



**HAL**  
open science

# Architecture et traitements d'images temps réel appliqués à l'étude des écoulements

Jacques Jay

► **To cite this version:**

Jacques Jay. Architecture et traitements d'images temps réel appliqués à l'étude des écoulements. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2005. tel-00225400

**HAL Id: tel-00225400**

**<https://theses.hal.science/tel-00225400>**

Submitted on 30 Jan 2008

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

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

**Université Jean Monnet  
Saint Etienne**

**HABILITATION  
à DIRIGER des RECHERCHES**



Titre :

**Architecture et Traitement d'images temps réel  
appliqués à l'étude des écoulements**

Présenté par :

**Jacques JAY**

Docteur de l'université Jean Monnet  
Maître de Conférences à l'université Jean Monnet

**Soutenu le 29 novembre 2005**

Devant le jury :

<b>Pr. Gérard Touchard</b>	Université de Poitiers	Rapporteur
<b>Pr. Jean Pierre Chante</b>	INSA de Lyon	Rapporteur
<b>Pr. Gérard Noyel</b>	Université Jean Monnet	Rapporteur
<b>Pr. Michel Paindavoine</b>	Université de Bourgogne	
<b>Pr. Robert Fouquet</b>	Université Jean Monnet	
<b>Pr. Jean Paul Schon</b>	Université Jean Monnet	

## REMERCIEMENTS

*Une page n'y suffira pas,  
Il y a trop de personnes à remercier.  
Tout au long de ces années,  
Vous que j'ai côtoyé,  
Vous qui m'avez aidé,  
Je ne vous oublierai pas.*

Que serait notre université, sans vous, que l'on nomme IATOS ?  
Ma première pensée est pour vous.

Lorsque **Gérard Touchard** a pris une charge de travail supplémentaire en acceptant de rapporter sur ce travail, j'étais très heureux. En effet, nous sommes l'un et l'autre à l'interface entre deux disciplines : les systèmes électroniques et la mécanique des fluides, je lui exprime ma gratitude.

Déjà membre de mon jury de thèse, **Jean Pierre Chante**, a de nouveau répondu présent pour examiner ce dossier, malgré une charge de travail déjà très lourde, je lui en suis très reconnaissant.

Etant son assistant de TP depuis 15 ans, j'ai beaucoup appris à son contact. **Gérard Noyel** a accepté de juger ce travail, j'en suis fier, il a toujours été un modèle pour moi.

**Michel Paindavoine** a pu se libérer malgré un emploi du temps chargé pour être membre du jury, j'en suis heureux car il a toujours été pour moi un modèle et une référence. Merci.

**Robert Fouquet** a été mon directeur de thèse (avec Robert Rougny), nous avons travaillé quotidiennement ensemble pendant des années. Les mots écrits ne seront jamais assez forts pour décrire mon admiration et ma reconnaissance, je lui dois beaucoup.

Quelle serait ma vie de chercheur s'il n'y avait pas eu **Jean Paul Schon** ?  
Tout au long de ces nombreuses journées à faire 'tourner' des 'manips', il a su me transmettre son enthousiasme pour la recherche expérimentale. Là aussi, les mots me manquent pour lui exprimer mon admiration et ma reconnaissance, je lui dois tant.

Je tiens à remercier également **Pierre Laporte**, directeur du LTSI, pour son soutien et l'intérêt qu'il a porté à mes activités.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon ami **Michel Courbon**, collègue de la première heure, en particulier pour son soutien dans les moments difficiles.

Quelle aurait été ma vie d'enseignant s'il n'y avait pas eu **Ebi Tafazzoli** ?  
Combien d'heures de TP avons nous passé ensemble ? Je n'ose pas compter. Il a su me guider et me conseiller tout au long de ces années. Je suis très fier d'avoir été à ses côtés lorsqu'il a été chef du département GEII. Merci mille fois.

**Isabelle Deslandes** par son travail discret nous a apporté un soutien sans faille, je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.

Sans **Dany Malosse**, il n'y aurait pas de licence professionnelle LR2i, elle a su m'apporter la rigueur qui me manquait dans les tâches administratives, je souhaite lui exprimer toute ma gratitude.

Je tiens à remercier **Christophe Ducottet** pour le travail qu'il fournit en tant que responsable de l'équipe IMAGE au LTSI et pour la confiance qu'il m'accorde.

Ma reconnaissance va aussi à **Habib Ben Aissia** et à tous ses collègues de Monastir (Yassine, Nabila, Taoufik, Hanene, ...) sans qui cette belle aventure qu'est la collaboration entre nos deux laboratoires n'existerait pas.

Je voudrais également remercier **Christian Pagès**, son aide, son soutien et ses conseils m'ont été précieux.

Merci à tous mes collègues du groupe 'archi', de l'équipe 'IMAGE' et du labo TSI.

Merci à tous mes collègues du département GEII et de l'IUT.

Merci aux collègues du laboratoire d'électricité de l'ENISE.

Pour terminer, je voudrais exprimer ma joie et mon bonheur de vivre à côté d'eux, je veux parler de mon épouse Claire et de mes enfants Emmanuel, Mathilde et Amandine.

# Plan du dossier

<b>1. Curriculum Vitae</b>	page 4
<b>2. Contexte et évolution de l'activité de recherche</b>	page 4
<b>3. Synthèse des travaux de recherche</b>	page 6
<b>3.1. Introduction</b>	page 7
<b>3.2. Instrumentation médicale</b>	page 9
3.2.1. Introduction	page 9
3.2.2. Banc de stimulation hydrodynamique pour l'étude du vieillissement accéléré de prothèses artérielles	page 10
3.2.3. Analyse ambulatoire de la marche chez l'artériopathe	page 13
<b>3.3. Systèmes de mesure par traitements d'images</b>	page 16
<b>3.3.1. Applications à l'étude des écoulements</b>	
<b>3.3.1.1. Introduction et contexte</b>	page 17
<b>3.3.1.2. Systèmes mono et multi caméras</b>	page 20
3.3.1.2.1. Plateforme à 5 i/s	page 20
3.3.1.2.2. Plateforme à 100 i/s	page 23
3.3.1.2.3. Plateforme bi-caméras	page 28
<b>3.3.1.3. Types d'écoulements étudiés</b>	page 31
3.3.1.3.1. Mesure de champs de vitesse d'un jet d'air rond	page 31
3.3.1.3.2. PIV et calculs de vitesse sur jet libre	page 35
3.3.1.3.3. Suivi spatio temporel des instabilités de KH	page 43
3.3.1.3.4. Charriage des boues torrentielles	page 50
3.3.1.3.5. Optimisation temps réel des paramètres de mesures en PIV	page 56
<b>3.3.2. Applications à la biométrie : Authentification de visage</b>	page 64
<b>3.4. Participation à des opérations de recherche multidisciplinaires</b>	
<b>3.4.1. Système de mesure de déplacement haute résolution</b>	page 70
<b>3.4.2. Système de mesure de température</b>	
3.4.2.1. Flux de chaleur en usinage par thermographie IR	page 75
3.4.2.2. Champs de température 3D par des méthodes optiques	page 78
<b>4. Autres aspects du métier d'enseignant-chercheur</b>	
4.1. Activités d'enseignement	page 82
4.2. Activités administratives et collectives	page 86
4.3. Contrats de recherche et transfert de technologie	page 89
<b>5. Conclusions, Perspectives</b>	page 91
<b>6. Annexes</b>	
6.1. Chronologie des opérations de recherche	page 97
6.2. Listes des travaux	page 98
6.3. Diplômes encadrés	page 103
6.4. Programmes financés	page 107
6.5. Coopérations scientifiques	page 109

## 7. Curriculum Vitae

Nom, prénom : **JAY Jacques**

marié, 3 enfants (12ans , 8 ans et 8 ans)

42 ans (né le 29/07/1963)

Adresse personnelle : Le Mont Morin, 42290 Sorbiers

Situation actuelle : **Maître de Conférences**, Section du CNU : 63<sup>e</sup>

Etablissement d'affectation : **Université Jean MONNET** (St Etienne –42)



Unité d'enseignement : **Institut Universitaire de Technologie** - Département G.E.I.I.

19, av Léon Jouhaux 42023 St Etienne cedex2

tel : 04 77 46 34 01



Unité de recherche :

**Laboratoire T.S.I. (UMR CNRS 5516)**

(traitement du signal et instrumentation : Equipe I.M.A.Ge)

18, rue Benoit Lauras 42000 St Etienne 04 77 91 57 94

[jay@univ-st-etienne.fr](mailto:jay@univ-st-etienne.fr)

### Postes successifs :

Assistant associé en 1987-88 et 1988-89, ATER en 1989-90, Maître de Conférences depuis octobre 1990.

### Diplômes :

- **Doctorat** de l'université Jean Monnet (St Étienne) : Thèse soutenue le 10 janvier 1990

Titre : "Système de télémessure de paramètres physiologiques chez l'homme. Application à la mesure de la température interne." Directeur : M. le Professeur R. ROUGNY (mention TH)

- **D.E.A.** : "Dispositifs de l'électronique intégrée" (Université Jean Monnet – 1987) (mention AB)

- **Maîtrise des Sciences et Techniques** : "Techniques Physiques et Instrumentation"

(Université Jean Monnet - 1986) (mention B)

- **D.U.T.** Génie Électrique et Informatique Industrielle (Université Jean Monnet – 1984) (classement 10<sup>e</sup>/120)

### Enseignement :

Programmation (C, C++, RAD, assembleur hc11 et C167), Electronique numérique (VHDL),

Electrotechnique, instrumentation à distance, CAO

### Thèmes de recherche :

Equipe IMAGE (Images, Modélisation, Architectures, Géométrie)

Groupe : Architectures pour la mesure et l'échange de données

Systèmes embarqués de traitement d'images

Application à l'étude des écoulements et la biométrie.

Propositions d'architectures logicielles et matérielles dédiées pour le traitement d'image

Implantation d'algorithmes sur FPGA, Acquisition et traitement d'images temps réel

Applications :

Etude des écoulements : Champs de vecteurs vitesses par PIV

Evolutions spatio-temporelles des instabilités de Kelvin-Helmholtz.

Authentification de visage

### Responsabilités administratives :

- Animateur du groupe de recherche : Architectures pour la mesure et l'échange de données depuis 2004  
(1 Pr, 1 Pr inv., 4 MC et 1 Ige)

- Responsable pédagogique d'une licence professionnelle par alternance en automatisme et informatique industrielle (LR2i) depuis sa création en 1999.

- Adjoint au chef de département GEII à l'IUT de 1996 à 2002



## 2. Contexte et évolution de l'activité de recherche

Ce dossier est organisé en une synthèse de toutes les activités de recherche que j'ai eu l'opportunité de mener. Cette synthèse est développée au paragraphe 3. Le paragraphe 4 permettra un résumé des autres aspects du métier d'enseignant-chercheur : l'activité d'enseignement, les tâches collectives et administratives et les relations avec le tissu industriel local.

Dans ce chapitre, un cadre général de mes activités de recherche sera donné dans un premier paragraphe, puis un résumé permettra de montrer l'évolution de ces activités.

### Contexte de l'activité de recherche

Les progrès des technologies de la microélectronique ont révolutionné, et continuent de le faire, le monde de la micro-informatique et des systèmes électroniques. Notamment, le domaine de l'instrumentation dans lequel s'inscrit globalement mon activité de recherche, a fait l'objet de fortes mutations.

C'est dans ce secteur de l'instrumentation que le groupe 'Electronique' du laboratoire TSI, (Traitement du Signal et Instrumentation) de l'université Jean Monnet à St Etienne a centré, dès l'origine, sa thématique de recherche.

J'ai eu l'opportunité de vivre l'évolution de ce groupe 'Electronique' composé alors de trois personnes (Robert Rougny, Robert Fouquet, Joseph Danière), et ce depuis 1987 date du début de mes travaux de thèse en génie biologique et médical. Ce groupe est devenu aujourd'hui une équipe de 13 chercheurs et enseignants-chercheurs permanents avec la dénomination 'IMAGE' (Image, Modélisation, Architecture et Géométrie).

Ces modifications thématiques ont suivi l'évolution du laboratoire TSI qui au fil des années s'est structuré autour de l'optique et de l'image. Cette politique a d'ailleurs conduit à la création d'un pôle de compétences reconnu : le Pôle Optique Rhône-Alpes (PORA) en 1998.

### Evolution de l'activité de recherche

Au début de mes travaux de thèse, le LTSI comprenait trois équipes : « Optique », « Image » et « Electronique ». Le thème de recherche de l'équipe « Electronique » concernait la mise au point de nouveaux outils de mesure ambulatoire de paramètres physiologiques pour le domaine médical. Cette activité était reconnue sous le terme GBM (Génie Biologique et Médical) ou « instrumentation médicale ».

Une part importante de mon activité s'est déroulée dans cette thématique et une partie de ce document (§ 3.2.) décrit les projets auxquels j'ai participé et qui ont été développés durant cette période allant de 1990 à 1995.

Progressivement, la thématique de recherche du groupe s'est orientée vers le domaine de la mesure par le traitement d'images et plus particulièrement vers de nouvelles **méthodes optiques pour la visualisation et la mesure de vitesse dans les écoulements**. Le choix de cette thématique a été influencé par l'arrivée au laboratoire de deux chercheurs : messieurs Jean Paul Schon et Michel Courbon, l'un spécialiste en mécanique des fluides et l'autre en optique et en traitement d'images. Jean Paul Schon possédait déjà une solide expérience sur la visualisation d'écoulement par la technique de tomographie Laser et sur la mesure de vitesse par la technique appelée PIV (Particules Image Velocimetry). Nous expliciterons ces deux techniques au paragraphe 3.3.1..

En 1998, cette équipe S.V.E.M. (Systèmes de Vision pour l'Etude du Mouvement) comportait 7 enseignants-chercheurs permanents. Les thèmes de recherche concernaient la mise au point des structures d'acquisition, de stockage et de traitement d'images destinées à la visualisation et à la mesure des mouvements. Le domaine d'applications visé était la caractérisation d'écoulements turbulents.

Cette équipe s'est ensuite développée en intégrant des chercheurs en traitement d'images (segmentation, morphologie, géométrie, reconstruction), en holographie et en implantation d'algorithmes sur FPGA. Les thématiques se sont alors élargies, le thème central restant le traitement d'image, mais avec la particularité qu'est la prise en compte lors du traitement, des caractérisations des milieux physiques dans lesquels sont acquises les images. L'objectif est toujours de détecter et de mesurer des éléments caractéristiques dans les images, mais en prenant en compte la nature particulière de cette image, comme le dispositif optique (Tomographie laser, projection de franges, hologramme, ...) et le milieu physique (écoulements, tissus biologiques, matériaux, ...).

Le troisième axe est une suite à la mise au point de systèmes de mesures de mouvement par vision où l'objectif central est **d'intégrer des algorithmes de traitement d'image sur des architectures matérielles dédiées**. Ces systèmes à vocation temps réel, intègrent des capteurs d'images CMOS ou reçoivent le flux de caméras CCD. L'objectif visé est de proposer des architectures matérielles (plateformes) adaptées aux spécificités du traitement d'image, à savoir, un fort flux de données d'entrée (flux vidéo) et un très faible flux de sortie (champ de vecteurs vitesse par exemple). Ces plateformes sont portées sur FPGA.

Un autre aspect de ce troisième axe s'intéresse à l'architecture logicielle de ces systèmes de mesure. La parallélisation éventuelle, l'ordonnancement et la répartition des tâches peuvent s'automatiser par l'intermédiaire de méthodes et d'outils, nommés **outils de portages**, Afin de pouvoir porter le plus rapidement possible les algorithmes écrits en C ou testés sous Matlab, ces outils doivent transcrire ces langages de programmation le plus possible automatiquement dans un langage plus proche de la description comme le VHDL. Ses systèmes ont toujours comme terrain applicatif la mesure de paramètres physiques telle la mesure de champs de vitesse ou le suivi spatio-temporel de structures dans des écoulements.

A ce jour, l'animation des activités de ce troisième axe m'a été confiée par le groupe.

A titre personnel, j'ai toujours œuvré pour une ouverture vers les autres thématiques du laboratoire et des laboratoires environnants, ce qui m'a permis de pouvoir mener à bien un certain nombre de projets dont les thématiques diffèrent de celles énoncées ci-dessus et dont l'aspect instrumentation m'a été confié. J'ai pu ainsi ouvrir mon champ de compétence vers des domaines tels que l'optique diffractante, la thermographie infrarouge ou les échanges de chaleur.

Une partie de ces activités s'est déroulée dans le cadre du PORA, élément fédérateur des activités de recherche du site stéphanois.

Aussi, la présentation de la synthèse de mes travaux de recherche se fera en trois parties :

- Une première partie sera consacrée aux projets menés dans le cadre biomédical (§3.2)
- Une deuxième partie abordera les projets liés aux traitements d'images et leurs applications à la mesure de paramètres physiques. Une première phase sera plutôt tournée vers la formation et l'acquisition des images (§3.3.1.2) en étude des écoulements. Une deuxième phase développera plutôt l'aspect traitement et analyse des images avec une implication nette sur l'interprétation des résultats (§3.3.1.3). Une troisième étape mettra en évidence les travaux sur l'implantation sur FPGA d'algorithmes de traitement d'images (§3.3.1.3 et §3.3.2).
- Une troisième partie permettra de présenter 3 projets liés au domaine de l'optique dans le cadre d'actions transversales au sein du laboratoire TSI et avec d'autres laboratoires partenaires dans le cadre du PORA (§3.4).





## 3. Synthèse des travaux de recherche

## 3.1. Synthèse des travaux de recherche : introduction

Comme cela a été écrit au paragraphe précédent, la synthèse de mes travaux de recherche sera présentée en trois parties.

Dans un premier paragraphe (§3.2), nous donnerons quelques explications afin de situer le contexte de ces travaux dans le domaine biomédical (§3.2.1). Nous détaillerons deux projets sélectionnés : une étude de vieillissement accéléré de prothèse artérielle (§3.2.2) et une analyse ambulatoire de la marche chez l'artériopathe (§3.2.3).

Le paragraphe suivant (§3.3) permettra d'aborder les projets liés aux traitements d'images et leurs applications à la mesure de paramètres physiques, il est décomposé en deux sous paragraphes : 3.3.1 pour l'étude des écoulements et 3.3.2 pour la biométrie. Le paragraphe 3.3.1 commence par une présentation du contexte des travaux et par la définition de quelques notions liées au domaine de la mécanique des fluides et d'une méthode optique de mesure : PIV (particules image velocimetry). Dans une première phase, plus tournée vers la formation et l'acquisition des images (§3.3.1.2) nous décrivons les applications en étude des écoulements. Dans une deuxième phase, nous mettrons l'accent sur le traitement et l'analyse des images (§3.3.1.3).

Une troisième partie permettra de présenter 3 projets liés au domaine de l'optique dans le cadre d'actions transversales au sein du laboratoire TSI et avec d'autres laboratoires environnants (§3.4).

Un premier projet a été réalisé en collaboration avec l'équipe 'optique diffractante' du laboratoire TSI, animé par Olivier Parriaux. La diffraction par des réseaux gravés sur verre a été utilisée pour la réalisation d'un capteur de déplacement très haute résolution (§3.4.1).

En collaboration avec des collègues du LTDS (Laboratoire de Tribologie Des Systèmes, site de l'ENISE - Ecole Nationale d'Ingénieurs de St-Etienne-), une étude de la qualité de l'état de surface des pièces en acier en fonction des paramètres de réglage lors de la rectification a été menée. Cette étude nécessite une connaissance de la physique de l'interface et en particulier l'échange de chaleur entre la meule, la pièce usinée et le milieu ambiant. Pour cela, une rectifieuse a été instrumentée, afin d'enregistrer la puissance électrique absorbée, les efforts sur le support de la pièce et les gradients de température dans la pièce (obtenus par thermographie IR)(§3.4.2.1).

Des travaux en commun avec les collègues CETHIL (Centre d'Etude Thermique de l' INSA de Lyon) sur des mesures de vitesse d'écoulement nous ont permis d'estimer les transferts de chaleur entre une paroi chauffée et un jet d'air oscillant. Ensuite, il y eu des travaux afin de mettre en place des méthodes de mesure d'isolation thermique de vêtement humide en vue d'une normalisation. Plus récemment, nous avons commencé à mettre en place des méthodes optiques de mesure de la température dans le but de pouvoir en déduire les flux de chaleur entre une flamme et une paroi (cas d'une chaudière). Ces méthodes sont basées sur la sensibilité de l'indice optique de l'air à la température, ce qui provoque des différences de marche des faisceaux laser. Ces différences sont enregistrées par interférométrie (holographie et photographie de speckle). Actuellement, des réflexions sont menées afin de proposer une mesure des champs de températures en 3D à partir d'un ensemble de moyens de mesures combinés : interférométrie thermographie IR, champs de vitesse PIV, simulation directe, ...

## Bilan chiffré de mon activité de recherche

L'ensemble de ces travaux a donné lieu à 15 articles publiés dans des revues avec comité de lecture, de 8 communications orales dans des congrès internationaux avec actes et comité de lecture, de 10 communications dans des congrès francophones avec actes et comité de lecture, et de 8 communications et affiches dans des congrès sans actes (cf annexe 6.2. : liste des travaux).

Afin d'essayer de proposer des indicateurs sur l'activité de recherche, la figure 1 montre le nombre d'articles publiés, le nombre de communications et le nombre de contrats industriels réalisés chaque année. On peut noter une certaine régularité.

Une description de ces contrats industriels est donnée au paragraphe 4.3.

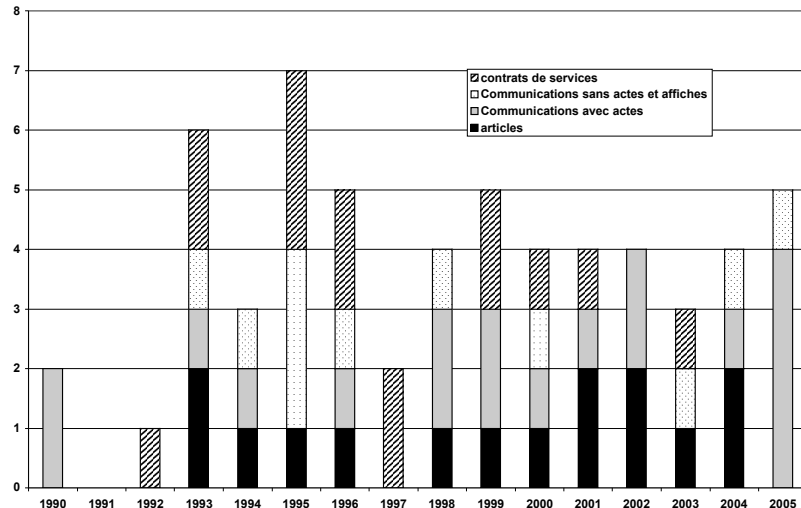


Figure 1 : nombre de publications suivant les années

Un certain nombre de projets menés ont été soutenus financièrement (§6.4) :

Région Rhône Alpes : 6

Europe : 1

CNRS : 1

Sur l'ensemble de tous ces projets, des doctorants ont été associés. J'ai eu l'occasion de travailler avec 9 doctorants. J'ai pu participer à l'encadrement de 6 d'entre eux à des degrés divers. A 5 reprises, j'ai été membre de leur jury, sachant que 2 thèses sont en cours. Dans 3 cas, je suis associé officiellement à la direction de la thèse (§6.3).



## 3.2. Instrumentation médicale

## 3.2. Instrumentation médicale

### Contexte

La recherche médicale est en permanence attentive à tout moyen de mesure de paramètres physiologiques. En effet, le diagnostic médical repose souvent sur des données subjectives fournies par le patient, par exemple, sur l'intensité de la douleur. L'intérêt est encore plus fort si les moyens de mesures sont non invasifs et plus encore si ces moyens de mesures peuvent être aussi ambulatoires, donc en situation d'activité.

Aussi, ces objectifs étaient tout à fait convergents avec ceux d'une équipe de recherche scientifique dont l'activité de recherche a consisté à développer des méthodes de mesures et les instrumentations correspondantes n'ayant pas d'équivalent sur le marché.

Cette thématique est une des activités historiques du laboratoire TSI. En 1987, lorsque mes travaux de thèse ont débuté, cette équipe d'électronique du labo se composait alors de deux personnes : Robert Rougny (professeur) et Robert Fouquet (Maître de conférence).

Sous la direction de ces deux personnes, j'ai pu réaliser des travaux qui m'ont permis de soutenir en janvier 1990 devant l'université Jean Monnet une thèse de doctorat intitulée : "Système de télémesure de paramètres physiologiques chez l'homme, application à la mesure de la température interne.". Nous reviendrons sur ce projet un peu plus loin.

A la suite de ce travail de thèse, j'ai pu contribuer à un ensemble de travaux de l'équipe dans ce domaine de l'instrumentation médicale. Nous pouvons citer quelques projets significatifs réalisés durant une période allant de 1990 à 1998 :

#### Projet A :

Mesure de la puissance développée par un sportif au cours de l'exercice.

Ces travaux étaient réalisés en collaboration avec l'équipe de physiologie de la faculté de médecine (professeur A. Geysant)(aujourd'hui laboratoire de Physiologie-Physiopathologie de l'Exercice et du Handicap). Ce projet a donné lieu à 2 articles (P2, P4).

#### Projet B :

Mesure de la dépense énergétique d'un footballeur par l'enregistrement ambulatoire de la fréquence cardiaque en simultané avec un enregistrement vidéo de l'action. Ce travail a fait l'objet d'une thèse soutenue en 1993 par Jean Claude Dumas et d'une communication (C2).

#### Projet C :

Mesure de la position, de la vitesse et de l'accélération d'un sprinter.

Mesure de la hauteur d'un saut au rebond d'handballeurs.

Les méthodes retenues fonctionnent sur le principe suivant : des cibles caractéristiques sont placées sur le sportif retenu (disques noirs au centre de disques blancs placés sur la cheville, le genou et la hanche par exemple), la bande vidéo était ensuite numérisée et indexée. Chaque image était traitée individuellement par une segmentation avec un filtrage par un gradient puis à l'aide de la transformé de Hough, les objets circulaires étaient sélectionnés. Chaque cible était suivie lors de la séquence et permettait d'obtenir sa trajectoire, puis sa vitesse et son accélération.

Ces travaux ont été soutenus par la région Rhône Alpes (R1). Une affiche a été exposée (A6).

#### Projet D :

Mesure de l'évolution des paramètres mécaniques de prothèses artérielles lors d'un vieillissement accéléré in vitro. Ce projet a été financé par la région Rhône Alpes (R2) et a donné lieu à un article (P5) et à un poster (A4).



Le suivi de ces caractéristiques mécaniques n'étant pas possible *in vivo*, nous avons défini une méthode permettant un vieillissement *in vitro* en reproduisant les barotraumatismes subis par la prothèse. Pour provoquer un vieillissement accéléré, nous avons choisi d'imposer des contraintes supra-physiologiques en pression et en fréquence de cycle.

Les contraintes mécaniques subies *in vivo* par les prothèses ont essentiellement pour origine la répétition à chaque cycle cardiaque de l'onde de pression générée par le ventricule gauche. L'action du muscle cardiaque peut être schématisée par une pompe à piston injectant un volume de sang à chaque cycle, ce qui entraîne la circulation. La résistance de l'ensemble du lit vasculaire (artères, artérioles, capillaires,..) provoque une surpression systémique. Cette onde de pression est amortie par la viscoélasticité des matériaux. Cette sollicitation est à l'origine de l'usure.

Nous avons donc cherché à mettre au point un système à même de reproduire ce barotraumatisme pour simuler *in vitro* les effets mécaniques rencontrés *in vivo*.

Ce système permet dans des conditions *in vitro* de simuler les barotraumatismes subis par les prothèses *in vivo*. Compte tenu du temps de relaxation de l'ensemble prothèse et fluides, nous avons choisi une fréquence de stimulation de 10 Hz ou 600 battements par minute, c'est à dire une fréquence d'environ 10 fois supérieure à la fréquence moyenne physiologique. Dans le même esprit, la valeur relative de la pression maximale de l'onde, qui est de 0,184 bars, a été fixée à 0,3 bar, afin d'obtenir une amplification des barotraumatismes. Nous avons conservé par ailleurs la valeur minimale de la pression de l'onde en conditions physiologiques, à savoir 0,1 bar. La pression "différentielle" (différence entre la pression systolique ou maximale et la pression diastolique ou minimale) est amplifiée et majore le barotraumatisme subit par la prothèse. Ces conditions supra physiologiques concourent à obtenir un vieillissement accéléré.

Les cycles de pression sont contrôlés par un module de régulation électronique au niveau de chaque prothèse, et l'ensemble du système est supervisé par un micro-ordinateur.

Une première série de périodes de stimulation a été réalisée sur un lot de huit prothèses pour des durées représentant un vieillissement physiologique de 2 heures à 27 mois. Cette expérience a montré une dégradation limitée mais significative des caractéristiques d'élasticité et de résistance à la rupture du matériau constituant les prothèses pendant les premières heures d'utilisation. Ensuite, une stabilisation des caractéristiques a été constatée.

## **DESCRIPTION DU BANC**

Un appareil a été développé afin de générer ces ondes de pression dans des échantillons. Les sur-pressions sont obtenues par un système d'électrovanne d'eau et d'air sous pression. Les amplitudes des sur-pressions étant réglées par les durées d'ouverture des électrovannes, un système de régulation des pressions a été mis au point.

La compression de l'air situé dans le montage et la compliance de la prothèse contribuent à la création d'une onde de pression dont la forme est voisine de celles rencontrées *in vivo*. Le volume d'air comprimé entre les électrovannes et l'interface air/eau agit directement sur la forme de l'onde de pression dans la prothèse.

A chaque prothèse est associée une carte électronique permettant la régulation des valeurs minimales et maximales de la pression dans la prothèse. Si le dépassement de la pression par rapport à la valeur de seuil fixée devient trop important, il faut diminuer la durée d'ouverture de l'électrovanne. Et inversement, lorsque la pression n'atteint pas le seuil, il est nécessaire d'augmenter la durée d'ouverture.

Le banc complet construit comporte un ensemble de 8 groupes régulation-prothèse. Cet ensemble est supervisé par un micro ordinateur chargé de surveiller le bon fonctionnement et de détecter les défauts de fonctionnement ou les fuites éventuelles. Cet ordinateur enregistre également le nombre de cycle subis par chaque prothèse et permet ainsi de connaître leur « âge ». Cette automatisation était rendu indispensable par la durée des tests s'étalant sur plusieurs mois.

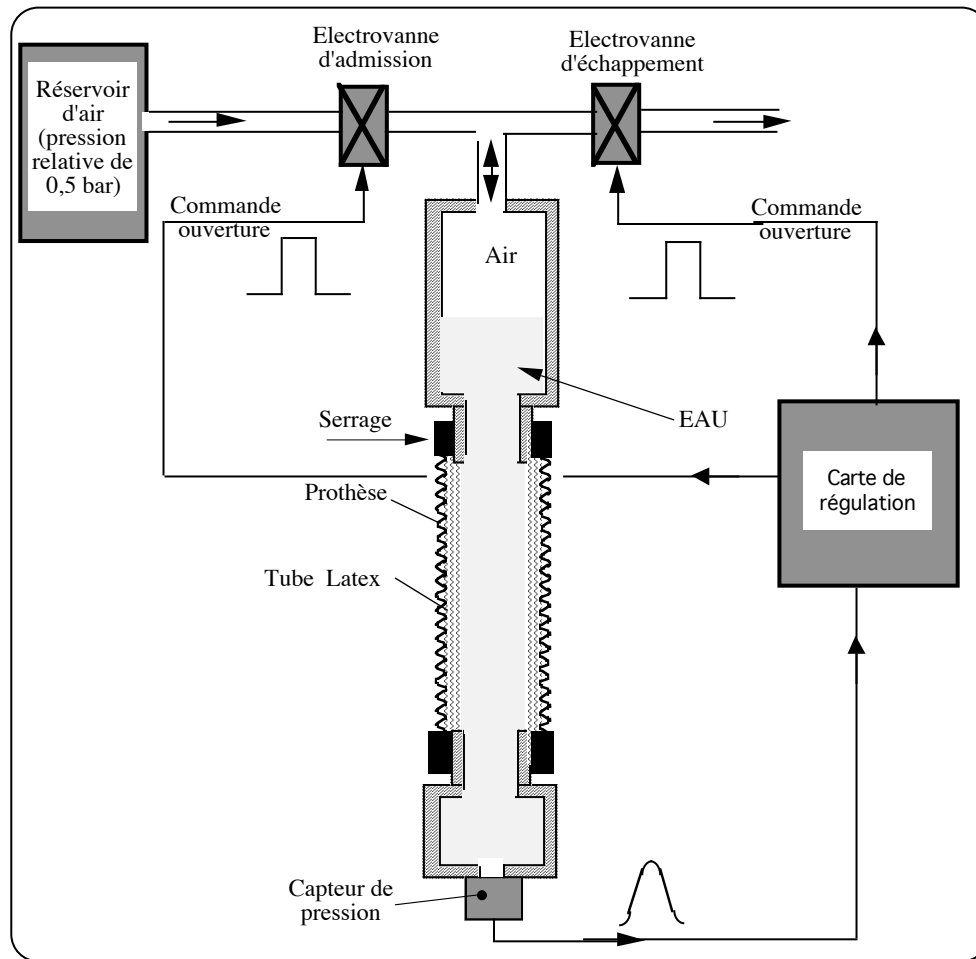


Figure 1 : Système de commande et de régulation des pressions

### Matériel et méthodologie des essais

Le protocole de vieillissement que nous avons adopté nous a conduit à soumettre huit prothèses en polyester Dialine de la société Cardial avec un diamètre de 14 mm et de longueur de 30 cm. Les caractéristiques de ces prothèses sont parfaitement connues et répondent aux tests de caractérisation de la norme NF ISO 7198-1 (épaisseur de la paroi : 0,53 mm, résistance à l'éclatement de ces prothèses : 310 N, résistance à la traction circonférentielle : 12,1 N/mm).

Nous avons opté pour une étude comparative. C'est à dire que huit prothèses d'un même lot de fabrication seront soumises aux barotraumatismes sur le banc avec des durées de stimulation croissantes. Les contraintes subies par les prothèses doivent être rigoureusement identiques. Une prothèse de ce lot ne sera pas placée sur le banc et servira de témoin. Les prothèses ont été installées sur le banc dans les mêmes conditions, puis les prothèses ont été retirées à intervalles pré définis.

Une machine de traction compression (modèle DY.30 -Adamel Lhomargy-) a été utilisée pour mesurer la résistance à l'éclatement et tracer la courbe d'hystérésis de l'élasticité (force de traction par rapport à l'allongement).

De toutes les mesures effectuées, nous avons extrait deux courbes significatives. Le premier paramètre retenu est la pente à mi-hauteur du premier passage de la courbe d'élasticité (pente 1). Le second paramètre est la valeur de la force de traction provoquant la rupture du tissu. Le calcul du vieillissement théorique se fait à partir des valeurs suivantes : fréquence cardiaque moyenne de 60 battements par minute, 24 h par jour, 30 jours par mois et 12 mois par an.

Pour les deux paramètres présentés ci-dessus on peut remarquer une usure mécanique par perte d'élasticité de la paroi de la prothèse. Cette dégradation, limitée mais non négligeable (6 à 15%) se produit dès la mise en place de la prothèse sur le banc et se prolonge sur une durée réelle d'environ de 3 jours (soit un vieillissement théorique de 1 mois). Au delà, les modifications deviennent limitées et n'apparaissent pas significatives.



Ces constatations traduisent certainement une "adaptation" du matériau aux conditions de stress auxquelles il est soumis. Ensuite, jusqu'à 2 mois (2 ans en temps réel), on peut constater une absence de dégradation significative.

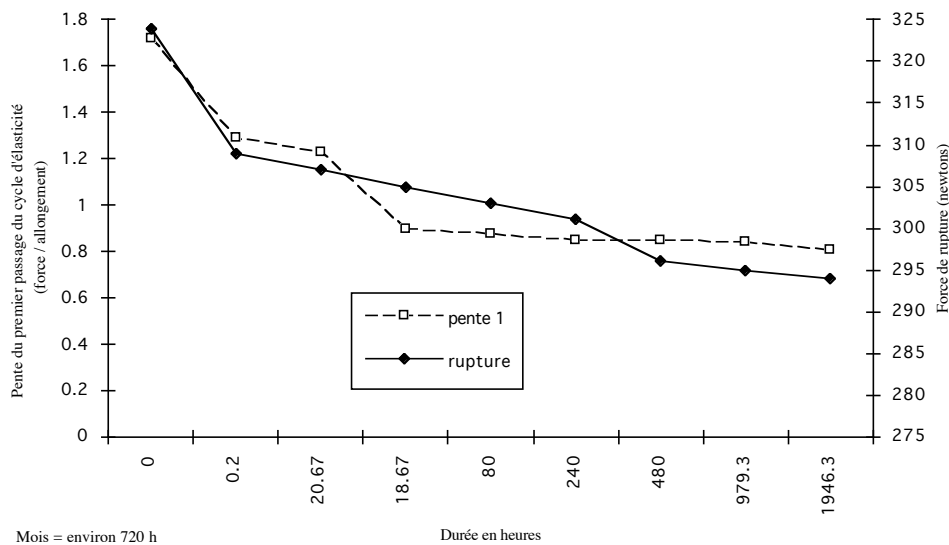


Figure 2 : Evolution du point de rupture en fonction du temps et évolution de la pente du premier cycle "force de traction/allongement" en fonction du temps.

## Analyse ambulatoire de la marche chez l'artériopathe

Intervenant LTSI : Jacques Jay  
 Collaboration : Christian Boissier      Faculté de médecine UJM  
                          P. Geoffray et T. Perrot      ENS Lyon  
 Production : C9

Sous le terme artériopathie sont regroupées toutes les pathologies liées aux atteintes des tissus formant les parois des artères. Parmi les signes extérieurs de ces atteintes, les difficultés rencontrées lors de la marche forment un critère important de dépistage. Toutefois, le praticien se heurte à une limite, en effet, il lui est difficile d'évaluer le degré de ces atteintes au simple discours des patients. Aussi, il a été imaginé un moyen de mesurer ces difficultés à la marche chez des patients atteints d'artériopathie. Donc, l'objectif de ces travaux était d'obtenir un outil simple d'utilisation pour évaluer le degré de modification de la marche et l'évolution de ces modifications sur plusieurs années.

