctement, le traitement des largeurs et de la coordonnée " y " est très simple. De même, nous ne considérerons ici que les variables essentielles à l'algorithme.

Supposons donc que pour une ligne de balayage j le Tampon contienne n coordonnées x et que N suiveurs soient simulés, avec $n < N$ pour toutes les lignes.

Chacun des N suiveurs comprend un registre temporaire et une FIFO de M adresses, simulés par une matrice à N colonnes et $1+M$ lignes. Il comprend également 4 flags (variables booléennes). Dans chaque suiveur le FIFO doit mémoriser les *coordonnées échantillonnées* de la *fissure suivie*; une fois la fissure finie, ce paquet de coordonnées sera transféré dans une mémoire centrale (voir dessin page 219).

Soient

REG[s]	le registre du suiveur s , $s \in [1, N]$
FIFO[s]	un vecteur contenant m valeurs, $m \in [1, M]$, simulant le FIFO du suiveur s , $s \in [1, N]$
x	la coordonnée x lue depuis le Tampon
$\Delta_{\max}$	une constante indiquant la largeur de la fenêtre temporelle "de poursuite" d'une impulsion.

L'algorithme proposé repose sur trois *variables booléennes* globales, communes à tous les suiveurs, et trois *variables booléennes* locales, internes à chaque suiveur.

Examinons ce que signifient ces variables pour un suiveur qui les reçoit et comment le suiveur s'en sert pour communiquer avec les autres suiveurs. Pour faire cela, mettons nous "à la place d'un suiveur" .

◇ *Les trois variables booléennes internes*

Delta[s] Cette variable revêt un rôle central dans l'algorithme, elle est aussi la seule nécessitant un calcul (soustraction et valeur absolue). Pour le suiveur s , elle représente la réponse à la question "*Est-ce que la coordonnée x que je reçois est proche du contenu de mon registre (et donc cette impulsion appartient à la fissure que je suis en train de suivre) ?*". Plus précisément:

"Est-ce que $ABS(REG[s]-x) \leq \Delta_{\max}$?"

I take[s] "*Je prends en charge la coordonnée x actuelle, (et je serai donc occupé pour les prochaines coordonnées de cette ligne de balayage)*".

Empty[s] "*Mon registre REG[s] ne contient aucune coordonnée x .*"

A ces trois variables fondamentales vient s'ajouter un quatrième flag interne:

ReadFIFO[s] *"Les données de mon FIFO[s] peuvent être transférées dans la mémoire centrale (car ma fissure est finie)".*

◊ *Les trois variables booléennes communes*

TAKEN (x could be taken). Cette variable est distribuée *en parallèle* à tous les suiveurs. Tous les suiveurs y ont accès et tous peuvent la rendre *vraie* en même temps.

Elle indique à tous que la coordonnée x actuelle *peut être prise en charge par au moins un suiveur* en tant qu'appartenant à la fissure qu'il est en train de suivre. Il ne s'agit donc pas d'une nouvelle fissure qui commence. Elle signifie

"Il existe au moins un suiveur pouvant considérer la coordonnée x actuelle comme appartenant à sa fissure. "

OKAY Contrairement à TAKEN, cette variable *se propage de suiveur en suiveur* : chaque suiveur la reçoit, la rend *vraie* le cas échéant, et l'envoie au prochain suiveur qui fera de même. Elle signifie

*"La coordonnée x a été prise en charge"*¹

FREE Cette variable se propage comme OKAY de suiveur en suiveur. Pour le suiveur qui la reçoit, elle signifie

"Il existe au moins un suiveur libre avant moi"

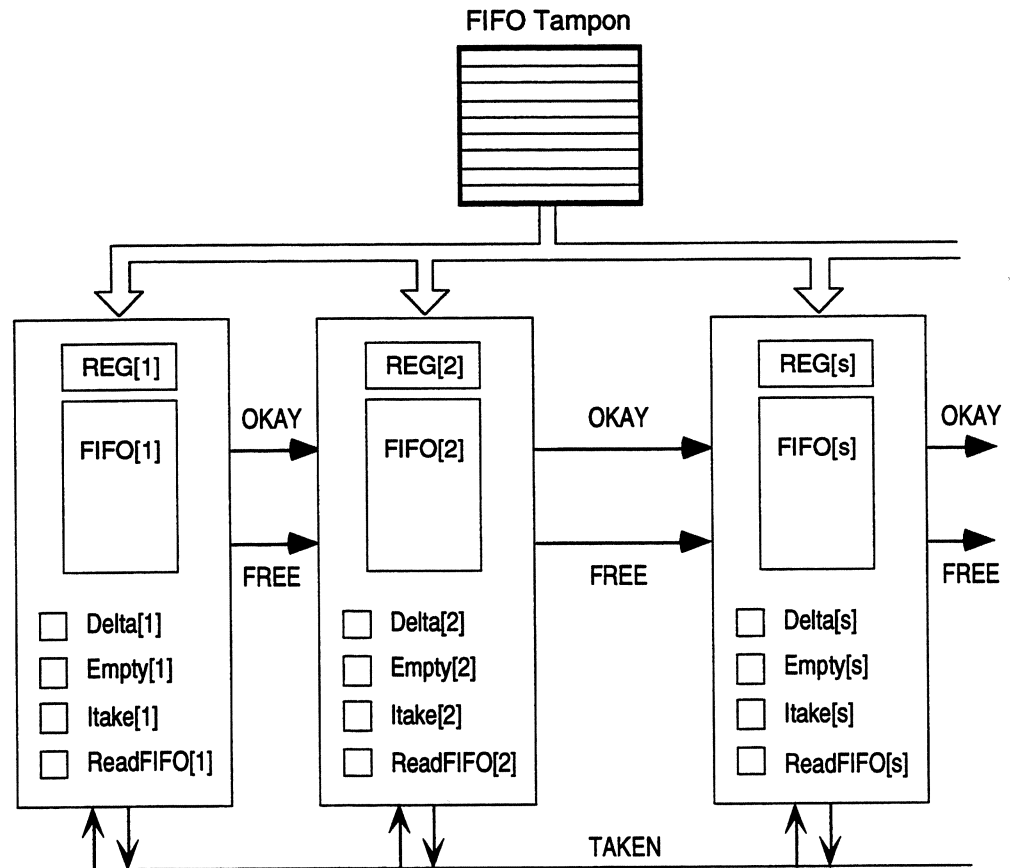
La structure des suiveurs (simulée ici par une matrice contenant les différentes valeurs) est schématisée à la page ci-contre.

Chaque suiveur, lorsqu'une nouvelle coordonnée lui est présentée, a le choix entre quatre modes de fonctionnement:

- ◊ commencer à suivre une nouvelle fissure (routine New-crack)
- ◊ continuer de suivre une fissure (routine Follow-crack)
- ◊ détecter la fin d'une fissure (routine End-crack)
- ◊ ne rien faire, en se déclarant libre(routine Unit-free).

Le choix du mode de fonctionnement approprié se fait selon l'état des six variables booléennes principales. Chaque routine effectue des opérations de mémorisation et redéfinit une partie des variables booléennes.

¹ Les variables TAKEN et OKAY, de signification assez semblable, ne doivent pas pour autant être confondues: la première signifie "Quelqu'un (avant ou après moi) *peut* s'en charger, comme suite d'une fissure déjà suivie " et la deuxième "Quelqu'un (avant moi) *s'est* chargé de cette coordonné (fissure nouvelle ou déjà suivie)". Elles ont aussi deux modes de propagation différents.



Examinons maintenant l'algorithme proprement dit, qui est schématisé à la page 221. Ce schéma représente le traitement d'un paquet de coordonnées correspondant à *une* ligne de balayage.

A chaque *pas*, une nouvelle ligne de balayage apparaît, générant un nouveau paquet de coordonnées dans le Tampon. La liste d'opérations effectuées pour chaque nouveau paquet est décrite dans les deux pages suivantes, à la fois de manière graphique et verbalement, "du point de vue d'un suiveur".

Dans cet algorithme, les tests sur les variables booléennes et leur mise à jour sont faits de manière à effectuer un minimum d'opérations, en vue de l'implémentation électronique.

Pour cette raison, les conditions implicitement vérifiées par l'état des autres variables ne sont pas testées.

Un des atouts de cet algorithme est sa simplicité d'implémentation.

Au début de chaque paquet de coordonnées examiné (une ligne de balayage), la variable Itake[s] est initialisée *faux* pour tous les suiveurs (état "disponible").

Les coordonnées x présentes dans le Tampon sont lues séquentiellement par une boucle. Dans tous les cas, chaque coordonnée sera présentée à toutes les cartes, pour simuler le parallélisme de l'opération.

A la lecture de chaque nouvelle coordonnée x, TAKEN, OKAY et FREE sont initialisées à la valeur *faux*.

- ① Pour simuler la nature parallèle de TAKEN, la nouvelle coordonnée x est présentée à tous les suiveurs dans une boucle indépendante, où l'on détermine s'il existe au moins un suiveur pouvant considérer x comme appartenant à "sa fissure" :

"Si je n'ai pas déjà pris en charge une autre coordonnée dans cette ligne (Itake[s]=0), (si je suis en train de suivre une fissure et)¹ si la nouvelle coordonnée rentre dans mon intervalle (Delta[s]=1), alors je signale aux autres qu'il y a au moins un suiveur qui pourrait, le cas échéant, prendre cette coordonnée comme appartenant à sa fissure (TAKEN=1)."

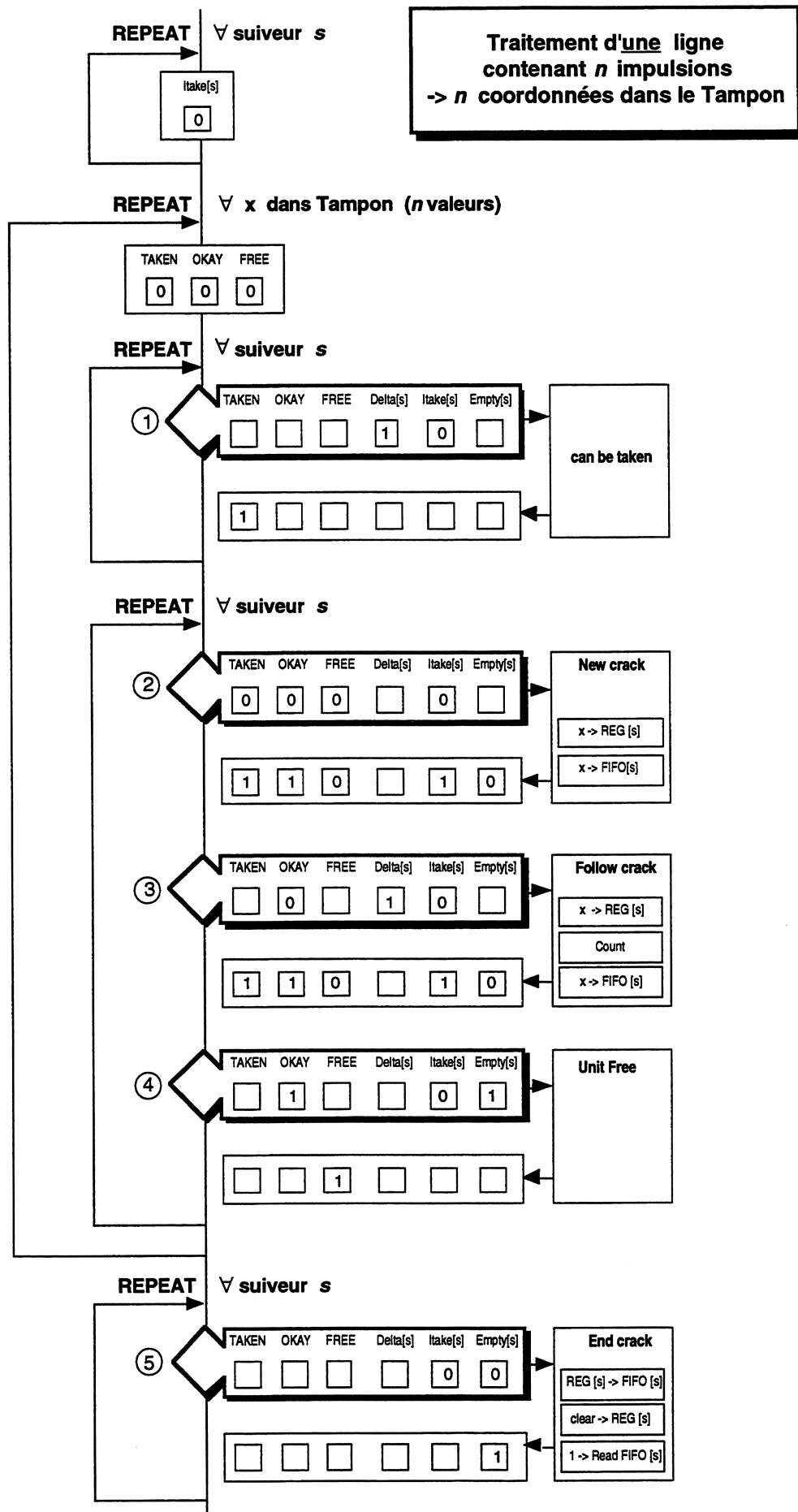
- ② *"Si je n'ai pas déjà pris une autre coordonnée dans cette ligne (Itake[s]=0), si la nouvelle coordonnée ne correspond à aucune fissure actuellement suivie (TAKEN=0), si aucun suiveur avant moi l'a déjà prise (OKAY=0), s'il n'y a pas de suiveurs libres avant moi (FREE=0), alors je prends cette coordonnée comme début d'une nouvelle fissure. Je la mémorise dans mon registre et dans mon FIFO, et je signale aux autres qu'elle a été prise (TAKEN=1 et OKAY=1) et que je ne suis plus libre (FREE=0). J'ai pris ma coordonnée pour cette ligne (Itake[s]=1) et je négligerais donc les coordonnées suivantes."*

- ③ *"Si je n'ai pas déjà pris une autre coordonnée dans cette ligne (Itake[s]=0), si cette coordonnée rentre dans mon intervalle (Delta[s]=1), si personne avant moi ne l'a prise (OKAY=0), alors je prends cette coordonnée comme suite de la fissure que je suis en train de suivre. Je la mémorise dans mon registre, et j'en mémorise une chaque n^o échant. dans mon FIFO. Je signale aux autres qu'elle a été prise (TAKEN=1 et OKAY=1) et que je ne suis plus libre (FREE=0). J'ai pris ma coordonnée pour cette ligne (Itake[s]=1) et je négligerais donc les coordonnées suivantes."*

- ④ *"Si je n'ai pas déjà pris (pour l'instant) une autre coordonnée dans cette ligne (Itake[s]=0), si la nouvelle coordonnée a été prise par un suiveur avant moi (OKAY=1), et si mon registre est vide, (Empty[s]=1) alors je ne fais rien et je signale aux suiveurs après moi que je suis libre (FREE=1)."*

- ⑤ *"Si (à la fin de la ligne de balayage) je n'ai pris aucune coordonnée (Itake[s]=0) mais mon registre n'est pas vide (Empty[s]=0), alors ma fissure est finie. Je mémorise le contenu du registre dans mon FIFO, je vide le registre, et je signale à l'unité de lecture que mon FIFO peut être lu (ReadFIFO[s]=1)".*

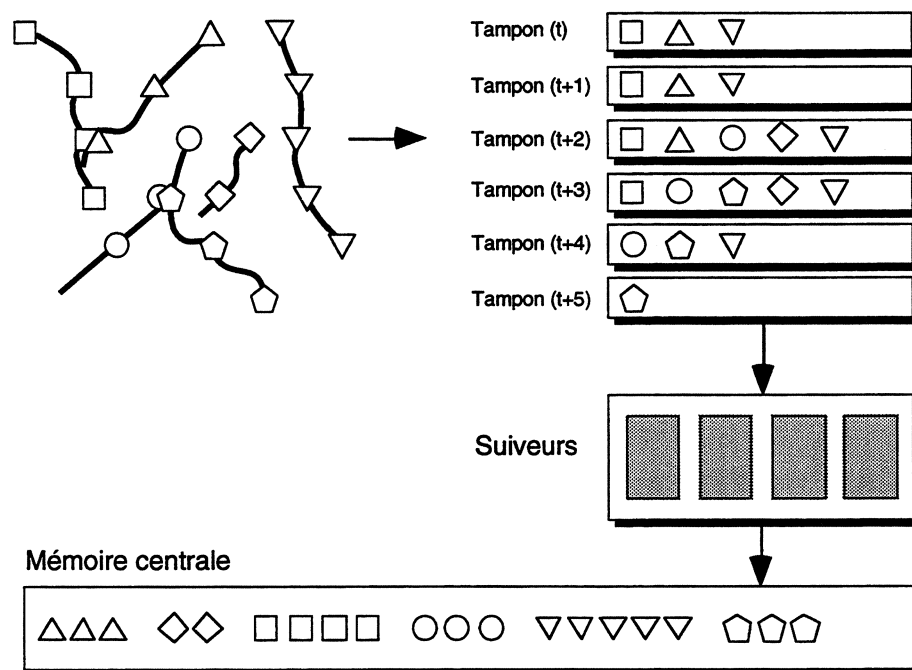
¹ Cette condition n'est pas à tester, car sous-entendue dans Delta[s] (état non-vide du registre).



30.7. Lecture des suiveurs

A la fin du traitement de chaque ligne de balayage le programme principal vérifie dans chaque suiveur l'état du flag ReadFIFO[s]. Si ce dernier est actif, tout le contenu du FIFO[s] correspondant est transféré dans une mémoire centrale. Comme nous venons de le voir, ReadFIFO[s] devient actif lorsque la fissure est terminée: FIFO[s] contient donc la série complète des coordonnées décrivant une fissure, qui a maintenant été *identifiée* comme telle.

Par rapport aux sèmes mémorisés dans le Tampon de manière "désordonnée", nous avons maintenant dans la mémoire centrale des sèmes *structurés* selon les contextes *fissures*. Le gain de valeur symbolique de l'information, obtenu en faisant usage de la connaissance "*la fissure est de forme filaire*", est ici considérable.

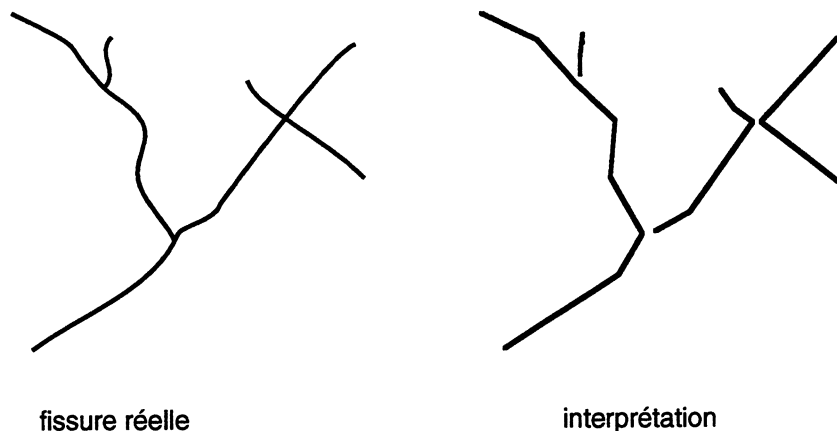


Le contenu de la mémoire centrale est repris par l'interface graphique (voir §30.1. page 213), qui redessine dans la fenêtre d'observation les fissures telles que le système les a reconnues (en rouge et décalées vers la droite pour des raisons de visibilité).

30.8. Résultats

Cet algorithme fournit des résultats excellents: toutes les fissures sont reconnues et interprétées correctement.

Un cas particulier est constitué par les croisements et les ramifications des fissures, qui sont interprétés comme plusieurs fissures simples. L'algorithme choisit une interprétation donnant la priorité de suivi à la fissure la plus à gauche, comme l'illustre le dessin de la page suivante.



La façon dont la décomposition en fissures simples s'opère n'affecte en rien la qualité de la mesure. De plus, si cela s'avérait nécessaire, les différentes parties de la fissure ramifiée pourraient aisément être ré-assemblées a posteriori à partir des données de la mémoire centrale.

Limites de validité

- ◇ Le programme ne simule pas les fissures transversales très proches de l'orientation de la ligne de balayage. Ces fissures produisent dans Sig_{bin} une impulsion très large et très courte selon "y". Une unité spécialement dédiée à ce problème doit être développée.
- ◇ La largeur de la "fenêtre de poursuite" $\Delta_{\max}$ est ici constante, et ne tient compte ni de l'orientation de la fissure suivie ni de sa largeur. Un $\Delta_{\max}$ variable peut être implémenté.
- ◇ La largeur de la fissure est en effet une "largeur apparente", qui dépend de l'orientation de la fissure par rapport à la ligne de balayage. Cette imprécision, bien que peu importante dans ce contexte, peut facilement être corrigée a posteriori.
- ◇ Ce programme ne simule pas le faïençage. La condition $n < N$ est toujours garantie (plus de suiveurs que de fissures). La détection de faïençage peut être réalisée simplement en comptant le nombre d'impulsions dans Sig_{bin} avant le Tampon.
- ◇ Le signal Sig_{bin} ne contient pas de bruit. Cette partie du traitement n'a pas été simulée. Rappelons que le traitement des impulsions surnuméraires est basé sur un grand nombre de suiveurs et sur une détection de longueur minimale de la fissure dans chaque suiveur (voir § 29.3.). Les impulsions manquantes n'altèrent pas l'information de manière significative.
- ◇ Les fissures sont ici *échantillonnées* et non *vectorisées*. L'algorithme d'échantillonnage est bien plus simple, mais ne réalise pas une compression de l'information optimale.

- ◇ Par rapport à l'implémentation électronique, ce programme ne simule pas les temps de propagation des signaux, notamment les signaux OKAY et FREE.

Ces temps peuvent en effet jouer un rôle dans le fonctionnement de l'algorithme, mais les éventuelles erreurs introduites seraient compensées à la ligne de balayage suivante. Une imprécision d'une ligne ($\sim 1\text{mm}$) sur la longueur totale de la fissure serait parfaitement tolérable.

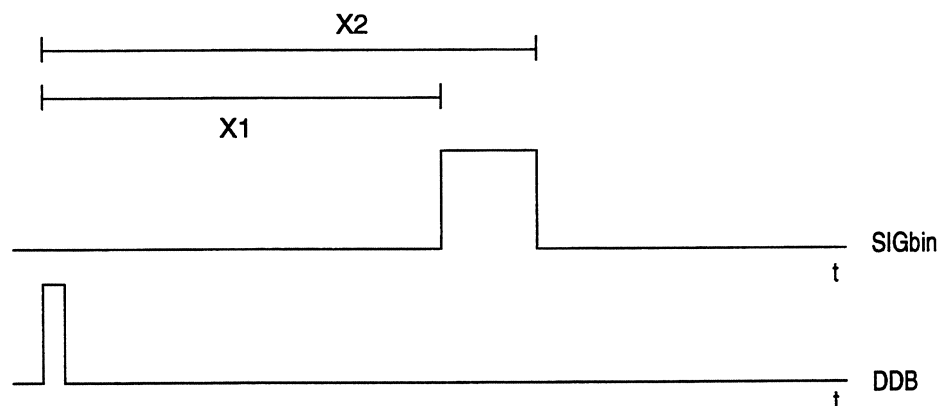
31. IMPLEMENTATION ELECTRONIQUE

L'implémentation électronique de l'algorithme de traitement s'est faite en plusieurs étapes. Un premier prototype a été réalisé par un étudiant en microtechnique, Bertrand Gros, dans le cadre d'un projet de semestre. Sur la base des concepts et des schémas résumés aux chapitres 29 et 30, M. Gros a réalisé une carte tampon et deux suiveurs simplifiés (sans traitement de la largeur ni du faïençage et sans transfert des données dans la mémoire centrale). Ce prototype a été testé à l'aide de Logidules, à une cadence très faible. Les résultats ont été très satisfaisants.

La réalisation d'un deuxième prototype, plus proche des conditions réelles de mesure, a été confiée à M. Alexandre Micsiz, ingénieur ETS, dans le cadre d'un bref mandat.

M. Micsiz a reconsidéré le problème dans le détail, notamment en ce qui concerne la mesure de largeur et l'adaptation de la fenêtre de poursuite à l'orientation de la fissure, et a proposé de tester une variante d'algorithme de suivi. Cette variante reste basée sur les mêmes concepts et la même structure que l'algorithme que nous venons d'examiner.

Sa principale différence réside dans la "condition de poursuite", qui n'est pas basée sur la coordonnée x de début de l'impulsion, sur sa largeur et sur la fenêtre temporelle $\Delta_{\max}$, mais sur la comparaison des coordonnées de début et de fin de l'impulsion x_1 et x_2 .

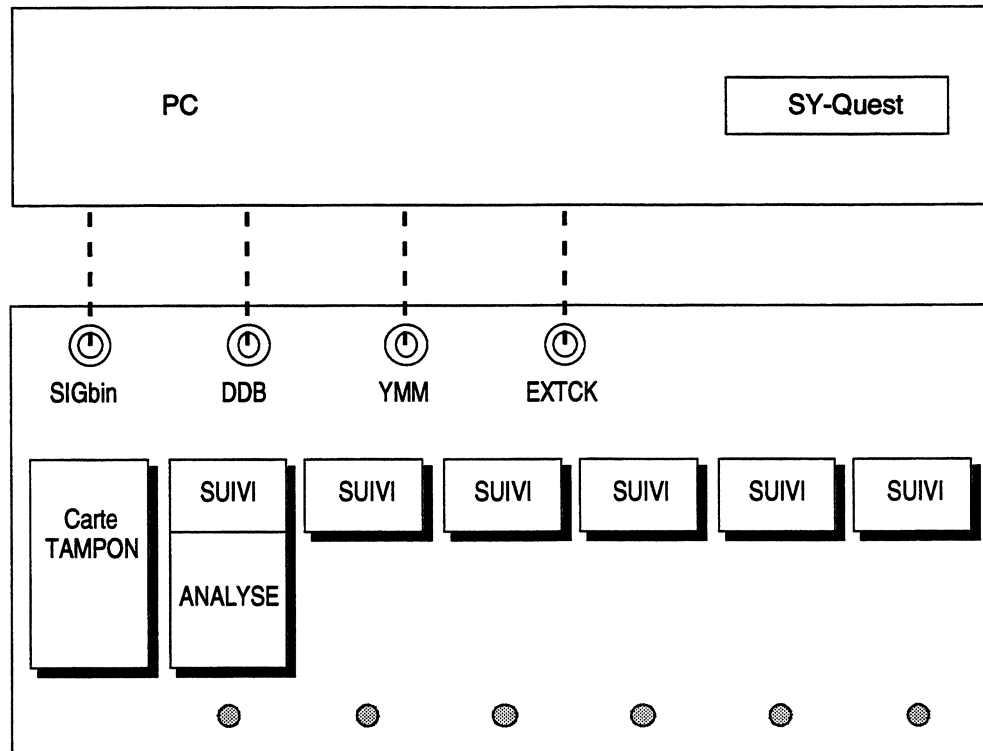


Le rôle et la structure du Tampon restent par contre inchangés, à l'exception du format de mémorisation des données dans le FIFO rapide (voir paragraphe suivant). Dans les suiveurs, la fonction de suivi et la fonction d'analyse et mémorisation sont nettement séparées.

Un rack a été réalisé, comprenant:

- ◇ un PC avec SY-quest 80 Mb;
- ◇ la carte tampon, version définitive;
- ◇ 1 suiveur complet (suivi + analyse), prototype de test;
- ◇ 5 suiveurs partiels (seulement partie suivi), prototypes de test.