Un appareil ambulatoire a été développé par les collègues de l'ENS permettant d'enregistrer pendant plusieurs heures la distance séparant les 2 pieds. Le principe repose sur la mesure du temps de parcours d'un signal ultra sonore entre un émetteur placé sur le pied gauche et un récepteur placé sur l'autre pied. Ces temps sont mesurés à intervalles réguliers de 100 échantillons par secondes et stockés dans une mémoire permanente. A partir de ces temps, il est possible d'obtenir des informations sur la marche du porteur : nombre de pas, amplitude des pas, vitesse de marche, temps de marche, mais aussi, dissymétrie des pas, perte de vitesse et autres modifications permettant de quantifier la gêne pendant la marche.

Des enregistrements ont été réalisés sur plusieurs personnes. Sur l'ensemble de ces personnes, certaines ne présentant aucune gêne à la marche seront considérées comme sujets sains. Les données recueillies serviront donc de référence dans les analyses. Le déroulement d'un enregistrement sous-entend 2 épreuves de marche régulière en terrain plat, entrecoupée d'un arrêt de 1 minute (repos total).

J'ai contribué au développement de cet outil de mesure au niveau de la mise au point d'un traitement des données issues des enregistrements. L'objectif était d'obtenir des indicateurs permettant d'évaluer le degré d'atteinte de la maladie.

Les données enregistrées sont des signaux périodiques s'approchant d'une forme sinusoïdale. Une première série d'analyse a consisté à extraire la durée des arrêts vis à vis des durées de marche. Cette information indique la vitesse avec laquelle arrive la fatigue du patient, cette fatigue pouvant être liée à la gêne provoquée par la maladie. Malheureusement plusieurs autres causes peuvent provoquer ce même effet.

Une période du signal correspondant à un pas complet, ainsi la mesure de la longueur et la durée du pas (donc la vitesse de marche) sont faciles à obtenir par une analyse spectrale (transformée de Fourier). L'évolution de ces paramètres pendant la durée de l'enregistrement a été étudiée, ce qui a permis de mettre en évidence différentes phases. Les variations de cette « fréquence de pas » pouvant traduire là aussi une fatigue prématurée donc un signe de gêne à la marche. Cette corrélation a été validée par comparaison entre les données obtenues sur des sujets sains et des patients dont l'atteinte est déjà connue.

La figure 3 montre les différentes phases lors du déroulement d'un enregistrement. Nous avons utilisé les variations de la largeur à mi hauteur du premier pic dans l'espace de Fourier : plus la marche sera irrégulière, plus cette largeur sera grande. Les phases ont été nommées ainsi : adaptation initiale, marche normale, compensation, marche difficile, et sont séparées par des points caractéristiques : S, Pa, C, Pb et A (indice 1 pour la première marche et indice 2 pour la seconde)(tableau 1).

Une étude statistique de ces paramètres a été menée sur une cinquantaine d'enregistrements réalisés sur des patients dont les atteintes étaient préalablement connues. Ce qui a montré la pertinence de nos choix.

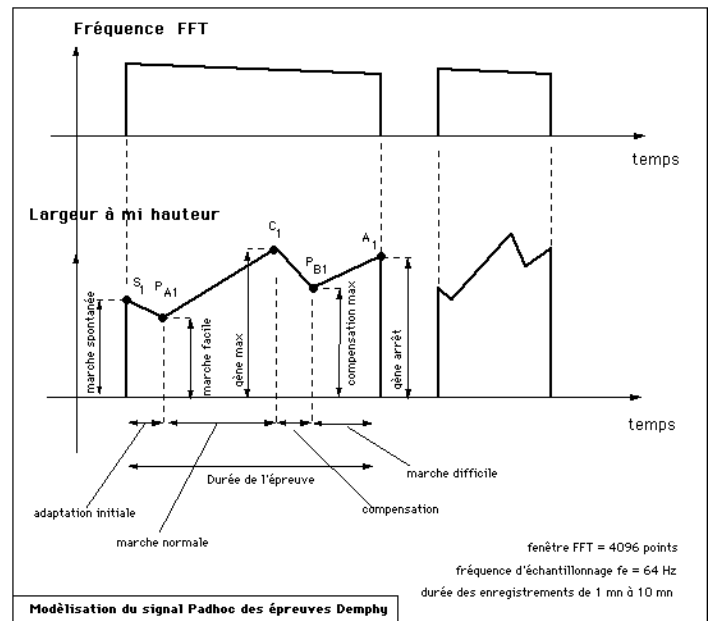
Ensuite, nous avons cherché à analyser plus finement ces signaux. En effet, après avoir étudié le premier pic dans l'espace de Fourier, nous avons regardé les autres pics. Nous avons constaté qu'en fin d'enregistrement (au moment où la fatigue est la plus forte) et pour des patients dont l'atteinte est sévère, un harmonique de rang 2 apparaissait. La présence de cet harmonique peut être interprétée comme une forte dissymétrie entre le pas gauche et le pas droit, comme lorsque la douleur dans une jambe est nettement plus forte que dans l'autre jambe.

L'amplitude de cet harmonique est donc un indicateur supplémentaire. Toutefois, sa faible sensibilité limite l'intérêt de cet indicateur.

Tableau 1 : listes des paramètres mesurés fréquence

Paramètres	Signification
Fréquence Moyenne	Vitesse moyenne FFT
Fréquence Max	Vitesse Max FFT
Cadence Moyenne	
Foulée Moyenne	
Vitesse Moyenne	
Amplitude de S	Caractéristiques de la marche spontanée
Amplitude de Pa	Caractéristiques de la marche facile
Amplitude de Pb	Caractéristiques de compensation Max
Amplitude de C	Caractéristiques de la gêne max
Amplitude de A	Caractéristiques de la gêne à l'arrêt
Ecart Amplitude S Pa	Degrés de perturbations spontanées
Ecart Amplitude Pa C	Degrés de dégradation de la marche
Ecart Amplitude Pa Pb	Degrés d'adaptation
Délai S / Pa	Durée de la période d'adaptation initiale
Délai Pa / C	Durée de la période Marche Normale
Délai Pb / A	Durée de la période de marche difficile
Délai C / Pb	Durée de la période de compensation
Délai S / A	Durée de l'épreuve

Figure 3 :Analyse de l'évolution de la des pas lors d'enregistrement



## **3.3. Systèmes de mesures par traitement d'images**

### **3.3.1. Application à l'étude des écoulements**

### 3.3.1.1. Introduction et contexte

#### Contexte

Du début des années 90 à nos jours, l'évolution des capteurs d'images (CCD, progressive scan, shutter électronique, capteur CMOS, rétine, ...), des puissances de calcul des micro-ordinateurs et de leur capacité de stockage est telle que les objectifs scientifiques sont passés du simple fait de visualiser des phénomènes inconnus à des mesures avec les meilleures résolutions dans les 3 dimensions sur des écoulements complexes.

*Mes activités dans cette thématique seront présentées en deux phases. Ces deux phases sont liées à cette évolution du matériel informatique et des caméras vidéos. Aussi, durant la première phase, pour réaliser nos systèmes d'acquisition de séquences d'image, nous avons utilisé des caméras au format de la télévision : 25 images par seconde ou 50 trames par seconde car les images étaient entrelacées. Les capacités de stockages des micro-ordinateurs étaient assez limitées et la programmation des cartes d'acquisition était très compliquée. Pour améliorer les performances de nos systèmes, nous avons entrepris en 1994, la réalisation d'une caméra autour d'un capteur de marque EEV qui nous a permis de monter la cadence à 100 images par seconde avec une résolution pleine de 512 par 512 pixels. Le stockage en RAM était réalisé en interne à la caméra car les performances des cartes d'acquisition étaient insuffisantes.*

*L'ensemble des composants de la chaîne d'acquisition (soufflerie, ensemencement, caméras et ordinateurs d'acquisition) était synchronisé par un générateur de signaux conçu pour cette application. Ce générateur, dénommé **boîtier de synchronisation** était entièrement configurable. Chaque temps, chaque délai étaient paramétrables via un micro-ordinateur.*

La deuxième phase débute avec l'arrivée de caméras CCD 'progressive scan'. Nous avons alors adapté nos cartes d'acquisition, leurs programmations et nos boîtiers de synchronisation. L'utilisation de systèmes à deux caméras va permettre de saisir des phénomènes rapides par le montage 'face – face' (les caméras enregistrent le même champ mais avec un décalage temporel contrôlé), ou de mesurer des champs de vecteurs vitesse en trois dimensions par un montage stéréographique. La disponibilité de caméras performantes adaptées à la mesure, très sensible, rapide, haute résolution a permis de développer plus amplement les moyens d'analyse et de traitement des séquences d'images obtenues et surtout de mettre au point des systèmes de **traitement d'images temps réel**.

Nos systèmes d'acquisition et le logiciel de traitement d'image (WIMA) développé par l'équipe ont permis de réaliser des analyses d'écoulement sur les installations expérimentales à St Etienne, mais aussi sur des installations de plusieurs laboratoires en France. Dans ce cadre, une collaboration avec un laboratoire de Monastir en Tunisie a débuté en 2000 et se poursuit encore aujourd'hui sur deux projets : le suivi spatio temporel des instabilités de Kelvin Helmost dans un écoulement de type jet rond à faible nombre de Reynold et la mise en place d'un système d'optimisation temps réel des paramètres d'acquisition en PIV (taille des imquettes, délai entre les deux caméras, ...).

#### Présentation des technique d'analyse des écoulements par traitement d'images

La **technique PIV** (Particule Image Velocimetry) consiste à ensemencer le fluide à visualiser par de très petits objets appelés particules ou marqueurs. Afin que ces objets suivent le plus fidèlement possible les mouvements du fluide, la masse volumique de ceux-ci doit être la plus proche possible de celle du fluide ensemencé. Et pour ne pas perturber les mouvements du fluide, la taille de ces objets doit être la plus faible possible. A contrario, les marqueurs doivent avoir une taille minimale due au fait que la lumière qu'ils peuvent diffracter ou réfléchir soit suffisamment importante pour être enregistrée par une caméra. Aussi, l'ensemencement est une technique complexe toujours délicate à mettre au point.

L'écoulement à visualiser est ensuite « éclairé », c'est-à-dire que sur la zone à étudier, une source de lumière est projetée. Les marqueurs réfléchissent alors la lumière et forment ainsi une image

des mouvements du fluide. Cette technique d'éclairage s'appelle « **Tomographie** » car, souvent, seule une tranche fine d'un écoulement est visualisée.

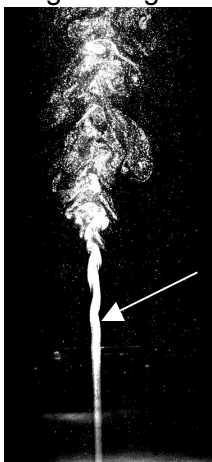
Si deux photographies de ces images sont enregistrées à deux instants proches, on peut généralement, en analysant ses images, connaître la **vitesse de chaque particule**. Il s'agit en fait de mesurer le déplacement de chaque marqueur entre les deux images.

Si dans les images, les particules sont bien distinctes, on parle alors de **marqueur ponctuel**, sinon, on utilise le terme de **marqueur diffus**. Dans des marqueurs ponctuels, les particules peuvent être individualisées et peuvent être suivies séparément, c'est la technique du suivi de particule ou **traking**. Lorsque la densité devient trop forte pour individualiser les particules (celles ci sont néanmoins visibles), une méthode globale est alors utilisée. Le calcul de la vitesse est effectué sur une imagerie, un morceau de l'image, récupérée sur deux images successives. Les traitements utilisés pour extraire la vitesse à partir des deux imagerie sont basées sur des méthodes de **corrélation**.

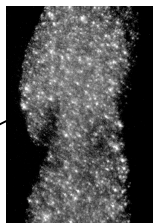
Lorsque la densité de particules devient trop forte pour la technique précédente, l'analyse se fait alors en deux temps : d'abord une détection des frontières des zonesensemencées puis un suivi de points caractéristiques de ces frontières est réalisé entre deux images (**suivi de frontière**)

Voici à titre d'exemple une photo d'une cuve d'eau dans laquelle est injecté un jet rond, les marqueurs sont des billes de verres dont le diamètre est de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ , la vitesse d'injection est de l'ordre de 20 cm/s.

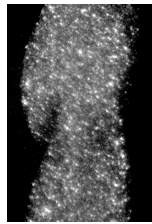
L'image enregistrée :



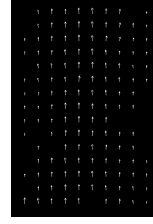
deux images successives dans la zone intermédiaire



temps T



temps T + t1



champ de vitesse obtenu

Temps d'intégration = 200  $\mu\text{s}$ , Temps entre les deux images  $t_1 = 1,5 \text{ ms}$ ,  
Champ de 15 par 12 mm



En photographie, pour fixer un objet ou un personnage en mouvement, il est nécessaire, pour éviter le flou, de régler une durée d'intégration (ou temps d'exposition ou temps d'ouverture) du capteur photosensible (ici la caméra). Lorsque les caméras ne disposent pas de contrôle de ce temps d'exposition, il faut soit disposer d'une source de lumière impulsionnelle (scromboscopique) soit placer devant la caméra un obturateur de type intensificateur de lumière. De plus, pour mesurer des écoulements rapides, il faut disposer des enregistrements d'images à une fréquence élevée, soit la fréquence de la caméra est compatible avec la vitesse de l'écoulement (ce qui est la cas que pour des faibles vitesses  $< 1 \text{ m/s}$ ), soit il faut recourir à la technique du double capteur (2 capteurs d'images dans une caméra ou deux caméras visant la même scène)(cas de l'exemple donné ci-dessus), soit d'enregistrer sur une même image deux instants successifs (images dites bi exposée), solution moins performante mais plus simple à mettre en œuvre.

### **Chronologie des opérations de recherche**

Un récapitulatif des différentes étapes est détaillé en annexe (6.1). Pour chaque période sont donnés le type d'écoulement étudié, le type de caméra, le type de carte d'acquisition, la version des boîtiers de synchronisation et leurs principales performances et également, les publications, communications et programmes associés.

### **Organisation du chapitre 3.3**

Dans ce chapitre 3.3, nous allons détailler l'ensemble des travaux concernant la mise au point de systèmes d'acquisition, d'enregistrement, de traitement et d'analyse d'image en vue de mesures. Le paragraphe 3.3.1 abordera l'étude d'écoulement. Le paragraphe 3.3.2 décrira un système d'authentification de visage (biométrie).

L'ensemble des pages regroupées sur le numéro 3.3.1 : Systèmes de mesure par traitement d'images, application à l'étude des écoulements, a été organisé en deux sous ensembles.

Une première phase (3.3.1.2) présentera les systèmes mono et multi caméras essentiellement utilisés pour des mesures de champs de vecteurs vitesses sur des jets d'air et d'eau, jets rond et plan. Nous détaillerons une première plateforme d'acquisition d'images réalisée autour d'une caméra à 25 images par secondes. Ensuite, nous présenterons la réalisation d'une caméra à 100 images par seconde et de la plateforme associée. Une troisième plateforme permettra de réunir les 2 caméras. Des exemples d'images et d'exploitation seront ensuite présentés, elles ont été réalisées dans le cadre d'un programme européen.

Une deuxième étape (3.3.1.3) permettra de présenter quelques types d'écoulements étudiés : PIV et suivi de frontière sur un jet d'air libre à faible vitesse et le suivi du charriage de boues torrentielles. Nous terminerons ce paragraphe par la présentation d'un système d'optimisation en temps réel des paramètres de réglages de mesures en PIV.

### **Exemples de collaborations avec des équipes extérieures au laboratoire**

Dans le cadre du **projet européen EUROPIV**, relevant du programme Brite/EuRam et coordonné par le Laboratoire de Mécanique de Lille (URA CNRS 1441 - Pr M. Stanislas), nous avons participé à deux des cinq tâches du projet. Ce projet a pour but de faire une synthèse, une confrontation et des développements sur le plan matériel et méthodologique dans le domaine de la V.I.P, en vue d'appliquer cette technique aux grandes souffleries et aux turbomachines. La première tâche, dans laquelle nous sommes intervenus, a pour objet la comparaison des systèmes d'acquisition d'une part, à l'aide d'une même soufflerie, et des méthodes de dépouillement d'autre part, à partir d'images issues d'une base de données. La deuxième tâche à laquelle nous avons participé a trait au développement de systèmes vidéo. Il s'agissait pour nous de coupler deux caméras afin de réaliser des séquences de paires d'images correspondant à des instantanés très faiblement décalés dans le temps (qq  $\mu$ s).

Nous collaborons avec l'équipe d'Alain Texier du **Laboratoire de Mécanique des Fluides de Poitiers (LMFP)** pour l'étude des écoulements à l'aval d'un cylindre ainsi que la détermination des petites structures en turbulence de grille. Nous apportons notre savoir faire d'acquisition et de traitement d'images sur leur plate-forme expérimentale. Ces recherches ont donné lieu à une publication commune

Le **laboratoire de Machines Thermiques** (Professeur J.C. Champoussin) de l'**Ecole Centrale de Lyon (ECL)** nous fournit aussi une plate-forme expérimentale originale. L'objet de cette étude commune est la mesure des vitesses d'injection diesel et fait intervenir nos deux opérations de recherches (systèmes de vision et mise en place d'algorithmes d'études du mouvement).

Un travail soutenu par la région Rhône Alpes a été réalisé avec l'**équipe ETNA du CEMAGREF de Grenoble** sur le suivi du charriage de boues torrentielles.

Une collaboration a débuté en 2000 avec l'**UMMFT de l'école nationale d'ingénieur de Monastir** (unité de métrologie, de mécanique des fluides et thermique). Leur installation expérimentale permet de réaliser une étude du jet d'air libre à faible nombre de Reynold.



### 3.3.1.2 Systèmes mono et multi-caméras

Nous allons décrire dans ce chapitre les différentes plateformes de mesure par traitement d'images utilisées sur des installations expérimentales. Deux plateformes mono caméra seront présentées (25 et 100 i/s). Ensuite, nous aborderons une plateforme multi-caméra pour des configuration stéréoscopique et dite 'face-face'.

#### 3.3.1.2.1. Plateforme à 25 i/s

Nous avons installé dans les locaux du TSI plusieurs plateformes expérimentales afin de mettre au point et de tester nos appareils.

Historiquement, la première installation est une micro soufflerie permettant de générer des écoulements d'air plan dont la vitesse de sortie de buse est comprise entre 0,1 et 20 mètres par seconde. L'ensemencement est obtenu par des gouttelettes d'huile vaporisées. Ce type de marqueur est diffus. La caméra utilisée était une caméra vidéo standard couplée à un intensificateur de lumière de marque Hamamastu référencée C4215 (figure 1).

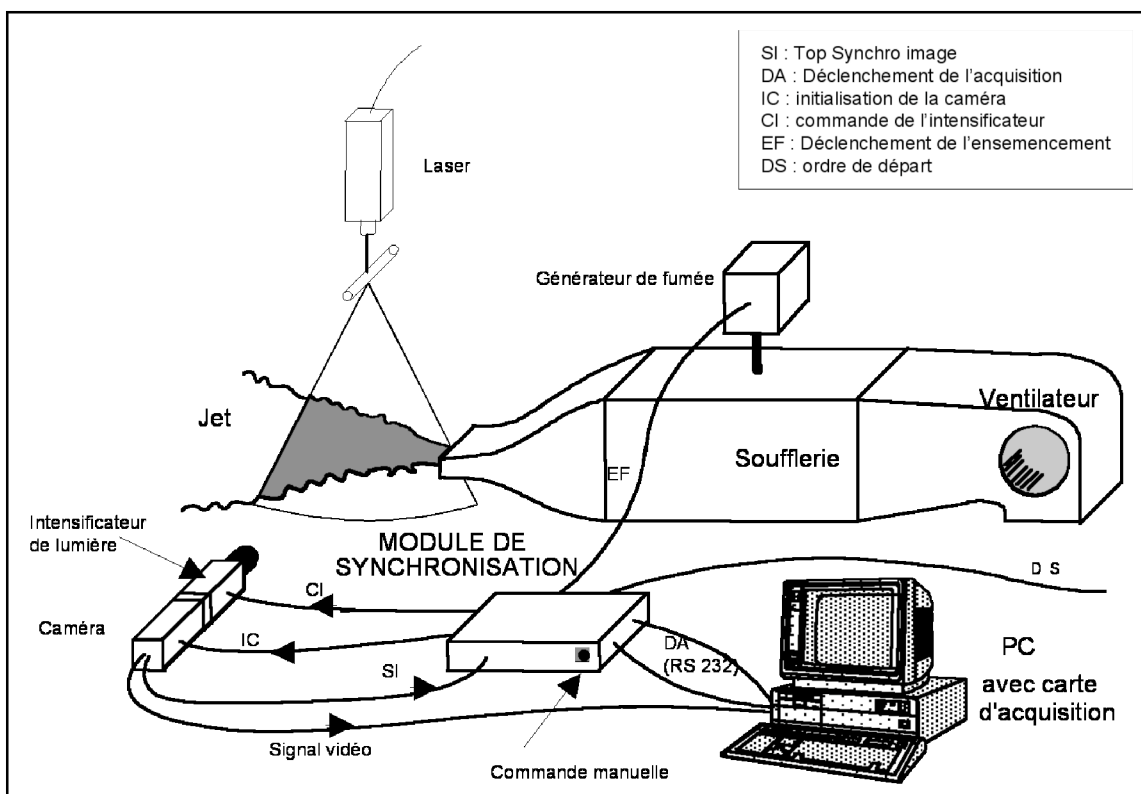


Figure 1 : Schéma de la plateforme à 25i/s

Cette première plate-forme dispose d'une vitesse d'acquisition de **25 images/s** et est conçue à partir d'une caméra standard couplée par fibres optiques à un amplificateur de lumière et disposant d'une résolution de **512\*512 pixels**. Un système de contrôle de la fonction d'obturation de l'amplificateur a été développé. Ce système est synchronisé au fonctionnement de la caméra et dispose d'un mode multi exposition entièrement paramétrable par ordinateur. Ce type de fonctionnement permet l'étude de phénomènes très rapides (durée inter-exposition minimale de 100ns) à partir d'une vidéo standard.

La soufflerie est composée d'un ventilateur, d'une chambre de tranquillisation, d'un convergent et d'une buse rectangulaire de 2 cm de hauteur et de 30 cm de longueur. Les marqueurs peuvent être injectés en amont de la chambre de tranquillisation et cette injection est contrôlée par une électrovanne.



La zone d'étude est visualisée par une nappe Laser. Le boîtier de synchronisation va organiser le séquençement de l'ensemble.

Un délai est proposé entre l'ordre de départ donné par un bouton poussoir, une commande venant du PC ou un ordre à distance et le début de l'ensemencement. Un nouveau délai pour laisser le temps aux marqueurs d'arriver dans la zone d'étude puis un ordre de remise à zéro est envoyé à la caméra. En fonction des tops synchro, les commandes d'ouverture de l'intensificateur sont émises. La carte d'acquisition peut alors stocker les images exposées.

La figure 2 montre un exemple d'image réalisée sur cette installation. Nous pouvons voir, sur cette image, une zone du jet dite de transition entre la partie laminaire de l'écoulement (à droite) et un état turbulent (à gauche). On peut remarquer des instabilités qui se développent en s'écartant du centre du jet et en tournant sur elles-mêmes.

Cette image est issue d'une double exposition, deux vues séparées par un délai sont enregistrées sur la même image. Le module de synchronisation développé pour cette plateforme permet jusqu'à 8 expositions sur une même image. Les durées de chaque exposition et les temps entre les expositions sont paramétrables. Le contrôle des durées d'exposition est obtenu par la commande « marche/arrêt » de l'intensificateur de lumière placé devant la caméra. Cet intensificateur joue alors le rôle d'une porte optique.

Pour donner des ordres de grandeurs des durées, reprenons l'image de la figure 2. La taille du champ visualisé est de 10 cm sur l'axe horizontal, la résolution du capteur CCD de la caméra de ce même axe est de 750 pixels. La résolution spatiale est donc de  $100/750$  soit  $0,13$  mm/pixel.

L'absence de flou sur l'image impose un déplacement nul pendant la durée de l'exposition, en pratique, un déplacement d'un est toléré. Pour une vitesse du fluide d'1 mètre par seconde et pour obtenir un déplacement d'un pixel, il faut fixer la durée du temps d'exposition à :

$$\text{Temps d'exposition} = 0,13 \cdot 10^{-3} / 1 = 0,13 \text{ ms} = 130 \mu\text{s}$$

Pour cette image, la seconde exposition de même durée a été réalisée 13 ms après la première, soit un déplacement d'environ pixels

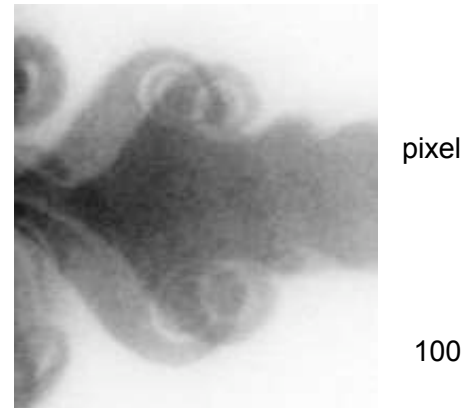


Figure 2 : exemple d'image réalisée sur cette première plate-forme

Le boîtier de synchronisation fournit les impulsions de commande à l'intensificateur permettant de fixer la durée des expositions et le temps entre les expositions. La génération de ces impulsions est synchronisée par rapport au fonctionnement interne de la caméra et par rapport aux événements extérieurs tel que le déclenchement d'une bouffée de particules dans la soufflerie.

La première version de ce type de boîtier de synchronisation permettait le contrôle d'une caméra intensifiée avec la possibilité d'exposer jusqu'à 8 fois une même image. Les performances temporelles qui peuvent être citées sont :

- Retard programmable entre le déclenchement et l'acquisition des images de 1ms à 5 s,
- Durée d'une exposition ou d'inter exposition minimale de  $5\mu\text{s}$  avec une précision de  $1\mu\text{s}$ .

Le système est piloté par un microcontrôleur (Intel 8751). Ce circuit est associé à un séquenceur câblé (circuit de logique programmable Altera EP610) permettant la génération des impulsions de durée programmable utilisées pour la commande de l'intensificateur. Cette fonction ne peut pas être assurée par le microcontrôleur car sa vitesse n'est pas suffisante pour générer des impulsions avec une précision de  $1\mu\text{s}$ .

La communication entre le microcontrôleur et le séquenceur est réalisée à l'aide d'une mémoire RAM dans laquelle sont stockés les différents temps DO, DE exprimés en  $\mu\text{s}$  (figure 3).

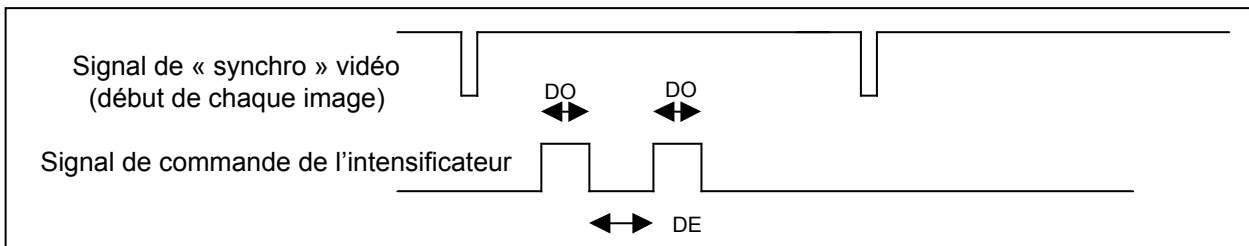


Figure 3 : Chronogrammes de la commande de l'intensificateur pour une image bi-exposée

Le paramétrage des temps est effectué via une ligne série RS232 par un logiciel implanté dans le micro ordinateur d'acquisition des images.

Lorsque les performances en temps de ce boîtier se sont avérées insuffisantes car un temps d'exposition minimal de 5 µs est encore trop grand pour visualiser des écoulements dont la vitesse dépasse quelques mètres par seconde.

Nous avons alors utilisé des circuits de logique programmable (PLD) de plus grande capacité, permettant de supprimer le boîtier de mémoire RAM et d'obtenir des temps d'exposition minimale de l'ordre de 50 ns avec une précision de 10 ns (circuit Altera EPM7128-10) .

L'exposition multiple dans une même image permet des mesures d'écoulement rapide. Par exemple, dans le cas de l'image ci dessus, avec une exposition minimale de 100 ns, nous aurions pu figer des écoulements d'une vitesse de  $0.13 \cdot 10^{-3} / 100 \cdot 10^{-9} = 1300 \text{ m/s}$  !

Il est nécessaire de relativiser cette valeur. En effet, la quantité de lumière reçue par le capteur CCD de la caméra est proportionnelle à la puissance lumineuse mais aussi à la durée de l'exposition. Par conséquent, l'utilisation de ces faibles temps d'exposition impose une très forte puissance lumineuse, ce qui n'est pas toujours possible.

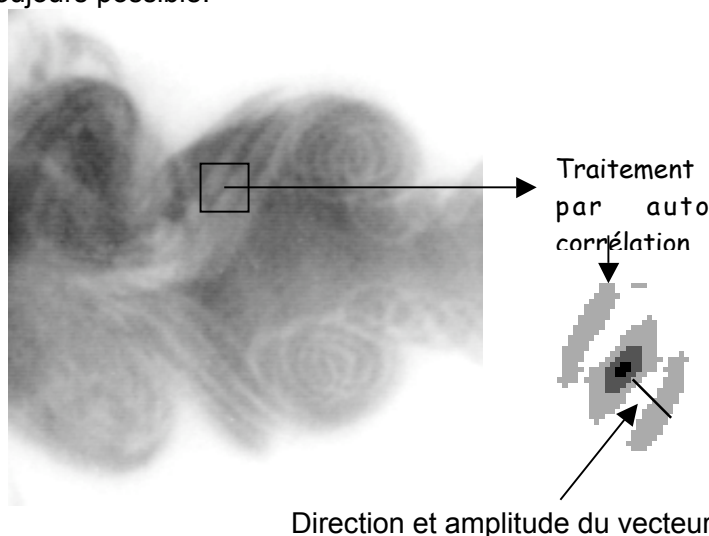


Figure 4 : exemple d'image multi exposée et d'un résultat de vecteur vitesse sur un extrait

L' imagerie repérée dans l'image donnée figure 4, dans laquelle les trois frontières sont nettes, est extraite, puis un calcul de corrélation avec elle-même est effectué. La direction du vecteur vitesse ainsi obtenu ne peut être connue car rien d'indique dans quel ordre sont enregistrées les vues. C'est la technique dit de « **l'auto-corrélation** ».

Ce travail a été réalisé en équipe avec Robert Fouquet, Michel Courbon et Jean Paul Schon au LTSI (se référer aux annexes 6.1 pour la production scientifique et 6,5 pour les coopérations).

### 3.3.1.2.2 Plateforme à 100 i/s

La principale limite de la plateforme précédente est la fréquence image de 25 i/s. Cette longue durée entre deux images successives (40 ms) ne permet pas de suivre dans le temps des structures mesurées. Deux possibilités ont été explorées : disposer d'une caméra ayant une fréquence plus rapide (développement d'une caméra CCD à 100 i/s) et un système composé de deux caméras visant la même scène mais avec un décalage temporel remplaçant le temps inter exposition de l'enregistrement d'une image bi-exposée. Cette deuxième technique présente un avantage important, l'algorithme de traitement, l'**inter corrélation** permet de connaître la direction du vecteur vitesse contrairement à la méthode d'auto corrélation. Nous allons revenir à ces deux techniques.

L'autre défaut des caméras à vidéo standard réside dans le principe du mode entrelacé (images des lignes paires, puis images des lignes impaires). Cette technique a été retenue pour la télédiffusion afin d'augmenter la fréquence de rafraîchissement des écrans sans augmenter la bande passante.

Aussi, nous avons entrepris le développement d'une caméra 100 i/s. Ce développement a fait l'objet d'un travail de thèse : Zara 1999.

Ne disposant pas de moyens technologiques pour le développement d'un capteur CCD, nous avons sélectionné le capteur le plus performant, au vue de nos préoccupations. Ce choix s'est porté vers le fabricant EEV (Grande-Bretagne) et la référence CCD17.

Sa particularité était de disposer de 2 sorties de données. Cette structure interne pourrait se comparer avec deux capteurs mis bout à bout sur le même substrat. Chacun de ces 2 capteurs présente une résolution de 256 pixels par ligne et 512 lignes, ce qui donne un capteur d'une résolution de 512 par 512 pixels. Cette structure est rendue nécessaire par la limite en fréquence des sorties des capteurs CCD fixée à 15 MHz par la technologie de fabrication. Cette fréquence multipliée par les 2 sorties et le nombre de pixels à sortir du capteur donne un temps de sortie légèrement inférieur à 10 ms, d'où une fréquence image de 100 i/s.

Ce capteur est organisé en 2 plans images, un plan mémoire et un plan actif. Cette solution autorise la sortie des pixels de l'image n pendant l'intégration de l'image n+1, donc le temps de sortie des pixels impose la cadence de la caméra (figure 5).

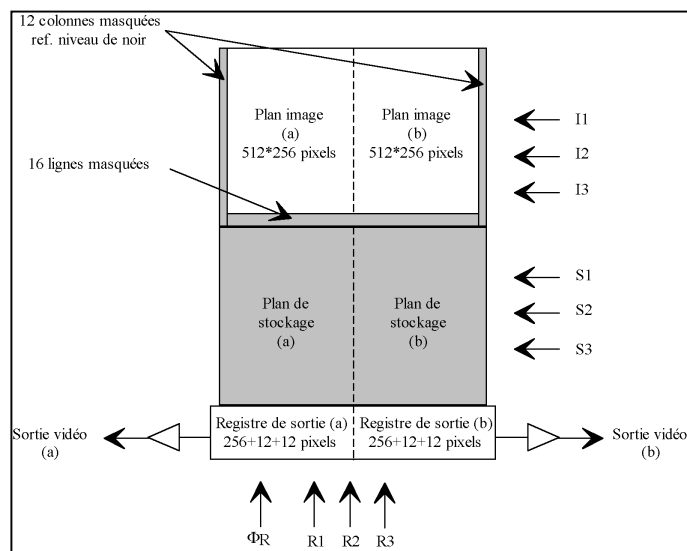


Figure 5 : synoptique interne du capteur d'image CCD17

Un capteur CCD fonctionne comme un registre à décalage, décalage du plan « pixels actifs » au plan « mémoire », décalage des lignes une par une dans le registre de sortie et décalage des pixels un par un sur la sortie analogique. Cette sortie fournit donc une tension formée par la juxtaposition des tensions de chaque pixel. La tension fournie par un pixel est proportionnelle à la quantité de lumière reçue.

La génération des 9 signaux a été obtenue par programmation d'un circuit FPGA. Ce générateur assure également la gestion globale des différentes phases de lecture du capteur. Ces durées sont réalisées par les compteurs lignes (10 bits) et pixels (9 bits)(figure 6).

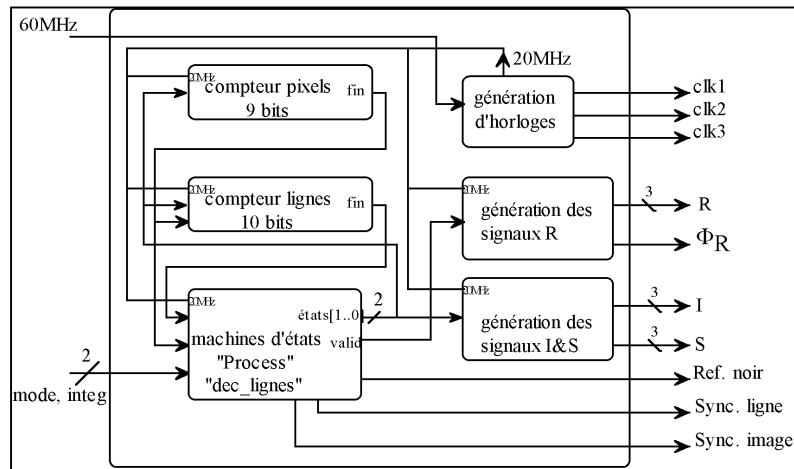


Figure 6 : schéma structurel du générateur d'horloges

Le capteur fournit un signal par sortie composé de la juxtaposition de la tension de chaque pixel, mais ce signal doit être mis en forme pour pouvoir être transmis vers une carte d'acquisition des images : amplification, suppression du niveau continu, filtrage et conversion en un nombre sur 8 bits. Ces deux nombres sont alors transmis sous forme normalisée RS422 vers une carte d'acquisition placée dans un micro-ordinateur (Carte Magic de Matrox)(figure 7).

Dans les phases de mise au point de la netteté par exemple, une visualisation sur un écran est indispensable. Aussi, une visualisation des images captées sur un écran au format VGA a été réalisée autour d'une mémoire RAM double port.

Cette mémoire sert de stockage tampon entre le débit de données issues de la caméra : 16 bits à 20 MHz et la fréquence d'un signal vidéo compatible avec la norme d'un signal vidéo VGA : 600 lignes de 800 pixels à 60 Hz. L'écriture et la lecture s'effectuent de manière asynchrone. Le signal vidéo obtenu après une conversion numérique – analogique est amplifié avant d'être transmis à l'écran ainsi que les deux signaux de synchronisation verticale et horizontale (figure 7).

Le débit d'information de cette caméra ne permet pas d'utiliser des systèmes de stockage habituels, type magnétoscope. Le débit moyen d'information est égal à la taille d'une image multipliée par le nombre d'image par seconde : 512x512 pixels par 100 i/s soit 26 214 400 pixels par seconde ou 26,2 Mo/s. Compte tenu des durées de synchronisation, le débit de pointe est plus fort car cette caméra fournit deux voies codées sur 8 bits avec une fréquence pixel de 20 Mhz, soit un débit de pointe de 320 Mo/s.