L'unité de lecture des suiveurs n'a pas été développée, et l'état des suiveurs est indiqué par une LED. Le rack est schématisé ci-dessous.



Dans les phases de test, les signaux SIG_{bin}, DDB, EXTCK et YMM (compteur de tours de roue) peuvent être simulés par le programme décrit au chapitre 30.

31.1. La carte tampon

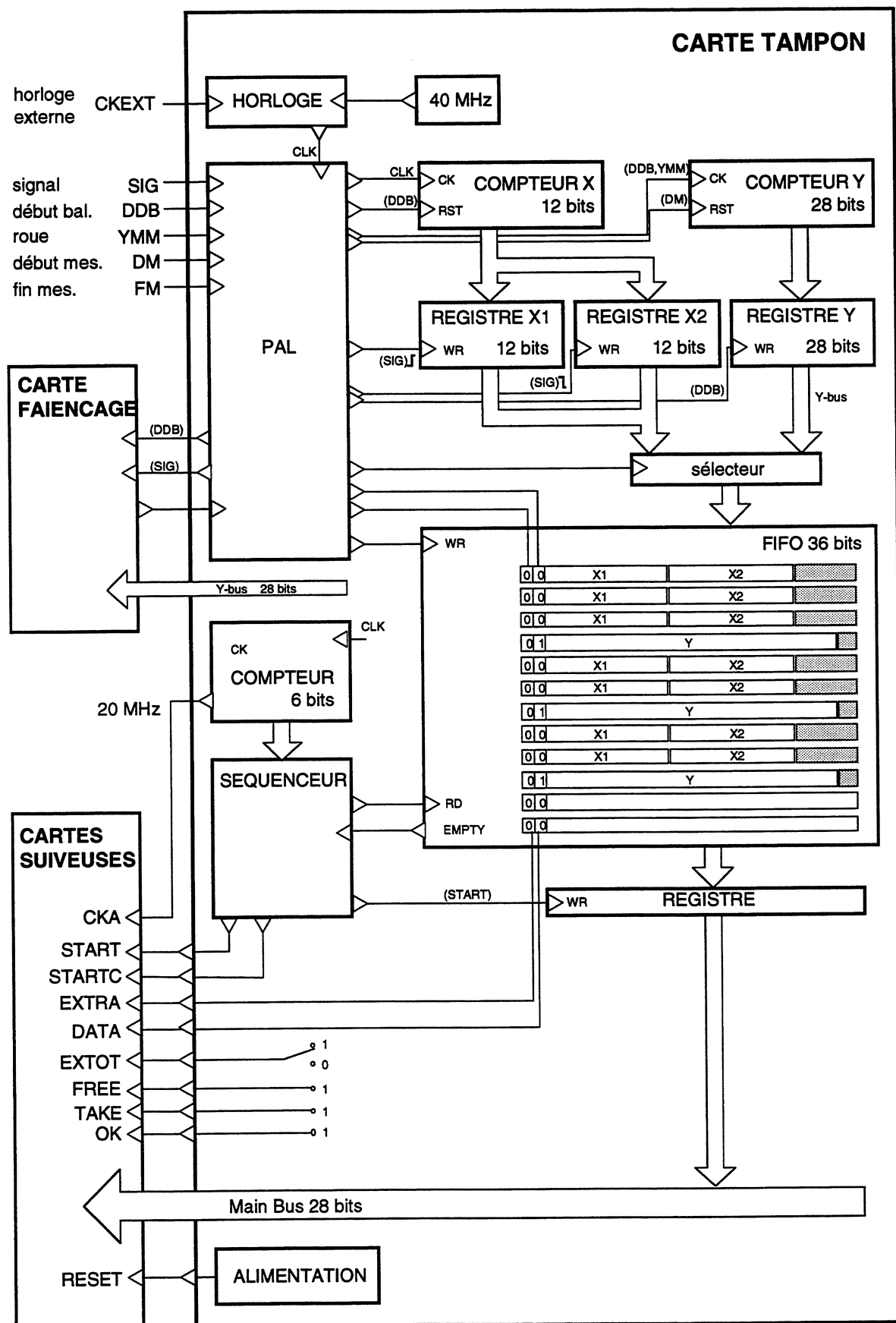
Le FIFO Tampon a été réalisé sur une carte format Europe, dans sa version définitive. Son schéma global est présenté à la page ci-contre.

Dans le FIFO, le deuxième bit indique si la coordonnée enregistrée est une coordonnée x ou une coordonnée y. En pratique, le positionnement en "y" est compliqué par le fait que le balayage et la position du véhicule ne sont pas corrélés, notamment au niveau des arrêts et des accélérations du véhicule.

Position relative et vitesse du véhicule sont mesurés à l'aide d'une roue de vélo calibrée, qui fournit une impulsion par mm (signal YMM). Le premier bit dans le FIFO est utilisé par un algorithme de correction du déphasage entre DDB et YMM, qui ne sera pas abordé ici.

La carte de détection du faïençage a été étudiée mais n'a pas été implémentée, en raison de la trop courte durée du mandat de M. Micsiz.

Le fonctionnement de cette carte Tampon est très satisfaisant et conforme aux prévisions.



31.2. Les suiveurs

La durée du mandat de M. Micsiz n'a pas permis d'effectuer des tests approfondis sur les suiveurs. La partie suivi des six cartes, qui implémente le "nouvel" algorithme, donne satisfaction avec les signaux simulés, mais pose des problèmes de synchronisation avec les signaux réels. Ce sujet sera traité plus amplement dans la section F.

La partie du suiveur consacrée à l'analyse et à la mémorisation n'a pas pu être validée dans tous ses aspects. Bien que valable globalement, elle nécessite des améliorations locales (voir rapport de M. Micsiz).

Le développement des suiveurs n'étant pas à son stade définitif, nous ne présenterons pas ici de schéma détaillé¹.

La structure des suiveurs est de nature à rendre possible leur implémentation sur ASIC². Ce développement n'est cependant pas intéressant, du point de vue économique, au niveau actuel du projet.

¹ Leur schéma de principe et leur fonctionnement sont déjà décrits aux §§ 29.2. et 30.6.

² Circuits intégrés "sur mesure".

32. CONCLUSIONS

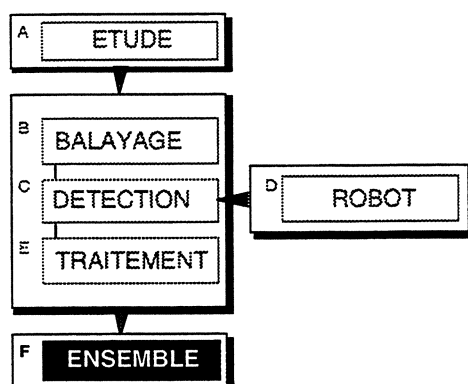
- ◆ Une solution de traitement efficace a été proposée, et son bien fondé a été prouvé à la fois par une simulation et par des tests de principe sur une implémentation électronique simplifiée (travail de M. Gros).
- ◆ Cet algorithme répond à toutes les exigences formulées, notamment:
 - la totalité du traitement peut être faite en *temps réel*, à vitesse élevée;
 - *fidélité* élevée de l'information;
 - gain de *valeur symbolique* élevé;
 - compression de l'information;
 - temps de traitement indépendant du nombre des fissures suivies;
 - filtrage du bruit sémique;
 - suiveurs réalisables sur ASIC.
- ◆ La carte Tampon définitive est réalisée.
- ◆ Un prototype de la partie suivi des suiveurs a été réalisé et testé avec succès.
- ◆ L'implémentation de la partie analyse (vectorisation) nécessite un développement ultérieur, mais leur fonctionnement de principe n'est pas remis en cause.
- ◆ La détection de faïençage et le transfert des données des suiveurs dans la mémoire centrale sont à développer. Ces réalisations ne posent pas de problèmes majeurs, et reposent sur des techniques bien connues.
- ◆ Les applications de cet algorithme peuvent être étendues à tous les problèmes nécessitant un suivi rapide d'impulsions appartenant à un contexte et superposées aléatoirement.¹

¹ Ce type de problème se rencontre notamment dans les techniques de suivi (radar ou autres) d'objets en mouvement indépendant et dans la lecture de chaînes de mesure multicanal.

Section F

LE SYSTEME DANS SON ENSEMBLE

Prototype 1



Cette section décrit de manière succincte le premier prototype de CREHOS, qui réunit les dispositifs étudiés isolément dans les sections précédentes.

Sont également présentés et commentés les principaux résultats obtenus.

33. Assemblage du prototype	233
33.1. Structure	233
33.2. Installation électronique	235
33.3. Gestion des signaux	236
33.4. Configuration testée	237
33.5. Vue d'ensemble	239
34. Résultats en laboratoire	241
34.1. Dispositif de balayage	241
34.2. Dispositif de détection	241
34.3. Dispositif de traitement	244
35. Mesures "in situ"	245
36. Evaluation globale	249

33. ASSEMBLAGE DU PROTOTYPE

L'assemblage des différents organes décrits dans les sections précédentes a donné lieu à un premier prototype de système. Ce prototype est destiné à des essais de laboratoire sur des échantillons de revêtement et à des tests in situ, à basse vitesse. Le prototype n'étant pas homologué pour la circulation, son utilisation est limitée aux chemins internes au site de l'EPFL.

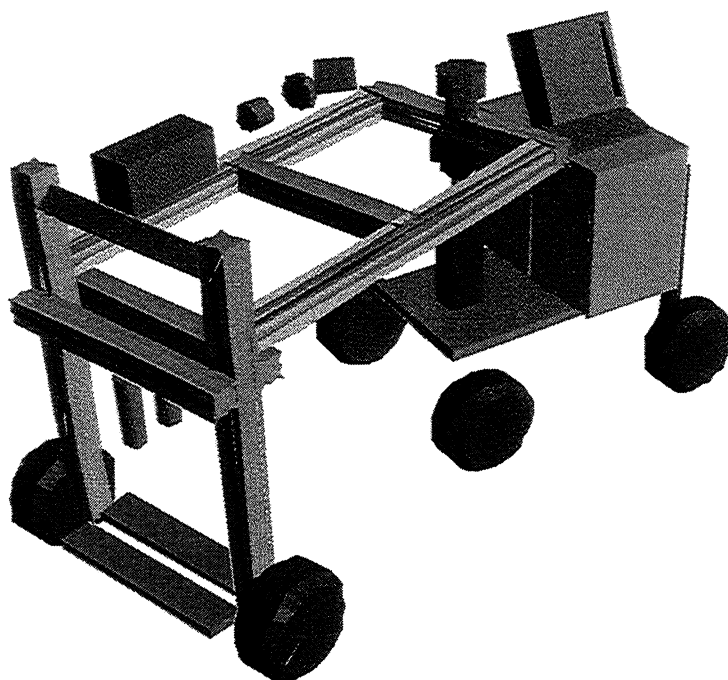
Le but premier de ce prototype est l'étude de la synergie entre les différents organes. Il n'est pas destiné à des campagnes de mesure.

Cette étape très importante du projet est de nature essentiellement pratique: elle comporte plusieurs réalisations de pièces mécaniques, des assemblages progressifs, des ajustages, des alignements, des synchronisations, etc. Ces aspects ne présentant pas d'intérêt particulier, nous nous limiterons ici à la description succincte du résultat final.

33.1. Structure

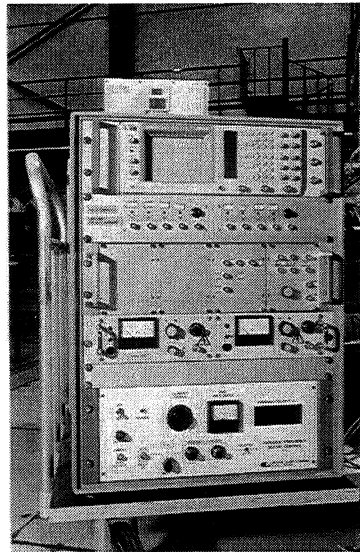
Les trois organes de CREHOS sont installés dans un cadre réalisé en bancs Microcontrôle X95. Cette structure constitue une remorque destinée à être tractée manuellement ou par un véhicule lent. Les parties optique et optoélectronique sont installées dans un cadre rigide amorti, qui est fixé par un cardan à un chariot transportant deux racks: l'un contenant le dispositif de traitement et le PC, et le deuxième contenant les dispositifs de pré-traitement et les différentes alimentations. La remorque est illustrée schématiquement ci-dessus :

en bleu	le dispositif de balayage (laser, optique de focalisation, miroir polygonal tournant et miroir de déflexion);
en rouge	le dispositif de détection (collecteurs holographiques multifacettes et photomultiplicateurs);
en vert	les racks de traitement et d'alimentation.



33.2. Installation électronique

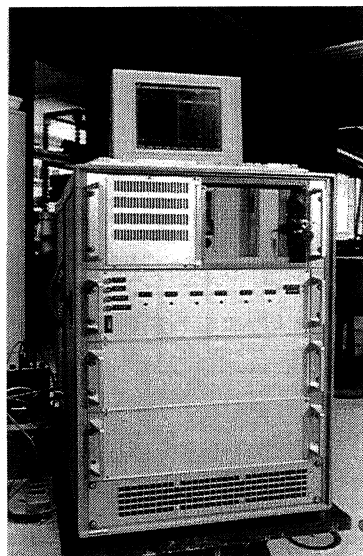
Rack de contrôle



Ce rack contient (de haut en bas)

- un oscilloscope de contrôle (2 canaux);
- un commutateur permettant de sélectionner les signaux à visualiser sur l'oscilloscope (8 entrées);
- le dispositif de pré-traitement comprenant un générateur de "fenêtre de masquage" et une unité de seuillage (voir § 33.3.);
- les deux alimentations des photomultiplicateurs;
- l'unité d'alimentation et de contrôle du miroir tournant.