Nous disposons d'une carte d'acquisition Matrox (Magic) avec un module d'entrée de données numériques couleurs, 3 entrées 8 bits (1 entrée par couleur). Une des trois n'est donc pas utilisée. La capacité de stockage RAM de cette carte limite à 8 le nombre d'images successives pouvant être enregistrées, ce qui est faible.

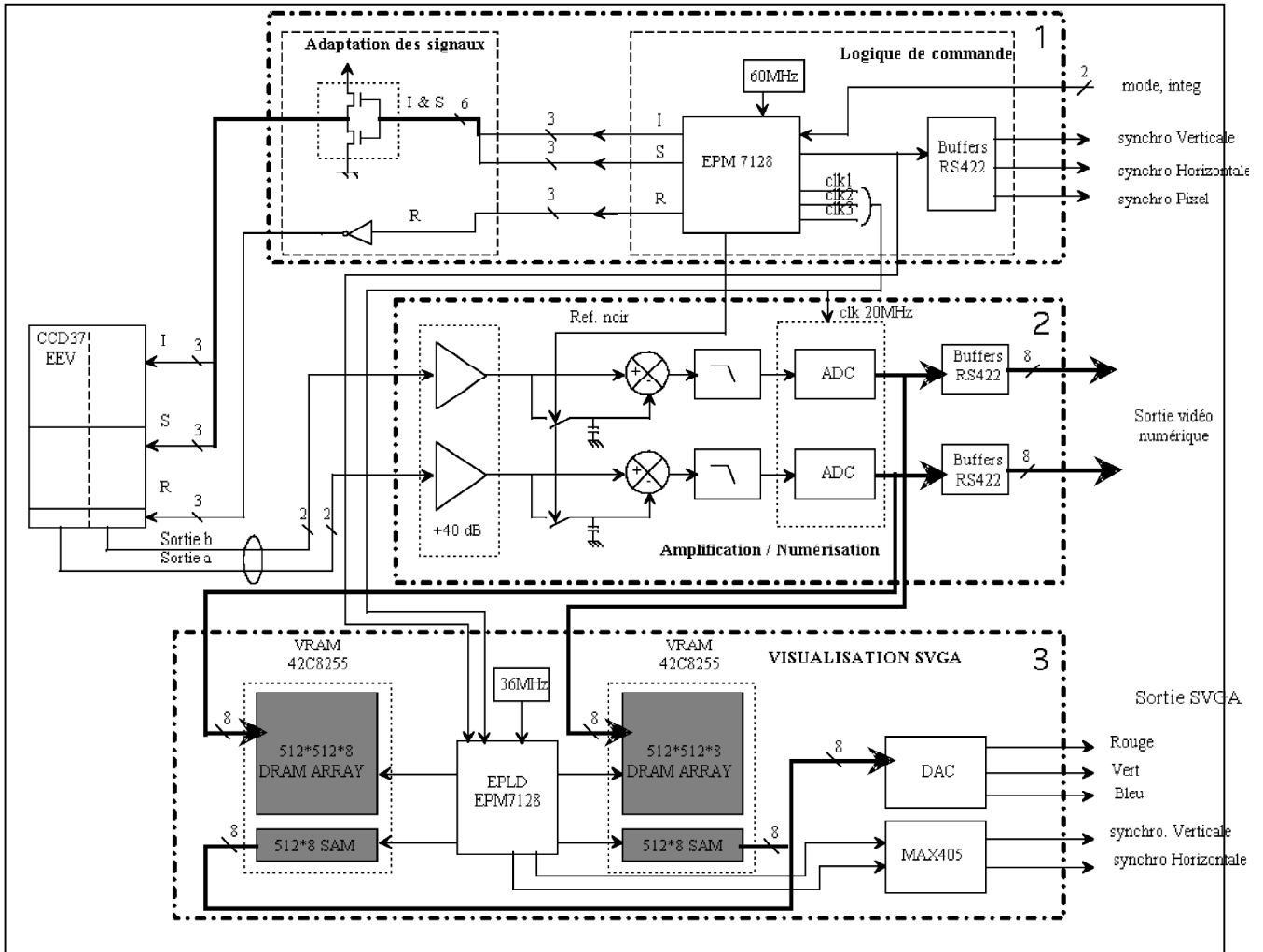


Figure 7 : Schéma structurel de la caméra TSI17 développée au laboratoire.

Le développement d'une carte de stockage indépendante d'un micro-ordinateur s'avérait indispensable. Nous avons utilisé des barrettes de mémoires RAM dynamiques intéressantes à la fois pour des raisons de coût et de disponibilité. En effet, la taille d'image étant de l'ordre d'un quart de Mo (méga octets), fixer la capacité mémoire de cette carte de stockage revient à choisir le nombre d'image à stocker. Ce choix s'est porté sur 256 images successives soit environ 2 secondes et demi d'enregistrement.

L'autre difficulté à surmonter est la lecture de ces images stockées dans la mémoire RAM par un micro-ordinateur. Nous avons choisi d'utiliser les propriétés du port parallèle des micro-ordinateurs de type PC dans le mode ECP. Ce mode avait été développé par les constructeurs pour permettre le dialogue avec une imprimante (figures 8 et 9).

Cet ensemble offre un débit de transfert de l'ordre de 2 images par seconde avec un affichage des images sur l'écran du PC et de 7 à 8 images par seconde en écriture directe sur un disque dur.

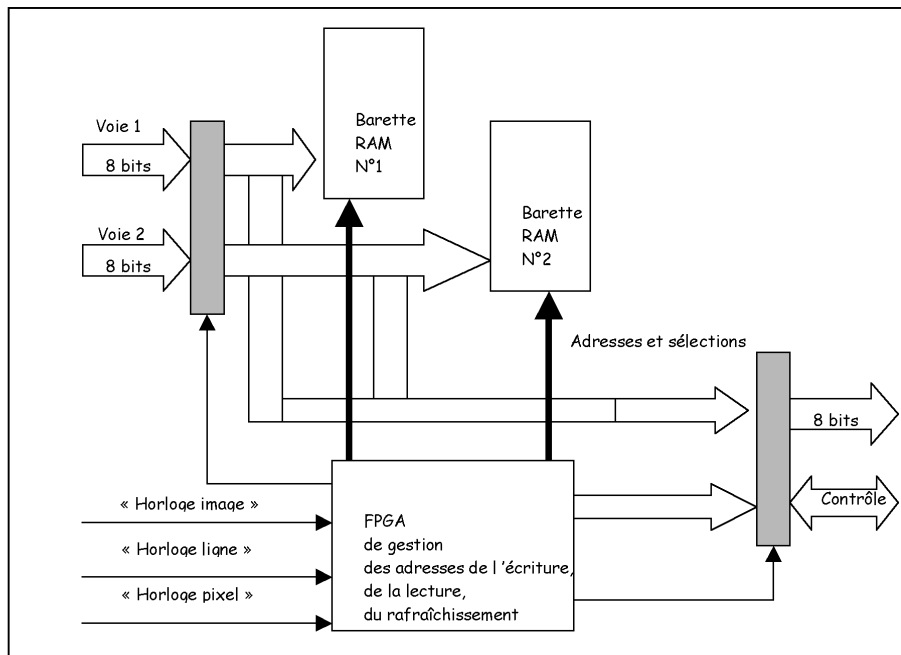


Figure 8 : schéma structurel de la carte de stockage :

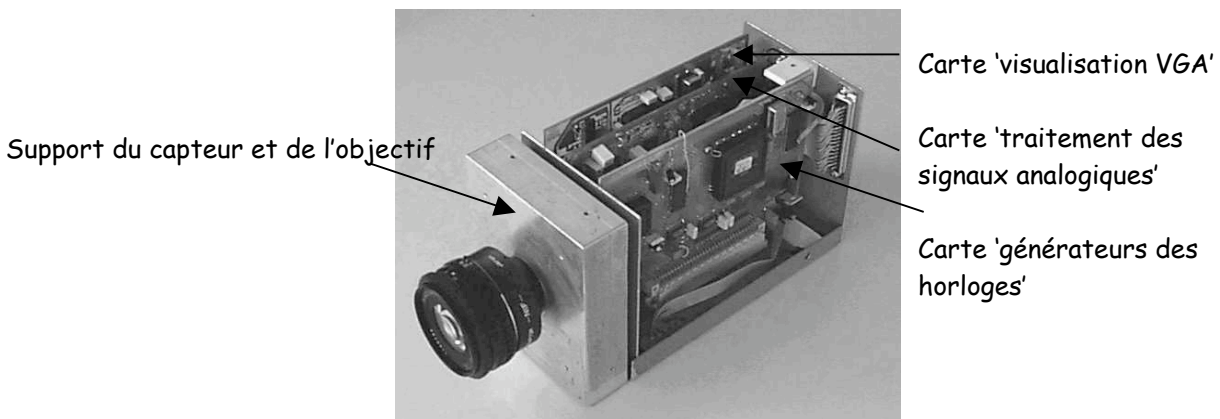


Figure 9 : Photographie de la caméra réalisée

En résumé, cette caméra avec son intensificateur peut fonctionner dans trois modes différents, le mode mono exposition (figure 10-a), le mode bi exposition (figure 10-b) et un mode dit 'vidéo instantanée' qui consiste à commander l'ouverture de l'intensificateur de l'image en cours à la fin de la période image, puis au début de la période image sur l'image (figure 10-c).

Le boîtier de synchronisation permet de générer des impulsions d'une durée minimale de 50 ns, des temps inter exposition dans le cas de la bi exposition minimal de 1  $\mu$ s. Dans le mode vidéo instantanée, le temps d'inter exposition minimal est de 330  $\mu$ s, valeur imposée par le fonctionnement de la caméra.

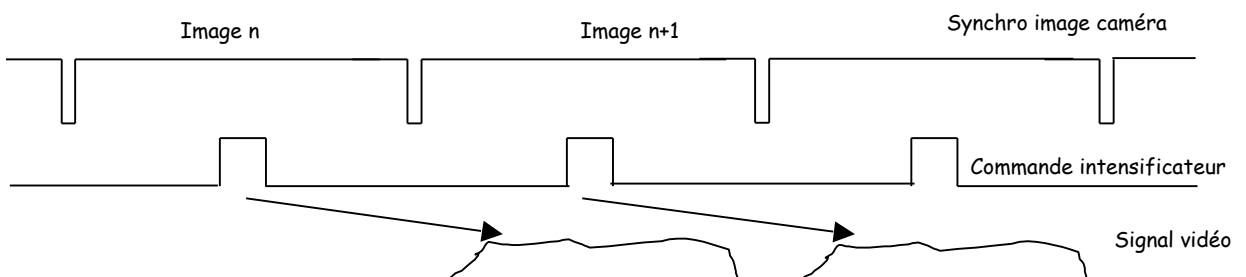


Figure 10-a : chronogrammes du mode 'mono exposition'

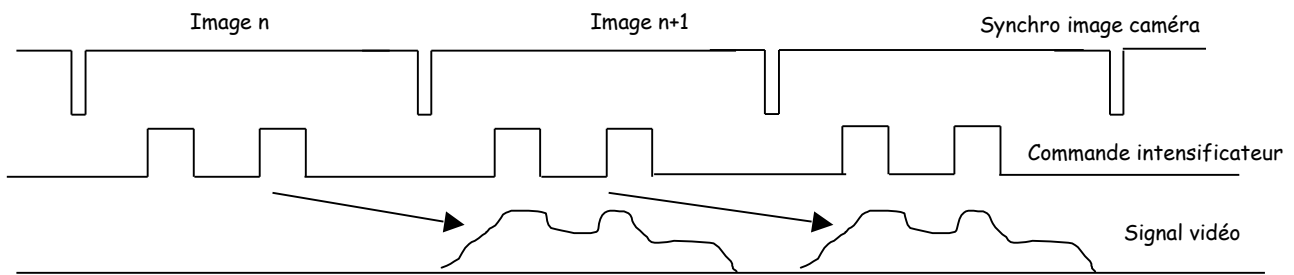


Figure 10-b : chronogrammes du mode 'bi exposition'

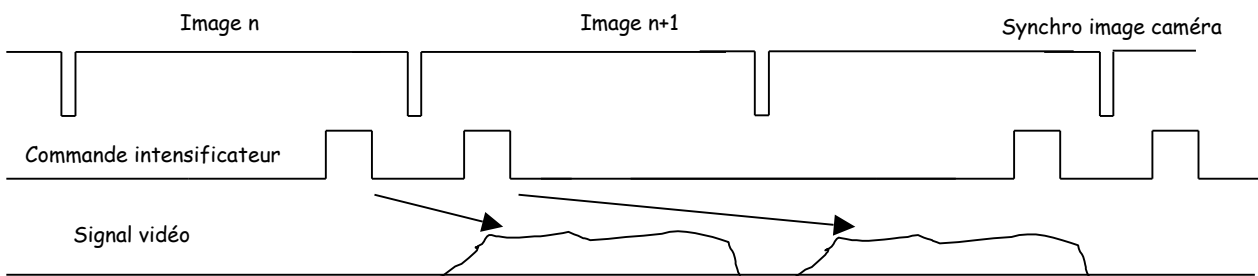


Figure 10-c : chronogrammes du mode 'vidéo instantanée'

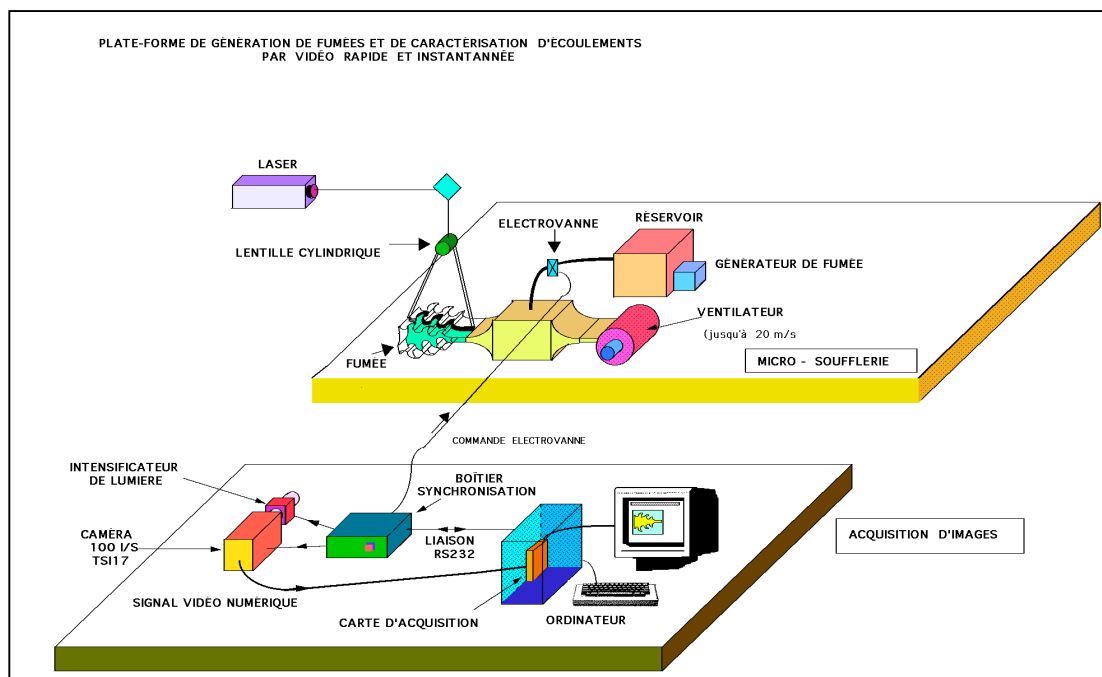


Figure 11 : schéma représentant la plate-forme 'TSI17' complète

Ce travail a été réalisé en équipe avec Robert Fouquet, Viktor Fischer, Henri Zara et Jean Paul Schon au LTSI (se référer aux annexes 6.1 pour la production scientifique et 6,5 pour les coopérations).

### 3.3.1.2.3. Plateforme bi caméras

Malgré toutes les méthodologies décrites précédemment, les performances de nos systèmes sont encore insuffisantes. Aussi, nous avons mis en œuvre une autre **configuration nommée 'face – face'**. Ce système comporte deux caméras, la caméra TSI17 à 100 i/s et la caméra Hamamatsu à 25 i/s, toutes deux intensifiées. La méthode proposée utilise deux caméras visualisant le même champ. Simplement, la commande d'ouverture de l'intensificateur de la seconde caméra est légèrement décalée par rapport à la commande d'ouverture de l'intensificateur de la première caméra. Cette solution permet d'obtenir deux images séparées et de pouvoir utiliser la technique de l'inter corrélation avec ses avantages (figure 12).

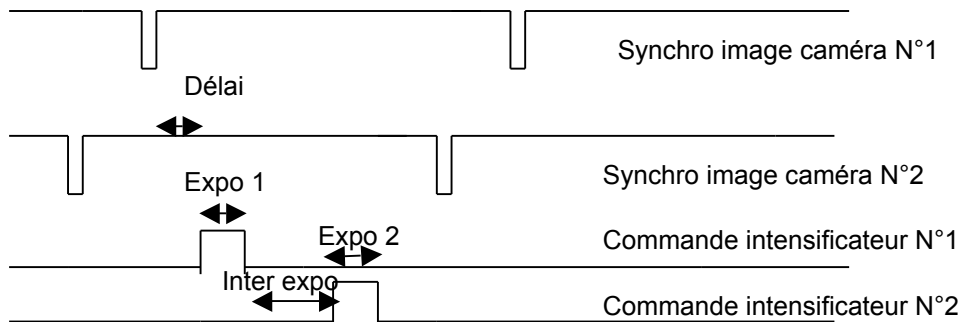


Figure 12 : chronogrammes de commandes de deux intensificateurs

Cette deuxième version du boîtier de synchronisation permet la gestion de deux caméras qui peuvent avoir des cadences différentes l'une de l'autre. La valeur minimale du temps d'inter exposition est limitée par les performances des composants électroniques (50 ns).

En considérant la figure 12 nous constatons que parmi les deux plages possible d'exposition, la plus grande présente la meilleure solution. C'est la mesure du décalage des top de synchro ( $\Delta T$ ) des deux caméras qui nous permet ainsi de choisir la meilleure plage d'exposition. Par suite, l'issue de ce choix nous permet de synchroniser l'exposition avec le top de synchro de la première ou de la seconde caméra.

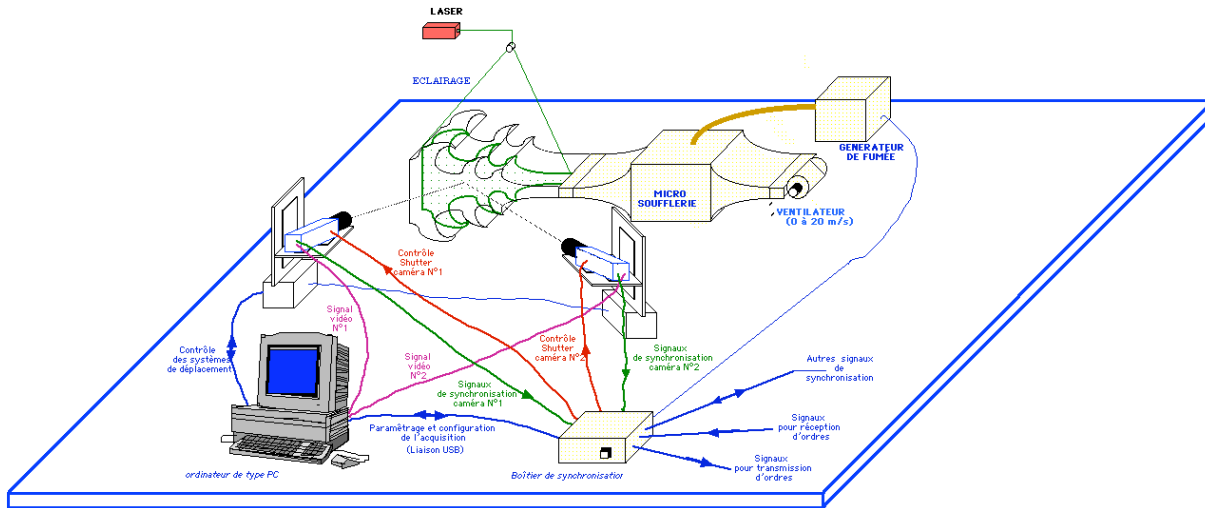
La mesure de  $\Delta T$  pose deux problèmes. En premier lieu, le rapport des périodes image n'étant pas entier, la valeur de l'intervalle  $\Delta T$  doit être mesurée à chaque période. Ensuite, nous pouvons constater qu'il est impossible de faire en même temps la mesure et la prise de décision sur le départ de la commande d'exposition. Il apparaît donc nécessaire de mesurer  $\Delta T$  sur la période précédente, et de la prédire pour la période courante. Cette prédiction est aisément obtenue par la connaissance du rapport des fréquences images (une mesure préalable des fréquences image est donc nécessaire).

La structure interne de cette version du boîtier est toujours identique, un micro contrôleur (Intel 96C196) pour la gestion des phénomènes lents (déclenchement, dialogue avec le micro ordinateur de configuration, mesures de fréquences images, calcul de décalé, ...) et des circuits de logiques programmables (FPGA, Altera EPM7128) pour les signaux rapides (décalé, expo 1, inter expo, expo2).

### Configuration stéréoscopique

Cette configuration sort de la technique PIV classique offrant des champs de vitesse dans un plan, donc à 2 dimensions (2D). Elle permet après un étalonnage des 2 caméras sur une mire fixe d'obtenir la troisième composante du vecteur vitesse, à condition que cette troisième composante soit de faible amplitude vis à vis des deux autres composantes, d'où le nom donné à cette technique : PIV 3C (3 composantes)(figure 13).





PLATEFORME DE MESURE DE VITESSES D'ÉCOULEMENT D'AI PAR UTILISATION DE LA TECHNIQUE DE LA VIP (VÉLOCIMÉTRIE PAR IMAGE DE PARTICULE) CONFIGURATION STÉRÉOSCOPIQUE

Figure 13 : Schéma de la configuration stéréoscopique

Une mise en œuvre de la configuration 'face-face' ou stéréoscopique nécessite une phase de calibration. Cette phase permet de connaître les caractéristiques de l'ensemble caméra et système optique (objectifs) et leurs positions relatives d'une caméra par rapport à l'autre. Ces informations vont ensuite permettre de modifier l'image d'une des deux caméras afin de la rendre compatible avec l'image de l'autre caméra.

Le principe d'étalonnage repose sur la caractérisation de chacune des caméras par l'enregistrement d'une série d'images d'une mire connue à différentes positions spatiales (figure 14).

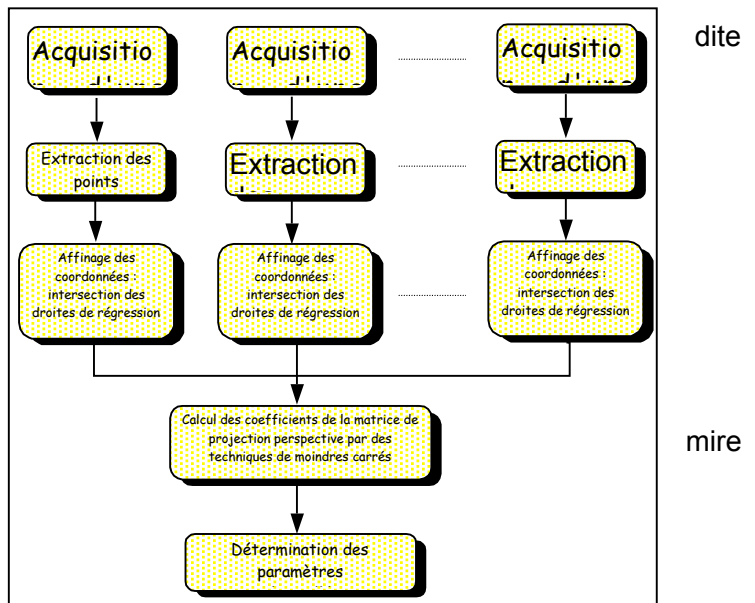


Figure 14 : organigramme de la méthode de calibration d'une caméra

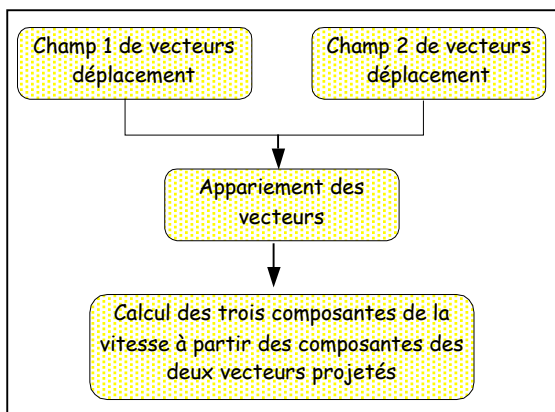


Figure 15 : organigramme de la phase d'appariement

Ensuite, avec les images enregistrées sur les écoulements, les champs de vecteurs sont calculés, une dernière étape est nécessaire pour obtenir un champ de vecteurs en 3D. Cette phase d'appariement permet d'adapter un champ de vecteurs pour le mettre à l'échelle de l'autre champ de vecteurs à partir des données de la phase de calibration (figure 15).

### Boîtier de synchronisation version 3

La structure interne de cette version du boîtier est toujours identique, un micro contrôleur (Intel 96C196) pour la gestion des phénomènes lents : déclenchement, dialogue avec le micro ordinateur de configuration, et des circuits de logiques programmables (FPGA, Altera EPM7128).

Le synoptique présentant la structure de ce boîtier est donné figure 16.

L'organisation structurelle est basée sur un bloc « timer » dont le but est de générer une impulsion d'une durée fixée par un paramètre avec un retard vis à vis de l'ordre de déclenchement programmé par un autre paramètre. Ces impulsions sont prévues pour la commande des intensificateurs ou des signaux de contrôle des caméras. Les 3 timers du boîtier peuvent fonctionner de manière indépendante, synchronisés les uns avec les autres ou en boucle (générateur de signal).

Chaque timer peut être déclenché de multiples manières et le choix est configurable depuis le micro ordinateur. Une combinaison logique est possible entre les entrées (synchro caméra, ordre direct, autre timer, ...).

Lorsque les timers sont synchronisés, le boîtier travaille dans le mode multiple exposition sur une caméra ou deux si elles sont parfaitement synchrones. Le mode indépendant est prévu pour la configuration « face – face ».

Les temps des impulsions et des retards sont programmable par gamme :

50ns à 10 $\mu$ s, 1 $\mu$ s à 100 $\mu$ s, 100 $\mu$ s à 1ms, et ainsi de suite jusqu'à une seconde.

Avec une précision de 10% pour la première gamme et 1% pour les autres.

Afin de limiter la taille en nombre de bit des paramètres, il a été créé une série d'horloges de fréquences décroissantes obtenues par division de l'horloge principale. La valeur des paramètres et du choix de la fréquence sont sélectionnés par le logiciel de configuration installé sur le micro ordinateur.

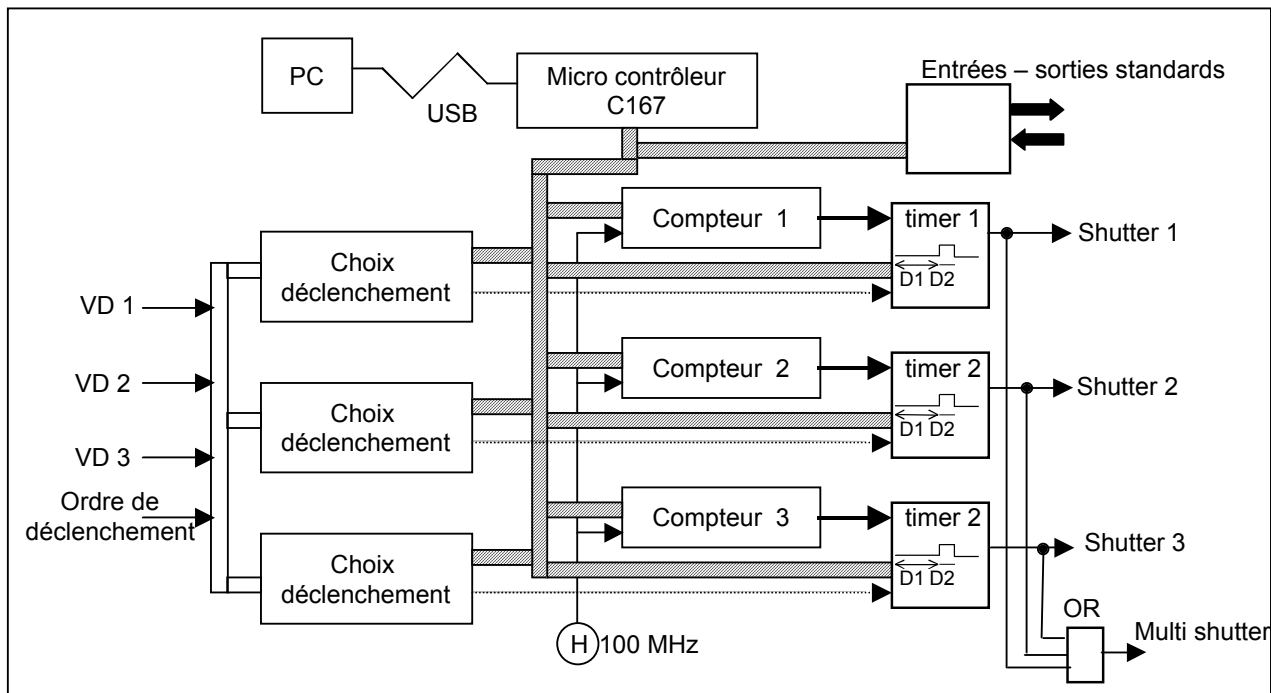


Figure 16 : Synoptique de la version 3

Ce travail a été réalisé en équipe avec Robert Fouquet, Ebi Tafazzoli, Laurence Riou et Sébastien Coudert au LTSI (se référer aux annexes 6.1 pour la production scientifique et 6,5 pour les coopérations).



### **3.3.1.3 Types d'écoulements étudiés**

### 3.3.1.3 Types d'écoulements étudiés

Nous allons décomposer ce chapitre en 4 sous ensembles :

- PIV sur jet d'air rond, soufflerie 'Europiv'
- PIV et calculs directs sur jet libre à faible vitesse
- Suivi de frontières et étude des instabilités
- Etude du charriage des boues torrentielles
- Système d'optimisation des paramètres de réglage en PIV

#### 3.3.1.3.1 Mesures de champs de vitesse d'un jet d'air rond programme européen 'EUROPIV'

Dans le cadre du projet européen EUROPIV, relevant du programme Brite/EuRam et coordonné par le Laboratoire de Mécanique de Lille (URA CNRS 1441 - Pr M. Stanislas), nous avons participé à deux des cinq tâches du projet. Ce projet a pour but de faire une synthèse, une confrontation et des développements sur le plan matériel et méthodologique dans le domaine de la PIV, en vue d'appliquer cette technique aux grandes souffleries et aux turbomachines. La première tâche qui nous concernait a pour objet la comparaison des systèmes d'acquisition d'une part, à l'aide d'une même soufflerie, et des méthodes de dépouillement d'autre part, à partir d'images issues d'une base de données.

Nous avons donc eu la possibilité d'effectuer des mesures avec nos systèmes PIV sur une soufflerie étalon. Ces essais ont eu lieu dans les locaux de l'institut Franco-Allemand de St Louis, en parallèle avec les moyens d'enregistrement de micro holographie de l'institut (Mr Royer) et avec le système PIV bi-caméra du CORIA (Rouen)(Mr Allano).

Nous avons utilisé deux caméras placées dans la configuration « face – face ». La caméra TSI17 couplée à un intensificateur de lumière d'un côté du jet, et de l'autre une caméra de marque Hamamastu référencée C4215, intensifiée elle aussi.

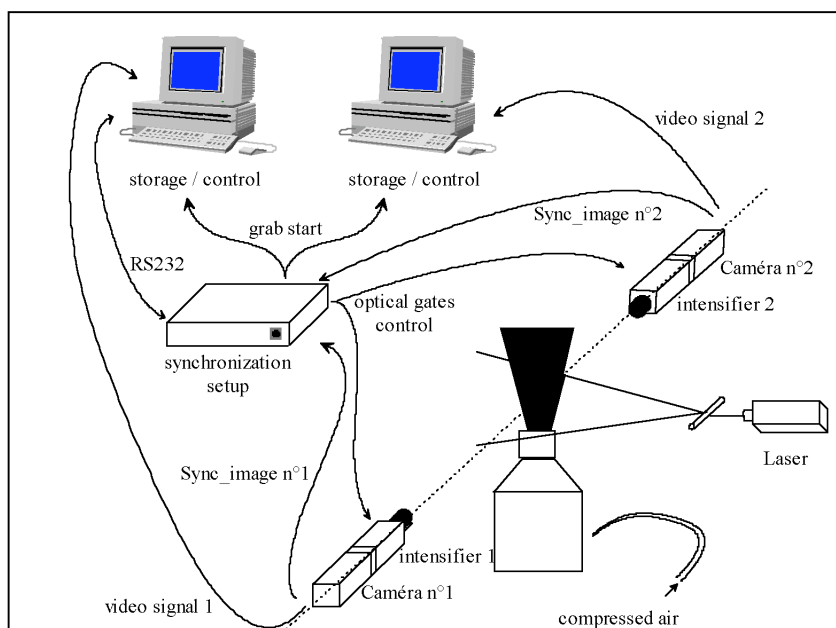


Figure 1 : schéma de l'installation utilisée lors des manipulations 'europiv'

Figure 2 : Photographie du jet d'air de la soufflerie 'europiv'

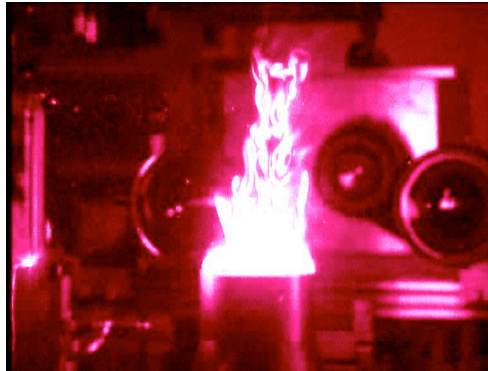
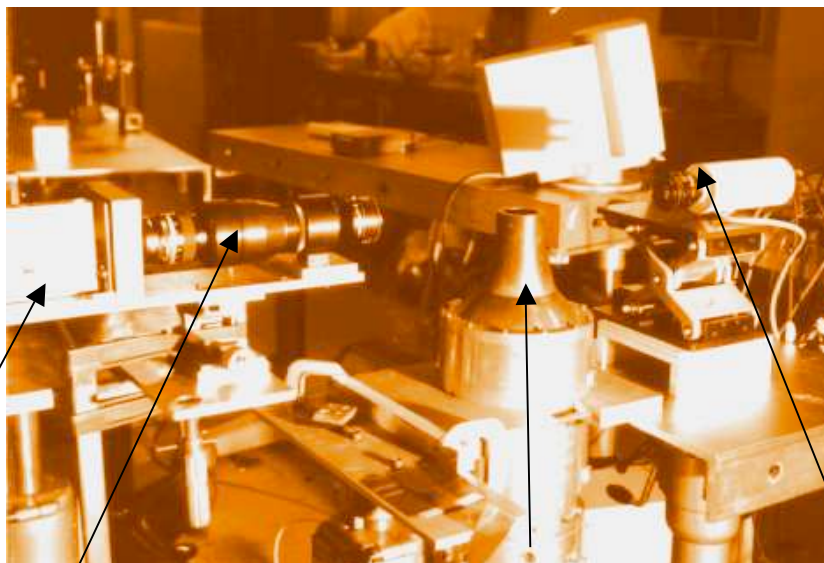


Figure 3 : Photographie de l'installation complète



Caméra TSI17 + Intensificateur

Soufflerie

Caméra Hamamatsu

Le jet étudié est un jet d'air dans de l'air axisymétrique, la buse d'injection est circulaire (diamètre de la buse = 50 mm). Ce fluide est ensemencé par des gouttelettes d'huile d'olive vaporisée d'une taille de l'ordre du micromètre (figure 15). La vitesse du jet à la sortie de la buse est d'environ 2 m/s, la taille des images obtenues est de 3,5 cm en horizontale. 512 pixels pour 35 mm donne 68  $\mu\text{m}$  par pixel. Un flou toléré d'un pixel impose une durée d'ouverture de 34  $\mu\text{s}$  (50 $\mu\text{s}$  programmée). Le temps d'inter-exposition est fixé à 500  $\mu\text{s}$  soit un déplacement d'environ 14 pixels.

### Configuration « face – face » et images mono exposées :

Une phase de calibration est indispensable dans le cas de cette configuration. Les caméras étant différentes (capteur, intensificateur, optique), le même objet n'aura pas la même taille sur les images. Il faut donc appliquer deux corrections : une réduction ou un grossissement de l'image d'une des deux caméras permet d'avoir la même taille sur les deux images, et un décalage droite/gauche et/ou haut/bas d'une des deux images afin d'avoir le même objet à la même position dans les deux images (figure 4).

Chaque image ayant été découpée en imagerie juxtaposées de 64 par 64 pixels, nous obtenons un vecteur vitesse par imagerie. Le calcul de corrélation est fait entre imagerie de chaque image. La valeur moyenne de tous ces vecteurs donne 1,7 m/s, ce qui reste compatible avec la valeur de 2m/s annoncée.