Rack de traitement



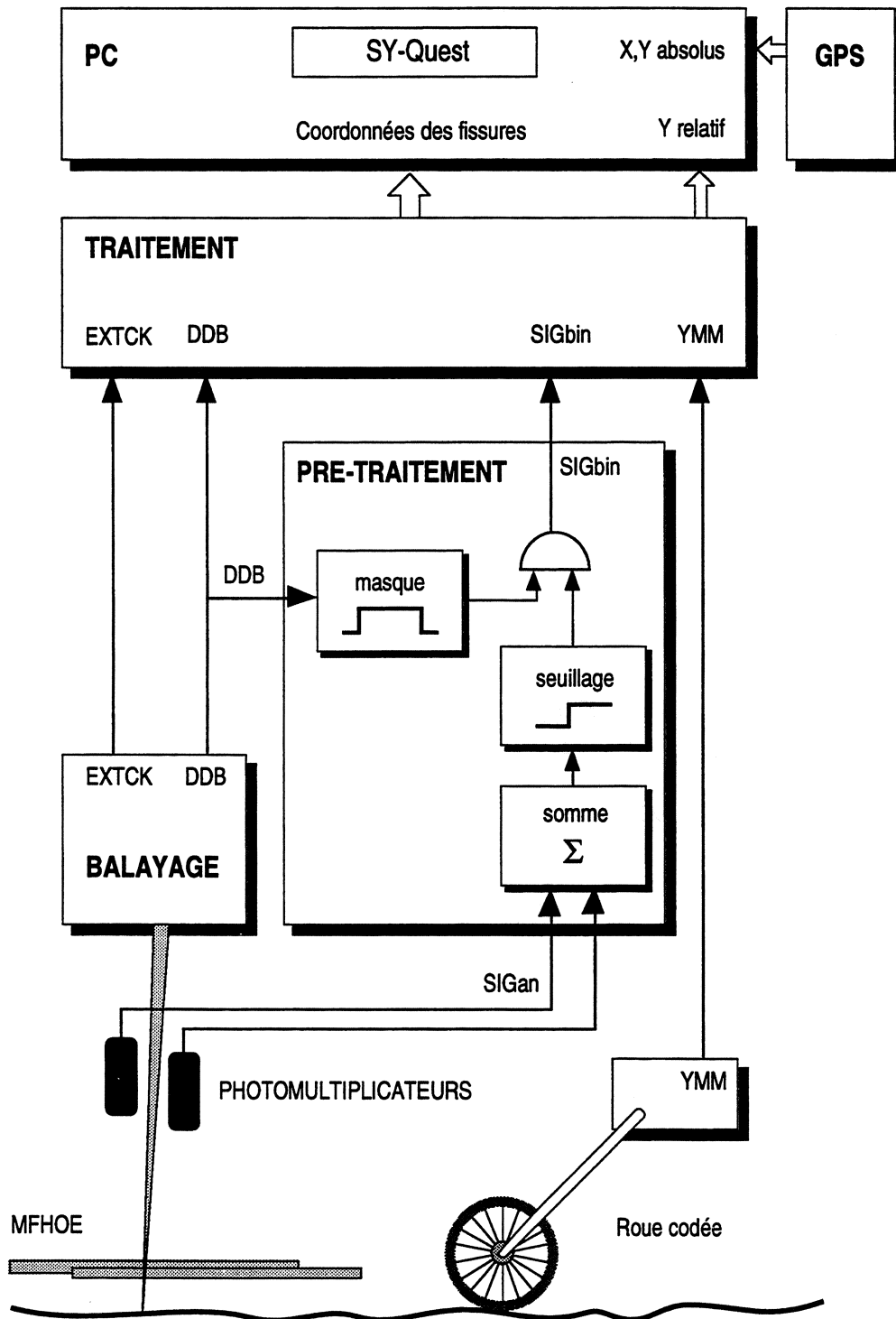
Ce rack contient (de haut en bas)

- un PC avec écran plat (noir-blanc) et port de sortie PIO;
- l'unité de traitement, comprenant une carte tampon et six suiveurs, dont un avec algorithme d'analyse (voir ch. 31).

Le PC peut fournir à l'unité de traitement des signaux simulés (voir ch. 30).

33.3. Gestion des signaux

Les différents signaux que nous avons examinés dans les sections précédentes se propagent dans le système de la manière illustrée ci-dessous (dispositif final). Tous les signaux principaux peuvent être visualisés sur l'oscilloscope de contrôle.



33.4. Configuration testée

Le prototype réalisé a les caractéristiques suivantes.

Balayage

- Laser Argon ILT 30mW refroidi à l'air, $\lambda=514$ nm.
- Miroir polygonal tournant 24 facettes, 30'000 tours/min (voir §10.2.).

Fréquence de balayage :	12'000 lignes de balayage/sec
Rayon de balayage:	2.900 m
Longueur balayée:	700 mm
Diamètre de la tache au sol:	1 mm (écart sur les bords négligeable)
- Signal DDB (début du balayage) généré par une photodiode placée légèrement à l'extérieur de la fenêtre de balayage et "corrigée" électroniquement (voir sec B ch 11).
- Signal EXTCK à 7.2 MHz simulé par un multiplicateur de fréquence à partir du signal de commande du miroir polygonal (500 Hz) ou à partir de DDB (12 kHz). Il fournit 600 impulsions par balayage(voir sec B ch 11).

Détection

- Deux hologrammes multifacettes de 100 x 600 mm (2 x 2160 facettes), de part et d'autre de la ligne de balayage (voir §16.7.). Hologrammes en phase, plaques en gélatine argentique Agfa 8E56 blanchies.
- Deux photomultiplicateurs Hamamatsu H1949, de part et d'autre de la ligne de balayage. Surface de détection de 2x 300mm de diamètre. Gain réglé manuellement.
- Pré-traitement:
 - seuillage à réglage manuel;
 - fenêtre de masquage réglable réalisée à partir de DDB.

Traitement

- Carte tampon.
- Cinq suiveurs (partie suivi seulement).
- Un suiveur complet (suivi+ analyse).
- Un PC complet avec SY-Quest 80 Mb.

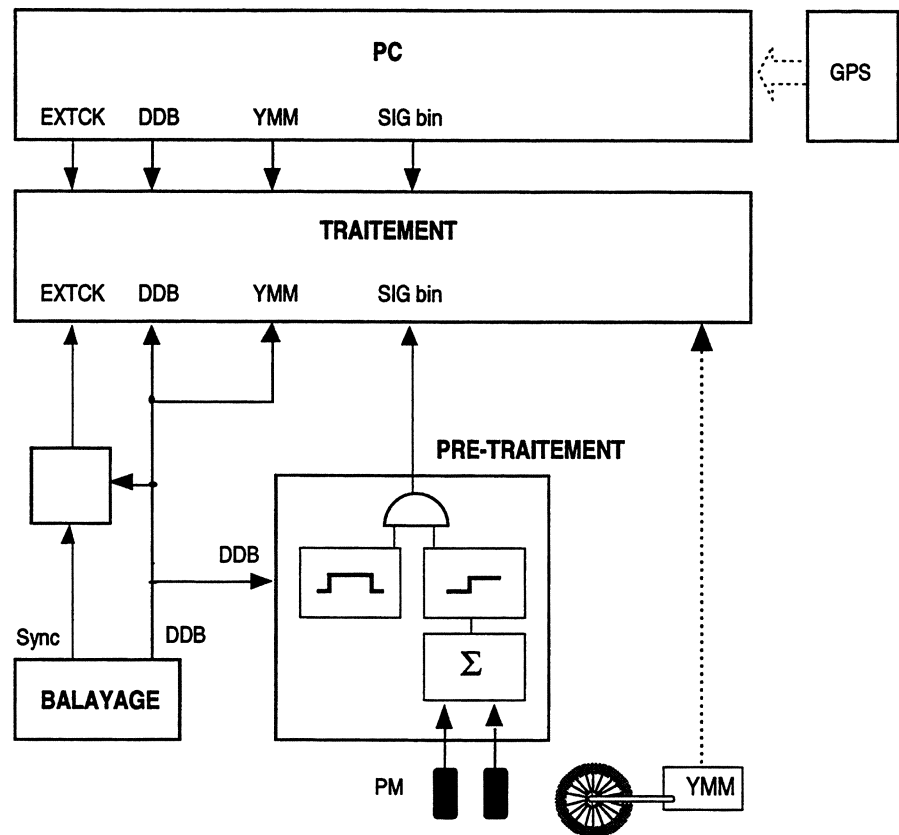
L'unité de lecture des suiveurs, qui transfère dans le SY-Quest les données se trouvant dans les FIFO des suiveurs, n'a pas été développée pour le moment. Le PC est utilisé principalement pour simuler les signaux nécessaires aux tests de l'unité de traitement.

Positionnement

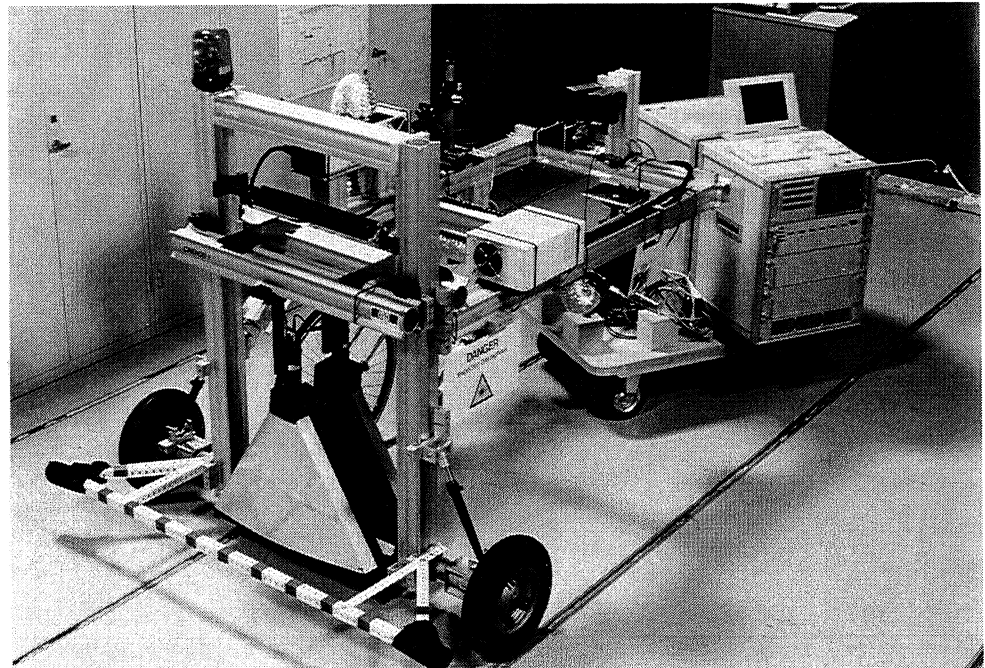
- (Roue codée, une impulsion par mm).
- (Système de positionnement GPS)

Ces deux dispositifs sont installés, mais ne sont pas raccordés au système à l'heure de la rédaction de cette thèse. Le signal YMM est simulé par DDB.

La configuration provisoire des signaux est donc la suivante:



33.5. Vue d'ensemble



Nous remarquons que deux caches de forme conique protègent les collecteurs et les détecteurs de la lumière parasite ambiante (voir également photo page 131).

34. RESULTATS EN LABORATOIRE

Le prototype a été mis au point et testé en laboratoire à l'aide des éprouvettes en bitume usé (carotte réelle) et en béton. Elles sont décrites au § 5.3. (page 28 et 29). Les éprouvettes sont installées de manière à pouvoir simuler le déplacement du véhicule.

Le critère de base de l'évaluation des différents stades du prototype est le contrôle visuel des signaux sur l'écran d'oscilloscope.

34.1. Dispositif de balayage

Le dispositif de balayage fonctionne conformément aux prévisions, de manière très satisfaisante (voir section B). L'intensité de la tache focale au niveau du sol est de 10 mW.

34.2. Dispositif de détection

Collecteur holographique multifacettes

Le double collecteur holographique de 600 mm de longueur, décrit au §16.7. (page 123) donne des résultats conformes aux prévisions.

Le rendement optique global au niveau des photomultiplicateurs de l'ensemble revêtement+collecteur est, comme prévu, faible (I_{PM}/I_{in}):

$$\eta = 0.05\% \quad \text{pour le bitume noir (mesure statique)}$$

$$\eta = 0.4\% \quad \text{pour le béton gris (mesure statique)}$$

Avec une intensité d'éclairage au sol de 10 mW, ce rendement permet amplement aux photomultiplicateurs, très sensibles, de détecter le signal lors d'un balayage à 12 kHz.

En de bonnes conditions (obscurité totale), l'intensité minimale d'éclairage permettant d'obtenir un signal exploitable à 12 kHz est

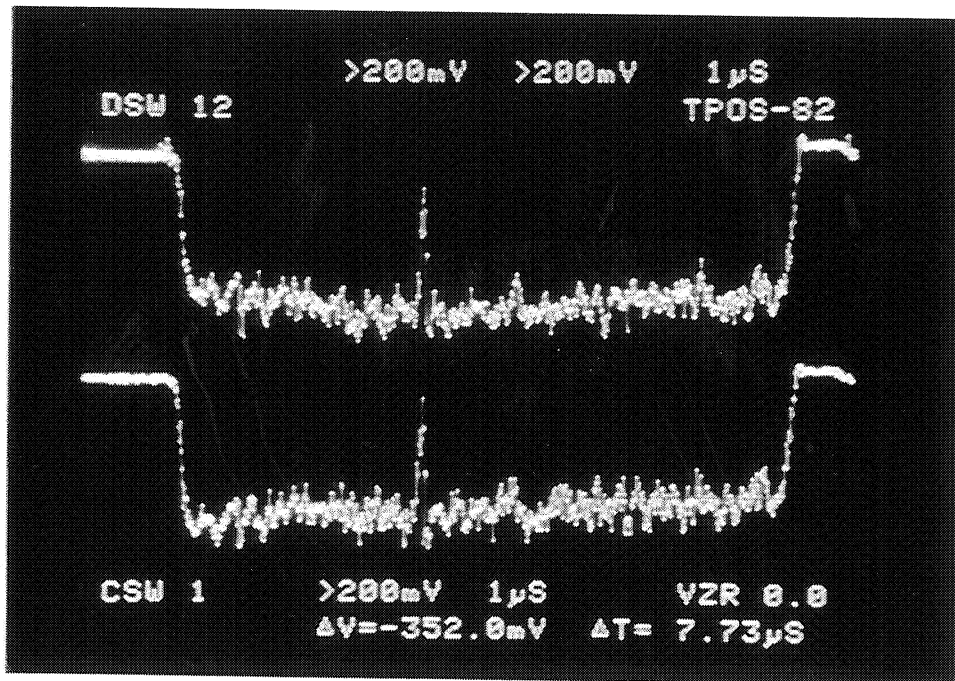
$$I_{in}^{MIN} \cong 1 \text{ mW}$$

- ◆ Ce résultat est important, car en considérant les nombreuses pertes introduites à la fois par le revêtement et par le collecteur, l'utilisation d'un laser très puissant aurait pu s'avérer nécessaire. L'installation d'un tel laser dans un véhicule aurait été problématique.