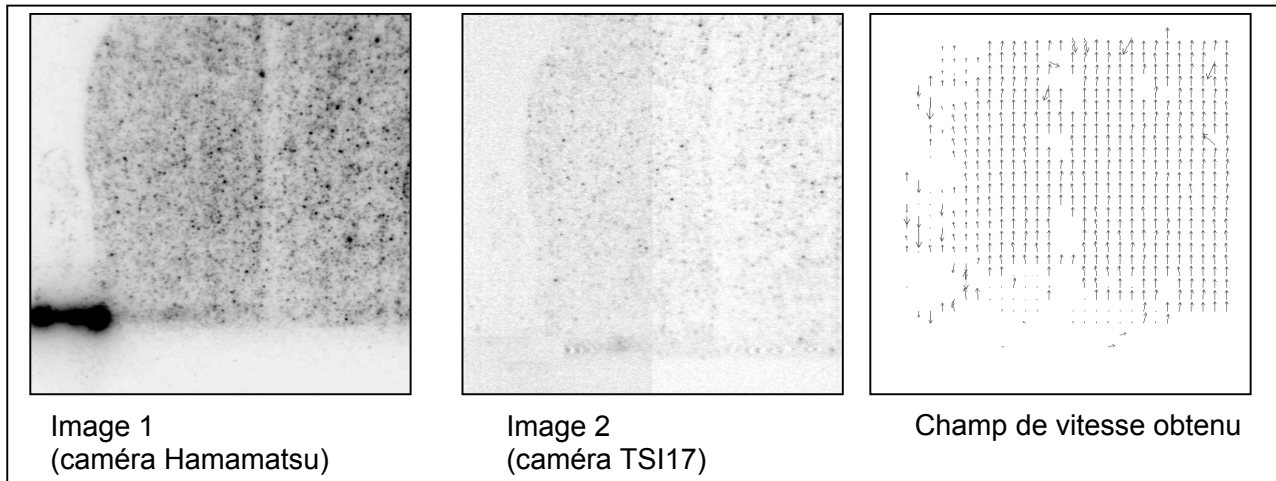


Figure 4 : exemple de paire d'image et résultats obtenus (face-face, mono exposées)

(Exposition de  $50\mu\text{s}$ , temps d'interexposition (entre les deux images) de  $500\mu\text{s}$ )

### Configuration « face – face » et images bi exposées

Dans cette expérience, nous avons commandé l'intensificateur de la caméra TSI17 pour un mode bi exposé (deux ouvertures de  $50\mu\text{s}$  séparées de  $500\mu\text{s}$ ) et l'intensificateur de la caméra Hamamatsu, comme précédemment pour un mode mono exposé ( $50\mu\text{s}$ ). La première exposition de la caméra TSI17 est identique à l'exposition de l'autre caméra.

Cette solution présente un avantage car elle combine deux situations. Une image bi exposée permet par le fait que les 2 vues sont enregistrées par le même support, d'éliminer toutes les différences entre les caméras et de ne pas tenir compte des défauts du système d'enregistrement, la mesure étant obtenue par comparaison. Cette méthode présente le défaut de ne pas fournir une information importante qu'est la direction du vecteur. En ayant l'image de la caméra Hamamatsu, nous pouvons dans l'image bi exposée repérer quelle vue est en avance sur l'autre. Ainsi, même si des erreurs importantes existent dans la phase de calibration, ces dernières n'interviennent pas dans le calcul des vitesses, celui-ci étant obtenu à partir de l'image bi exposée (figure 5).

Là encore, la valeur moyenne des amplitudes des vecteurs vitesses donne  $1,7\text{ m/s}$ , ce qui confirme le résultat précédent.

En pratiquant une corrélation entre l'image bi exposée et l'image mono exposée, nous obtenons deux informations pour chaque imagerie : le déplacement et la distorsion. Ce résultat va uniquement servir à fournir la direction des vecteurs (figure 6).

Ce travail a été réalisé en équipe avec Laurence Riou, Henri Zara et Thierry Fournel au LTSI (se référer aux annexes 6.1 pour la production scientifique et 6,5 pour les coopérations).

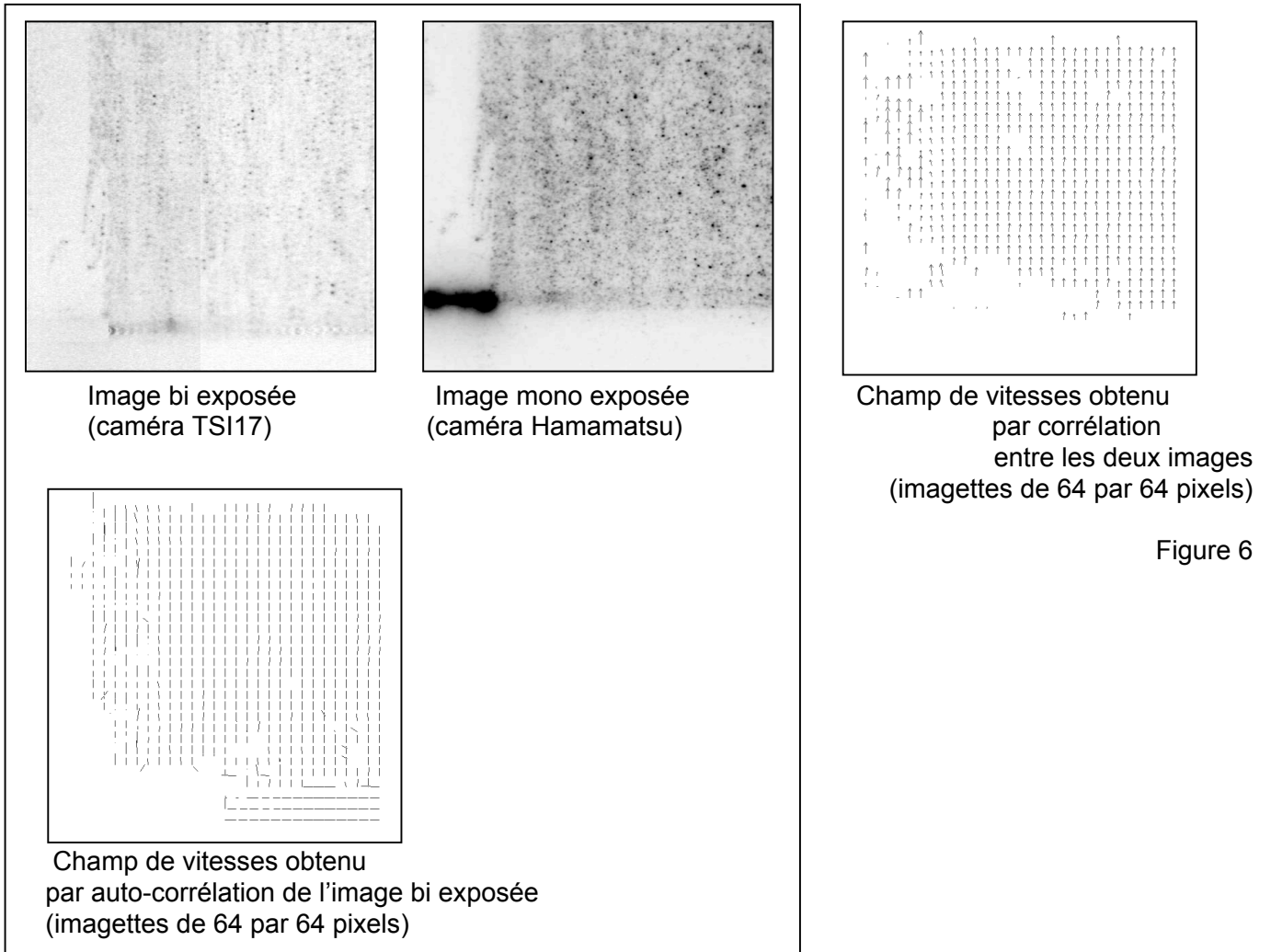


Figure 5 : exemple de paire d'image et résultats obtenus

### 3.3.1.3.2 PIV et calculs de vitesses de jet libre à faibles vitesses

La thématique de recherche abordée ici se développe autour de la **caractérisation des écoulements** à faible nombre de Reynolds (de 600 à 2000). Plus précisément, le jet étudié est un jet d'air libre à buse circulaire.

Ces travaux ont été et sont réalisés en commun avec un laboratoire de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir en Tunisie. Ce laboratoire (UMMFT : Unité de métrologie et de mécanique des fluides et de thermique) a mis au point une installation expérimentale particulièrement performante permettant l'étude détaillée des instabilités des jets laminaires et l'évolution de ces instabilités vers la turbulence (figures 6 et 7).

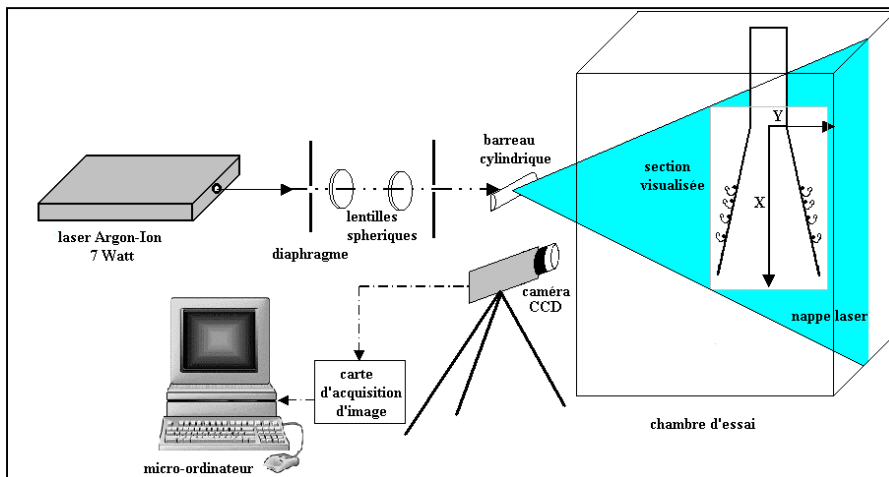


Figure 6 : Schéma de l'installation expérimentale de Monastir

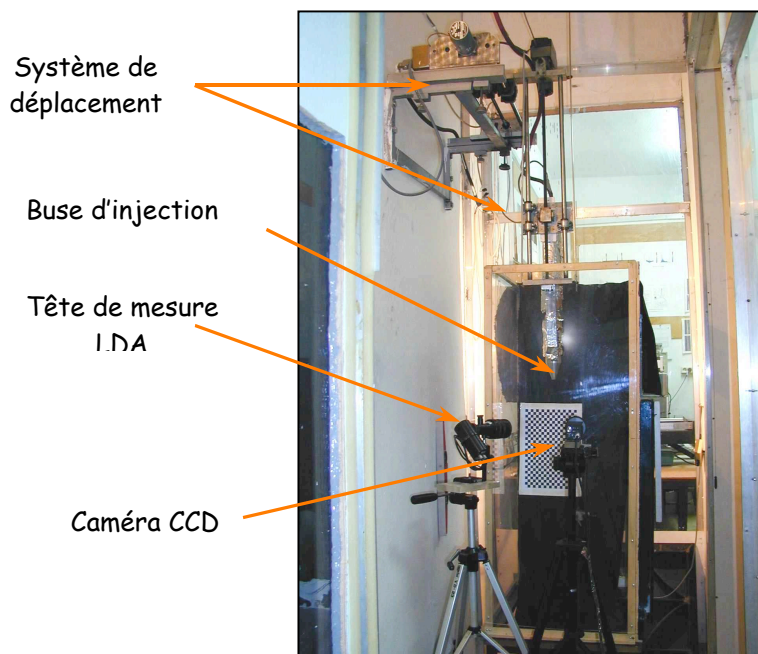


Figure 7 : photographie de cette installation

D'un point de vue général, le projet vise à fournir des données expérimentales sur les **instabilités** d'un **jet gazeux** en sortie d'injecteur présentant une grande longueur laminaire (de l'ordre de 10 à 15 cm) pour un nombre de Reynolds voisin de 1000. Les applications industrielles d'un tel jet



sont nombreuses mais encore peu optimisées en raison du manque de fiabilité des modèles disponibles. Parmi ces applications, on peut citer en particulier:

- l'épithaxie utilisant un jet de gaz vecteur,
- le refroidissement et le séchage par jets ronds unitaires ou en réseaux matriciels,
- l'isolation thermique par rideau d'air.

Plus précisément, l'objectifs de ces travaux est d'analyser les phénomènes d'apparition des **modes d'instabilités** du jet. La caractérisation des modes d'instabilités visibles dans ce type d'écoulement est d'une grande importance dans la mesure où leur amplification conduit à la transition vers la **turbulence**. Ces modes se propageant sur la ligne frontière du jet, leurs évolutions spatio-temporelles (en particulier des **fréquences caractéristiques**) peuvent être obtenues.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à des **profils de vitesse dans la zone laminaire** du jet. Le but est de pouvoir caractériser l'écoulement en connaissant le profil de vitesse à l'injection. Cette information est très importante pour effectuer une simulation numérique de l'écoulement. Aussi, il sera possible de comparer les profils de vitesse à différentes distances  $X$  de la buse d'injection (distances relatives à  $d$ , diamètre de la buse soit en  $X / d$ ) entre les mesures par PIV et le calcul numérique réalisé par Yassine Zaouali dans sa thèse.

Ensuite, nous allons effectuer des mesures de vitesse non plus dans le jet, mais à l'extérieur, afin de quantifier l'entraînement des molécules d'air par le jet. L'analyse de ces données devrait permettre une étude des phénomènes qui provoquent le passage de la zone laminaire aux instabilités puis à la turbulence (**Cartographie de vitesse des phénomènes d'entraînement**).

Cet entraînement pour être quantifié nécessite une visualisation des frontières du jet et simultanément une cartographie P.I.V. à l'intérieur et à l'extérieur du jet. Cette double cartographie est très difficile à obtenir car les valeurs de vitesses sont très différentes.

La troisième étape concerne l'étude de cette zone de transition entre la zone laminaire et la turbulence. En effet des instabilités naissent à la fin de la zone laminaire, se développent, s'amplifient, et provoquent des ralentissements et des rotations. Ainsi, la turbulence apparaît.

A partir des images du jet (figure 8), nous avons pu localiser ces instabilités. En suivant leurs évolutions dans l'espace et dans le temps, nous pourrions mieux connaître les mécanismes qui provoquent leur naissance et leur amplification, et peut être trouver leur équation de vie. Nous rechercherons d'éventuelles corrélations entre la vitesse d'injection du fluide et les fréquences caractéristiques des modes d'instabilités. Ces instabilités sont connues sous le nom d'ondes de Kelvin-Helmholtz (**suivi spatio-temporelle des ondes de KH**, Kelvin-Helmholtz). Nous détaillerons cette étude au paragraphe 3.3.1.3.3..

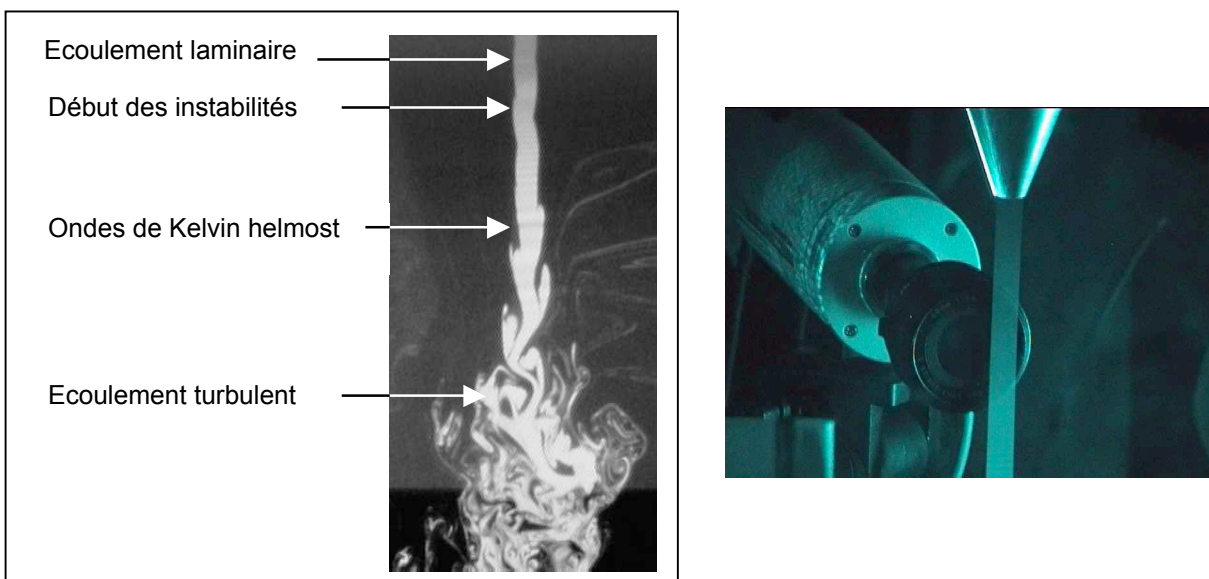


Figure 8 : Tomographie du jet de l'UMFT (nombre de Reynolds = 832)

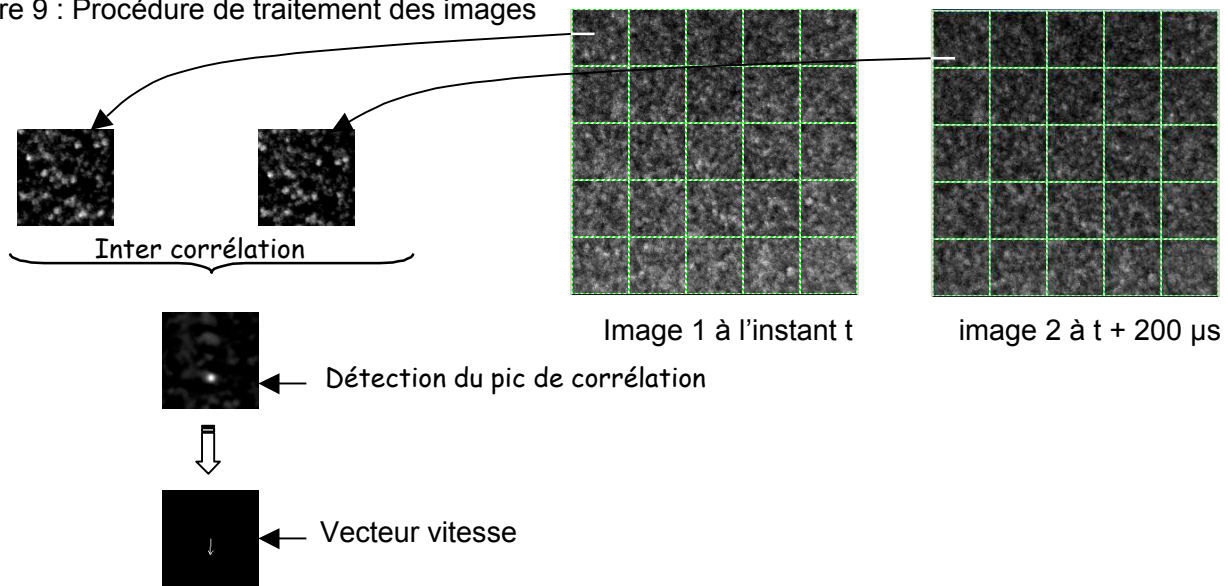
A droite une photographie du jet, de la buse d'injection et d'une caméra

### Profils de vitesse dans la zone laminaire

La caméra est placée à une distance précise de l'injecteur grâce à un système de déplacement motorisé : une première image est enregistrée avec l'injecteur dans le champ de vision, puis l'injecteur est déplacé. Une première série d'image a été enregistrée à  $X/D = 22$  (pour la première ligne de l'image) et une seconde à  $X/D = 24$ .

Chacune des images de la paire fournie par la caméra (DICAM PRO) est décomposée en imagettes carrées de 64 pixels de côté. Par un calcul de corrélation (figure 9), un vecteur vitesse est obtenu par imagette. Les valeurs des vitesses de chaque imagette sont ensuite moyennées sur l'ensemble des paires d'images (une centaine d'images). Ces valeurs moyennes permettent de tracer des profils de vitesse.

Figure 9 : Procédure de traitement des images



Sur la Figure 10, nous présentons un exemple de champ 2D de vecteurs de déplacement trouvé à la suite d'un traitement d'images par PIV sur deux images enregistrées avec un temps de séparation égal à  $250 \mu s$  pour un nombre de Reynolds égal à 830.

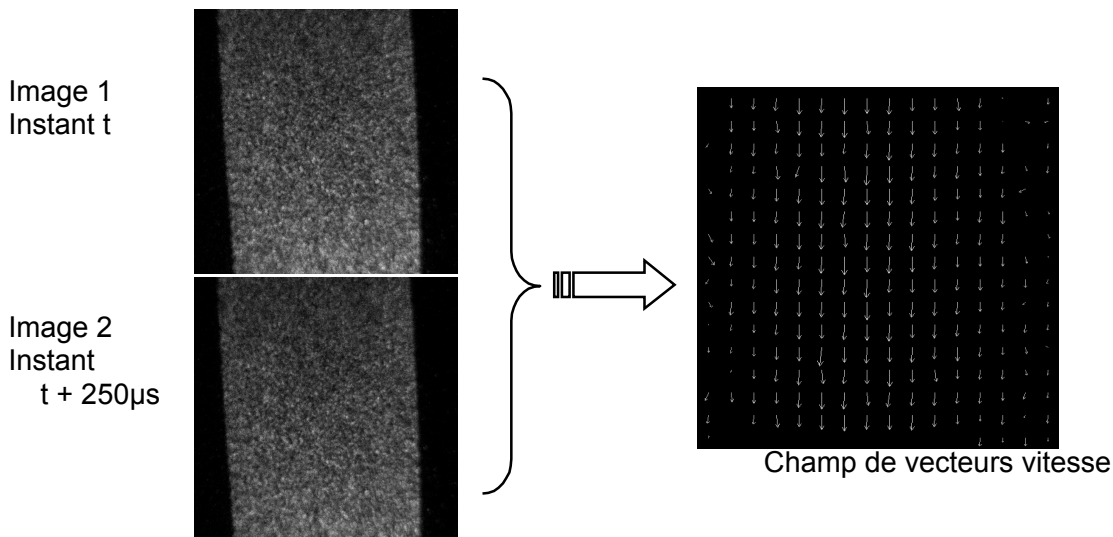


Figure 10 : exemple de champ de vecteur vitesse.  
(Champs de  $25 \times 20 \text{ mm}^2$ , temps d'exposition =  $50 \mu s$ ,  $\Delta t = 250 \mu s$ )

Nous récupérons une série de 140 champs de vecteurs déplacement dans les mêmes conditions ( $U_{inj} = 1,04 \text{ m/s}$ , temps d'exposition =  $50 \mu s$ , temps d'inter-exposition ( $\Delta t$ ) =  $250 \mu s$ , champ de  $25 \times 20 \text{ mm}^2$ ). Le champ moyen de vecteur déplacement est représenté sur la Figure 11.

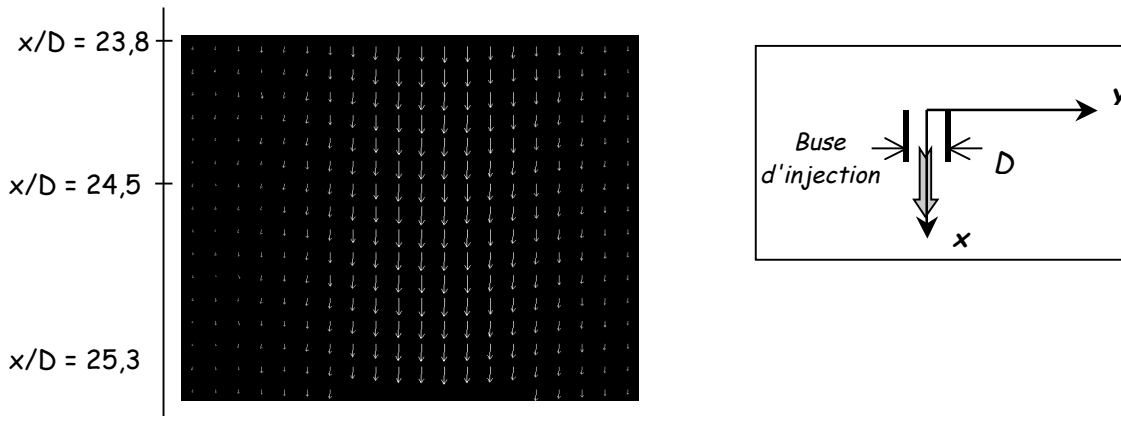


Figure 11 : Champ moyen de vecteurs déplacement (jet d'air,  $Re = 830$ )

Sur la Figure 12, nous représentons l'évolution de la vitesse moyenne dans trois sections différentes du jet ( $x/D = 23,8, 24,5$  et  $25,3$ ). Cette vitesse moyenne présente une allure gaussienne qui atteint son maximum sur l'axe du jet. La vitesse diminue et elle atteint des valeurs faibles tout en s'éloignant de l'axe du jet, les profils s'aplatissent à fur et à mesure que  $y$  croît. Il est à noter que sur les images de PIV acquises, nous remarquons un mouvement latéral de l'écoulement par rapport à l'axe du jet.

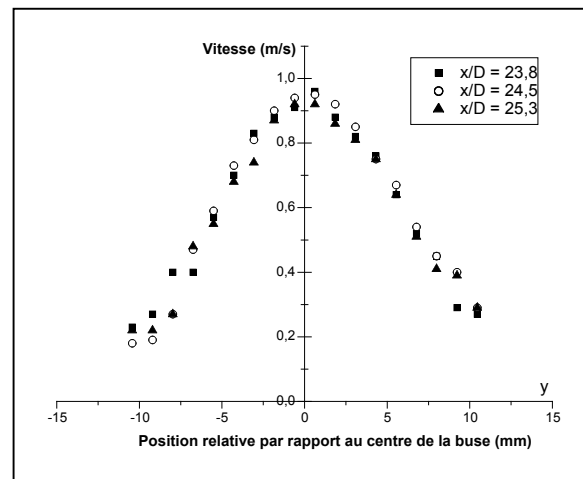


Figure 12 – Evolution radiale de la vitesse moyenne en différentes sections du jet d'air ( $Re = 830$ )

### Cartographie de vitesse des phénomènes d'entraînement

Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'analyse de l'écoulement entraîné par le jet d'air et la zone de raccordement du milieu extérieur avec la frontière du jet. Sur la Figure 13, le phénomène de l'entraînement est mis en évidence. Les deux images sont prises de deux séquences enregistrées à des instants différents, à des grossissements identiques et à temps d'exposition différents. Elles sont positionnées par rapport à la sortie de la buse. Nous avons présenté sur la même figure l'image de la zone interne du jet en vue d'analyser par PIV la zone de mélange et de raccordement du jet avec le milieu extérieur. Une visualisation quantitative de ce phénomène est donnée par la cartographie des vitesses mesurées par la technique PIV.

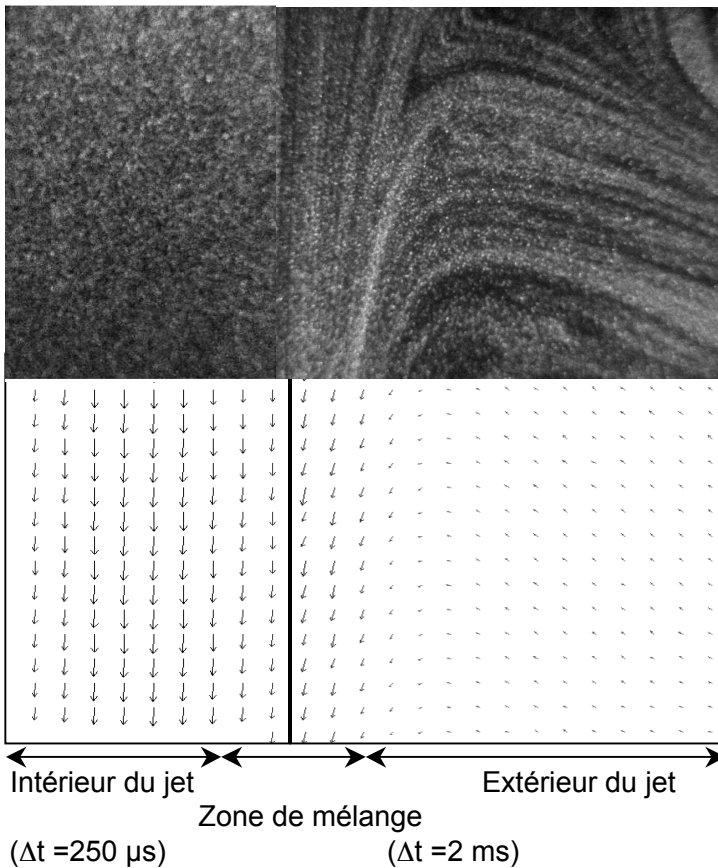
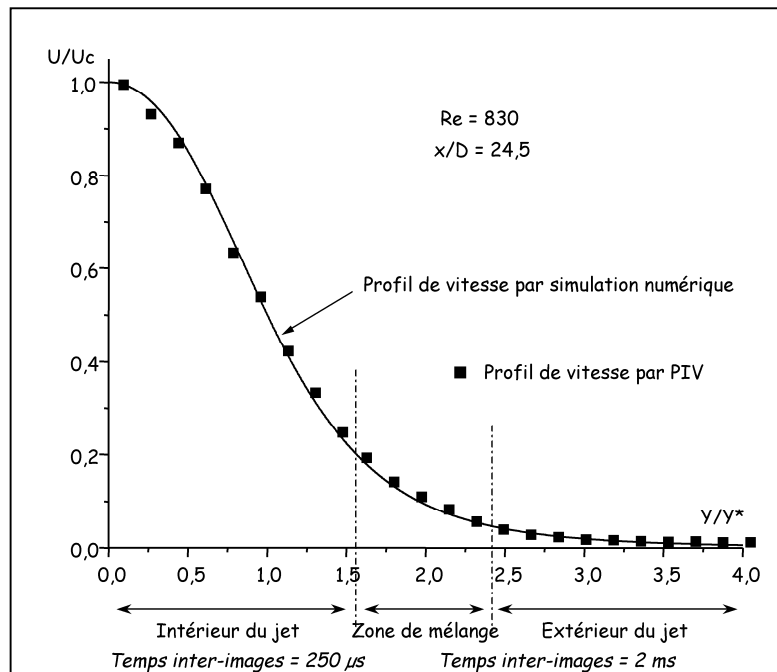


Figure 13-a : Tomographie laser à l'intérieur et à l'extérieur du jet pour  $Re = 830$  (temps d'exposition =  $50 \mu s$ )

Figure 13-b : Cartographie de la vitesse à l'intérieur et à l'extérieur du jet pour  $Re = 830$

**Comparaison Mesures / simulation numérique**

Nous comparons les résultats obtenus par la méthode expérimentale basée sur la technique de PIV et les résultats du code de calcul numérique déjà développé (Thèse Zaouali 2004). Pour le même nombre de Reynolds ( $Re = 830$ ) et pour un profil initial d'émission uniforme, nous avons choisi un profil expérimental à une hauteur  $x/D = 24,5$ . La comparaison montre que la vitesse adimensionnelle longitudinale mesurée par PIV vérifie de manière convenable celle calculée numériquement (Figure A l'extérieur du jet, nous disposons plus de points de mesures grâce images faites dans la zone d'entraînement. Sur cette figure,  $Y^*$  correspond à l'ordonnée transversale pour laquelle  $U = U_c/2$ .



14).  
de  
aux  
  
du

Figure 14 : Comparaison mesures / simulation d'un profil de la vitesse jet d'air ( $Re = 830$ )

**Remarques :**

De ces premières analyses, une première remarque importante est apparue : il existe un écart entre la notion de frontières du jet telle qu'elle a été obtenue par une des études présentées plus haut et

une autre définition de la taille du jet tirée à partir du profil des vitesses du jet. En juxtaposant les profils de vitesses obtenus par PIV et par PIV extérieure, on peut mettre en évidence une largeur du jet, qui est différente de la largeur obtenue lors l'étude des frontières.

L'explication la plus probable serait que la concentration des marqueurs dans le jet ne serait pas homogène dans la totalité du jet, et que l'entraînement d'air de l'extérieur du jet par le jet accentuerait le phénomène. Une étude théorique de la concentration des marqueurs qui pourrait confirmer cette hypothèse a été en partie faite par Yassine Zaouali.

### **Profils de vitesse sur un jet d'eau :**

La même méthodologie a été appliquée sur un autre écoulement. Au laboratoire TSI à St Etienne, une installation expérimentale est disponible. C'est un jet d'eau ascendant axisymétrique dans une cuve d'un mètre de haut (figure 15).

Les deux installation peuvent être réglées por obtenir un nombre de Reynold du même ordre de grandeur.

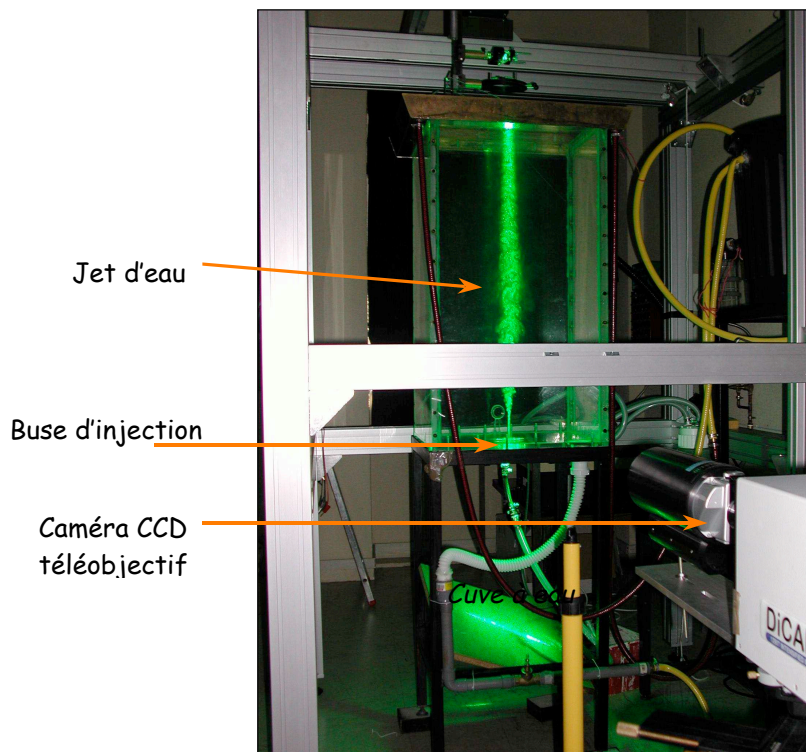


Figure 15 : Photo de l'installation expérimentale du jet d'eau du LTSI

Afin d'avoir des informations sur les propriétés et les caractéristiques de la zone du jet étudiée, nous procédons à un traitement statistique d'une série de séquences d'images acquises et enregistrées dans les conditions suivantes :  $U_{inj} = 0,203$  m/s, Temps d'exposition = 200  $\mu$ s, Temps d'interexposition = 1,5 ms, champ de 15x12 mm (figure 16). A partir des images obtenues, nous récupérons une série de 380 champs de vecteurs déplacement. Le champ moyen de vecteur déplacement et représenté sur la figure 17 et les profils sont donnés figure 18. dans trois sections différentes du jet ( $x/D = 8, 9$  et 10).

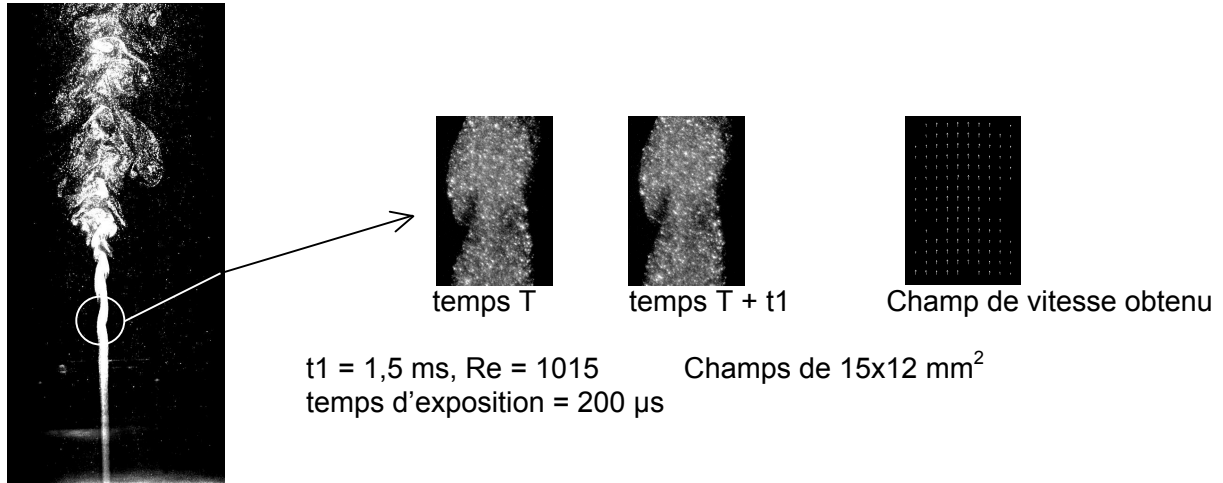


Figure 16 : image du jet et champ de vitesse obtenu par PIV

Cette vitesse moyenne présente une allure gaussienne qui atteint son maximum sur l'axe du jet. La vitesse diminue et elle atteint des valeurs faibles tout en s'éloignant de l'axe du jet, les profils s'aplatissent à fur et à mesure que  $y$  croît. En revanche, une discordance est remarquée au niveau de la vitesse sur l'axe du jet. Ceci est dû à l'insuffisance de la précision sur la mesure de la vitesse à la sortie de la buse. En plus, le jet ne garde pas un état parfaitement perpendiculaire.