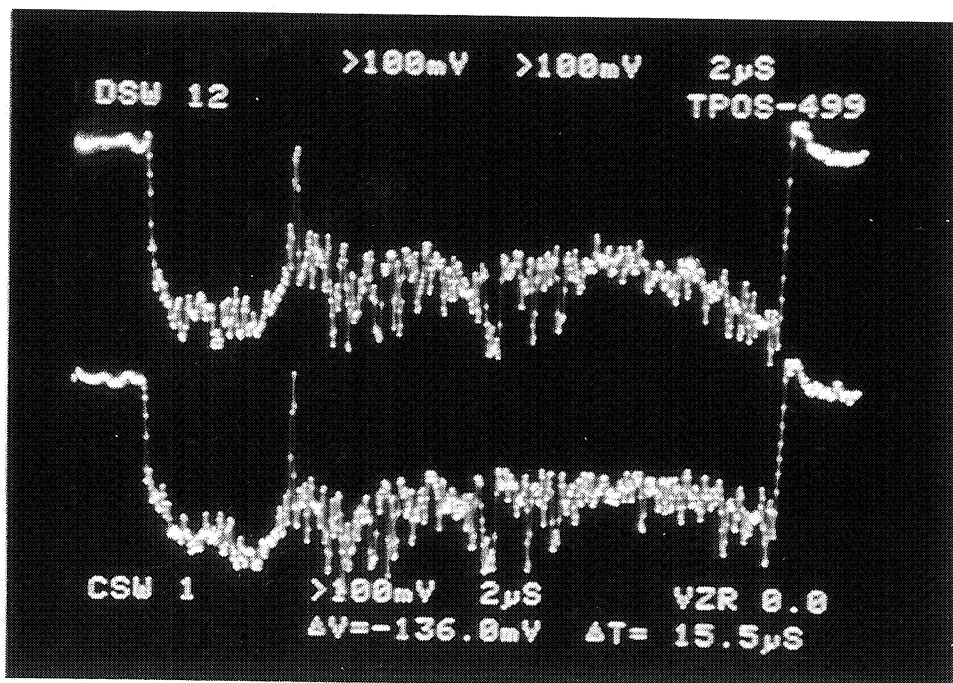
Le bon comportement du collecteur, couplé à la sensibilité élevée des photomultiplicateurs, nous permet par contre d'utiliser un laser de puissance limitée, ne nécessitant pas de dispositifs de refroidissement encombrants et ayant une consommation de courant limitée.

Un exemple de signal de sortie des deux photomultiplicateurs est illustré ci-dessous. Les détecteurs sont légèrement décalés spatialement afin de minimiser la modulation introduite par le collecteur (voir §17.1.). Le signal est inversé (une forte rétrodiffusion donne un signal négatif).

- ◆ Malgré le bruit, la fissure est nettement visible (pic positif), à l'intérieur de la fenêtre temporelle de balayage.



Eprouvette en béton, 1 fissure de 0.4 mm de largeur.

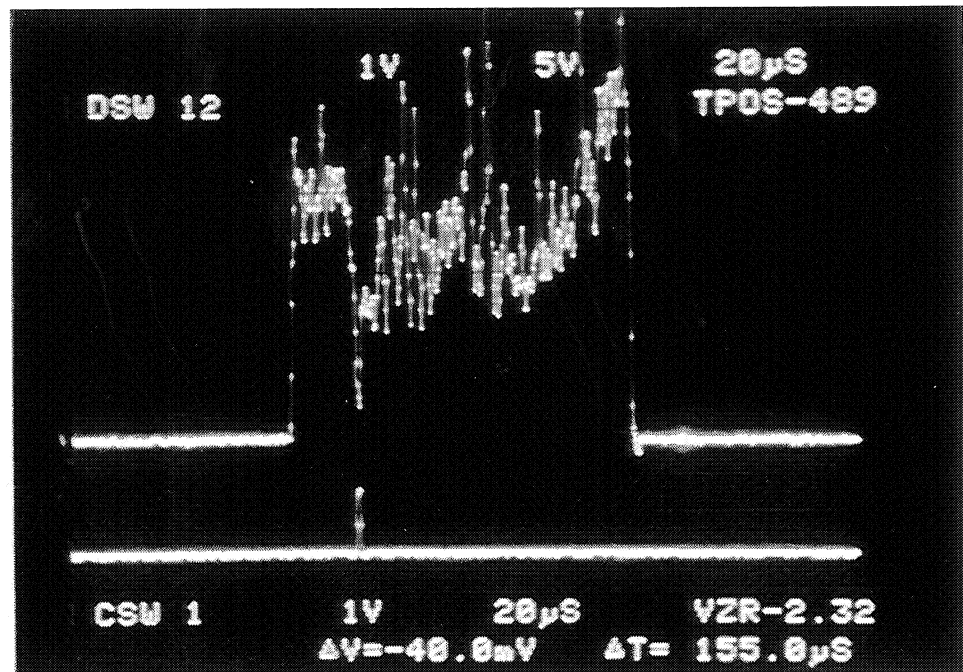


Carotte de revêtement bitumineux usé réel, 1 fissure de 1mm de largeur.

Mise en forme du signal

La photographie ci-dessous montre le signal SIG_{an} qui correspond à la somme des signaux de sortie des deux détecteurs, et, en dessous, le signal SIG_{bin} , qui sera envoyé au dispositif de traitement. Le signal SIG_{an} n'est pas inversé (une forte rétrodiffusion produit un signal positif). Le signal SIG_{bin} est obtenu par seuillage, binarisation et masquage du signal SIG_{an} (voir ch. 18.).

La valeur de seuillage est choisie manuellement à l'aide d'un potentiomètre.



Carotte de revêtement bitumineux usé réel, 1 fissure de 1mm de largeur.

- ◆ La fissure a donc été détectée.

Le problème du seuillage est délicat, car les minima du signal SIG_{an} dus au bruit sont parfois proches des minima dus à la fissure.

La valeur de seuillage optimale (locale) peut facilement être trouvée manuellement, mais cette solution ne saurait être acceptable dans le système définitif. En effet cette valeur de seuillage peut varier non seulement d'un revêtement à l'autre, mais également entre différentes régions d'un même revêtement: elle doit donc être réglée de manière continue et en fonction du signal présent.

- ◆ Le développement d'un dispositif de réglage automatique de la valeur de seuillage doit faire l'objet un développement prioritaire dans la suite des travaux.

34.3. Dispositif de traitement

Test avec les signaux simulés

La carte Tampon et les six suiveurs ont été testés avec les signaux SIG_{bin}, DDB, EXTCK et YMM simulés par le programme décrit au ch. 30, à des fréquences réduites (limitées par les performances du PC).

- ◆ Avec ces signaux, le comportement du Tampon et de l'algorithme de suivi des six suiveurs donne des résultats excellents: les fissures simulées sont prises en charge correctement par les suiveurs.

L'algorithme d'analyse, implémenté dans l'un des suiveurs, demande par contre des mises au point locales.

Test avec les signaux réels

- ◆ La carte Tampon fonctionne correctement avec les signaux provenant du système.

La configuration provisoire de signaux (voir §33.4.) ne permet pas à l'algorithme de suivi de fonctionner correctement à cause de problèmes de synchronisation. En effet, les fissures sont suivies, mais pas forcément par les bons suiveurs.

La source de ce problème est le miroir polygonal tournant, dont les 24 facettes ne sont pas parfaitement orientées les unes par rapport aux autres. Cela provoque un décalage temporel périodique des impulsions, qui "fait croire", à tort, aux suiveurs que de nouvelles fissures commencent à chaque tour de miroir.

C'est justement pour pallier à ce type de problème qu'a été prévu le signal de synchronisation EXTCK, qui fournit au dispositif de traitement le signal d'horloge en se basant sur le balayage effectif¹. Pour des raisons de temps, le dispositif optique (ou électronique) générant un "vrai" signal EXTCK n'a pu être réalisé (voir sec A ch 11.).

Dans la configuration testée, EXTCK est généré à partir de la *fréquence* d'alimentation du miroir (ou à partir de la *fréquence* de DDB), et ne reflète donc pas exactement le comportement de *chacune* des lignes de balayage.

Rappelons également que, outre les défauts d'alignement des facettes du miroir tournant, la vitesse de rotation de ce dernier n'est pas parfaitement stable.

- ◆ Ce problème de synchronisation peut sans doute être résolu par l'implémentation d'un "vrai" signal EXTCK, obtenu de façon optique à chaque ligne de balayage.

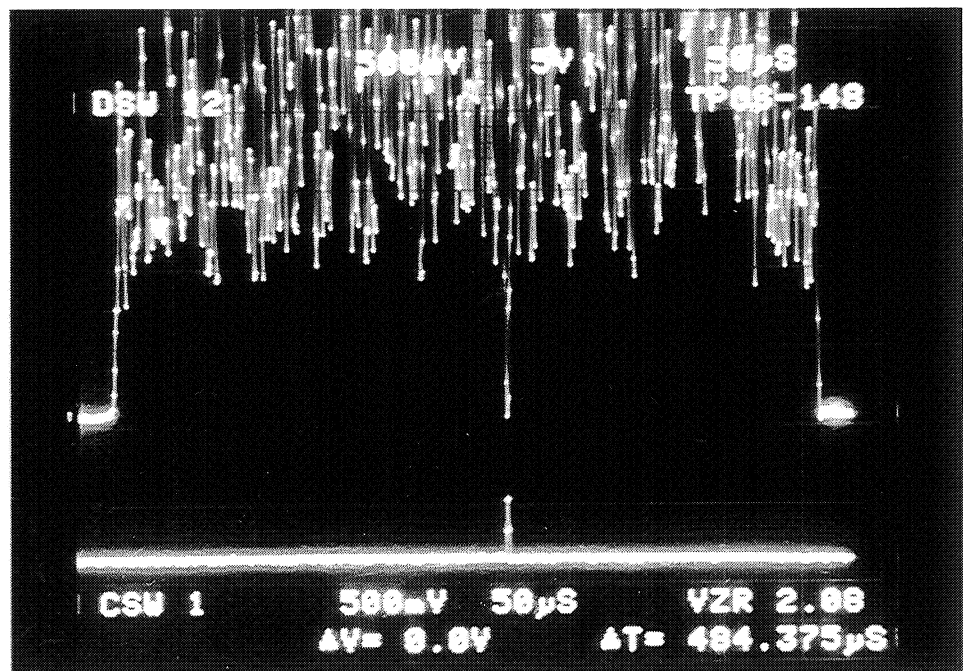
¹ 600 impulsions par balayage pour ce prototype, 4000 pour le dispositif final.

35. MESURES "IN SITU"

Le prototype a été testé, à faible vitesse, sur des fissures réelles sur le site de l'EPFL.



Les signaux SIG_{an} et SIG_{bin} typiques pour des fissures in situ sont illustrés ci-dessous.



Les signaux à la page précédente ont été obtenus avec une fissure de largeur de 1mm dans un enrobé plutôt clair, comportant des granulats blancs .



- ◆ Les résultats obtenus sont analogues à ceux obtenus en laboratoire, voire meilleurs. Sur l'écran d'oscilloscope, les fissures sont clairement visibles.

36. EVALUATION GLOBALE

Les résultats principaux dégagés par ces tests sont les suivants.

- ◆ Le prototype permet de confirmer le bien fondé du principe de mesure et démontre la faisabilité du système.
- ◆ Des améliorations locales sont nécessaires (seuillage, synchronisation), mais le principe de mesure n'est pas remis en cause.
- ◆ Le bon comportement du collecteur multifacettes est également à souligner, car cet élément, étant de type nouveau, n'avait jamais été testé auparavant.

Le bon fonctionnement de cet hologramme n'était pas *assuré a priori*, en raison de la mauvaise qualité optique de l'onde à collecter, sa nature speckle, ses paramètres aléatoires, la distribution statistique des facettes de l'hologramme et l'aspect probabiliste de la collection. Des doutes sur le fonctionnement de ce collecteur étaient bien légitimes¹.

- ◆ Le rôle du collecteur holographique au sein du système est déterminant.

Un test du prototype *sans* collecteur holographique a donné les résultats suivants.

Un signal correspondant à la lumière rétrodiffusée est détecté, et parfois des fissures y sont visibles. Mais ce signal présente des inconvénients considérables. Notamment:

- La probabilité de détection sans collecteur n'est pas la même pour différentes fissures, et peut même être nulle: dans beaucoup de cas, la présence d'une fissure *n'est pas visible* dans le signal SIG_{an}. Des points de fissure seraient donc considérés comme points sains.
Ceci est dû au fait qu'au centre du balayage, sans collecteur, le détecteur amplifie de manière préférentielle la lumière rétrodiffusée sous un angle proche de la normale au revêtement. Nous avons vu au §14.1. que cet angle correspond justement à l'angle de rétrodiffusion résiduelle des fissures.
- A contrario, des points sains peuvent être interprétés comme des fissures, et ceci surtout sur les bords du balayage. Sans collecteur, seule la lumière rétrodiffusée dans une direction privilégiée est détectée, avec un angle très fermé. Cette direction varie pour chaque point, et l'angle de détection est plus fermé pour les points au bord du balayage. Lorsque la rugosité est importante, la lumière rétrodiffusée par un point sain est perdue pour toutes les directions autres que celle du détecteur.
- Sans collecteur, l'intensité rétrodiffusée moyenne diminue sur les bords de la ligne de balayage. Ceci complique le réglage du seuil de détection, qui n'est valable que pour la zone centrale du balayage. Ce phénomène n'est pas

¹ Plusieurs personnes, en diverses occasions, m'avaient d'ailleurs fait part amicalement de leurs doutes, voire de leur scepticisme quant au fonctionnement de ce collecteur.

excessivement marqué dans le prototype, mais son importance serait sans doute plus grande lors d'un balayage de 4m.

- ◆ Ce système donnant de bons résultats sur un revêtement d'aussi mauvaise qualité optique que la route, il ne peut que donner des résultats meilleurs sur d'autres surfaces, moins rugueuses ou plus claires.

Section G

CONCLUSIONS GENERALES

37.	Récapitulatif du travail effectué	253
38.	Récapitulatif des résultats obtenus	257
38.1.	Remarques	258
38.2.	"By-products"	258
39.	Autres applications de CREHOS	261
40.	Développements futurs	263
40.1.	Prototype	263
40.2.	Système définitif	263
41.	Diffusion	265
41.1.	Publications	265
41.2.	Promotion	266
41.3.	Film	267
42.	Commentaires finaux	269

Section. G. CONCLUSIONS GENERALES

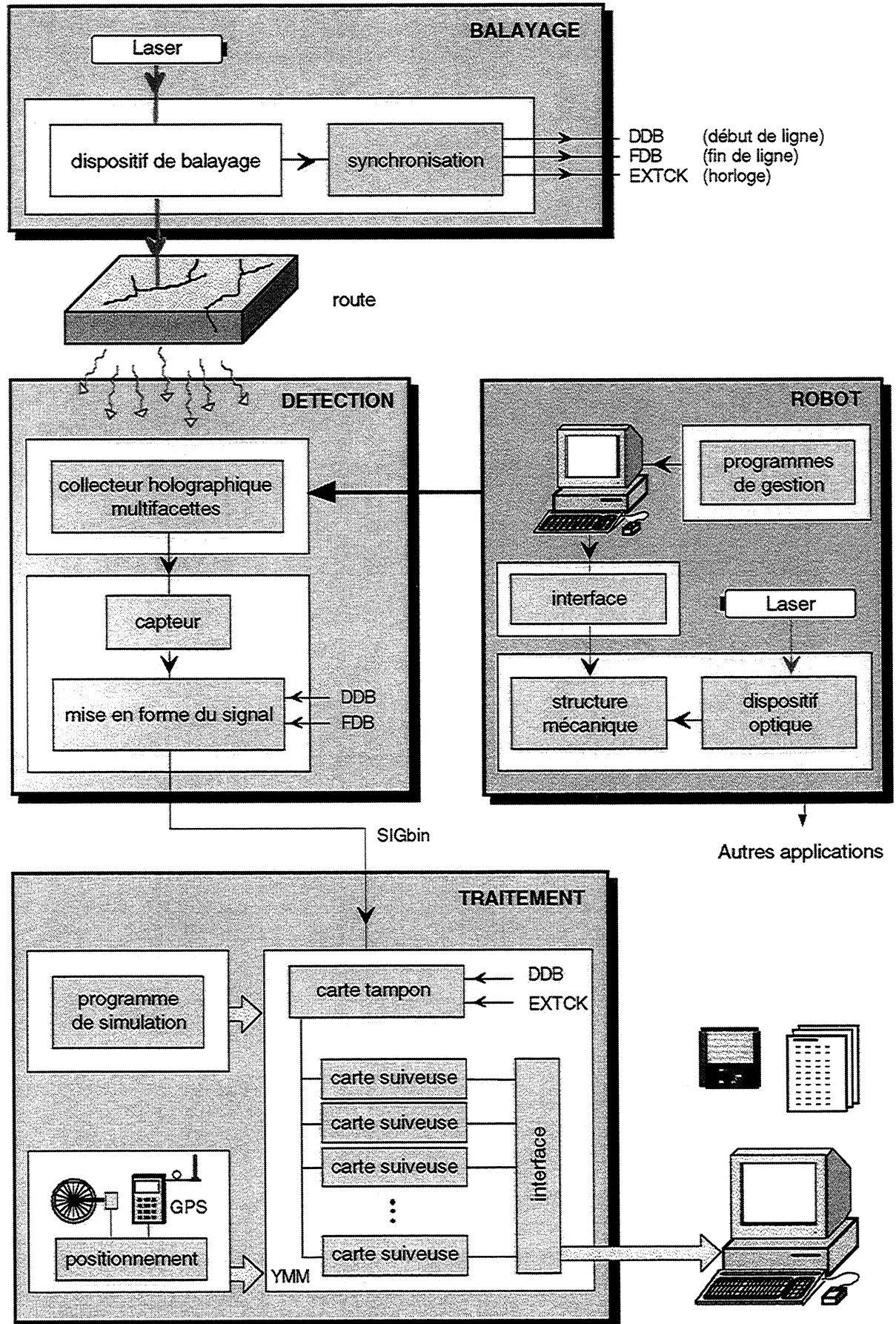
37. RECAPITULATIF DU TRAVAIL EFFECTUE

Résumons les principales étapes, tant théoriques que pratiques, qui ont constitué ce travail. Sont exclus de cette liste les présentations et les publications, qui feront l'objet du chapitre 41.

La liste ci-dessous, en plus d'une énumération de ces étapes, offre également l'occasion de faire apparaître la démarche qui a guidé ce projet, démarche qu'il n'a pas toujours été possible de faire ressortir par l'agencement des différents chapitres.

- Etude des besoins présents et futurs en matière de maintenance routière, dans le domaine de la détection de fissuration. A. ch.1.
- Définition des caractéristiques d'un dispositif idéal permettant de répondre à ces besoins, avec l'accent sur la synergie des performances. A. ch. 1.
A. ch. 3.
- Evaluation des dispositifs existants sur la base des performances idéales. Aucun d'eux ne répond pleinement aux exigences formulées et n'atteint donc pas les buts finaux. A. ch. 1.
- Proposition d'un nouveau système, CREHOS, répondant à ces exigences. L'accent est mis sur l'*aspect système* du projet et sur la synergie entre les différents organes plutôt que sur le développement poussé des organes eux-mêmes. A. ch. 5.
A. ch. 2.
- Le projet a été placé dans un contexte européen par le biais d'un projet COST. A. ch. 2.
- Etude de l'évolution de l'information dans le système, à partir de la fissure physique jusqu'au niveaux d'utilisation les plus élevés. A. ch. 5.
A. ch. 6.
- Choix et dimensionnement du dispositif de balayage. B.
- Etude des propriétés optiques des revêtements routiers. Mise en évidence de la "signature" des fissures. C. ch. 14.
- Proposition d'une stratégie de détection mettant en évidence la "signature" des fissures. C. ch. 15.
- Proposition d'un nouveau type de collecteur implémentant la stratégie de détection, basé sur un hologramme multifacettes. L'application des hologrammes multifacettes à ce type de problème constitue également une innovation. C. ch. 16.
- Etude du pavage optimal (disposition des facettes) du collecteur multifacettes. C. § 16.3.
- Proposition d'une méthode euristique de recherche des fonctions de pavage. C. § 16.4.

- Proposition de divers exemples de pavage, avec des densités uniformes ou variables. C. § 16.5.
C. § 16.6.
- Construction d'un robot dédié à la réalisation du collecteur holographique multifacettes. Cette machine, bien qu'elle ne fasse pas appel à des techniques totalement nouvelles, est unique et partiellement innovatrice. D.
- Réalisation du collecteur holographique multifacettes proposé. Il est constitué de deux éléments de 100 x 600 mm. C. § 16.7.
- Conception d'une unité électronique simple pour la mise en forme du signal. C. ch. 18.
- Etude du traitement de l'information en temps réel. E. ch. 28.
- Proposition d'un algorithme de traitement en temps réel. E. ch. 29.
- Simulation des principes centraux de l'algorithme de traitement. E. ch. 30.
- Proposition d'un processeur parallèle ad hoc pour l'implémentation de cet algorithme. L'algorithme et son implémentation constituent un élément innovateur, aux applications variées. E. ch. 29.
E. ch. 31.
- Réalisation de prototypes d'unités électroniques implémentant l'algorithme. E. ch. 31
- Réalisation d'un premier prototype opérationnel de système complet, réunissant les trois organes principaux. F. ch. 33.
- Etude d'un système de positionnement combiné roue codée-GPS. E § 29.5.
- Proposition d'un format d'archivage des données. E § 29.6.
- Test du prototype en laboratoire et in situ, à basse vitesse. F. ch. 34.
F. ch. 35.



38. RECAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS

Les principaux résultats, pratiques, théoriques, locaux et globaux sont résumés dans la table ci-dessous, de manière "transversale" par rapport à la structure des chapitres.

- Les exigences idéales en matière de détection de fissuration sont définies. A. § 1.2.
- La Confédération a donné son accord à la participation active au projet COST 325 PAV-MON. A. § 2.2.
- Le robot pour l'enregistrement automatique d'hologrammes multifacettes analogiques donne entière satisfaction. D.
 Ce robot permet la réalisation rapide et à faible coût de différents types d'hologrammes multifacettes pour des applications diverses.
- Le bien-fondé du principe du collecteur holographique multifacettes est démontré. ce principe a fait l'objet d'un brevet. F. § 34.2.
- L'algorithme euristique de disposition des facettes pour le collecteur holographique donne de bons résultats. F. § 34.2.
- Deux collecteurs holographiques multifacettes de 100 x 600 mm ont été réalisés. Leurs performances sont conformes aux prévisions. C. § 16.7.
F. § 34.2.
- Le bien-fondé de l'algorithme de traitement de l'information en temps réel a été démontré. Cet algorithme répond à toutes les exigences souhaitées. E. § 30.8.
- L'algorithme de traitement a été partiellement implémenté sur des unités électroniques travaillant en parallèle, donnant de bons résultats sur les signaux simulés. Des problèmes locaux de synchronisation interviennent par contre avec les signaux réels. F. § 34.3.
- Les résultats des essais du prototype en laboratoire et in situ sont positifs: les fissures sont détectées (visibles sur l'oscilloscope). Les signaux provisoires ne sont pas suffisants pour synchroniser le dispositif de traitement. F. ch. 34.
F. ch. 35.
- Le bien-fondé du principe de fonctionnement de CREHOS est démontré. Des améliorations locales sont nécessaires, notamment au niveau de la synchronisation et du seuillage de SIG_{an} . F. ch. 36.

38.1. Remarques

La solution proposée est dimensionnée pour atteindre les performances résumées dans le tableau ci-dessous.

Paramètres mesurés	• position de la fissure (x et z) • longueur de la fissure • largeur de la fissure (en 8 catégories) • forme de la fissure (vectorisée)
Sensibilité	• réglable de 0.5 à 20 mm de largeur
Résolution spatiale	• de 1 à 2 mm dans le sens de marche • balayage latéral continu
Surface analysée	• 4 m x 200 km (1 S-Quest 80Mbites, suivant l'état du revêtement)
Vitesse du véhicule	• 40 km/h avec une résolution longitudinale de 1 mm • 80 km/h avec une résolution longitudinale de 2 mm
Analyse des données	• reconnaissance de la fissure en temps réel • compression de l'information en temps réel
Mémorisation des données	• PC, hard disk (80Mbytes)
Rapport de mesure	• disponible immédiatement après la mesure • représentation des données "à la carte"
Rendement global	• potentiellement 150'000 km/an (8 heures de mesure les jours ouvrables)

Remarquons que ce système répond potentiellement à toutes les caractéristiques du système idéal défini au début (voir §1.2., §4.1. et § 5.5.), à l'exception de la mesure de profondeur des fissures¹.

38.2. "By-products"

Plusieurs parties du projet CREHOS permettent de développer des applications en dehors de la détection des fissures. Ces applications sont décrites dans les sections respectives. Récapitulons-les.

¹ Il ne s'agit pas ici d'un artifice de présentation: les caractéristiques idéales ont été étudiées avant le développement de CREHOS et leur validité est générale. Bien entendu, CREHOS a été étudié de manière à répondre au mieux à ces exigences, mais leur pleine satisfaction n'était pas garantie a priori.

Le robot

Cette machine est sans doute la partie de CREHOS à vocation la plus générale. Elle permet de réaliser différents types d'hologrammes multifacettes, qui peuvent trouver des applications notamment dans les domaines suivants (voir sec D. ch.25):

- collecteurs spéciaux (autres que celui pour CREHOS);
- lumière structurée pour métrologie ou pour systèmes de vision;
- lentilles de grandes dimensions;
- séparateurs de faisceau multiples et recombinaisons (éléments de fan-in et de fan-out);
- hologrammes de caractérisation des procédés d'enregistrement;
- sécurité et cryptage;
- scanners arbitraires¹;
- connectique (recherche)¹;
- optical computing (recherche)¹.

Le collecteur multifacettes

Ce type de collecteur peut être utilisé dans les toutes applications de mesure cohérente sur des grandes surfaces de mauvaise qualité optique, notamment:

- ciment;
- béton;
- roche;
- métal non poli;
- carton;
- matières brutes.

La forme du collecteur peut être adaptée aux formes de la surface à analyser. De même, si la rugosité de la surface présente des orientations privilégiées, la fonction optique du collecteur peut y être adaptée.

Rappelons que le collecteur multifacettes a fait l'objet d'un brevet.