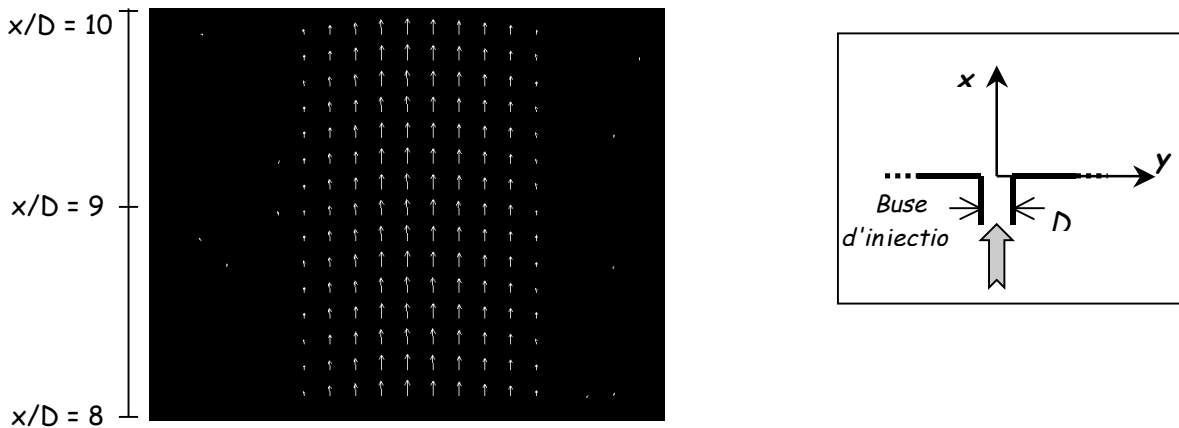


Figure 17 : Champ moyen de vecteurs vitesses ( $Re = 1015$ )

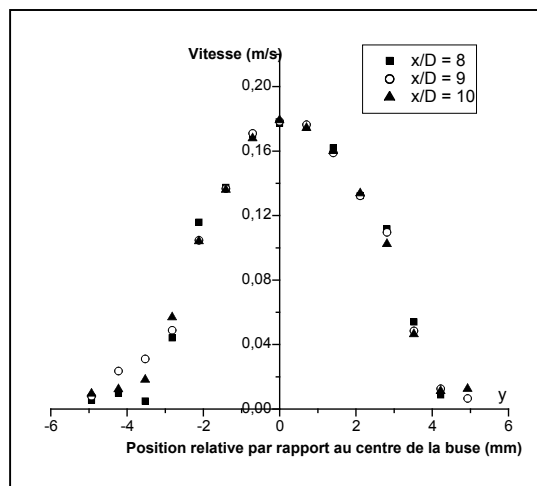


Figure 18 : Evolution radiale de la vitesse moyenne en différentes sections du jet d'eau ( $Re = 1015$ )

### Comparaison Mesures / simulation numérique

Dans le but de comparer nos résultats expérimentaux et les résultats du code de calcul numérique déjà développé (Thèse Zaouali 2004), nous présentons sur la Figure 19, les deux profils de la vitesse longitudinale pour le même nombre de Reynolds ( $Re = 1015$ ). Le profil initial d'émission est uniforme, et la comparaison est faite à une hauteur  $x/D = 10$ . Cette figure montre que la vitesse adimensionnée longitudinale mesurée par PIV vérifie de manière plus ou moins convenable celle calculée numériquement.

Sur cette figure,  $Y^*$  correspond à l'ordonnée transversale pour laquelle  $U = U_c/2$ .

Les profils de vitesse obtenus sur le jet de St Etienne, sont comparables aux profils obtenus sur le jet de Monastir.

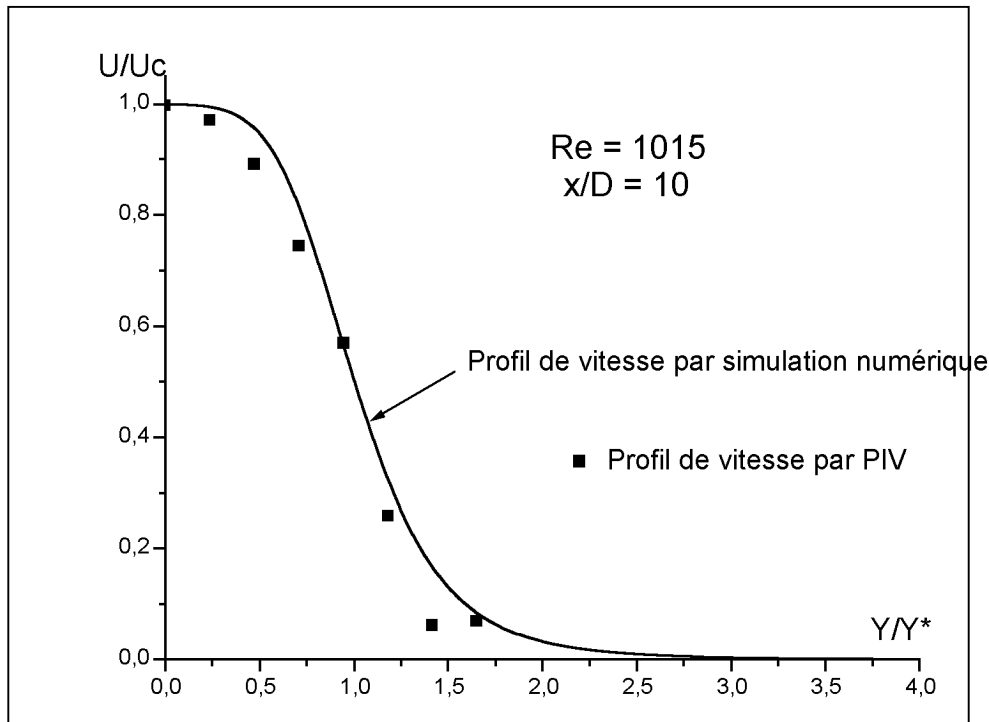


Figure 19 : Comparaison mesures / simulation d'un profil de la vitesse du jet d'eau ( $Re = 1015$ )

Intervenants LTSI : Jean Paul Schon, Jacques Jay  
 Intervenants Monastir : Habib Ben Aissia, doctorant en co tutelle : Yassine Zaouali  
 Production scientifique : P10, P14, C17  
 Programme TEMPRA, puis MIRA (mobilité internationale de la Région Rhône-Alpes) (2000-2007) : R10

### **3.3.1.3.3 suivi spatio-temporel des instabilités de KH**

*(Caractérisation des évolutions spatio-temporelles des instabilités de Kelvin-Helmholtz dans un jet rond)*

#### **Préambule :**

Il faut noter une difficulté qui peut avoir son importance dans l'interprétation des résultats : la diffusivité des marqueurs est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la viscosité cinématique de l'air. Le nombre de Schmidt est estimé de l'ordre de  $5 \cdot 10^5$ . De plus, les marqueurs n'étant pas sphériques, la diffusion moléculaire est extrêmement faible, et on peut considérer que les marqueurs suivent les lignes de courant sans diffusion latérale.

Les visualisations doivent être interprétées comme des lignes de courant et non comme des bords de jets. Au paragraphe précédent, dans la zone laminaire, à une distance de l'axe double de la partie visible sur les images, la vitesse mesurée est de l'ordre de 10% de la vitesse au centre. Le jet interagit donc en dehors de la zone visualisée sur les images.

#### **Rappel du contexte :**

Au paragraphe 3.3.1.3.2, nous avons présenté l'étude par PIV des profils de vitesse. Sur le même écoulement, nous nous proposons d'approfondir l'étude de ce type d'écoulement par l'analyse des instabilités. Cette troisième étape concerne l'étude de cette zone de transition entre la zone laminaire et la turbulence.

L'analyse spatio-temporelle des instabilités présentes lors de la transition vers la turbulence d'un jet d'air reste incontournable pour la compréhension de ces phénomènes de transition. Le jet d'air étudié est caractérisé par un nombre de Reynolds faible, une longue zone laminaire et des instabilités de Kelvin-Helmholtz en mode 'sinueux' ou en mode 'variqueux'.

A partir d'images obtenues par tomographie laser, nous avons cherché à suivre dans le temps et dans l'espace des points caractéristiques, par exemple, le sommet des crêtes de la ligne de courant externe du jet. Ainsi, l'angle d'amplification et les longueurs d'onde ont pu être mesurés.

#### **Instabilités de Kelvin-Helmholtz :**

Les images obtenues montrent que le jet peut être divisé en trois zones : une zone laminaire, une zone de transition et une zone de turbulence ou de chaos. La zone de transition est caractérisée par des instabilités pour lesquelles le mode le plus amplifié dépend du nombre de Reynolds, du diamètre de la buse d'injection et la vitesse de l'injection

L'amplitude des instabilités augmente en s'éloignant de la buse, l'écart de vitesse entre les creux et les crêtes s'accroît, on parle d'amplification des instabilités. Au delà d'un seuil sur cet écart de vitesse, une partie de l'instabilité va se séparer du reste du jet par une rotation sur elle-même. L'écoulement devient alors turbulent.

Dans cette zone de transition, la morphologie du jet pour un nombre de Reynolds de 830 est totalement différente de celle pour un Reynolds de 1800. Sur ces images de la figure 20, nous remarquons que les premières instabilités qui apparaissent sont le mode sinueux ou (et) le mode variqueux suivis par des instabilités de Kelvin-Helmholtz (K-H) symétriques ou antisymétriques.

Pour des bas nombres de Reynolds, le jet présente une longueur laminaire importante pouvant atteindre  $x/D = 17,5$  pour  $Re = 830$  et  $x/D = 34$  pour  $Re = 586$ . Les images de la Figure 20 présentent la section laminaire du jet évoluant d'une manière naturelle. La visualisation par tomographie laser d'une séquence d'environ 150 images montre la conservation de cet état laminaire. On note aussi que l'expansion du jet est plus importante pour les faibles nombres de Reynolds



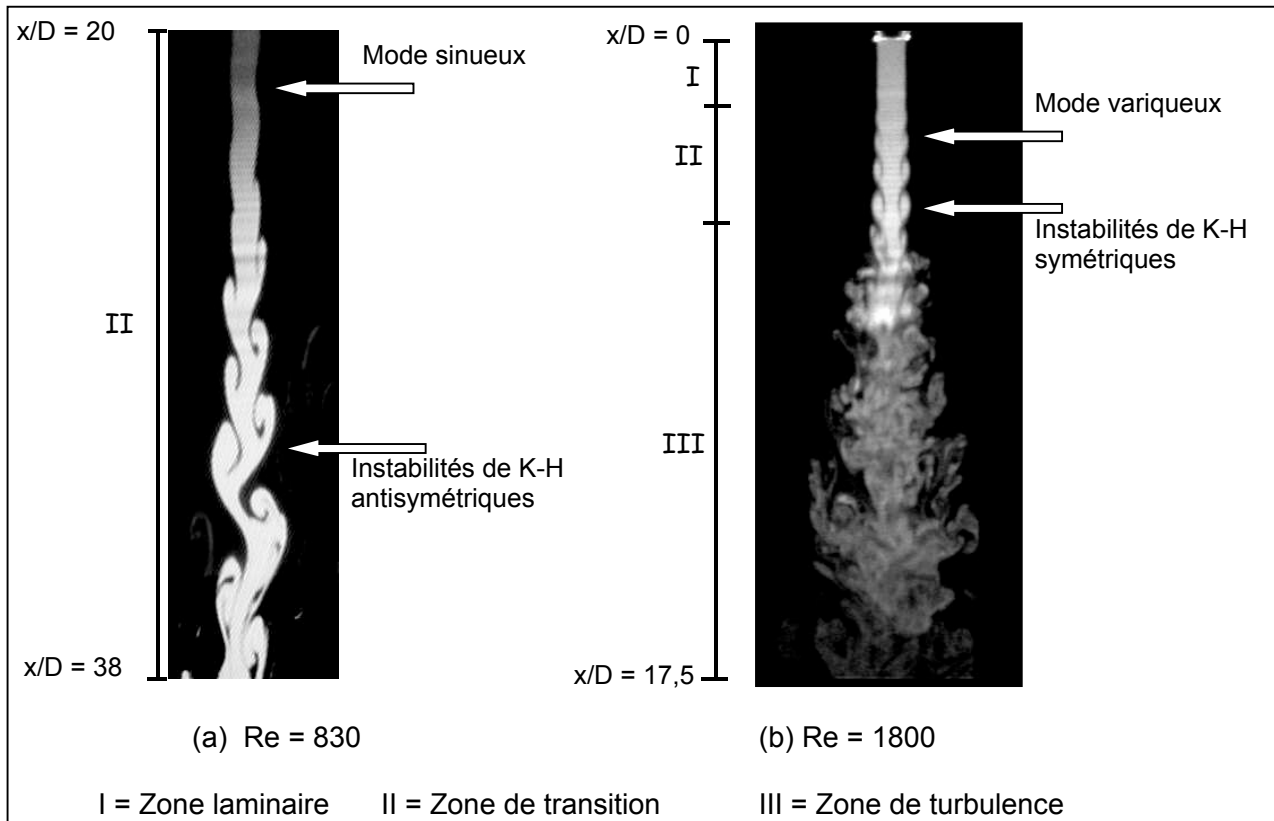


Figure 20 : Visualisation expérimentale des zones caractéristiques du jet

Même s'il présente une certaine symétrie axiale, ce type de jet se développe sous forme d'un cône, donc une structure légèrement tridimensionnelle. Suivant le nombre de Reynolds, les instabilités peuvent prendre une forme annulaire ou hélicoïdale (figure 21).

L'amplitude des instabilités augmente en s'éloignant de la buse, l'écart entre les creux et les crêtes s'accroît, on parle d'amplification des instabilités (figure 22a). L'angle  $\alpha$  formé par les droites reliant les crêtes et les creux permet de quantifier cette amplification.

Un autre paramètre important est l'écart de vitesse des crêtes  $V_b$  et des creux  $V_c$  (figure 22b).

La vitesse de rotation  $\omega$  est une caractéristique importante (figure 22b) puisqu'elle provoque un ralentissement de la structure. Celui-ci induit au delà d'un seuil un mélange des instabilités qui deviennent alors turbulentes.

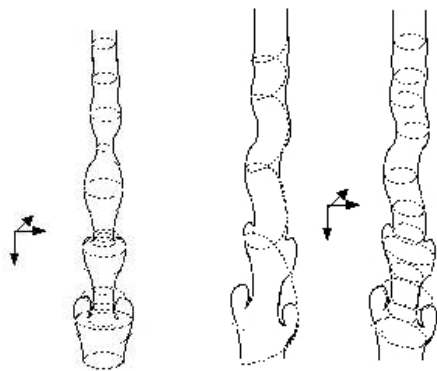


Figure 2 : formes supposées des instabilités de KH

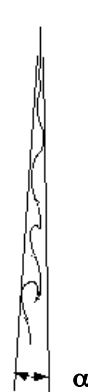


Figure 22a : accélération

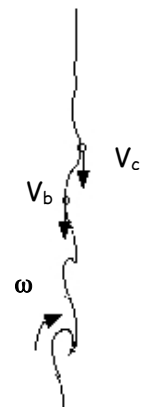


Figure 22b : ralentissement et rotation

### Mesures des paramètres des instabilités de Kelvin-Helmholtz :

Le principe repose sur la localisation de points particuliers sur la ligne de courant limite du jet. Cette frontière est obtenue par segmentation des images, puis analysée pour détecter ses points de retournement (figure 23). Les instabilités ont été classées en 3 catégories : 'Ondulation', 'séparation débutante' et 'séparation forte'.

A partir de la localisation des points B1 sur deux 2 images successives, nous obtenons le vecteur vitesse de chacun des points.

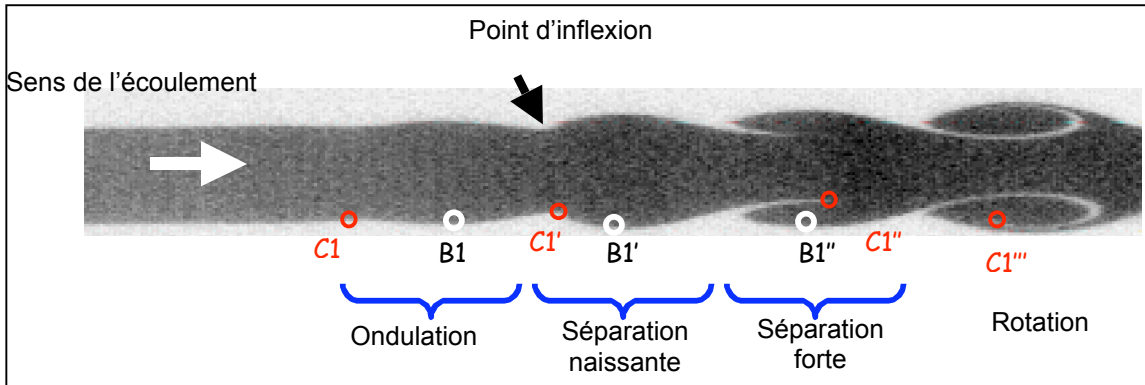


Figure 23 : Description des différentes formes des instabilités

Dans la zone 'ondulation', seuls deux points peuvent être localisés : le 'creux' C1 et la 'bosse' B1. Au cours du temps, l'instabilité évolue : elle s'éloigne de la buse et se transforme. Après la zone 'ondulation', l'instabilité atteint la zone de séparation. La discontinuité de la frontière marque la naissance de la séparation (point C1'). Ensuite, ce point C1' glisse à l'intérieur du jet jusqu'à une séparation presque complète (zone de séparation forte)(point C1''), puis effectue une rotation à l'intérieur du jet : c'est la zone de rotation (point C1''').

A partir de la localisation des points B1 et C1 sur deux 2 images successives, nous obtenons le vecteur vitesse de chacun des points. L'écart de vitesse entre le point et le point C1 peut alors être déduit. Il est également possible de calculer l'évolution de l'éloignement du point B1 par rapport à l'axe central du jet, et donc obtenir l'amplification des instabilités. Par suite, la longueur de séparation (distance entre C1 et B1 dans le cas d'une 'séparation forte') et la vitesse de rotation  $w$  des instabilités peuvent être déduites.

### Etude de l'écart de vitesse dans la zone d''ondulation', mode sinueux

Dans un premier temps, nous avons basé notre étude sur le développement du mode sinueux. Ce mode apparaît, dans le cas d'un nombre de Reynolds égal à 830, à une distance  $x/D$  voisine de 20. La première étape consiste alors à localiser la zone sinueuse et l'extraire de l'image acquise. La partie extraite présente deux frontières antisymétriques en forme sinusoïdale.

Dans cette zone, la frontière du jet ne présente pas de discontinuité ni de retournement. La procédure de traitement commence par un seuillage des images afin de rendre plus nettes les frontières (passage d'image en niveau de gris -0 à 255- en image binaire -0 à 1-). Ensuite, il faut séparer la frontière basse de celle du haut. Pour cela, une technique dite de remplissage est utilisée : elle remplace un pixel de valeur 0 (noir) par un pixel de valeur 1 (blanc) tant qu'aucune frontière ne puisse arrêter le remplissage. Deux remplissages haut et bas sont nécessaires pour éliminer respectivement la frontière basse puis la frontière haute. On extrait le profil de chacune des frontières en ajoutant algébriquement la valeur de tous les pixels sur chaque colonne. On obtient ainsi des courbes donnant l'allure de chaque frontière (figure 24). Ces profils ont été mis en équation par des polynômes du troisième degré, ainsi les minima et les maxima ont pu être localisés (figure 25).

Cette étude a été menée pour une distance relative ( $x/D$ ) à la buse d'injection de 20 et 27. Les axes  $x$  et  $y$  sont pris à l'origine au centre et l'orifice de la buse,  $y$  étant dans le sens de l'écoulement et  $x$  perpendiculaire. Pour un nombre de Reynolds de 830 et pour une centaine d'images, une mesure de la position des minima (creux) et des maxima (bosses) a été réalisée.

Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau de la figure 26. L'analyse de ces résultats montre que les parties convexes (crêtes) et les parties concaves (creux) ne défilent pas à la

même vitesse avec un écart de vitesse moyen de l'ordre de  $\Delta U/U_0 = 0,08 U_0$  étant la vitesse d'injection (1,05 m/s).

La résolution sur la mesure des déplacements est estimée à un pixel. Aussi, la résolution de la mesure de vitesse des crêtes et des creux est de l'ordre de 0,02 m/s. Cette incertitude représente le quart de la mesure.

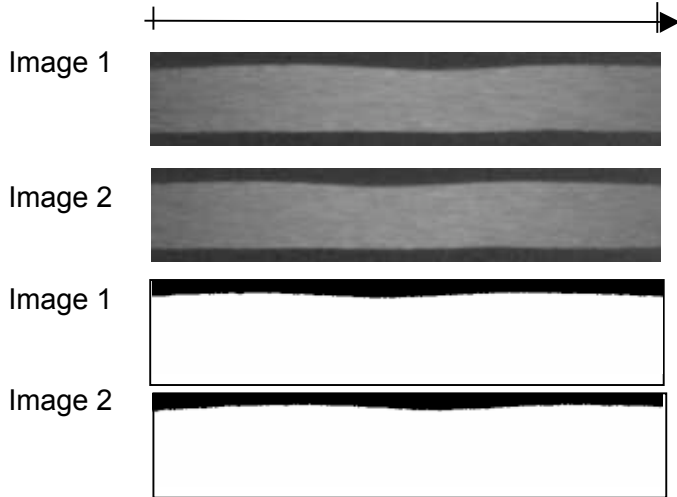


Figure 24 : traitement des images

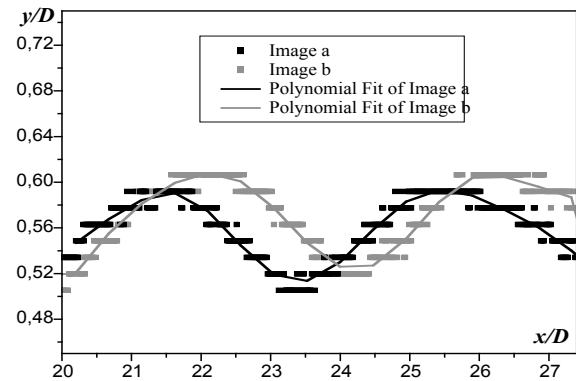


Figure 25 : Courbes collées au profils  
Après seuillage et remplissage bas

	Vitesse moyenne		Longueur d'onde moyenne	
	U	U/U <sub>0</sub>	$\lambda$	$\lambda/D$
<b>Crête</b>	0,42 m/s	0,40	54 mm	4,35
<b>Creux</b>	0,50 m/s	0,48		
<b>Moyenne</b>	0,46 m/s	0,44		

Figure 26 : Paramètres caractéristiques du mode sinueux (Re = 830)

L'écart de vitesse longitudinale entre creux et crête confirme en fait l'hypothèse d'instabilité non-visqueuse dans l'analyse linéaire de stabilité des jets. En effet, l'hypothèse qui consiste à négliger la viscosité dans la couche de mélange nous permet d'utiliser l'équation de conservation de l'énergie mécanique totale le long de la ligne frontière, et puisque la pression  $P_1$  dans la partie convexe de cette frontière est supérieure à celle dans la partie concave, il en résulte donc un écart de vitesse entre la partie convexe et la zone concave du mode sinueux.

### Etude de l'écart de vitesse dans la zone d'ondulation, mode sinueux

La détection des frontières du jet utilisée au paragraphe précédent ne peut s'appliquer à toutes les zones du jet. Pour illustrer les méthodes de mesure, nous avons sélectionné sur l'ensemble des séquences enregistrées, sept images consécutives et caractéristiques de l'écoulement et de l'évolution des instabilités (figure 27). Nous avons sélectionné puis mis en concurrence trois méthodes de segmentation pour exploiter les images. La méthode 1 est basée sur un seuillage adaptatif, la méthode 2 sur un détecteur de contours par ondelettes et la méthode 3 sur un opérateur de palpation morphologique.

Le principe du seuillage adaptatif repose un calcul de seuil sur un groupe de lignes et non pas sur l'ensemble de l'image (une ligne est liée à l'axe y donc perpendiculaire au sens de l'écoulement). Le détecteur de contours est construit en fusionnant les contours obtenus à partir des deux opérateurs : laplacien de gaussienne (LOG) et gradient de gaussienne (GOG). Le principe du palpeur est de faire glisser virtuellement le long de la bordure du jet, un objet linéaire. La longueur de cet objet peut varier pour s'adapter aux courbures des frontières du jet.

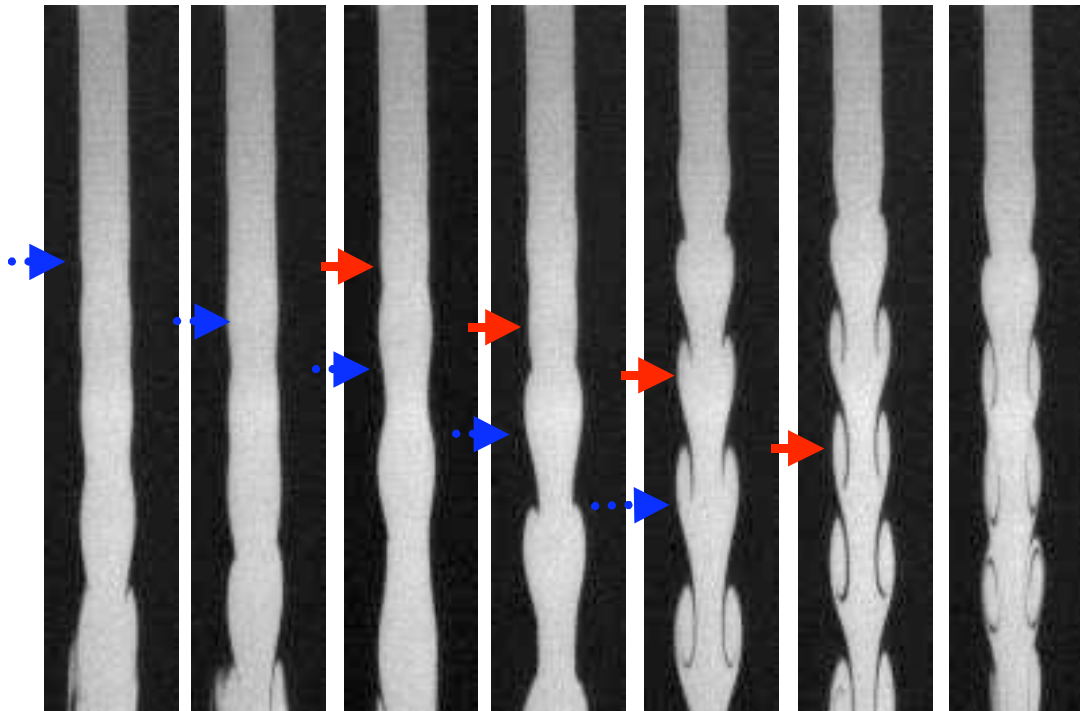


Figure 27 : Images de référence avec deux exemples de suivi spatio-temporelle d'instabilités

Un exemple de résultats de détection de contour sur la quatrième image est présenté figure 28. Sur l'ensemble des 7 images, on peut remarquer que les contours obtenus par les trois méthodes sont en meilleure correspondance dans le cas d'images sur-échantillonnées d'un facteur 2 en particulier dans les zones de faible perturbation. En résumé, on peut dire que la méthode 2 montre une capacité de bien segmenter la totalité des contours. La méthode 1 présente l'avantage d'être simple et la méthode 3 apporte un profil moins bruité.

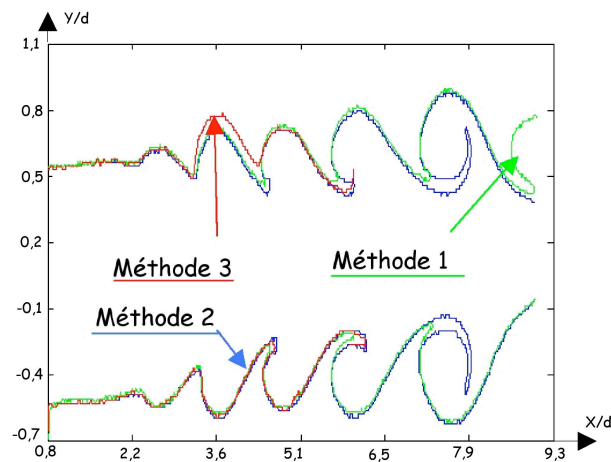


Figure 28 : Contours image obtenus

### Localisation des points caractéristiques des profils

A partir des profils obtenus, il est possible, par un simple traitement, de localiser les points caractéristiques des instabilités. Cette technique consiste à déterminer les points de retournement (dérivée nulle). L'étude menée ici a porté sur trois séries de 100 images chacune (temps inter image de 8,33 ms). La segmentation des profils a été obtenue par la méthode 1 (figure 29). Sur les 3 séries, pour chaque profil (haut et bas), les coordonnées en pixels de chaque point B1 ont été enregistrées.

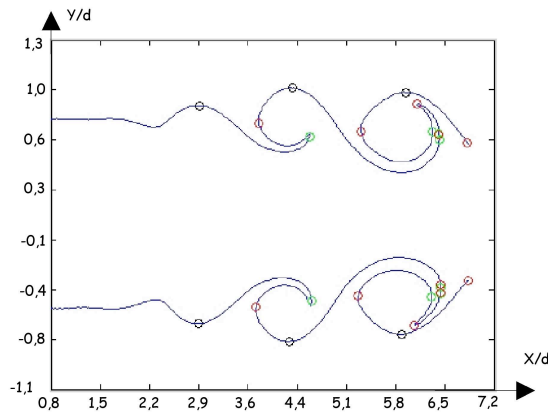


Figure 29 : Contours et points caractéristiques

### Analyse des sommets des crêtes (points B1, B1', B1'', ...)

Pour chaque série, l'ensemble des points B1 du profil 'haut' de toutes les images ont été regroupé sur une même figure, idem pour le profil 'bas'. La figure 11a montre les regroupements des images de la série 1, la figure 30b, ceux des images de la série 2 et la figure 30c, ceux des images de la série 3. L'ordonnée de ces figures indique la position des points dans un axe perpendiculaire à l'axe du jet (axe Y). En abscisse, l'axe x est colinéaire à l'axe du jet.

Ces regroupements de points B1 vont permettre de mesurer un paramètre important de ces instabilités de KH : le taux d'amplification. Ce facteur est noté par l'angle d'ouverture des crêtes de ces instabilités par rapport à la taille du jet à la sortie de la buse (figure 31). Pour cela, nous avons appliqué une régression linéaire sur les nuages de points pour obtenir une droite caractérisant l'évolution générale de ces points. Ainsi, l'angle  $\alpha$ , le facteur d'amplification, peut être déduit.

Figure 30 : regroupements des points B1

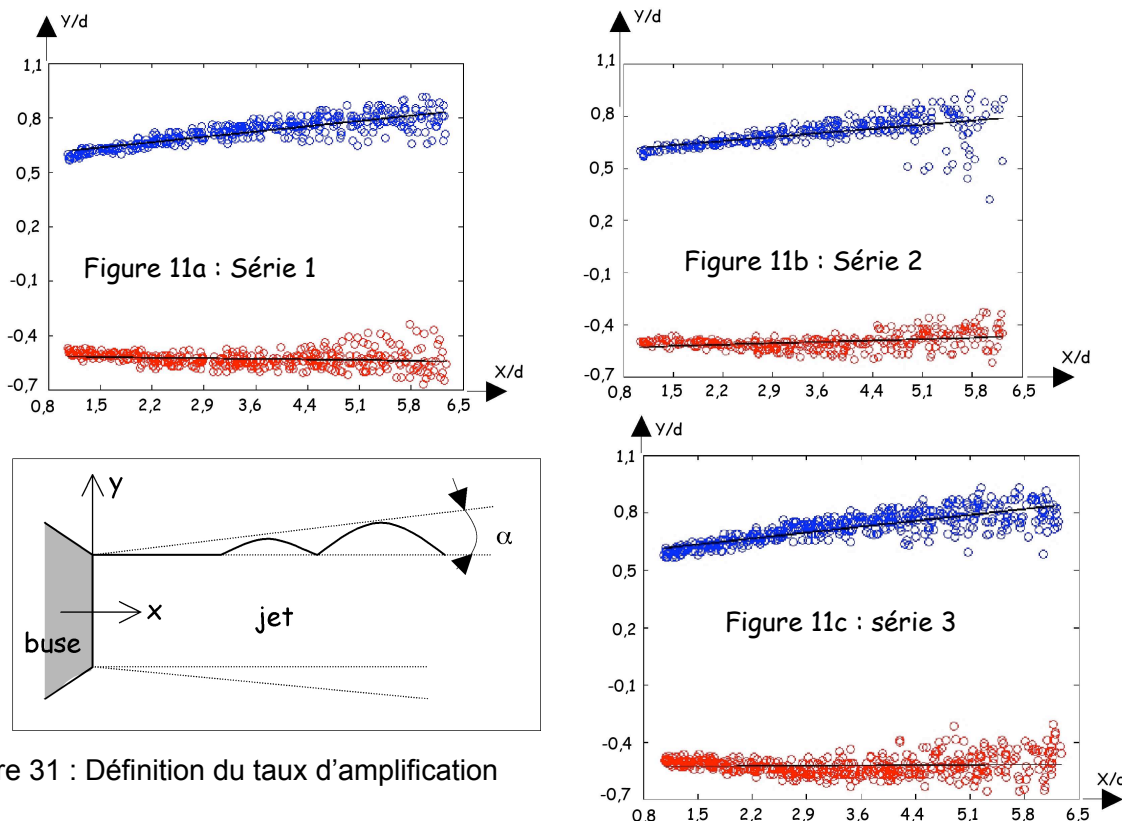


Figure 31 : Définition du taux d'amplification

Sur ces 6 regroupements, l'angle d'amplification a pu être mesuré.

Série 1 Profil 'haut'	$a = 1,11^\circ$	Profil 'bas'	$a = - 0,13^\circ$	moyenne = 0,49°
Série 2 Profil 'haut'	$a = 0,9^\circ$	Profil 'bas'	$a = 0,3^\circ$	moyenne = 0,60°
Série 3 Profil 'haut'	$a = 1,18^\circ$	Profil 'bas'	$a = 0,08^\circ$	moyenne = 0,63°

Il existe une bonne concordance entre les mesures sur les trois séries. Toutefois, la différence des angles entre les profils 'haut' et les profils 'bas' est importante. Ceci est certainement du au fait que le jet est légèrement orienté, par conséquent, seule la moyenne de ces valeurs est à conserver.

### Analyse des distances entre les points B1 des images successives

A partir des coordonnées des points B1 de chaque image, un calcul de vitesse a été réalisé. Les distances évaluées entre le premier point (au sens de l'écoulement) d'une image n et les autres points B1 de l'image suivante n+1 ont permis de construire l'histogramme des vitesses sur chaque série. (figure 32).

On peut constater que les vitesses mesurées directement sur 2 images sont très proches de celles lues sur les histogrammes : de l'ordre de 1,2 m/s. De plus, le signal sort nettement du bruit.

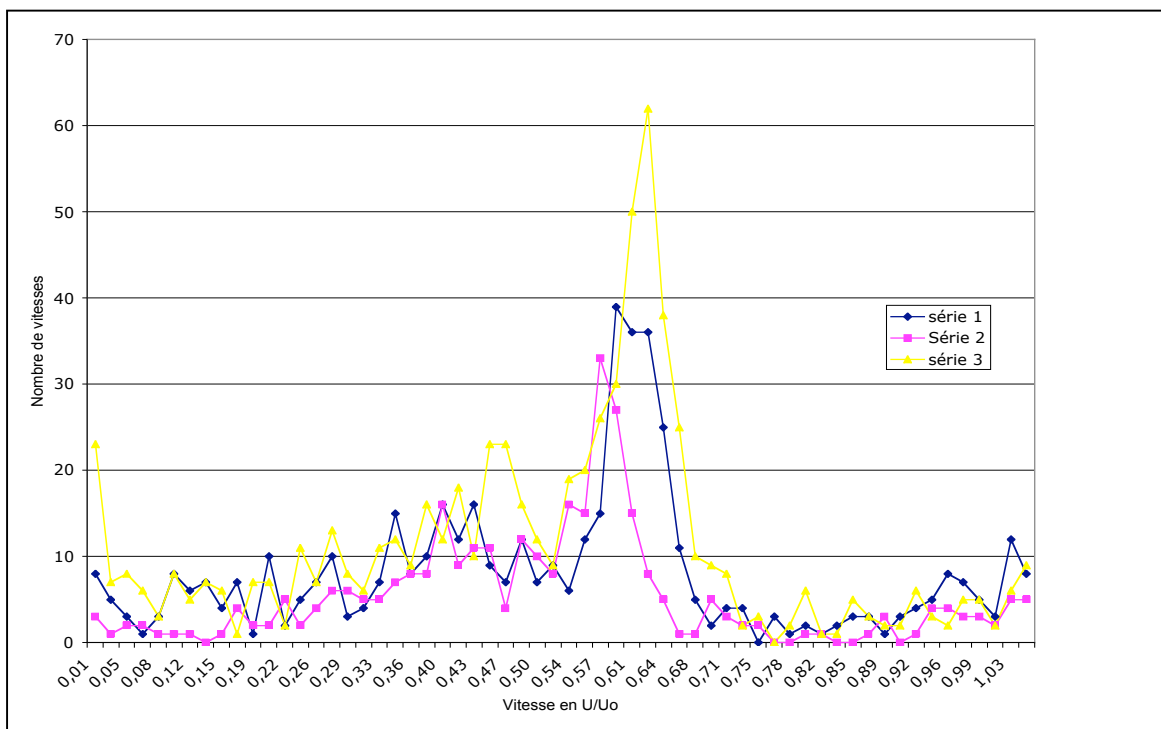


Figure 32 : Histogramme des vitesses des points B1

### Remarques

Les méthodes d'analyse des images de jet proposées ont permis de mettre en évidence, malgré une résolution moyenne des images (600 par 200), quelques caractéristiques importantes des instabilités de KH. Ainsi, le taux d'amplification et un histogramme des vitesses des crêtes ont été obtenus. A ce stade, seuls les points B1, les crêtes, ont été localisés. Bien entendu, il apparaît nécessaire de faire le même travail sur les autres points caractéristiques des instabilités : les points C1, les points B2, C2, ...(creux, bosses, ...).