Traitement temps réel

Les applications de l'algorithme de traitement et de son implémentation parallèle peuvent être étendues à tous les problèmes nécessitant un suivi rapide d'impulsions appartenant à un contexte et superposées aléatoirement.

Ce type de problème se rencontre notamment dans les domaines suivants:

- techniques de suivi (radar ou autres) d'objets en mouvement indépendant;
- lecture de chaînes de mesure multicanal.

¹ Après extension de la version actuelle du robot.

39. AUTRES APPLICATIONS DE CREHOS

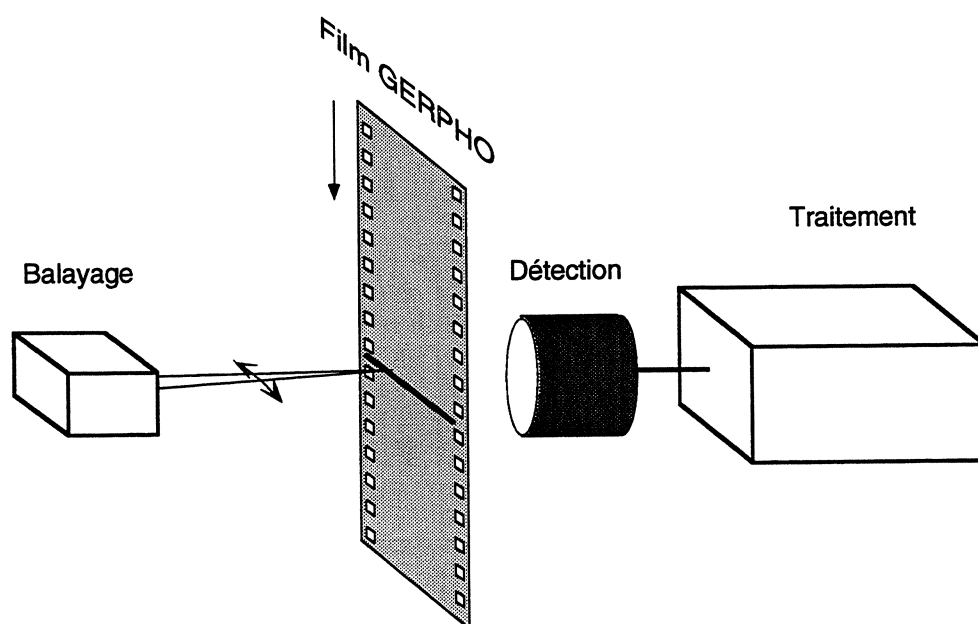
Le système CREHOS, développé principalement pour les revêtements routiers, peut également être appliqué à l'analyse de fissuration sur d'autres types de revêtement.

- CREHOS peut être engagé sans modifications sur des grandes surfaces planes en matériaux divers, notamment les pistes d'aérodrome.
- Des versions adaptées de CREHOS pourraient être développées pour l'analyse de fissuration dans les structures suivantes:
 - éléments de construction préfabriqués;
 - barrages;
 - parois de tunnel;
 - roche¹;
 - rails et traverses;
 - produits à fabrication linéaire à grand débit.

Traitement des films GERPHO

Une application intéressante d'une version simplifiée de CREHOS est l'analyse automatique des films produits avec le système GERPHO (voir § 1.3.).

Dans ce cas le collecteur n'est pas nécessaire, en raison des dimensions réduites de la surface du film à analyser et de sa bonne qualité optique. Le film serait analysé en transmission.



¹ L'efficacité de la méthode CREHOS sur la roche doit être validée par des essais ultérieurs.

40. DEVELOPPEMENTS FUTURS

40.1. Prototype 2

Pour la réalisation d'un deuxième prototype, apte à effectuer des campagnes de mesure d'étalonnage, les développements suivants sont nécessaires.

Balayage

- Développement et réalisation d'un dispositif optique générant le signal EXTCK (600 impulsions par balayage) nécessaire à la synchronisation du système de traitement (voir B. ch. 11. et F. § 34.3.).

Pré-traitement

- Développement et réalisation d'une unité seuillage automatique dans le dispositif de pré-traitement (voir C. ch. 18. et F. § 34.2.).
- Développement et réalisation d'un dispositif électronique gérant de manière automatique le gain d'amplification des photomultiplicateurs.

Traitement

- Mise au point des suiveurs définitifs, incluant l'analyse complète et réalisation en plusieurs exemplaires (au moins une dizaine).

Remorque

- Une structure homologuée pour la circulation doit être conçue et réalisée.

40.2. Système définitif

Par rapport au futur prototype 2, le passage à un système définitif de plusieurs mètres de largeur et adapté à une exploitation commerciale est plus laborieux et demande un investissement conséquent.

Le dispositif de traitement du prototype ne nécessitera pas de développements ultérieurs. De même, le dispositif de balayage ne devra pas faire l'objet d'adaptations particulières.

Le dispositif de détection, par contre, devra être adapté aux nouvelles dimensions. La réalisation d'un nouveau collecteur holographique multifacettes de plus grandes dimensions rendrait nécessaires des extensions du robot.

Une solution alternative consisterait en la mise en parallèle de plusieurs dispositifs de détection de taille limitée, qui seraient obtenus simplement en dupliquant le dispositif du prototype 2.

Les problèmes inhérents à l'environnement de travail du système doivent également être étudiés, notamment les problèmes de poussière, de vibrations, d'entretien. Il serait également opportun de développer un dispositif de pré-nettoyage du revêtement (brosses ou air comprimé), qui améliore la visibilité des fissures.

Précisons que, en principe, la réalisation d'un tel système et a fortiori son exploitation commerciale n'incombent pas à un organisme public tel que l'EPFL.

41. DIFFUSION

41.1. Publications

Brevet et publications

Divers laboratoires dans le monde, publics ou privés, travaillent sur les dispositifs de détection de fissures. La publication des résultats dans les revues spécialisées n'est pas toujours compatible avec les règles de la concurrence, et complique les procédures d'obtention de brevets.

Pour ces raisons, ce projet n'a fait l'objet d'aucune publication détaillée pendant son développement, à l'exception du robot, dont la vocation est plus générale.

La nécessité de protéger CREHOS par des brevets a été actuellement reconsidérée, rendant possible la diffusion de cette thèse dans le domaine public. Des articles seront publiés dans des revues spécialisées en optique et en génie civil après la publication de cette thèse.

Publications

- | | |
|-----------|---|
| 6.1992 | Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL). " <i>Automatic crack detection on road pavements : CREHOS project.</i> ". |
| 1.1993 | Dépôt de brevet sur le collecteur holographique multifacettes. |
| 7.1993 | Proceedings IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging: Science & Technology. San José, California USA. Conférence 1914, Practical Holography VII : Imaging and Materials. " <i>A robot for recording analog multifacet holograms</i> ". |
| 1990-1993 | Rapports annuels à l'attention de l'Office Fédéral des Routes (OFR) |

Présentations

- | | |
|--------|---|
| 4.1990 | Symposium "Maintenance of civil engineering infrastructure", EPFL, Lausanne. " <i>Holographic scanner for pavement crack detection</i> ". |
| 9.1991 | RAO/TOA 91, ETH Zürich. Poster " <i>Holography with PM fibers : a phase stabilized system</i> " (avec P. Jacquot et M. Barillot). |

- 9.1992 Forum of European highway Research Laboratories (FEHRL), SERRP. Paris, LCPC. Préparation projet COST 325 PAV-MON "Nouveaux moyens et méthodes pour l'auscultation des revêtements routiers".
- 10.1992 RAO/TOA 92, UNI GE. Poster "A robot for recording multifacet holograms".
- 11. 1992 Sous-comité technique du projet européen COST 325 PAV-MON. Bruxelles.
- 2.1993 IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging. San José, California USA. "A robot for recording analog multifacet holograms".
- 2.1993 Sous-comité technique du projet européen COST 325 PAV-MON. Bruxelles.
- 6.1993 Organisation de la réunion du sous-comité technique du projet européen COST 325 PAV-MON. Lausanne EPFL.
- 4.1994 Séminaire Mobil Oil, Regensdorf ZH (sur invitation). "Automatic crack detection on road pavements : CREHOS project."

Des présentations plus informelles de ce projet ont été sollicitées à plusieurs reprises, notamment dans le cadre des contacts européens et par de nombreuses personnalités en visite à l'IMAC, visites souvent ciblées sur CREHOS.

41.2. Promotion

Ce projet a fait l'objet d'un article de divulgation, qui figure en annexe. Il a été écrit en 1994 par le journaliste P.-A. Magnin de CEDOS, et a connu une distribution très vaste, en Suisse et à l'étranger¹, dans des journaux ou des revues. Parmi celles-ci, retenons en particulier la revue française Science & Vie et son homologue italienne Scienza & Vita, qui comptent plus de cinq millions de lecteurs².

Ce projet a également fait l'objet de brèves présentations à la radio d'information France Info (6 interventions de 40 secondes) ainsi qu'à la Radio de la Suisse Romande (1 min 30).

Bien que cet article et ces émissions ne soient pas de niveau scientifique, leur contenu a été de nature à éveiller l'intérêt de nombreux organismes tant publics que privés, parmi lesquels se trouvent notamment la SNCF et la RATP françaises, et deux bureaux privés de maintenance routière français.

Les contacts avec ces entreprises se poursuivent actuellement.

¹ L' article, dont l'original est en français, a été traduit en allemand (par CEDOS) et en italien (par Scienza & Vita).

² Citons également la Revue Automobile, Baukader, Le Nouvelliste, Flash (EPFL), ainsi que divers quotidiens romands. Cette liste n'est pas complète, car nous ne sommes pas directement informés des parutions.

41.3. Film

Afin de pouvoir répondre aux nombreuses sollicitations par des présentations aussi claires que succinctes, j'ai réalisé une brève animation de synthèse.

Ce film, d'une durée de 3 ' 40", illustre les principes de CREHOS ainsi que ses performances. Il a été enregistré sur un support vidéo et sonorisé en quatre langues (E, F, D et I) avec la collaboration de M. Moser du service audiovisuel de l'Ecole (SAVE).

42. COMMENTAIRES FINAUX

Détecter les fissures de façon efficace n'est pas un problème facile, et il est exclu de le résoudre par le biais d'un dispositif simple et peu coûteux. Un système de détection efficace et performant doit répondre à de nombreuses exigences: si elles ne sont pas considérées dans leur ensemble et dans leur interdépendance, le résultat ne pourra en aucun cas être exploité de manière fructueuse. Il est donc inutile d'investir dans le développement de systèmes ne satisfaisant que partiellement aux nécessités de la maintenance routière moderne.

A la lecture de cette thèse, CREHOS peut apparaître comme un système complexe. Il est vrai que son développement l'a été, mais le dispositif final est en réalité très simple.

La remorque comporte très peu d'éléments : un laser, un miroir tournant, deux hologrammes et deux détecteurs (plus deux lentilles et deux miroirs de renvoi). Dans le véhicule, tout le traitement, y compris le dispositif de pré-traitement et le PC, peut tenir dans un rack de dimensions modestes¹. Les seules alimentations indispensables sont celles du laser, du miroir tournant et des PM. Le tout se résume donc en une remorque "presque vide" et en un rack de contrôle.

Par ailleurs, je tiens à souligner un point qui n'apparaît pas explicitement dans la présentation de ce travail: l'aspect de gageure, relevée et accomplie, de ce projet, notamment en ce qui concerne le collecteur multifacettes. Son fonctionnement n'a en effet pu être vérifié qu'après un travail de plusieurs années, le temps nécessaire à la mise au point du robot.

En plaçant ce travail dans un contexte plus général, j'aimerais finalement observer que CREHOS se situe en dehors d'une tendance répandue, qui vise des recherches ou des développements très poussés, mais confinés à des domaines de plus en plus spécifiques et disjoints. De tels travaux sont de valeur et d'utilité certaines. Mais au même titre, il est à mon avis nécessaire que les projets qui tendent à une intégration cohérente de différents domaines connaissent un plus grand essor. Je souhaite que ce projet puisse y contribuer.

¹ Les dimensions du rack de traitement peuvent être davantage réduites par l'implémentation des suiveurs sur ASIC.

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier vivement les personnes et les institutions qui sont à l'origine de ce projet:

Prof. Léopold Pflug EPFL IMAC	pour m'avoir proposé ce sujet et pour m'avoir soutenu et encouragé pendant tout le projet;
Dr. Pierre Jacquot EPFL IMAC	pour les précieux conseils et les nombreuses discussions, pour son aide et pour son soutien constants;
Direction de l'EPFL	pour son encouragement à l'application des techniques de pointe aux besoins de la pratique;
OFR (Office Fédéral des Routes)	pour avoir contribué au financement de ce projet;
IOFES (Office Fédéral de l'Education de la Science)	pour son appui dans la participation au programme COST.

Dans le développement du projet, de nombreuses discussions informelles m'ont permis de bénéficier de précieux conseils, d'aide ou de soutien. Je souhaite adresser mes sincères remerciements à:

Prof. R. Clavel EPFL DMT	pour sa disponibilité pour ses conseils dans la conception du robot et pour l'encadrement des travaux de semestre et de diplôme;
Prof. R. Dändliker IMT UNI NE	pour son précieux concours dans l'évaluation de ce travail;
Prof. Declercq EPFL DE-LEG	pour sa disponibilité de collaboration en matière de ASICs, et pour l'encadrement des projets de semestre;
Prof. Dumont EPFL LAVOC	pour son appui et sa collaboration dans le cadre de l'action COST;
Prof. J.-M. Fournier Rowland Institute for Science, Boston USA	pour les conseils en holographie, les discussions et son appui tant à l'EPFL qu'aux Etats-Unis;
Prof. M. Kunt EPFL DE-LTS	et les membres de son Institut, pour l'ouverture à la discussion et la disponibilité;

REMERCIEMENTS

Prof. H. Tiziani Institut für technische Optik Stuttgart	apprécié pour son concours dans l'évaluation de ce travail;
Prof. J. Jütz NTB Buchs (SG)	pour sa disponibilité, sa collaboration et pour l'encadrement d'un projet de diplôme;
l'Institut de Microtechnique de l'EPFL	pour le prêt du matériel pour les premiers tests de faisabilité.