Intervenants LTSI : Jacques Jay, Michel Courbon

Intervenants Monastir : Yassine Zaouali (doctorant puis chercheur)

Production scientifique : C17, C20

Programme TEMPRA, puis MIRA (mobilité internationale de la Région Rhône-Alpes) (2000-2007) : R10

### **3.3.1.3.4 Charriage des boues torrentielles**

(Etude par traitement d'images du charriage de sédiments par des crues torrentielles)

#### **Contexte et objectifs du projet**

Dans les cours d'eau, le transport solide par charriage est un phénomène important. En montagne en particulier, les fortes pentes permettent un transport solide intense et de granulométrie étendue, du grain de sable aux gros blocs. Les débits volumiques de sédiments transportés peuvent représenter jusqu'à 20 ou 30 % des débits liquides. Ces grandes quantités de matériaux charriés peuvent se traduire par des variations localement importantes et rapides du niveau du lit.

Le groupe ETNA (Etude Torrents, Neiges et Avalanches) du CEMAGREF de Grenoble a pour objectif principal de recherche d'établir des modèles de prévision de déplacement de matériaux lors de crues ou d'avalanches. Philippe Frey, notre interlocuteur, s'intéresse plus particulièrement au transport de matériaux solides dans des crues torrentielles. L'installation expérimentale qu'il a réalisée est un canal simulant le cours d'un torrent. Ce canal a été conçu afin de pouvoir simuler le transport de cailloux de différentes tailles par la circulation d'eau. Auparavant, la mesure de ce transport de matière solide se faisait en récupérant pendant un temps donné les cailloux puis ils étaient répartis par lots suivant leurs tailles, chaque lot était ensuite pesé.

Ce projet a permis le développement d'outils de mesures par traitement d'images pour l'étude du transport solide par charriage. L'installation expérimentale placée au CEMAGREF de Grenoble a donc adapté avant de recevoir un système d'éclairage et une caméra. Ainsi, cette installation va permettre de mesurer le débit solide d'un matériau naturel par évaluation du volume de cailloux passant entre la source de lumière et la caméra. Les images vont permettre également de mesurer la granulométrie de ces cailloux par classement de leurs tailles (expérience 1).

L'étape suivante est l'étude des trajectoires des cailloux afin de comprendre l'interaction entre les matériaux solides en mouvement (transportés par le liquide) et le lit du cours d'eau (matériaux solides en dépôt) et entre les matériaux en mouvement entre eux. L'objectif est de pouvoir modéliser la création d'amas et leurs déplacements. Une deuxième installation a été réalisée afin de suivre dans le temps et le long du canal la trajectoire d'une bille. En effet, afin de commencer par des conditions expérimentales simples, il a été retenu cette étude se réaliserait dans un canal étroit (même ordre de grandeur entre la largeur du canal et la bille), des billes de forme sphérique remplaceront les matériaux naturels et le lit du cours d'eau sera simulé par un fond granulé de périodicité proche de la taille des billes. (expérience 2).

Les collègues du CEMAGREF complètent ces études par une analyse théorique du problème d'interaction fluide / structure en régime torrentiel, en particulier, l'analyse des interactions entre un écoulement et une particule solide. Des mesures de vitesse du fluide au voisinage de la particule, par la technique de la vélocimétrie par image de particules (VIP) ont été réalisées afin de valider les modèles.

#### **Mesure de la granulométrie et du débit solide (expérience 1)**

En sortie du canal, le débit d'eau et de matériau s'écoule sur une rampe transparente, inclinable, fixée sur un châssis imperméable contenant un éclairage haute fréquence qui assure la stabilité temporelle. La caméra est disposée au-dessus de la rampe ce qui permet une acquisition de type **ombroscopie** (figure 1).

La rampe peut être inclinée indépendamment du canal de façon à obtenir un écoulement liquide le moins épais possible avec une bonne dispersion des particules. Il est en effet important que toutes les particules soient dans un même plan. La vitesse sur la rampe est typiquement de 2 m/s et peut atteindre 6 m/s.

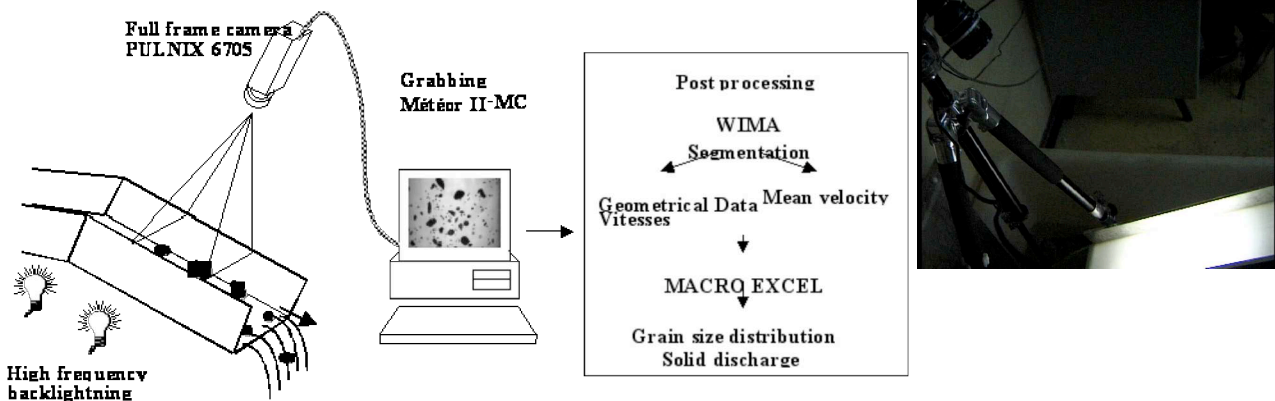


Figure 1 : présentation (schéma et photo) de l'installation expérimentale de l'expérience 1

L'éclairage a été réalisé avec des ampoules fluorescentes comportant un oscillateur haute fréquence (200 KHz). Ces ampoules sont connues pour leur excellent rendement énergétique. Cette caractéristique est importante car le dégagement de chaleur doit être le plus faible possible car ces ampoules sont placées dans un boîtier étanche situé sous le canal.

La caméra sélectionnée est de marque Pulnix et de référence TM6705. Elle est équipée également d'un système de « shutter », c'est-à-dire qu'on peut, par un commutateur, sélectionner la durée d'exposition du capteur par la lumière. La résolution est de 640 pixels par 480 lignes, la cadence est de 60 i/s (figure 2).



Figure 2 : exemple d'image obtenue

Un logiciel d'acquisition d'image a été développé pour enregistrer un ensemble de blocs d'images successives (10 par exemple) stockées sur disque dur. Cette solution permet des durées d'enregistrement de plusieurs heures.

Des adaptations du logiciel de traitement d'image WIMA spécialisé dans le traitement d'image PIV ont été nécessaires pour extraire de ces images les informations recherchées : le débit solide et la granulométrie.

### Granulométrie

La segmentation des images a été rendue difficile car les cailloux peuvent se toucher et il faut les séparer. La non uniformité du fond due à la surface de l'eau instable et le faible contraste avec les petits cailloux augmentent la difficulté (gradient de Sobel, puis jeux d'érosion / dilatation).

A partir de ces "objets" détectés, localisés et mesurés dans les images, un fichier est établi contenant les informations dimensionnelles de chaque "objet". Chaque "objet" est mesuré automatiquement suivant ses deux directions principales d'inertie qui correspondent à son mesodiamètre et à sa longueur.

Les tests réalisés avec cet algorithme sur 583 particules montrent que seulement 0.6 % des particules restent collées alors qu'elles devraient être séparées, et 0.6 % sont coupées alors qu'il ne s'agit que d'une seule particule (figure 3).



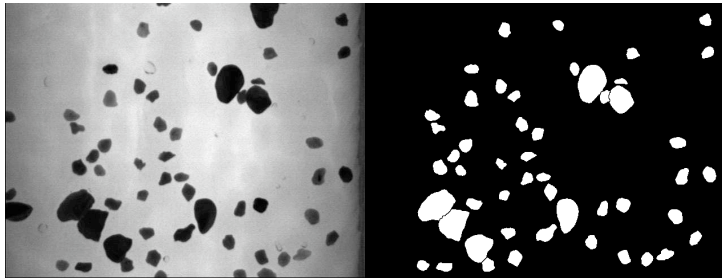


Figure 3 Exemple d'image segmentée

Il s'agit alors d'estimer le volume de toutes les particules sachant qu'elles sont de forme variable. Les "objets" sont considérés comme de forme convexe, et nous avons retenu un modèle de forme 3D de type ellipsoïde. Le volume  $V$  de l'objet est :  $V = (4/3) \cdot \alpha \cdot d \cdot A$ . L'aire  $A$  et le mésodiamètre  $d$  sont donnés par l'analyse d'image. Le coefficient de forme  $\alpha$  devra être calé (le rapport entre la dimension minimale (l'épaisseur) et le mésodiamètre).

Afin de valider notre méthode, des mesures comparatives ont été réalisées. Pour le calage du rapport  $\alpha$ , une série de 400 objets a été mesurés manuellement (pied à coulisse dans les 3 dimensions). Puis, avec une série de 40 échantillons, une comparaison entre la mesure manuelle et la mesure par le système de vision a donné le résultat suivant (figure 4).

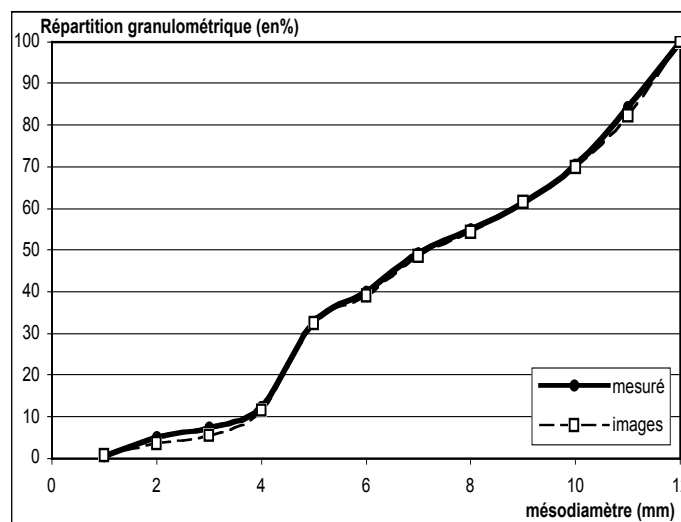


Figure 4 : Granulométrie comparée (pied à coulisse et images)

### Débit solide :

Il s'agit d'estimer la vitesse de chaque particule sur les images de matériaux naturels précédentes. Cette vitesse, combinée avec la mesure de granulométrie, doit permettre d'accéder au débit solide des particules. A partir de séquences d'images successives suffisamment rapprochées, on peut utiliser une technique globale basée sur des calculs de corrélation pour la mesure de vitesse. Les images sont décomposées en sous ensembles contigus (imassettes). Une à une, les imassettes sont comparées à leur équivalente dans l'image suivante. La valeur du calcul de corrélation entre le motif central de l'imasette 1 (kernel) et l'ensemble de l'imasette 2 (balayage) donne l'imasette de corrélation. Ainsi, dans cette imasette, la détection de la valeur du maximum donne le décalage, donc le déplacement (moyen) entre les deux imassettes. Cette technique n'est valable que si la taille et la vitesse des objets ne sont pas liées, ce qui est le cas ici.

Une campagne de mesure a été réalisée en collectant la quantité de matériaux transportés pendant un temps donné une pesé donne alors le débit. Une comparaison avec les valeurs obtenues par les images est montrée figure 5. L'échantillonnage temporelle de la mesure manuelle est ici de 45 s.

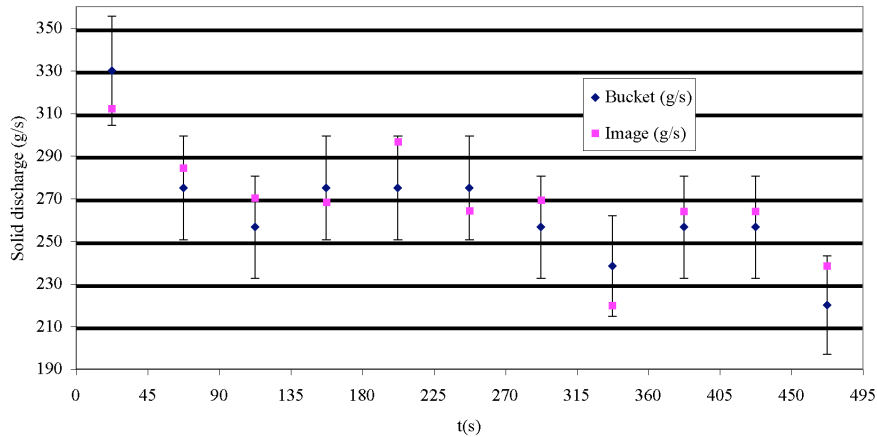


Figure 5 : Comparaison entre la mesure par image et la mesure directe  
Dans tous les cas l'erreur est inférieure à 6 %.

*Trajectographie dans un canal étroit  
(expérience 2)*

L'interaction entre les matériaux solides en mouvement (transportés par le liquide) et le lit du cours d'eau (matériaux solides en dépôt) et entre les matériaux en mouvement entre eux est un problème complexe. Aussi, une démarche progressive en plusieurs étapes a été retenue. Le premier objectif a été d'étudier le problème de transport solide le plus simple possible qui soit encore représentatif, même de manière caricaturale, du transport solide torrentiel.

La première étape du programme de recherche concerne le mouvement d'une seule particule sphérique sur un fond rugueux incliné dans un écoulement d'eau. Afin d'éviter la divagation de la particule, nous avons choisi de placer la bille dans un canal incliné étroit, de taille légèrement plus grande que le diamètre de la bille. L'emploi d'un canal étroit se révèle particulièrement pratique pour la prise d'images et leur traitement (figure 6).

Le dispositif expérimental est constitué d'un canal inclinable (de 0 à 40 %) très étroit de largeur variable de 3 à 9 mm, d'un système d'alimentation en eau régulé par un réservoir à charge constante et d'un système de distribution de billes. Les mesures par analyse d'images concernent l'acquisition de trajectoires de billes et de hauteur d'eau. Les vitesses de billes peuvent dépasser 1 m/s. L'éclairage est également de type ombroscopie, la caméra étant placée à l'opposé d'une source de lumière diffusée.

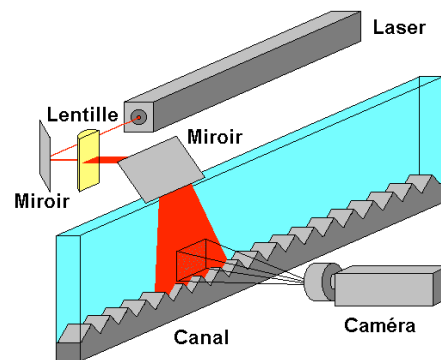


Figure 6 : description de l'installation dite 'canal étroit'

Trois régimes sont observés : arrêt, roulement et saltation. Le mouvement de roulement est acquis lorsque les sauts sont de taille inférieure au diamètre de la bille.

Les facteurs influents sont : le paramètre de rugosité (rayon des rugosités cylindriques sur rayon de la bille), la pente du canal, la hauteur d'eau (relative à la taille de la bille), le diamètre et la masse volumique de la bille. Ces paramètres permettent une classification des mesures du taux de roulement (temps de roulement / temps de saltation). Par exemple, le régime de roulement n'a pas été observé pour des pentes plus fortes que 10 %, ce qui constitue un résultat très intéressant.

A titre d'exemple, voici deux images successives (figure 7) :

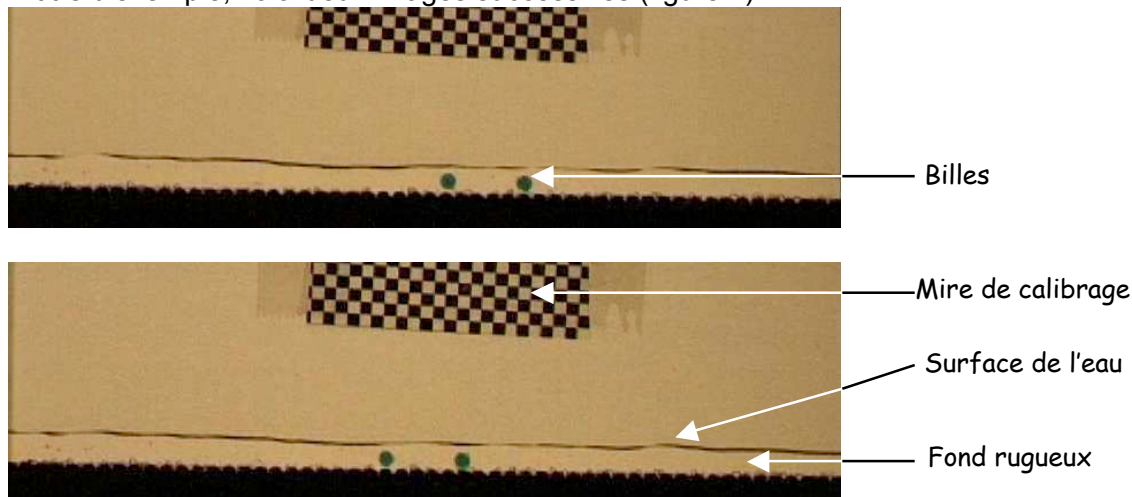


Figure 7 : deux images de suivi de billes dans le canal étroit

Il s'agit de repérer la position d'une seule bille tout le long de son passage, de manière à reconstituer sa trajectoire complète en détectant les éventuels sauts. On repère également la forme de la surface libre à chaque instant. Son repérage peut être réalisé à partir d'une corrélation avec un modèle en niveau de gris qui représente la particule recherchée. La position du pic de corrélation dans l'image, indique la position du centre de la particule. La surface de l'eau peut être détectée à partir d'un gradient vertical appliqué sur l'image.

Dans le cas du roulement, la vitesse moyenne d'une bille en acier représente environ 20 % de la vitesse débitante. Cette valeur est d'environ 40 % pour une bille en verre. Dans le cas de la saltation, les variations de vitesses moyennes sur un saut pour des conditions données n'excèdent pas 10 %. Comme pour les dimensions des sauts, ce sont l'angle de départ et l'effet de troncature de la surface libre qui expliquent cette variation. La vitesse moyenne calculée sur plusieurs réalisations de trajectoires (moyenne temporelle sur tous les sauts de la trajectoire et moyenne d'ensemble) est essentiellement gouvernée par les paramètres hydrodynamiques.

La figure 8 montre un résultat de suivi de trajectoire d'une bille.

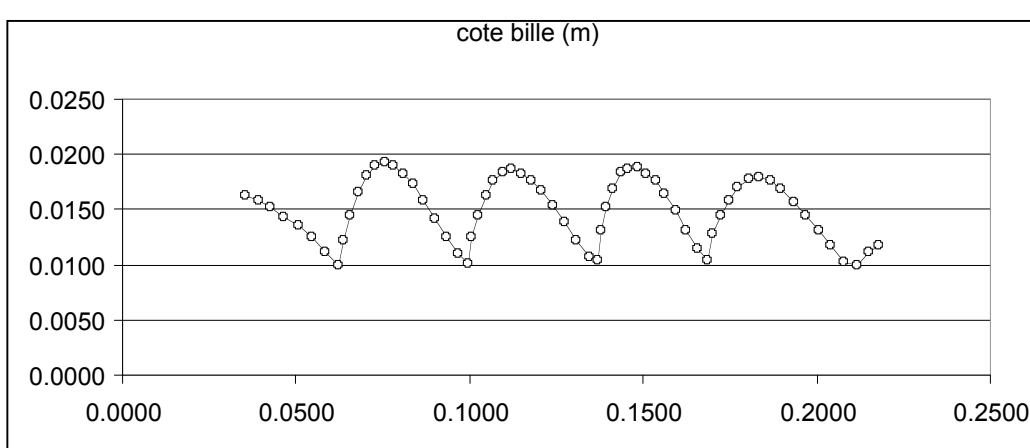


Figure 8 : Positions successives de la bille ( $\phi$  3mm, débit 0.035l/s, pente 5%, fond rugueux, h 11mm)

Une autre exemple de résultat présenté ci après est effectué sur un lit mobile constitué de plusieurs couches de billes. La figure 98 montre que la vitesse moyenne sur un lit de bille est moins importante que sur le fond rugueux usiné dans une seule barre d'acier.

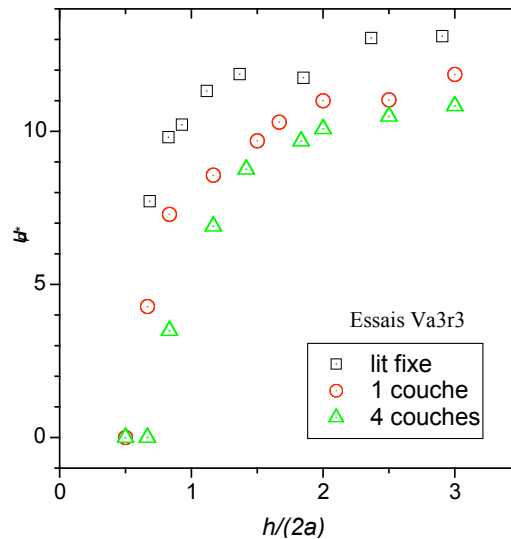


Figure 9 : Influence de la nature du lit sur la vitesse d'une bille en saltation (rayon bille 3mm, rayon rugosité 3mm, pente 5%)

### Perceptives

Les travaux se sont poursuivis et même développés depuis ce travail financé par la région Rhône Alpes. Sur le canal étroit, des mesures de vitesse de l'écoulement autour de la bille ont été entreprises, dans le but de pouvoir modéliser les interactions de la bille avec le lit ou les autres billes, mais aussi avec le fluide porteur. Des réflexions sont actuellement menées pour mettre en place un système de mesure par vision de vitesse de front d'avalanches de neige. Les difficultés de l'enregistrement (température, distance de prise de vue, expériences peu reproductibles) et les difficultés de traitement des images (du blanc sur du blanc) rendent ce projet intéressant.

Intervenants LTSI : Christophe Ducottet, Jacques Jay  
 Intervenants CEMAGREF : Philippe Frey  
 Collaborations : Département Génie civil de l'ENISE, société SOGREAH  
 Production scientifique : P13, C15  
 Programme Avenir, Région Rhône-Alpes (1999-2002) : R6

### 3.3.1.3.4 : Paramétrage automatique de systèmes de mesures PIV

*Optimisation automatique et temps réel des paramètres d'acquisition d'un système de mesure par piv de champs de vecteurs vitesse sur un écoulement de type jet libre.*

#### Contexte :

L'installation expérimentale de l'UMMFT de Monastir décrite dans les paragraphes 3.3.1.3.2 et 3.3.1.3.3 est à l'origine de travail. Lors des expérimentations, l'expérience montre que le temps perdu par les réglages et les mises au point est important. Il faut parfois attendre le dépouillement complet des séquences d'images pour se rendre compte que les résultats ne sont pas exploitables par des choix de paramètres non optimaux. Cette situation nous pousse à réaliser des systèmes de mesures de champs de vecteurs vitesse présentant des temps de calcul très courts voir d'obtenir un traitement des images temps réel.

Lorsque le système de mesure de champs de vecteurs vitesse est inséré dans un système plus complexe, un système de régulation par exemple, la notion de temps réel est alors définie par le temps de réaction du système de mesure par rapport aux autres temps de réaction du système plus complexe. Aussi, le système de mesure doit être construit en tenant compte de ce critère de temps de réponse, donc du temps de traitement des images. Dans notre cas, la définition du temps réel est différente. Soit l'objectif d'obtenir des résultats avec un délai raisonnable pour que l'expérimentateur n'ait pas l'impression de perdre son temps, nous donnerons alors le nom de '**temps réel humain**' (ordre de grandeur : la seconde – de 0,1 à 10 s). Soit, le temps de traitement des images doit être inférieur à la durée de lecture d'une image par la caméra, on parle alors de '**temps réel vidéo**'. Cette configuration temps réel vidéo permet de repousser une limite importante des systèmes de mesures : la capacité de stockage, donc la durée de l'enregistrement. En effet, le débit d'information en Moctets/s fourni par une caméra peut être important, par contre, la capacité de stockage nécessaire pour les coordonnées et l'amplitude des vecteurs vitesse est très faible. Un traitement des images PIV temps réel vidéo offre la possibilité de ne stocker que les résultats donc d'augmenter de manière considérable la durée d'enregistrement.

L'autre motivation qui a compté dans notre choix est le souci d'augmenter les performances du système de mesures PIV. Les caméras offrant fortes cadences (plusieurs centaines d'images seconde) tout en conservant de bonnes résolutions restent encore onéreuses. Une configuration à deux caméras dite 'face-face' (paragraphe 3.3.1.3.1) peut être une alternative caméras haut de gamme. Nous avons sélectionné deux caméras TM1300 de marque Pulnix, de résolution de 1280 par 1023 pixels de fréquence de 12 i/s à sorties numériques (10 bits). La configuration 'face-face' offre la possibilité d'enregistrer deux images de la même scène avec un écart en temps qui peut très court (inférieur à 1  $\mu$ s)(figure 1).

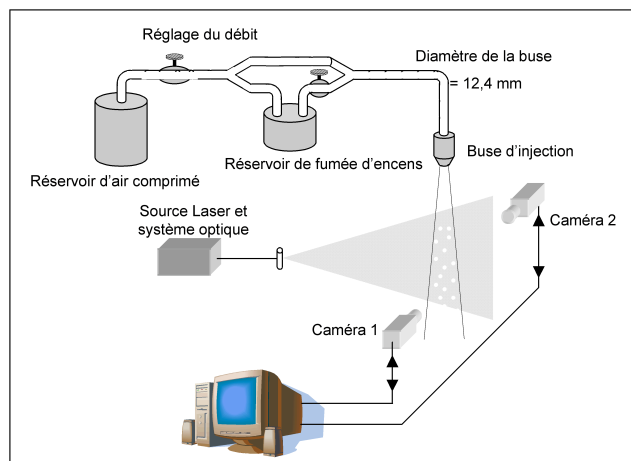


Figure 1 : Schéma de l'installation expérimentale

Aux vues de toutes ces considérations, nous avons proposé un système de mesures PIV à 2 caméras en configuration 'face-face' offrant la possibilité de **calculer la valeur optimale de l'écart de temps ( $\Delta t$ )** entre l'enregistrement des deux images. Ainsi, les séquences d'images enregistrées présentent un choix de temps inter exposition optimal sans intervention humaine, afin d'éviter des enregistrements inutiles. Un autre paramètre directement associé au précédent est le choix de la taille

des imagerie la plus adaptée à la valeur du vecteur déplacement dans l'imagerie. L'optimisation porte le couple de valeur :  $\Delta t$  et taille imagerie).

Dans un second temps, nous prévoyons pour ce système de mesures PIV d'autres possibilités d'action sur les paramètres d'acquisition des images. Afin de maîtriser la concentration de marqueur, le système peut mesurer cette concentration et agir sur l'électrovanne de mélange entre l'air du jet et le réservoir de fumée. Une autre possibilité d'action réside dans le contrôle de la durée d'intégration des caméras (temps d'exposition), on peut imaginer la mesure de la luminosité moyenne de l'image et une estimation du flou provoqué par le mouvement pour calcul le temps d'exposition.

Enfin, un objectif plus lointain sera de mettre au point un moyen d'action sur la vitesse d'injection du jet ou d'imposer une vibration de la buse d'injection afin d'agir sur les instabilités de KH. Ainsi, à l'aide des images et leurs traitements nous pourrions obtenir des jets ayant des longueurs de zones laminaires les plus longues possibles pour réaliser des isolations par rideau d'air de grandes dimensions (façade de bâtiment par exemple).

### Architecture du système :

Le système de paramétrage automatique est composé de deux sous systèmes en parallèle. Une chaîne d'acquisition sur PC permet un enregistrement de toutes les images en provenance des 2 caméras dans la mémoire RAM de l'ordinateur (figure 2). Cet ordinateur permet aussi de configurer les caméras par le biais d'une liaison RS232 (valeur du shutter, format de l'image, ...). L'autre sous système permet l'optimisation en temps réel de la valeur du  $\Delta t$ , délai entre le déclenchement des 2 caméras. Ce sous système calcule en temps réel un résultat de champ de vecteur vitesse, extrait des critères qualité de ce résultat et génère les signaux de remise à zéro des caméras (reset). Le dialogue entre le corrélateur et le PC s'effectue par l'intermédiaire d'un bus USB.

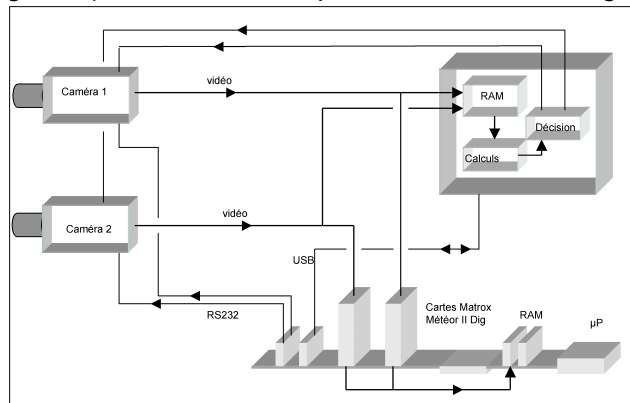


Figure 2 : synoptique du système de paramétrage automatique

Le scénario de fonctionnement du système est le suivant, l'utilisateur configure les caméras à partir du PC (shutter, format image) et un corrélateur (valeur de départ :  $\Delta t$  et taille d'imagerie). Dès le déclenchement de l'acquisition, le corrélateur lance les deux commandes de remise à zéro des caméras (reset), ces deux commandes sont séparées par un intervalle de temps nommé délai  $\Delta t$ . La mesure des vecteurs vitesses est obtenue par inter corrélation entre l'image n de la caméra 1 et l'image n de la caméra 2. De l'image de corrélation obtenue, on peut extraire des critères vont servir au calcul du délai  $\Delta t$  et de la taille des imagerie (figure 3). Le processus se reproduit pour le couple d'images n+1, et ainsi de suite. Le PC d'enregistrement des images mémorise également des valeurs sélectionnées le corrélateur pour en tenir compte lors dépouillement des images en différées.

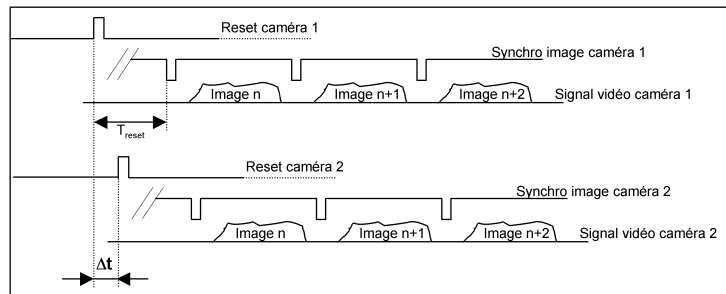


Figure 3 : chronogrammes des signaux entre les caméras et le corrélateur

Comme l'objectif n'est pas de réaliser tous les calculs de champs de vecteurs vitesses en temps réel vidéo, mais de calculer les paramètres en temps réel seulement, il est donc possible de chercher à dégrader au maximum les données afin de réduire la quantité d'information à traiter. En effet, nous ne cherchons pas un champ de vitesse précis mais une valeur du délai  $\Delta T$  et une taille d'imagerie les plus

adaptées. Aussi, une part de l'étude a été de trouver un compromis entre le nombre de bits codant chaque pixel et la qualité des résultats.

**Paramètres de réglages du système de mesures PIV :**

On distingue deux types de réglages :

Réglages statiques :                      Calibrage des caméras,  
Luminosité, focus,  
Ensemencement en particules.

Réglage et contrôle dynamique :  $\Delta t$  : décalage temporel entre les deux caméras,  
La taille des imagerie,   
La concentration en particules.

Pour des raisons de temps de calcul et de la difficulté d'effectuer des calculs avec des nombres de type flottant, une fonction de corrélation directe a été préférée à une fonction de corrélation utilisant la transformée de Fourier.

Toujours pour les mêmes raisons, nous n'avons sélectionné que trois tailles d'imagerie. Le système ne peut donc que choisir entre ces trois tailles : 64x64, 32x32 ou 16x16.

Les modes 16x16 et 32x32 constituent les tailles les mieux adaptées pour le suivi des particules. En effet, une fenêtre de 8x8 risque de confondre les motifs et donner beaucoup de vecteurs erronés. Le mode 64x64 est en fait utilisé lors d'un décrochage du système d'asservissement (perte du  $\Delta t$  optimum), car on a démontré que cette taille engendre toujours des vecteurs cohérents.

La taille du champ et la vitesse de l'écoulement imposent les valeurs du couple  $\Delta t$  et de taille d'imagerie, prenons un exemple :

Format de l'image 1024 par 1024, Champ mesuré de 15 par 15 cm,  
(correspondant à  $150 / 1024 = 0,146$  mm/pixel)

Vitesse de l'écoulement de 2 m/s

Avec un flou toléré de 1 pixel, le shutter doit être de  $0,146 \cdot 10^{-3} / 2 = 73 \mu s$ .

Taille de l'imagerie	8x8	16x16	32x32	64x64	(pixels par pixels)
Déplacement max	4	8	16	32	(pixels)
$\Delta t$	0,3 ms	0,6 ms	1,2 ms	2,4 ms	

A titre de comparaison, la caméra délivre 12 i/s, soit 83,3 ms par image.

Une première série d'étude a été menée afin de dimensionner ce système de paramétrage automatique. Pour faciliter les différentes combinaisons, nous avons choisi de créer des images d'écoulement par calcul (images synthétiques) où il est possible de simuler la concentration en particules et leur déplacement.

**Influence de la concentration des particules :**

Voici un exemple (figure 4) :

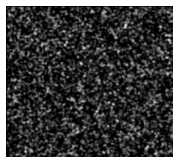


Figure 4a :  
imagerie brute  
8000 particules

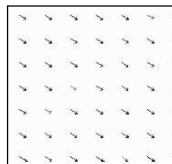


Figure 4b :  
Champs de vecteurs  
8000 particules

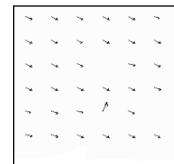
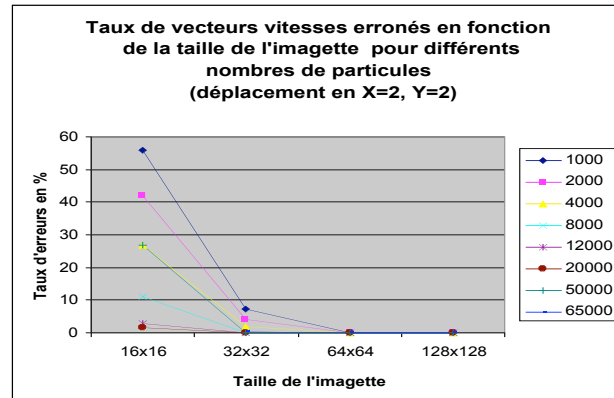


Figure 4c :  
Champs de vecteurs  
4000 particules

La figure 4 présente un exemple d'une zone d'image synthétique dont la concentration en particules est fixée à 8000. Pour une même taille d'imagette 32x32, les champs de vecteurs vitesse ont été obtenus pour des concentrations de 8000 et 4000 particules.

La figure 5 montre le taux d'erreur des vecteurs vitesse en fonction de la concentration particules.



en

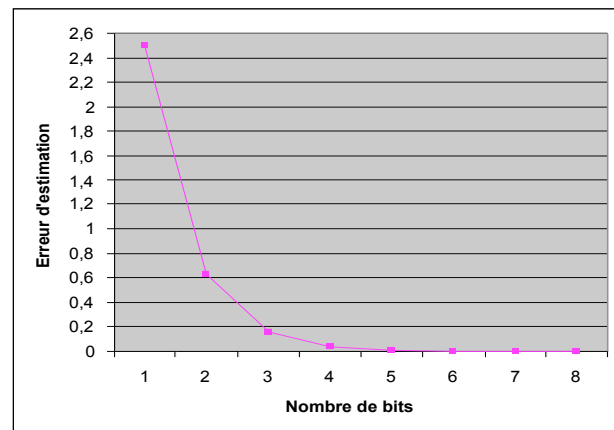
Figure 5 : taux de vecteurs vitesse erronés en fonction de la taille de l'imagette et pour plusieurs concentrations

On peut constater qu'un choix d'une taille d'imagette de 16 par 16 pixels imposera une surveillance de la concentration en particule beaucoup plus forte.

### Influence de la définition du niveau de gris par pixel :

La réduction du nombre de bits codant chaque pixel est un objectif important car le temps de calcul est fortement dépendant de ce critère. Aussi, nous avons cherché à quantifier la dégradation de la fonction de corrélation en fonction de ce nombre de bit.

Dans la littérature, des études ont été réalisées à partir d'une estimation de l'erreur de fonction de corrélation. Nous avons utilisé cette estimation d'erreur en faisant varier le nombre de bits codant chaque pixel et nous avons obtenu la courbe suivante (figure 6).



la

la

de  
la

Figure 6 : Erreur d'estimation de la fonction de corrélation en fonction du nombre de bits des pixels

On aperçoit nettement que cette estimation donne une erreur qui augmente fortement lorsque le nombre de bits devient inférieur à 3. Le facteur est de 16 entre un codage sur 3 bits et un codage sur 1 bit.

La figure 7a montre l'image réelle d'un écoulement dont chaque pixel est codé sur 8 bits, la même image avec un codage sur 3 bits (figure 7 b) et avec un codage sur 1 bit (figure 7c). Les champs de vecteurs vitesse pour chacune de ces trois images sont donnés figure 80 (a, b et c).

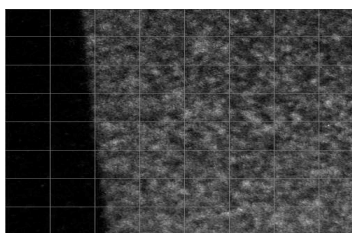


Figure 7a  
(8 bits)

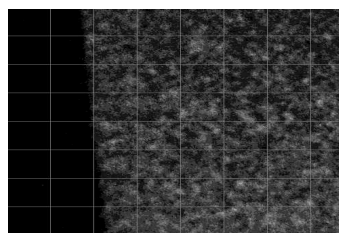


Figure 7b  
(3 bits)

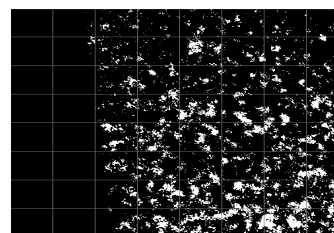


Figure 7c  
(1 bit)



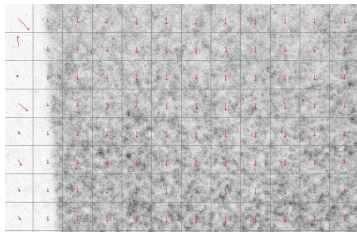


Figure 8a

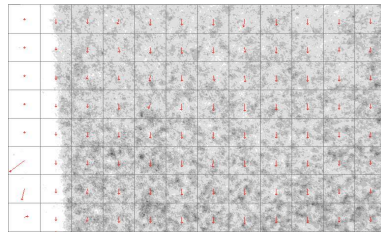


Figure 8b

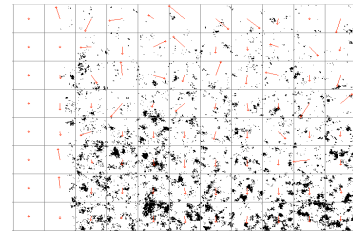


Figure 8c

Malgré la réduction à un codage sur 3 bits, le calcul donne des résultats relativement proches. Par contre, sur l'image binaire (codage sur 1 bit), l'effet d'un éclairage non uniforme de l'écoulement par un laser a augmenté le nombre de vecteurs aberrants de manière importante.

**Implantation de la fonction de corrélation :**

Le système de paramétrage automatique est organisé en fonction : le stockage en RAM des images entières et la lecture des imagettes de manière asynchrone, un corrélateur (2 imagettes) et une fonction de sélection des valeurs des paramètres (figure 9).

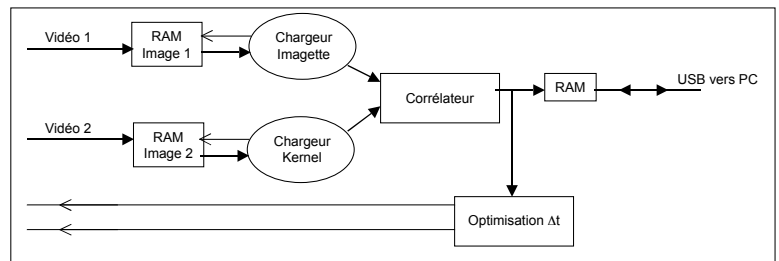


Figure 9 : synoptique du système de paramétrage

La fréquence image des caméras impose un temps entre deux calculs de 83,3 ms. Faisons une estimation du nombre d'opération afin de donner un ordre de grandeur du temps alloué à chaque imagette et chaque point de calcul.

La fonction de corrélation directe appliquée sur ses deux imagettes est donnée par :

$$C(u,v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [imagerie1(x,y) \times imagerie2(x-u,y-v)]$$

pour u et v allant de 0 à N

Elle permet d'obtenir une imagette résultat dans laquelle est localisé la valeur maximale. Ce pic correspond au cas où est enregistré la plus forte ressemblance (corrélation). La position relative de ce pic par rapport au centre de l'imagerie donne le déplacement (norme et sens) entre les deux imagettes.

Taille de l'imagerie	64 x 64	32 x 32	16 x 16
Nombre de bits de l'imagerie	4096	1024	256
Nombre de pixels du motif (1/4 au centre de l'imagerie2)	1024	256	64
Nombre de multiplications	(32x32) x (32x32) = 1048576	65536	4096
Nombre d'additions	32x32 = 1024	256	64
Nombre d'opérations	1049600	65792	4160
Nombre d'imagettes par image	256	1024	4096
Nombre d'opérations par image	268 697 600	67 371 008	17 039 360
En million d'opérations	267	67	17

Figure 10 : Evaluation du nombre de points à calculer suivant la taille de l'imagerie

Dans le cas d'une imagerie 32 x 32, N = 32, chaque calcul de C(u,v) prend 32 x 32 multiplications et 32 x 32 additions, pour une imagerie complète, cette opération est calculée 32 x 32 fois (figure 10). Il est donc nécessaire de calculer en parallèle afin de pouvoir réaliser le traitement de l'ensemble de

l'image. Aussi, nous allons proposer une architecture du flot de données qui permet de traitement en parallèle de ce calcul de corrélation.

L'élément de base de notre **corrélateur** capable de traiter **8 pixels, codé chacun sur bits, en une seule période d'horloge**. Ce corrélateur est composé d'une suite d'opérations de multiplications et d'additions successives (figure 11). Ensuite, ce module multiplié pour créer un composant capable de 128 pixels d'imagette (et donc 128 pixels du en même temps.

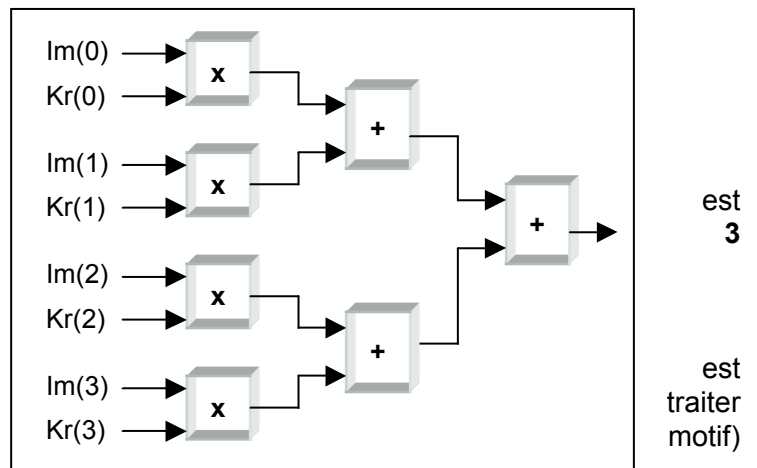


Figure 11 : architecture d'un corrélateur de 4 pixels sur 3 bits

Pour une imagette 16 x 16, un demi corrélateur 128 bits est suffisant, pour une imagette de 32 x 32, il faut 2 corrélateurs, et pour l'imagette de 64 x 64, il faut 8 corrélateurs. Ainsi, il faudra 2 passages pour l'imagette 32 x 32 et 8 passages pour l'imagette 64 x 64.

Un corrélateur ne se compose pas uniquement du composant présenté ci-dessus. Il faut tenir compte du chargement des pixels de l'imagette et du motif dans le corrélateur et la sauvegarde des résultats et la détection du maximum.

Les rapports fournis après compilation des différentes solutions sous le logiciel Quartus II (Altera), nous ont permis d'estimer la surface d'occupation en cellules logiques et en blocs mémoires pour chaque module. L'analyse temporelle nous a permis d'avoir une estimation du temps de calcul de la fonction de corrélation d'une paire d'imagettes et par suite le temps nécessaire pour le calcul de toute l'image (figure 12).

	Cellules logiques	Mémoire (bits)	Temps en ns
Chargeur du motif	787	-	9
Chargeur d'imagette	3096	4064	14
<b>Corrélateur 32 pixels</b>	1135	-	42
Séquenceur	60	-	21
Détecteur du pic de corrélation	98	-	17
Corrélateur complet	6967	16384	57

Figure 12: Estimation des surfaces et des temps de propagation

Taille de l'imagette	64 x 64	32 x 32	16 x 16
Nombre de bits de l'imagette	4096	1024	256
Nombre de corrélateur 32 bits	128	32	8
Temps estimé (57 ns)	7,3 µs	1,84 µs	0,46 µs
Nombre d'imagettes par image	256	1024	4096
Temps de calcul global	1,87 ms	1,87 ms	1,87 ms

On peut constater que ces temps, identique quelle que soit la taille de l'imagette, reste nettement inférieur au temps de chargement d'une image imposé par la caméra de 83,3 ms, mais ceci n'est qu'une estimation par une addition simple des temps de chaque unité.

### Perspectives :

Sur le plan de l'évaluation des critères de qualité du résultat, il reste encore la tâche de calcul de la valeur optimale du délai  $\Delta t$  en fonction des valeurs des vecteurs. Il faut parcourir les valeurs des vecteurs, éliminer certains qui peuvent avoir des valeurs très différentes des autres, trouver une valeur médiane et ensuite de décider de modifier la valeur du délai. Une étude des imagerie de corrélation pour en extraire par exemple, le rapport entre la valeur du pic maximal et la valeur du deuxième pic (une sorte de rapport signal à bruit du résultat de la corrélation). Une estimation de la concentration peut aussi nous avertir que les valeurs des vecteurs vitesses ne sont significatives.

Sur le plan de l'implantation dans un circuit FPGA, la gestion et le stockage des images avant leur découpage en imagerie et le transfert de ces dernières dans le corrélateur reste à implanter. De même, le transfert des résultats vers l'ordinateur n'a pas été réalisé.

Intervenants Monastir : Nabila Filali (doctorante), Taoufik Filali

Production scientifique : C18, C21

Programme TEMPRA, puis MIRA (mobilité internationale de la Région Rhône-Alpes) (2000-2007) : R10

Nom du laboratoire de Monastir UMMFT : unité de métrologie, de mécanique des fluides et thermique.



## 3.3.3 Biométrie

### 3.3.3 Biométrie

Ce projet a démarré en janvier 2003 lorsque j'ai pu réunir les collègues du LE2I (Laboratoire d'Electronique, de l'Image et d' Informatique) de l'université de Bourgogne à Dijon, ayant déjà travaillé sur un système de reconnaissance de visage à base de réseau de neurones et les représentants de la société Atmel basée à Grenoble. De ces rencontres est née une collaboration qui a permis de demander et d'obtenir un soutien de la région Rhône-Alpes (R11). Depuis novembre 2004, j'encadre un doctorant (Lionel Pierrefeu) qui a pu donner un coup d'accélérateur à ce travail.

#### **Contexte**

Notre projet est de créer un microsystème de vision, communément nommé rétine, capable d'analyser une scène en environnement naturel par un capteur d'image de type CMOS afin de détecter des événements ou des situations prédéfinies. D'un côté, le laboratoire LE2I disposait alors une expérience dans ce domaine, de l'autre, le partenaire socio-économique, la société Atmel, a très vite exprimé son intérêt pour un produit grand public, bas coût, d'authentification de visage d'une seule personne. L'expérience acquise au laboratoire LTSI en traitement d'image, en implantation de ce type d'algorithmes sur des FPGA font que les intérêts et les motivations des trois partenaires ont très vite convergé vers l'objectif de réalisation d'une rétine d'authentification mono personne.

#### **Description charges du système retenu**

Les discussions avec le partenaire socio-économique ont permis de mettre en forme un cahier des charges d'un système qui pourrait être commercialisé et qui intégrerait les fonctions de reconnaissance de visage déjà décrites.

La société Atmel développe des capteurs biométriques pour des applications grand public. A titre d'exemple, elle propose un capteur optique d'empreintes digitales installé sur un organisateur afin de remplacer la saisie d'un mot de passe.

Un capteur 'mono puce' de reconnaissance de visage du propriétaire de l'appareil protégé pourrait compléter leur offre de capteur biométrique.

Ce cahier des charges peut se résumer ainsi :

- capteur on chip (mono puce),
- faible coût, donc des moyens numériques de traitement limités afin de minimiser la surface de silicium nécessaire,
- la reconnaissance d'une seule personne,
- apprentissage réalisé par l'utilisateur,
- un taux de fausse reconnaissance faible (<10%)
- un taux de non reconnaissance moyen (<15%).

Il a été jugé que, pour le type d'application visée, une non reconnaissance de la bonne personne était moins grave qu'une erreur de reconnaissance. Il semble que l'accès à un ordinateur par une personne non autorisée est plus critique que le refus d'accès à la bonne personne, celle-ci pouvant toujours saisir son mot de passe.

Une solution à base de réseau de neurones a été retenue car cette technique offre un excellent rapport coût / performance. En effet, la complexité modeste de ce type de classification permet une implantation sans trop de difficultés. Toutefois les résultats en termes de taux de reconnaissance, du taux de non reconnaissance et du taux de fausse reconnaissance restent modestes vis-à-vis d'autres techniques.

Ces taux sont calculés de la manière suivante. On présente au système N images de la personne à reconnaître et M images d'autres personnes. Le système répond qu'il a reconnu A fois sur les N images la bonne personne et que, parmi les M images, il a reconnu B fois la bonne personne. Le taux de bonne reconnaissance (TBR) est le rapport entre A et N ( $=A/N$ ), le taux de non reconnaissance (TNR) est le rapport entre l'écart entre A et N et N ( $=(N-A)/N$ ). Le taux de fausse reconnaissance (TFR)

est le rapport entre B et M (=B/M). Un système parfait apporte un TBR de 100%, un TNR et un TFR de 0%.

La particularité d'un système à base de réseau de neurones réside dans le fait que sa structure est générique, son adaptation à l'application est réalisée par une phase d'apprentissage. A l'issue de celle-ci, les coefficients de pondération du réseau sont connus, ils sont utilisés dans la phase de reconnaissance.

Notre système est organisé en 3 blocs, bloc qui adapte l'image issue du capteur CMOS, réseau de neurones qui constitue le deuxième bloc. L'apprentissage forme le troisième bloc (figure 2). Le capteur (Eye on Si – AT76C451 –Atmel-), produit des images de résolution CIF (320x280 pixels) avec un débit de 15 images seconde. Le format des images est de type YcrCb 4 :2 :2 numérique. Les images sont converties en monochrome par sélection des valeurs Y des pixels.

L'adaptation des images commence lecture d'une fenêtre de 60 par 80 pixels au centre de l'image. Une correction de luminosité est réalisée. Un filtrage passe bas un sous-échantillonnage sont appliqués.

L'imagette est alors proposée au réseau de neurones préalablement appris. Ce dernier effectue un calcul de similarité entre le les visage(s) servant à l'apprentissage du réseau de neurones et celui présenté à l'entrée du système. En fonction du résultat fourni, une décision de reconnaissance est prise. Un voyant indiquera la reconnaissance visage appris. La figure 3 présente le synoptique des fonctions du système complet.

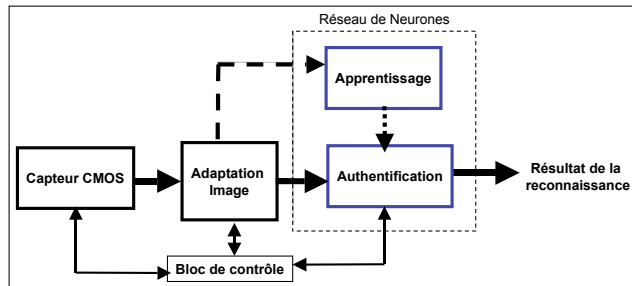


Figure 2 : synoptique global du système

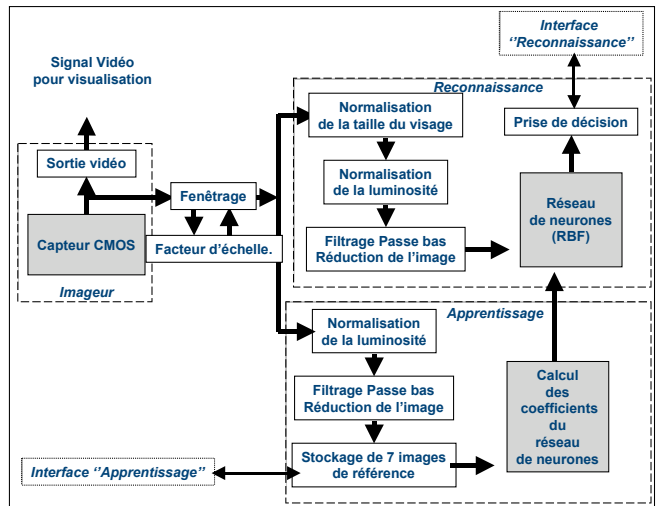


Figure 3 : synoptique détaillé du système

**Réseau de neurones**

Un réseau de neurone de type RBF est composé de 3 couches, une couche d'entrée, une couche cachée une souche de sortie. Chaque point de sortie est la somme pondérée de la valeur de chaque neurone caché. La fonction d'un neurone caché permet d'amplifier et de sélectionner les résultats de la couche précédente. Ce résultat est la somme des écarts entre coefficients de pondération et le vecteur d'entrée (figures 4).

Lorsqu'un visage à reconnaître présenté au réseau de neurone, l'ensemble des pixels de l'image forme vecteur d'entrée  $X_i$ . Chaque élément ce vecteur d'entrée est comparé à un coefficient  $C_{ij}$  (i est l'indice dans le vecteur référence, j est l'indice du neurone caché), on obtient la distance D. Les valeurs absolues des écarts sont additionnées et présentées aux neurones cachés Le neurone caché applique une fonction

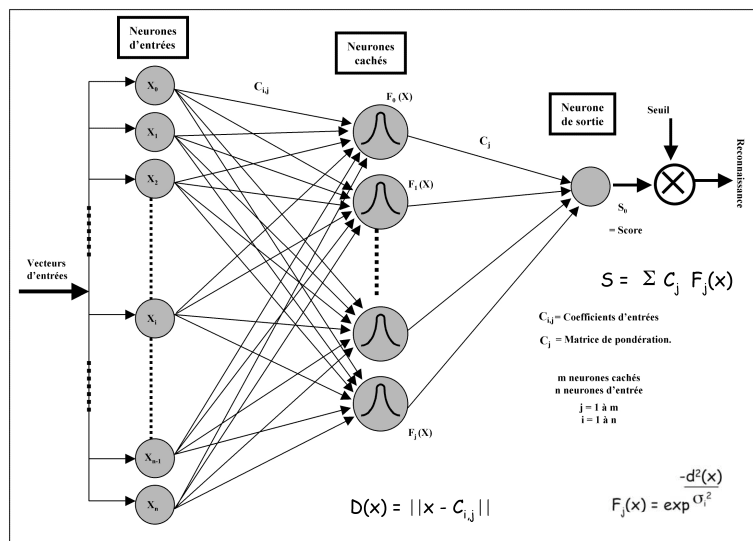


Figure 4 : synoptique du réseau de neurones

gaussienne à la somme des écarts. Les résultats  $F$  des fonctions de chaque neurone caché sont additionnés avec des pondérations pour obtenir le score de la phase de reconnaissance du réseau de neurone. Ce score  $S$  est ensuite comparé à un seuil pour déterminer la reconnaissance.

### Phase d'apprentissage

Les coefficients de la fonction gaussienne du neurone caché ont été retenus à la suite d'une série d'images de test sur une suite d'images de d'apprentissage, nommées images de référence. Cette même suite d'image de référence forme les  $m$  vecteurs de référence. La taille  $n$  des vecteurs est fixée, pour l'instant, à 320. Tous nos essais, jusqu'à présent, ont été réalisés avec un nombre de neurones cachés de  $n = 7$ . Les coefficients de pondération de sorties  $C_j$  sont obtenus par inversion de la matrice  $[C_j]$ . En effet, la sortie  $S$  est fixée de manière arbitraire, ici la valeur 10, nous obtenons l'équation  $[S] = [F_j(x)] \cdot [C_j]$ .

A la suite de ce choix de cette valeur 10, la valeur du seuil de comparaison à la fin de la phase de reconnaissance est par conséquent imposée : un visage est reconnu lorsque le score  $S$  est proche de 10. Voici un exemple d'une série de 7 images de référence (figure 5).



Figure 5 : exemple d'images de référence

### Correction de la luminosité (normalisation de l'histogramme)

Afin de maximiser les taux de reconnaissance et de minimiser le taux de fausse reconnaissance, nous avons cherché à présenter au réseau de neurones des images (vecteur d'entrée) ayant une luminosité toujours de même valeur. L'histogramme des poids des pixels de l'image offre un moyen de caractériser la luminosité globale de l'image. Aussi, un algorithme qui transforme l'image pour obtenir un histogramme normalisé a été retenu.

En appliquant cet algorithme aux images d'apprentissage et aux images de tests, nous présentons au réseau de neurones des images avec une luminosité globale toujours identique.

Notre but est de reconnaître le visage d'une personne définie. Il est donc impératif de ne pas confondre lors du traitement, le visage d'un inconnu et celui de la personne à reconnaître. Ainsi le taux de fausses reconnaissances permet de caractériser la qualité d'un système d'authentification de visage. Comme nous l'avons vu, le réseau de neurone que nous utilisons calcule un score qui détermine la similarité entre les visages appris et le visage testé. Plus score obtenu est important (maximum réglé à 10 dans notre cas) plus le visage testé est proche de celui à reconnaître. La reconnaissance et la non reconnaissance sont délimitées par un seuil en sortie du système. Nous allons donc observer les variations du nombre de fausses reconnaissances en fonction du seuil fixé.

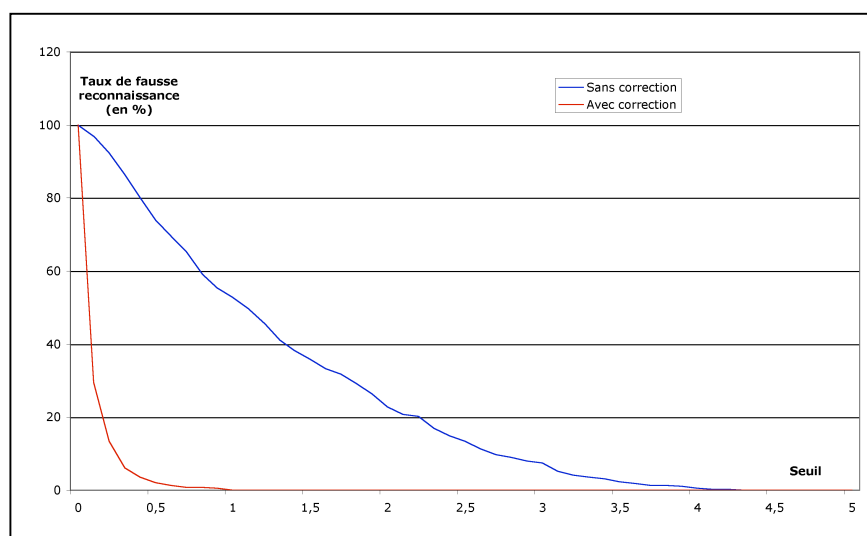


Figure 6 : Taux de fausse

reconnaissance en fonction du seuil

Les résultats ci-dessus (figure 6) ont été obtenus pour 390 visages d'inconnus (base Olivetti Research Laboratory). L'apprentissage a été réalisé à partir de 7 images de visage (soit 7 neurones cachés).

Nous pouvons constater que l'utilisation d'un prétraitement d'égalisation d'histogramme permet d'obtenir un taux de fausse reconnaissance égale à 0 pour un seuil de 1 contre 4,5 sans correction des images. Nous pouvons donc en conclure que le fait de corriger la luminosité des images permet d'améliorer significativement le fonctionnement de l'algorithme de reconnaissance de visage. En réglant le seuil de détection le plus bas possible, nous permettons une plus grande variation pour le visage à reconnaître. Le taux de bonne reconnaissance s'en trouve donc augmenté.

La méthodologie d'égalisation d'histogramme retenue se décompose en deux temps. Dans une première étape, nous calculons à partir de l'image d'entrée un histogramme cumulé. Dans un second temps, nous normalisons les valeurs de cet histogramme cumulé (valeur de 0 à 255) afin de définir une fonction d'étalement pour l'histogramme.

Ensuite, l'image d'entrée est traitée à l'aide de cette fonction d'étalement (sous forme de LUT ou table de correspondance) pour donner l'image de sortie. Le synoptique est présenté figure 7.

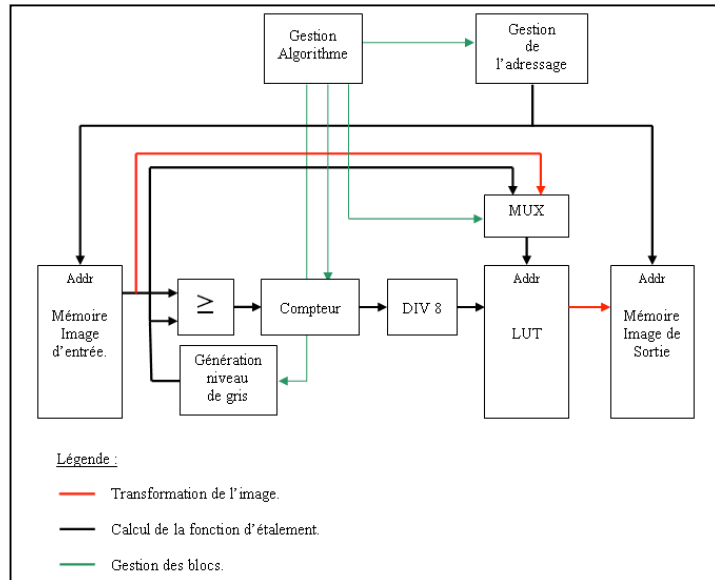


Figure 7 : Schéma structurel de l'algorithme

implanté :

### Implantation FPGA

Afin de réaliser un prototype (7 neurones cachés, vecteur d'entrée de 320 composantes), nous avons implanté le système sur carte FPGA Stratix (Altera). Ce travail nous a permis d'avoir le taux d'occupation du FPGA et la vitesse d'exécution maximale du code. Pour le système comprenant, le bloc de gestion capteur CMOS, le bloc de correction de luminosité (taille estimée), le bloc d'adaptation et réseau de neurone, nous obtenons le taux d'occupation donné figure 8.

	CLB	Registres (BaseD)	LUT	RAM (bits)
Gestion Programme	322	195	136	15360
Bloc de Récupération de l'image	93	55	46	-
Bloc d'Adaptation de l'image	96	54	22	-
Bloc correction de la luminosité	70	-	-	2048
RN * (calcul distance et fonction réponse)	958	604	479	-
Total	1276 (5%)	-	-	17408 (1%)
STRATIX S25	25660	-	-	1944576

\* Un neurone a été implanté pour l'instant. La valeur proposée dans le tableau est donc estimée  
 Nbr CLB : (7 x 114) + 20% = 958  
 Nbr registres: (7 x 72) + 20% = 604  
 Nbr LUT: (7 x 57) + 20% = 479

une  
taux  
du  
le  
des

Figure 8 : Occupations en CLB différentes fonctions

Après lecture du tableau, nous constatons que l'algorithme de correction de luminosité ne représente que 5,5 % du système total. La surface d'implantation nécessaire est donc faible.

Afin d'apprécier l'efficacité du système proposé, nous avons estimé le temps d'exécution du système pour la reconnaissance d'un visage. Pour cela, après simulation du code VHDL sur Quartus, nous obtenons une fréquence maximale pour le cadencement (horloge de contrôle) du système. Il est nécessaire de préciser que le système possède deux horloges de contrôles. La première correspond à l'horloge pixel fournis par le capteur d'image, elle cadence le bloc de récupération d'image. La seconde cadence le reste du système.

Les résultats obtenus sont :

Fréquence maximale de l'horloge pixel : 58 MHz,



Fréquence maximale de l'horloge système : 186 MHz.

A partir de ces résultats, nous pouvons estimer le temps d'exécution d'une reconnaissance de visage :

Temps de récupération d'une image  $\approx 33,3$  ms (temps imposé par le capteur, la fréquence image est de 30 images par seconde),

Temps de calcul de reconnaissance : 20  $\mu$ s pour une fréquence système de 80 MHz ,

Temps de calcul du bloc de correction de la luminosité :

$$T_{\text{histo}} = T_B + (NG_{\text{max}} - NG_{\text{min}}) \times T_B + T_B$$

$$\text{Avec } T_B = (N \times M) \times (1 / F_{\text{clk}}) \quad F_{\text{clk}} = 80 \text{ MHz, } N = 32 \text{ pixels, } M = 40 \text{ lignes}$$

(N et M dimension de l'image)

NG = niveaux de gris minimal et maximal de l'image.

Le temps total pour la correction d'une image sera de 4,13 ms.

L'augmentation du temps de calcul occasionné par l'ajout du bloc de correction de la luminosité est importante par rapport au temps de calcul du réseau de neurone. Cela est dû au calcul de l'histogramme cumulé de l'image (256 balayages de l'image). Au final, nous obtenons un système de traitement fonctionnant dans un temps très inférieur au temps de récupération de l'image.

### Perspectives

La première étape sera d'optimiser la taille des vecteurs d'entrée du réseau de neurones. Les essais ont été réalisés avec un vecteur d'une taille de 320 points. Nous nous proposons d'étudier la valeur du taux de reconnaissance du système en fonction de la taille des vecteurs d'entrée de façon à déterminer cette taille donnant les meilleures performances tout en conservant une occupation du FPGA raisonnable. Si la taille du vecteur augmente, le nombre de bloc mémoire augmente proportionnellement, mais deux fois plus vite que pour l'image. En effet il y a en plus de la mémoire utilisée pour le stockage du vecteur une mémoire référence.

La deuxième étape concerne la localisation automatique du visage dans l'image et si possible d'en déterminer un ordre de grandeur de la taille du visage. Cette localisation permettra de positionner la fenêtre d'étude et de traitement et donc d'éviter de se positionner obligatoirement au centre de l'image. La connaissance, même approximative de la taille du visage, doit offrir la possibilité de placer à la suite du filtrage passe bas, un sous-échantillonnage adaptatif qui permettra une adaptation automatique au problème du facteur d'échelle. Les premiers essais intéressants ont été réalisés avec une segmentation de l'image par un filtrage passe haut de type gaussien avec une sélection de taille des objets segmentés.

Ensuite, un prototype de l'ensemble devra être réalisé puis caractérisé.



## **3.4 Participation à des opérations de recherche multidisciplinaires**

### 3.4.1 Système de mesure de déplacement haute résolution

#### Contexte

Dans le cadre d'une action transversale à l'intérieur du laboratoire TSI, un projet de réalisation d'un micro-système mécano-optico-électronique de mesure de déplacement très haute résolution a été mis en place. Il s'agit de proposer aux fabricants de machines de positionnement de wafer de silicium lors de la fabrication de circuits intégrés un capteur miniaturisé de déplacement dont la résolution est inférieure au  $\mu\text{m}$ . Le principe du capteur repose sur l'utilisation de réseaux optiques de faible période (ici  $1\mu\text{m}$ ).

Ce projet a été soutenu par le CNRS (II 27)(R8), en collaboration avec le laboratoire LAAS et l'AIME à Toulouse. La production scientifique a été de 3 articles, 4 communications et d'une affiche (P15, P12, P11, C16, C14, C13, C11, A7).

Dans ce projet, j'ai eu la responsabilité de la mise en place de toute la chaîne de mesure (des photodiodes au bus normalisé). Les contraintes de miniaturisation imposaient la réalisation d'un ASIC (application specific integrated circuit) intégrant les photodiodes et le traitement analogique. Ce circuit a été conçu en collaboration avec les collègues de l'AIME.

#### Principe du capteur

L'élément optique de ce capteur est un réseau diffractant gravé sur un ruban de verre. La période spatiale des réseaux réalisés par les collègues stéphanois est de  $0,5\mu\text{m}$ . Ces réseaux diffractent la lumière avec deux ordres prépondérants (+1 et -1). Deux réseaux, placés l'un après l'autre sur le chemin optique, créent 4 faisceaux qui vont interférer. Si un des deux réseaux se déplace par rapport à l'autre, un mouvement des interférogrammes peut alors être enregistré. Les photodiodes éclairées par ces interférogrammes vont fournir des courants variant de manière périodique dans le temps lorsqu'un déplacement a lieu (Figure 1).

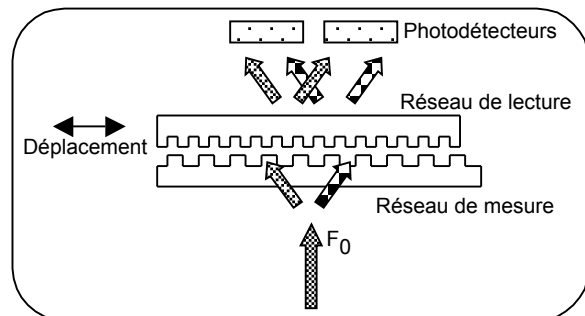
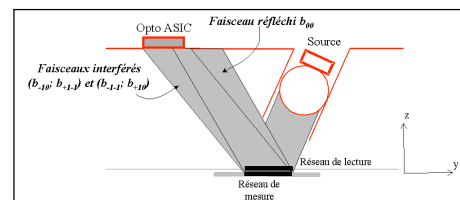


Figure 1 : principe de mesure du capteur de déplacement

A partir des variations temporelles des courants issus des photodiodes, le déplacement relatif des réseaux peut être calculé. La période temporelle de ces courants est liée à la période spatiale des réseaux ( $0,5\mu\text{m}$ ). Afin de satisfaire aux contraintes de miniaturisation, une configuration avec un décalage angulaire a été calculée. En effet, il était important de pouvoir placer la source laser à du réseau de lecture (figure 2).



côté

Figure 2 : Configuration angulaire

Classiquement, on place un système de 2 réseaux de lecture avec un déphasage, ce qui permet deux séries de signaux avec le même déphasage mais cette fois ci temporel. Le fait de disposer des deux séries de signaux offre la possibilité de connaître le sens du déplacement (figure 3).

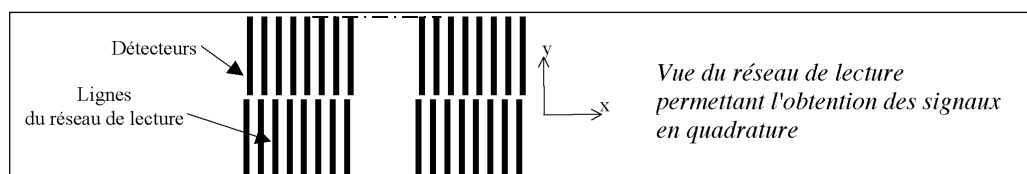


Figure 3 :

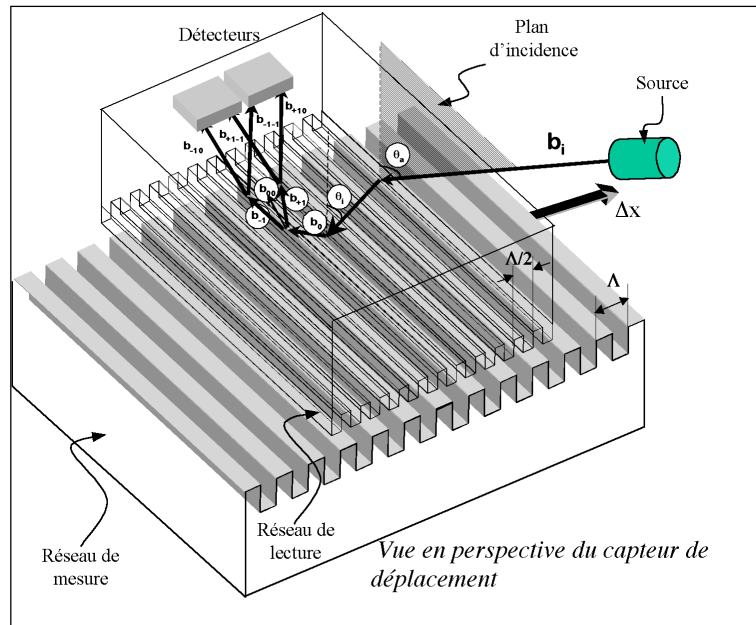
Disposition de 2 réseaux décalés

Le décalage entre les deux réseaux étant d'un quart de période, les signaux issus des photodiodes ont été nommés « Sinus » et « Cosinus » (figure 4).

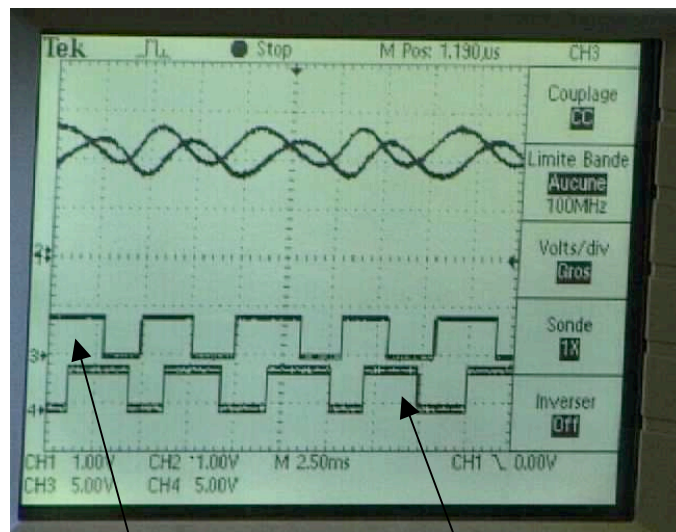
Une période du « sinus » correspond à un déplacement d'une période du réseau de mesure, soit 0,5  $\mu\text{m}$ . La première méthode consiste à compter les « minimas » et les « maximas » pour mesurer le déplacement par pas de 250 nm. En combinant les deux signaux « sinus » et « cosinus », le comptage s'effectue pas de 125 nm (figure 5).

Une méthode complémentaire permet de mesurer le déplacement avec une précision meilleure. En effet, assimilant ces signaux à des fonctions trigonométriques, il est possible de déterminer un déplacement inférieur à nm. A partir de la tension mesurée dans la période et du calcul de la fonction trigo inverse (arcsin ou arccos), on peut remonter au déplacement intermédiaire. Ce calcul appelé « interpolation ».

Figure 4 : dessin de l'ensemble 'tête mesure'



et par en 125 est de



« sinus » « cosinus » « sinus TTL » « cosinus TTL »

Figure 5 : Exemple de chronogrammes des signaux issus de la tête de mesure

**ASIC N°1**

Une première version d'ASIC a été réalisée en 2000. Elle comportait plusieurs photodiodes, de plusieurs types et de différentes tailles. Des soustracteurs de courant avaient été câblés car cette fonction est la première à être réalisée dans ce capteur. Des essais ont été effectués sur un convertisseur analogique – numérique (CAN) de type Sigma Delta. Des CAN sont indispensables pour effectuer les calculs d'interpolation (figure 6). Les mesures sur les photodiodes ont montré que les sensibilités étaient comparables à celles des photodiodes discrètes. Ce qui est encourageant.