J'adresse aussi mes remerciements sincères à tous mes collègues de l'IMAC, qui m'ont permis d'effectuer ce projet dans une ambiance sympathique et toujours ouverte au dialogue et à la discussion, et en particulier à:

Ing. M. Barillot EPFL IMAC	pour les fructueuses discussions et les suggestions au sujet de l'hologramme multifacettes;
Ing. X. Colonna de Lega EPFL IMAC	pour les nombreuses discussions, ses suggestions et son aide;
Ing. S. Vurpillot EPFL IMAC	pour son aide en matière de génie civil.

Cinq étudiants ont apporté leur contribution à ce projet, par des très bons travaux de semestre ou de diplôme, qui ont été d'une grande utilité. Je tiens à remercier

G. Perregaux étudiant en microtechnique	pour la réalisation de la partie mécanique du robot;
B. Gros étudiant en microtechnique	pour la réalisation du premier prototype de système de traitement;
D. Graber étudiant NTB Buchs	pour la réalisation de l'HOE produisant l'onde objet dans le robot;
K. Berrah assistant-étudiant	pour la conception et la réalisation de la carte d'interface pour le robot;
A. Wagner assistant-étudiant	pour le développement des logiciels de commande du robot.

La réalisation de ce projet n'aurait pas été possible sans le concours des personnes suivantes, que je remercie chaleureusement:

R. Délez IMAC	pour les innombrables réalisations mécaniques qu'à nécessité ce projet, pour les discussions et les irremplaçables conseils mécaniques, et pour son aide précieuse;
------------------	---

A. Duperret F. Gilliard	pour avoir secondé M. Délez dans les réalisations mécaniques;
----------------------------	---

Ing. Ch. Gilliard IMAC	pour les réalisations électroniques, les conseils et l'encadrement de différents projets;
---------------------------	---

Ing. A. Micsiz	pour la réalisation du système de traitement et pour son apport dans l'algorithme de suivi.
----------------	---

Enfin, j'adresse deux chaleureux remerciements à

A. Herzog photographe	pour les magnifiques photographies, de réalisation souvent difficile, qui ont permis de diffuser des images de CREHOS d'une grande qualité;
--------------------------	---

M. Moser Service Audiovisuel	pour sa contribution à la réalisation du film de présentation, pour son amabilité et sa disponibilité;
---------------------------------	--

M. Buff Atelier de reprographie	pour ses conseils, sa gentillesse et sa disponibilité.
------------------------------------	--

REMERCIEMENTS

BIBLIOGRAPHIE

G. F. Marshal, "Laser beam scanning", M. Dekker Inc., 1985.

P. Beckmann, A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", Pergamon Press Ltd. , 1963.

F. G. Bass and I. M. Fuks, "Wave scattering from statistically rough surfaces", Pergamon Press Ltd., 1979,

J. A. Ogilvy, "Wave scattering from random rough surfaces", Adam Hilger Ltd., 1991.

S. K. Case, P. R. Haugen and O. J. Lokberg, "Multifacet holographic optical elements for wave front transformations", *Applied Optics* v. 20 n. 15, 1 august 1981.

S. K. Case and H. Bartelt, "Coordinate transformations via multifacet holographic optical elements", *Optical Engineering* v. 22 n. 4, July-august 1983.

S. K. Case, P. R. Haugen and H. Bartelt, "Image formation by multifacet holograms", *Applied Optics* v. 22 n. 18, September 1983.

S. K. Case, H. J. Schock and L. Konicek, "Window aberration correction in laser velocimetry using multifaceted holographic optical elements", *Applied Optics* v. 23 n. 5, 5 march 1984.

S. K. Case and L. Konicek, "Information encoding systems employing multifaceted volume holograms", *Optics Communications* v. 49 n. 6, 15 April 1984.

S. K. Case, P. R. Haugen, H. Bartelt and L. Konicek, "Multifacet holographic optical elements", Laser Institute of America, Toledo, OH, 1984.

Bartelt and F. Sauer, "Space-invariant filtering with holographic multifacet elements", *Optics Communications* v. 53 n. 5, 1 April 1985.

"M. C. Escher, l'oeuvre graphique", Taco Verlagsgesellschaft und Agentur m.b.H., 1989.

M. Monti, "Automatic crack detection on road pavements : CREHOS project.", Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL), juin 1992.

M. Monti, "A robot for recording analog multifacet holograms", Proceedings IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging: Science & Technology . San José, California USA, 1993.

Rapports internes

Ing. A. Micsiz, "Conception et réalisation d'un système logique modulaire pour la reconnaissance en temps réel de trains d'impulsions binaires représentant des fissures", mandat IMAC, mars 1994.

B. Gros, "Conception et réalisation d'un système logique modulaire pour la reconnaissance en temps réel de trains d'impulsions binaires représentant des fissures", projet de semestre IMT-IMAC, juin 1990.

A. Wagner, "Réalisation du programme de contrôle pour un automate dédié à l'enregistrement d'hogrammes multifacettes", projet de semestre DE- IMAC, juin 1991.

G. Perregaux, "Conception d'un automate pour la réalisation d'hogrammes multifacettes", projet de diplôme IMT- IMAC, décembre 1989.

G. Perregaux, "Conception d'un automate pour la réalisation d'hogrammes multifacettes", projet de semestre IMT- IMAC, juillet 1989.

M. Monti, rapports annuels "CREHOS" à l'intention de l'Office Fédéral des Routes.

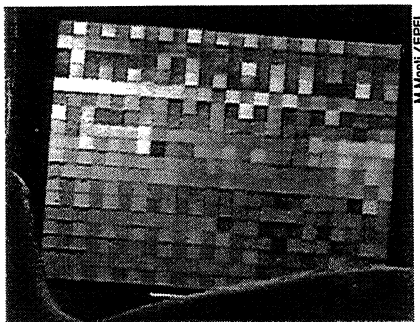
ANNEXES

- Extrait de Science & Vie, mars 1994
(article de P.-A. Magnin, CEDOS).
- Exemple de rapport de relevé visuel (canton VD).

INGÉNIERIE

Un "œil de mouche" détecte les fissures des routes

Les fissures sur les routes sont comme les maladies : plus tôt on les détecte, plus il est facile d'y remédier. Et moins la réparation coûte cher. Mettre au point une technique de surveillance rapide des chaussées, c'était le défi lancé par l'Office suisse fédéral des routes. Max Monti, de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), l'a relevé. L'ingénieur est même allé très loin : il a conçu



Un collecteur holographique, qui utilise la réflexion d'un rayon laser sur une route, permet de détecter des fissures d'un millimètre de large.

un scanner qui, embarqué dans un véhicule roulant à 120 km/h, détecte sur l'asphalte des fissures d'à peine un millimètre de large.

Dans le nouveau système, une voie entière de circulation, soit quatre mètres de largeur, est scannée par un laser, et chaque millimètre carré de bitume est numérisé. Le fin faisceau du laser, dévié en direction de la chaussée par un miroir tournant, balaie la route de gauche à droite à une vitesse de 172 000 km/h !

La lumière du laser est réfléchiée par le bitume, vers un collecteur holographique complexe jouant le rôle d'un "œil de mouche", puis elle est expédiée sur plusieurs cellules photo-électriques.

Les informations sont ensuite transmises à un groupe d'ordinateurs travaillant en parallèle. Lorsqu'une fissure se présente, la lumière laser disparaît en profondeur : aucun signal lumineux n'est plus perçu. Un des ordinateurs va alors prendre en charge la fissure jusqu'au bout, laissant aux autres le soin de s'occuper des prochaines fissures rencontrées.

Dès la fin du parcours, le bilan est terminé et les informations utiles stockées sur un support informatique : on peut voir la forme des fissures, constater leur nombre et retrouver très rapidement leurs positions sur le trajet.

Cette "camionnette-laser" n'existe pas encore, mais tous les éléments importants ont déjà été fabriqués. On a scanné en laboratoire des morceaux de route. La réalisation d'une camionnette opérationnelle, munie de ses propres générateurs d'électricité, dépend maintenant des commandes : un seul véhicule suffirait à un pays comme la Suisse, puisqu'il est capable de surveiller chaque année un réseau routier de 150 000 km. De même, il pourrait prendre en charge des pistes d'aéroport ou les parois d'un tunnel.

Simple dans son principe, l'instrument d'inspection de Max Monti constitue pourtant un véritable bouleversement technologique tant les méthodes actuelles sont rudimentaires. La plus perfectionnée consiste à monter une (ou plusieurs) caméra sur un véhicule, puis à filmer la chaussée en avançant. Ensuite, on développe les films... Et il ne reste plus qu'à regarder à l'œil nu.

La principale difficulté à laquelle l'ingénieur a dû faire face consiste à collecter la lumière du laser réfléchiée par la route. Car rien n'est moins coopératif que l'as-

phalte. Il est sombre et granuleux : la lumière laser est réfléchiée dans tous les sens possibles ; comment la ramener dans les cellules photo-électriques ?

Pour résoudre le problème, le chercheur a mis au point un collecteur holographique de lumière, le fameux œil de mouche que nous évoquons plus haut.

L'élément de base (il en faut vingt-quatre pour traiter quatre mètres de chaussée) est une plaque de verre grande comme une tablette de chocolat, sur laquelle se trouvent 2 000 petits hologrammes rangés comme sur une feuille de timbres-poste. A la différence que... tous les hologrammes sont différents ! Ainsi, il s'en trouve toujours quelques-uns qui sont capables de renvoyer sur une cellule photo-électrique la lumière laser réfléchiée par la route.

Pour réaliser son œil de mouche, l'ingénieur a créé un robot unique au monde, dont les bras déterminent automatiquement l'orientation des faisceaux laser pour fabriquer les hologrammes à la chaîne.

Conçu pour un matériau aussi difficile à scanner que les revêtements routiers, Creho - c'est le nom du système - pourrait s'adapter à n'importe quel autre matériau qui défile à grande vitesse : il pourrait lire, par exemple, un journal sur une rotative d'imprimerie.

imac

Voie : Page :/.....

Suite au verso :

CURRICULUM VITAE

Nom : **MONTI**
Prénom : **Massimo**

Né le : 19 janvier 1962
Origine : Lugano (TI)
Nationalité : Suisse
Langues : I, F, E, D

Formation

Ecole primaire et secondaire communales à Lugano (TI).
1981 Maturité type C (scientifique), Liceo Cantonale di Lugano.
1987 Diplôme en Electronique Physique, Université de Neuchâtel.

Activités professionnelles

1988-1994 Assistant scientifique au Laboratoire de Mesure et Analyse des Contraintes de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL DGC-IMAC).

- Responsable projet CREHOS.
- Responsable des travaux pratiques de 8ème semestre en microtechnique.
 - Photographie speckle.
 - Interférométrie holographique.
 - Eléments optiques holographiques.
- Encadrement de divers projets de semestre et de diplôme:
 - "Conception d'un automate pour la réalisation d'hologrammes multifacettes".
 - "Réalisation d'un automate pour l'enregistrement d'hologrammes multifacettes".
 - "Conception et réalisation d'un système logique modulaire pour la reconnaissance en temps réel de trains d'impulsions binaires".
 - "Conception et réalisation d'une carte d'interface et des routines de commande pour un automate destiné à l'enregistrement d'hologrammes multifacettes".
 - "Développement d'un HOE pour un automate destiné à l'enregistrement d'hologrammes multifacettes".
 - "Conception et réalisation d'un programme de commande pour un automate destiné à l'enregistrement d'hologrammes multifacettes".

1992-1994 Délégué suisse pour le projet européen COST 325 PAV-MON.

Publications

M. Monti, "Speckle photography applied to the detailed study of the mechanical behaviour of granular media", dans "Powders and Grains", edited by J. Biarez & R. Gourvès; Balkema, Rotterdam 1989.

M. Monti, "Automatic crack detection on road pavements : CREHOS project.", Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL), juin 1992.

M. Monti, "A robot for recording analog multifacet holograms", Proceedings IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging : Science & Technology. San José, California USA, 1993.

Dépôt de brevet sur collecteur holographique multifacettes, janvier 1993.

Publication de l'article de divulgation "Scanner la route à 120 km/h", de P.-A. Magnin (CEDOS) dans diverses journaux et revues (CH, F, I, D), dont Science & Vie (F), mars 1994, et Scienza & Vita (I), avril 1994.

Conférences

"Speckle photography applied to the detailed study of the mechanical behaviour of granular media". International conference on micromechanics of granular media, Clermont-Ferrand (F), 4-8 sept. 1989

Symposium *Maintenance of civil engineering infrastructure*, "Holographic scanner for pavement crack detection", EPFL GC, Lausanne, 2-3 avril 1990.

Invitation du Prof. Di Chirico, Université de Cagliari (I), "Fotografia speckle e interferometria holografica : due esempi d'applicazione", 27 avril 1990.

IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging. San José, California USA. "A robot for recording analog multifacet holograms", février 1992.

Forum of European highway Research Laboratories (FEHRL), SERRP. Paris, LCPC. Préparation projet COST 325 PAV-MON "Nouveaux moyens et méthodes pour l'auscultation des revêtements routiers", septembre 1992.

Séminaire Mobil Oil, Regensdorf ZH (invitation). "Automatic crack detection on road pavements : CREHOS project.", avril 1994.

Divers

Organisation de la 8ème Réunion des Assistants en Optique RAO/TOA 90, 25 sept. '90.

Edition de l' *Annuaire Suisse des Assistants en Optique 1990*.

Réunion du Sous-comité technique du projet européen COST 325 PAV-MON. Bruxelles, novembre 1992 et février 1993.

Organisation de la réunion du Sous-comité technique du projet européen COST 325 PAV-MON. Lausanne EPFL, juin 1993.

Réalisation du film d'animation de synthèse "CREHOS", 3'40", mars 1994.