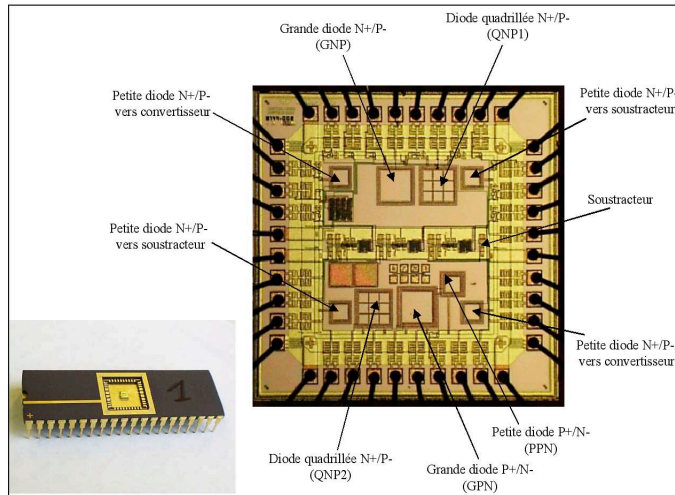


Figure 6 : photographie de l'ASIC N°1

## ASIC N°2

Les tests fonctionnels, les caractéristiques des photodiodes, des soustracteurs et du CAN ayant été satisfaisants, une autre réalisation d'ASIC a été entreprise avec l'objectif d'intégrer le maximum de fonctions.

La taille des photodiodes est fixée à 200µm de côté, l'expérience du premier ASIC a permis de savoir si cette surface était suffisante. La taille des photodiodes entre en compte dans la structure mécanique de l'ensemble, capteur, réseaux et source. La distance entre les deux photodiodes d'un capteur (sinus- et sinus+) intervient également dans la construction de l'ensemble (figure 7).

Le premier traitement des courants issus des photodiodes est un soustracteur de façon à éliminer les niveaux continus et d'augmenter l'amplitude. Ces courants « sinus » (« cosinus ») sont ensuite comparés à une référence de courant pour obtenir des signaux appelés « TTL » (voir photographie des chronogrammes ci dessus). Les valeurs de référence peuvent être sélectionnées par l'utilisateur via la ligne de communication série de l'ASIC (4 seuils positifs et 3 seuils négatifs).

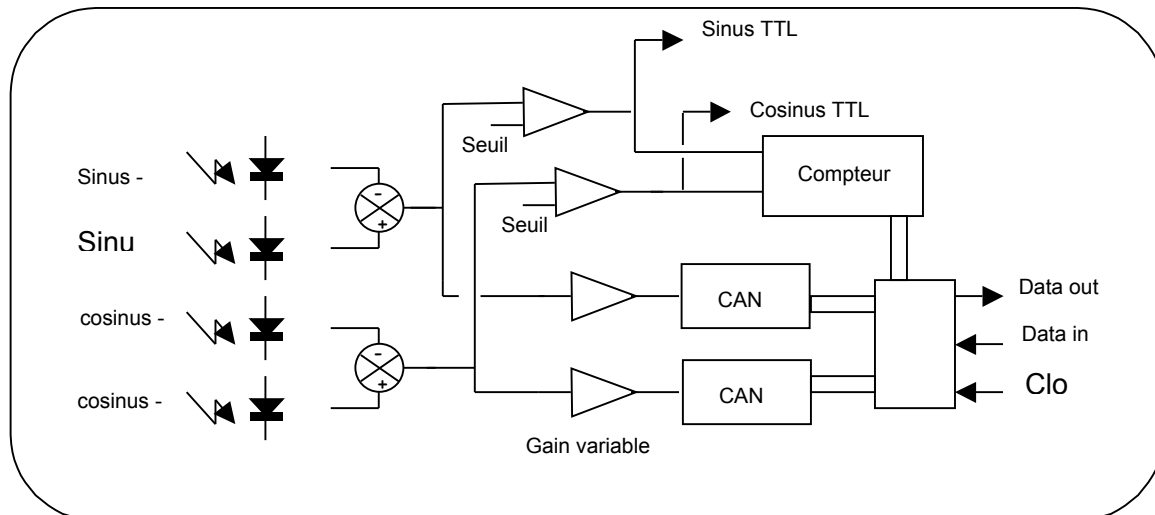
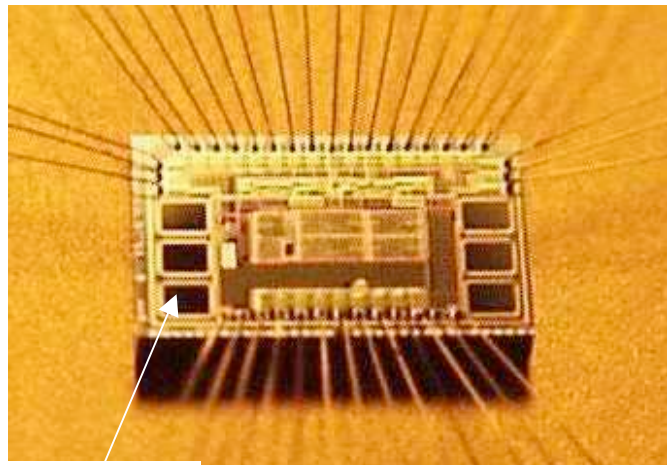


Figure 7 : synoptique des fonctions intégrées dans l'ASIC N°2

Les valeurs « sinus » et « cosinus » sont disponibles sur les bornes du circuit en courant et en TTL. Ces signaux TTL incrémentent ou décrémentent un compteur de 24 bits suivant le sens du déplacement. Ce compteur enregistre les déplacements par pas de 125 nm. La valeur du compteur peut être transmise à l'extérieur de l'ASIC N°2 par la ligne série.

Les courants « sinus » et « cosinus » sont amplifiés avant d'être convertis en tension. Ces deux tensions sont disponibles sur les bornes du circuit. Le gain de cet amplificateur est sélectionné par l'utilisateur via la ligne série entre 8 valeurs allant de 0,25 à 32. Ces tensions sont converties en un nombre de 12 ou de 6 bits (choix de l'utilisateur) par des convertisseurs de type Sigma Delta. Les résultats des convertisseurs peuvent être également transmis par la ligne série.

L'interface de liaison série synchrone reçoit la configuration (gain, seuil, taille du CAN, remise à zéro du compteur) et transmet valeurs des CAN et du compteur (figure 8).



Photodiodes

bits

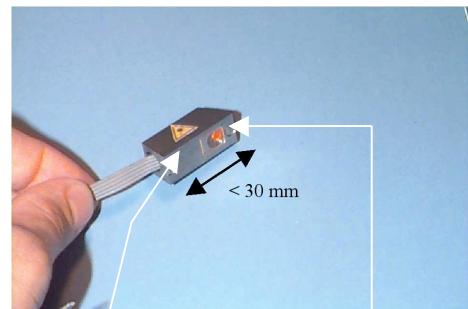
les

Figure 8 : photographie de l'ASIC 2

### Boîtier de contrôle

La tête de mesure composée des réseaux de lecture de mesure, du laser, de l'ASIC N°2 et du câble de liaison se place dans un boîtier métallique d'une longueur de 30 mm (figure 9).

Ce module est relié à un boîtier de commande dont le consiste à dialoguer avec l'ASIC de la tête de mesure via ligne série synchrone. Le dialogue avec l'utilisateur s'effectue avec quelques boutons poussoirs et un afficheur alphanumérique. Une connexion USB permet un transfert de valeurs vers un ordinateur (figure 10).



Laser

Réseau de mesure

et

rôle  
une

des

Figure 9 : Photographie de la tête de mesure

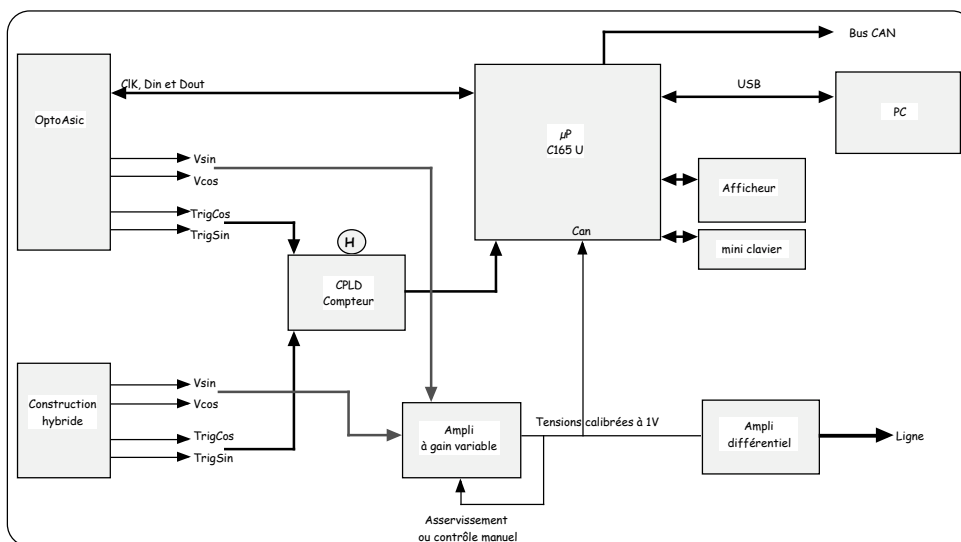


Figure 10 : synoptique des fonctions du boîtier de contrôle

Ce boîtier de contrôle est prévu également pour lire une tête de mesure non miniaturisée (construction hybride). Un amplificateur à gain asservi a été placé pour maintenir des tensions calibrées à 1 Vcc. Un circuit logique programmable permet le comptage des impulsions issues de la tête de mesure, En effet, le temps de réponse nécessaire était trop faible pour le micro contrôleur.

Une limite, toutefois, est constituée par la bande passante de l'optoacoustic qui ne permet pas d'obtenir des signaux TTL de fréquence supérieure à 200 KHz. Le débit de la ligne série, même si elle fonctionne avec une horloge de 8 MHz, impose une vitesse de déplacement du réseau de lecture inférieure à 1m/s.



## 3.4.2. Systèmes de mesure de température

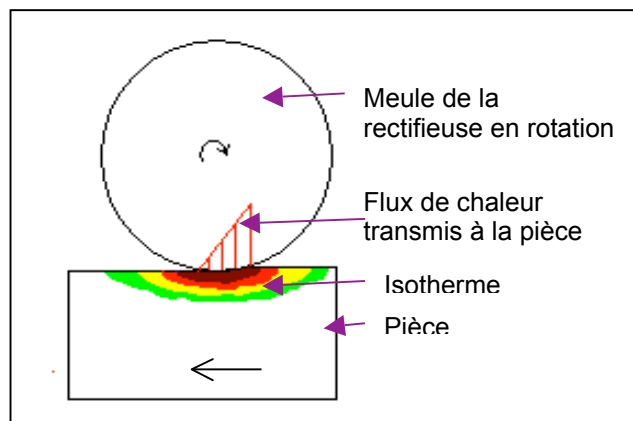


### 3.4.2.1. Flux de chaleur en usinage par thermographie IR

Cette étude a pour but de définir le flux de chaleur entrant dans une pièce lors du procédé de rectification, par la connaissance des températures au contact de la meule et en surface de la pièce. L'étude conduira donc à définir des isothermes, afin de connaître la localisation et la valeur des températures auxquelles est soumise une pièce rectifiée. Il existe plusieurs intérêts à connaître ces températures. Les températures étant très élevées au contact de la meule (observation de copeaux incandescents), la pièce peut subir des transformations métallurgiques importantes. De plus, ces températures étant observées durant un laps de temps très court (environ 0,1 s), le refroidissement est très important ce qui peut entraîner des phénomènes de trempes superficielles modifiant les caractéristiques de la pièce. Connaître ces températures pourrait donc permettre de comprendre ces phénomènes, voir de les anticiper. En définissant ces températures et leur localisation, il serait alors possible de déterminer précisément la forme et valeur du flux de chaleur entrant dans la pièce (figure 1).

La rectification étant un travail de finition, la qualité de l'état de surface est un critère important. Toutes informations permettant de limiter le flux de chaleur dans la pièce et donc réduire les tensions de surface sont très recherchées par les fabricants de d'outillage et machines-outils afin d'optimiser paramètres de coupe, des caractéristiques de meule, ...

Figure 1 : Flux de chaleur entre une meule et



la

des

une pièce usinée

De nombreuses difficultés existent pour la mesure des gradients de température. Tout d'abord, la présence de la meule limite la visibilité de la zone observée. Par conséquent, l'observation du rayonnement IR induit par la montée en température ne peut se faire soit qu'après le passage de la meule soit que sur le côté. Le temps de diffusion de l'énergie calorifique dans le métal étant très rapide, observer après le passage de la meule ne donnera que des informations partielles. Observer sur le côté semble a priori plus simple, toutefois la zone dans laquelle apparaissent les gradients de températures présente une très faible épaisseur (quelques centaines de micromètres)(figure 1). Ces gradients seront de fortes amplitudes car sur une distance de 100  $\mu\text{m}$ , la température va passer de 1000°C (copeaux incandescents) à la température ambiante.

Malheureusement, il n'est pas possible d'obtenir des informations sur le flux de chaleur absorbé par la pièce à partir de l'énergie mécanique fournie par la rotation de la meule. Même en supposant que l'intégralité de l'énergie mécanique fournie lors de la rectification est transformée en énergie thermique, il n'existe actuellement aucune méthode permettant d'effectuer un bilan thermique précis : on ne peut donc pas définir la chaleur transmise à chaque élément (meule, copeaux et pièce). Cette énergie calorifique va se distribuer entre la meule, la pièce, les copeaux et le milieu environnant (air, fluide de coupe, ...)(figure 2).

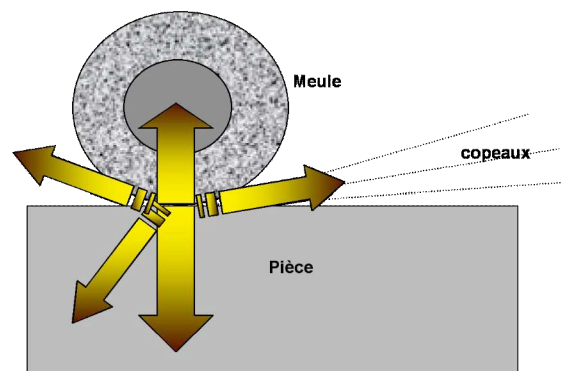
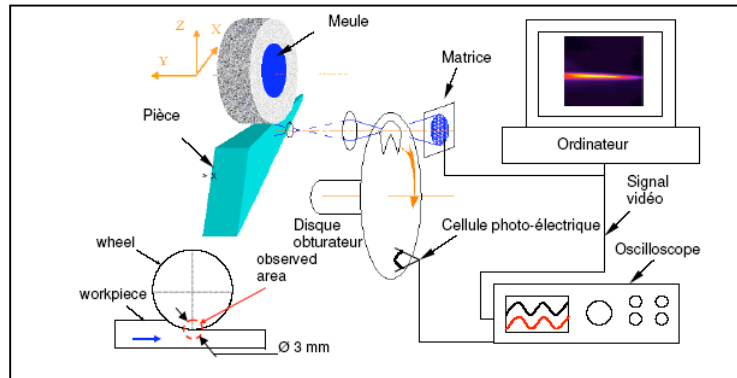


Figure 2 : schéma de diffusion de la chaleur

### Mesure de gradient de température par thermographie IR

Notre choix s'est porté sur la mesure des gradients de température accessible sur le côté de la pièce usinée. Il a fallu mettre en place un système disposant d'un grossissement suffisant (champ de 1 mm) et disposant de temps d'intégration compatible avec la durée du phénomène (1 ms). Toutes les difficultés liées à la mesure de température par thermographie existent là aussi. En particulier, l'émissivité d'une pièce en acier dépend non seulement de l'état de surface (oxydation, degré de finition de la surface, ...), mais aussi de la température elle-même, ainsi l'émissivité peut varier de 0,2 à 0,9, ce qui est énorme. Une phase d'étalonnage est donc indispensable.

Dans le cadre d'un stage d'ingénieur CNAM, Gilles Thomas a pu réaliser un montage comportant un objectif microscopique et un shutter mécanique (roue trouée)(figure 3). Des rayures sur la pièce ont été réalisées de servir de mire de calibration dimensionnelle. L'enregistrement des images sur l'ordinateur est synchronisé grâce à une cellule photoélectrique détectant la rotation du disque.



afin

Figure 3 : installation expérimentale

Plusieurs séquences d'images ont été enregistrées pour différentes configurations d'usinage. La figure 4 montre une de ces images.

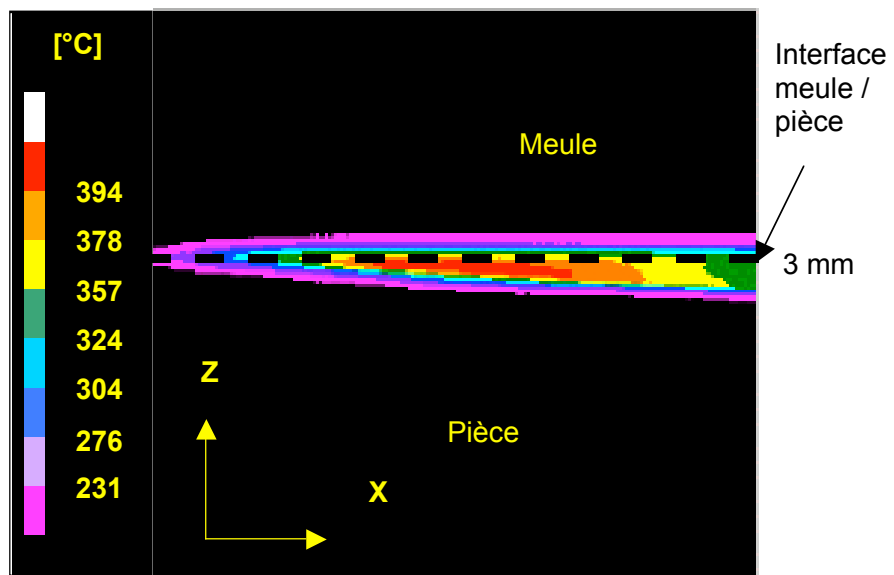


Figure 4 : Exemple de thermogramme

Sur l'ensemble des images, les profils de températures ont pu être extraits (figure 5).

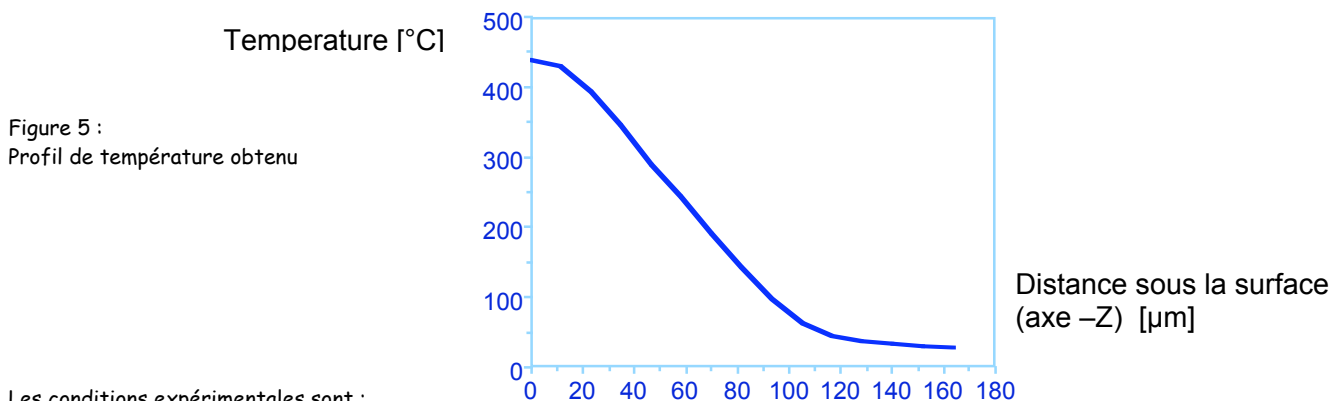


Figure 5 : Profil de température obtenu

Les conditions expérimentales sont :

Pièce : AISI 52100 (ISO 100Cr 6), 61.5 HRc  $\pm$  0.5

Meule : Abrasive:  $Al_2O_3$ , grain size: 60

Vitesse périphérique de la meule : 34 m.s<sup>-1</sup>

Déplacement de la pièce : 60 mm.s<sup>-1</sup>

Usinage d'une profondeur de 50  $\mu$ m sans fluide

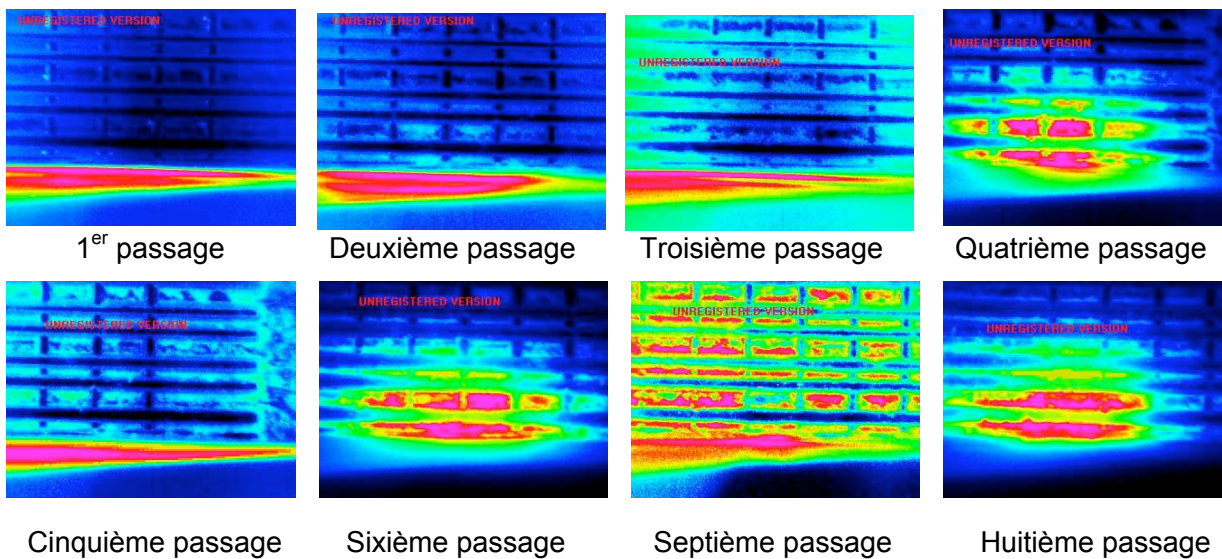
Température ambiante : 25 °C

temps d'intégration : 2ms

On peut constater que la température maximale est nettement plus faible par rapport à celle estimée à 1000°C en repère à l'incandescence des copeaux. Nous avons mis alors en doute la précision de nos mesures. Une seconde étape du travail du stagiaire a été de mettre en évidence les points de la chaîne de mesure qui pourraient augmenter l'incertitude de mesure.

En parallèle, il a été possible d'obtenir en prêt une caméra IR rapide, ce qui nous a permis de valider notre concept. La figure 6 montre quelques images obtenues. Malheureusement, la durée du prêt a été insuffisante pour effectuer correctement le calibrage et nos images ne peuvent pas être exploitées. Ces images sont celles de la mire (rayures sur le côté de la pièce). Cette mire présente des espacements de 10  $\mu$ m en vertical et de 20  $\mu$ m en horizontal. Le passage de la pièce est alternatif, c'est à dire que le premier passage le mouvement de la pièce de la gauche vers la droite, le deuxième de la droite vers la gauche et ainsi de suite.

Figure 6 : images obtenues avec la caméra CEDIP



Ordres de grandeur : vitesse de déplacement de la pièce 3 m/mn  
Taille des isothermes dans la pièce : 10  $\mu$ m  
Contact meule – pièce : 5 mm

L'exploitation de ces images est difficile. Toutefois, on peut remarquer, là aussi, une augmentation de la température avec le nombre de passage de la meule lors d'une séquence d'usinage. L'autre remarque concerne la durée de l'échauffement de la pièce. Ces images, en particulier celle du septième passage, montrent des phénomènes à très courte durée de vie et la prise d'image ne peut les saisir que de temps en temps. Nous n'avons pas encore d'explications à ces « flashes » lumineux, mais ils pourraient être des réflexions de lumière (IR) émise par les copeaux peut être.



Collaboration avec le laboratoire LTDS site de l'ENISE : Hédi Hamdi et Jean Michel Bergeau

(Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes / École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne)

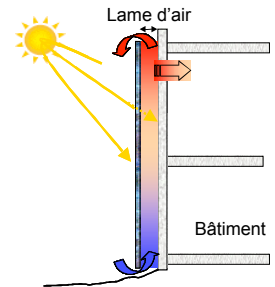
Production scientifique : 3 communications et 1 affiche (C22, C23, C24, A8)

Programme financé : région Rhône Alpes (R3)

### 3.4.2.2. Champs de température 3D par des méthodes optiques

#### Contexte

La détermination du flux de chaleur transféré à l'interface d'un fluide et d'une paroi est un problème fréquemment rencontré lors des étapes de dimensionnement des systèmes thermiques. Les situations de refroidissement, de chauffage ou de séchage par jets en sont un exemple particulier. On peut citer à titre d'exemple, l'habitat pour la gestion aérothermique de l'air dans les bâtiments. Sur le dessin ci-contre, une lame d'air a un rôle important dans les échanges thermiques. Les jets d'air permettent de transférer une densité surfacique de chaleur ou de masse très importante, mais très localisée. Aussi, le mesurage de flux de chaleur échangé entre un jet d'air plan et une paroi plane devient une étape importante.



Le projet est de proposer une méthode optique (non intrusive) pour la mesure du flux de chaleur entre la paroi et le jet d'air et ce dans les 3 dimensions.

Ce projet est une collaboration entre le CETHIL (centre thermique de l'INSA de Lyon), l'équipe 'optique' du LTSI et notre équipe 'image'. Ainsi, les compétences en échanges thermiques (CETHIL), les mesures de vitesse d'écoulement (IMAGE du LTSI) et l'optique interférométrique (OPTIQUE du LTSI) sont réunies. Une communication a été présentée fin 2000 (A5).

#### Méthodes 2D

Des mesures ont été réalisées par les collègues du CETHIL par interférométrie holographique et par thermographie infrarouge. Ces techniques présentent des difficultés de mise en œuvre liées d'une part à l'appareillage et d'autre part aux nombres importants de paramètres d'influence qui condamnent par suite la qualité des mesures.

L'exemple sur lequel nous nous appuyons est celui du transfert de chaleur entre un jet d'air plan (nombre de Reynold jusqu'à 1500) et une paroi chauffée par effet joule (figure 1).

Les images obtenues par interférométrie holographique donnent des gradients de température sous conditions d'écoulement 2D. car le faisceau optique transverse la totalité de l'écoulement, et la déviation des rayons lumineux correspond à l'intégration sur toute la longueur du parcours du faisceau lumineux.

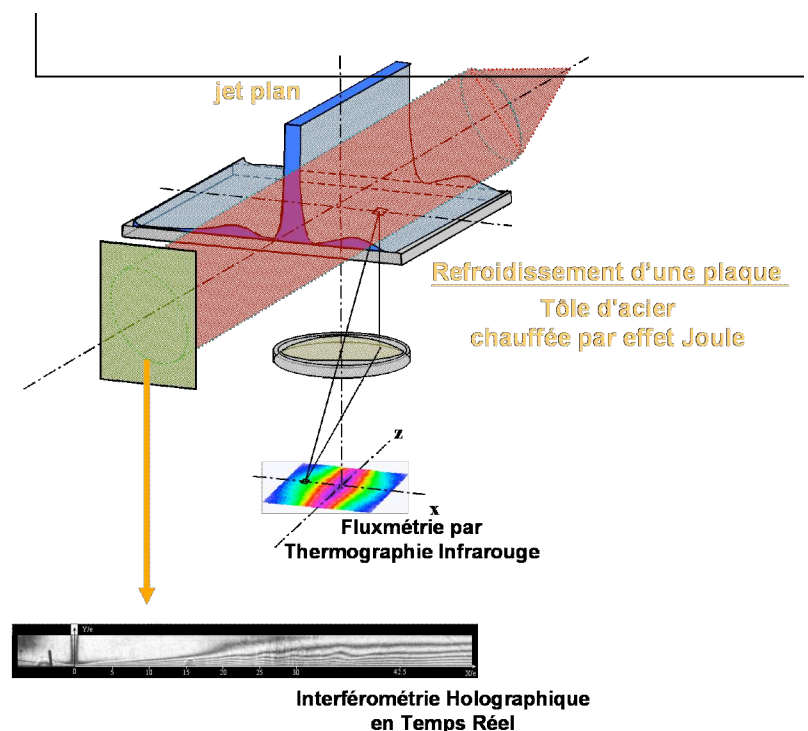


Figure 1 : schéma représentant les mesures en 2D

Dans cette expérience, l'hypothèse d'un champ d'indice de réfraction bidimensionnel est retenue. Ainsi, la mesure locale de l'interfrange et la connaissance de la température de la paroi à partir de thermocouples, permettent de déterminer le champ de température dans le fluide et de calculer le flux de chaleur transféré à l'interface du fluide et de la paroi.

Une caméra infrarouge est placée sous la plaque cible. Le flux convecté à l'interface du fluide et de la paroi peut être calculé à partir des profils de température sur la face arrière de la plaque.

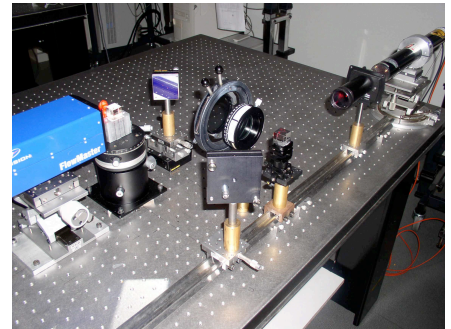
Les valeurs obtenues par les deux méthodes donnent des résultats cohérents dans le cas d'écoulement parfaitement bidimensionnel.

### **Evolution de la mesure de champs de température 2D vers le 3D**

L'évolution naturelle de ces mesures dans un plan est de s'ouvrir vers la mesure de champ de température dans des écoulements présentant des structures tridimensionnelles. Par exemple, les états intermédiaires entre un écoulement laminaire et un écoulement tourbillonnaire peuvent présenter des configurations intéressantes pour le transfert d'énergie calorifique. En effet, sur l'installation expérimentale décrite ci-dessus, des instabilités apparaissent lorsque la vitesse du jet augmente. Ces instabilités se caractérisent par un mouvement de battements du jet sur la plaque. La recherche des meilleures conditions de transferts d'énergie entre le jet et la paroi est un enjeu important pour l'optimisation des systèmes. Aussi, l'aspect dynamique et le caractère très légèrement tridimensionnel de l'écoulement, nous poussent à faire évoluer nos moyens de mesures.

#### Utilisation de l'holographie numérique

La première étape consiste à utiliser une caméra CCD pour l'enregistrement des hologrammes. En effet, l'absence de développement chimique des plaques holographiques apporte une souplesse d'utilisation incomparable. De plus, l'enregistrement de séquence ouvre la possibilité d'étudier les écoulements instables. Le dépouillement numérique des hologrammes donne accès à les images d'amplitude et de phase pour une meilleure interprétation des phénomènes mis en jeu (la variation de phase est liée à la variation des champs de température). Autorisant l'acquisition d'une séquence d'hologrammes, l'holographie numérique permet d'établir, par interférométrie holographique à exposition multiple, les transferts d'énergie localisés entre le jet et la paroi.



Nous avons utilisé un banc d'holographie numérique hors axe

développé au laboratoire TSI dont la géométrie est présentée figure 2. Le faisceau lumineux est séparé en deux bras, l'un sert de référence où son intensité est ajustée au moyen de polariseurs. L'autre bras, dit de mesure, passe dans une zone thermiquement perturbée, c'est à dire qu'elle présente un gradient de température. Les deux faisceaux sont ensuite recombinaisonnés. Leur interférence est enregistrée sur la caméra haute résolution (1280 x 1024 pixels carrés de 6,7  $\mu\text{m}$  de côté, dynamique de 12 bits, 8 i/s).

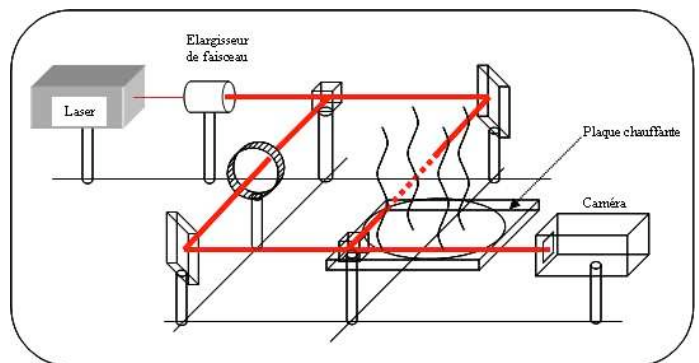


Figure 2 : description et photo du banc holographique

L'interprétation des premières images reconstruites est pour l'instant délicate car des paramètres sont encore à ajuster, notamment concernant la manière dont est perturbée thermiquement notre zone. Toutefois, nous sommes certains de coder sur les images restituées en phase une perturbation de la phase sur le bras de mesure due à des phénomènes thermiques. En effet, des séries d'une centaine d'hologrammes numériques « témoins » sans perturbation thermique sur le bras de mesure, ont été de même enregistrés, dépouillés puis comparés deux à deux pour démontrer que les images en phase restent alors toujours constantes.

#### Mesures simultanées (interférométrie et thermographie)

Cette configuration deviendra possible lorsque le banc holographique sera portable sur l'installation expérimentale décrite ci-dessus. Elle offrira la possibilité d'enregistrer simultanément le rayonnement émis par la plaque chauffée et l'hologramme obtenu par les gradients de températures. Aussi, la thermographie IR fournira une information 2D en x et en z, alors que l'holographie apportera une information dans le plan x et y mais avec une intégration sur l'axe z tout le long du trajet optique. La

question en suspens reste l'exploitation des données issues de ces deux méthodes pour remonter à des champs de température faiblement 3D.

### **Photographie de Speckle**

C'est une méthode interférométrique qui présente un avantage lié à un montage expérimental plus simple qu'un montage holographique. Les franges d'interférences obtenues fournissent des informations sur les gradients d'indices (donc de température) du milieu traversé (figure 3).

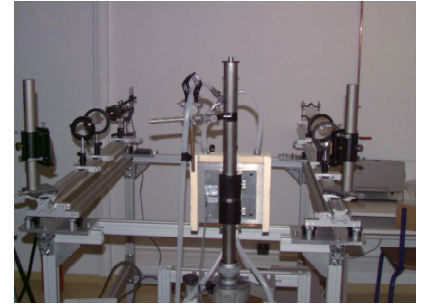


Figure 3 : photographie du montage optique installé au CETHIL

### **Perspectives**

Une première étape est une étude comparative des méthodes présentées au dessus. Une maquette offrant une zone ayant un gradient de température stable et reproductible est en cours de mise au point. Donc, avec une perturbation thermique connue, nous pourrions comparer les résultats issus par les trois méthodes. Peut être, pourrions nous faire un choix ?

Une étude bibliographique n'a pas apporté de solution pour des mesures optiques directement tridimensionnelles. La solution sera, peut être, une combinaison de mesures en couplage avec une modélisation numérique directe.



## **4. Autres aspects du métier d'enseignant-chercheur**

## 4.1. Activités d'enseignement

Les enseignements dispensés s'organisent autour de quatre pôles :

- **Electronique** (TR)
- **Physique** (CM et TD)
- **Electrotechnique** (CM, TD et TP)
- **Informatique industrielle**
  - + Programmation langage C (TD)
  - + Composants et langage VHDL (CM, TD et TP)
  - + Micro contrôleur et langage assembleur (TD et TP)
  - + Instrumentation à distance (PT)

Dans le tableau ci-dessous, sont regroupés les disciplines, les années, le type (CM, TD, TP, TR et PT), le nombre d'heures et le niveau.

<u>Disciplines</u>	<u>Années</u>	<u>CM</u> heures / an	<u>TD</u> heures / an	<u>TP</u> heures / an	<u>TR</u> heures / an	<u>PT</u> heures / an	<u>Niveau</u>
Electronique	de 1987 à 2003 (16 ans)				270 en moyenne		1 <sup>iere</sup> année DUT GEII
Electrotechnique	de 1994 à 1999 (5 ans)	30	90				1 <sup>iere</sup> année DUT GEII
	de 1987 à 1994 (7 ans)			64			1 <sup>iere</sup> année ENSMSE
	de 1987 à 1995 (8 ans)			64			2 <sup>ieme</sup> année MST TPI
	depuis 1995 (10 ans)			32			2 <sup>ieme</sup> année ISTASE option OE
Programmation langage C	de 1999 à 2002 (3 ans)		45				1 <sup>iere</sup> année DUT GEII
Composants logiques et langage VHDL	depuis 1999 (6 ans)	7	14	60			1 <sup>iere</sup> année DUT GEII
Micro contrôleur et langage assembleur	depuis 2002 (3 ans)		24	48			2 <sup>ieme</sup> année DUT GEII
	depuis 2002 (3 ans)			60			1 <sup>iere</sup> année DUT GEII
Instrumentation à distance	depuis 2002 (3 ans)					100	Licence professionnelle
Propagation des ondes	De 1990 à 1995 (5 ans)	7	10				2 <sup>ieme</sup> année DUT GEII
CEM	Depuis 2001 (4 ans)		7,5				2 <sup>ieme</sup> année DUT GEII

*CM = cours magistral (promotion entière), TD = travaux dirigés (groupes de 24)*

*TP = travaux pratiques et TR = Travaux de réalisation (groupes de 12)*

*PT = projets tuteurés (4 à 6 binômes)*

DUT GEII (diplôme universitaire de technologie, génie électrique et informatique industrielle) - UJM

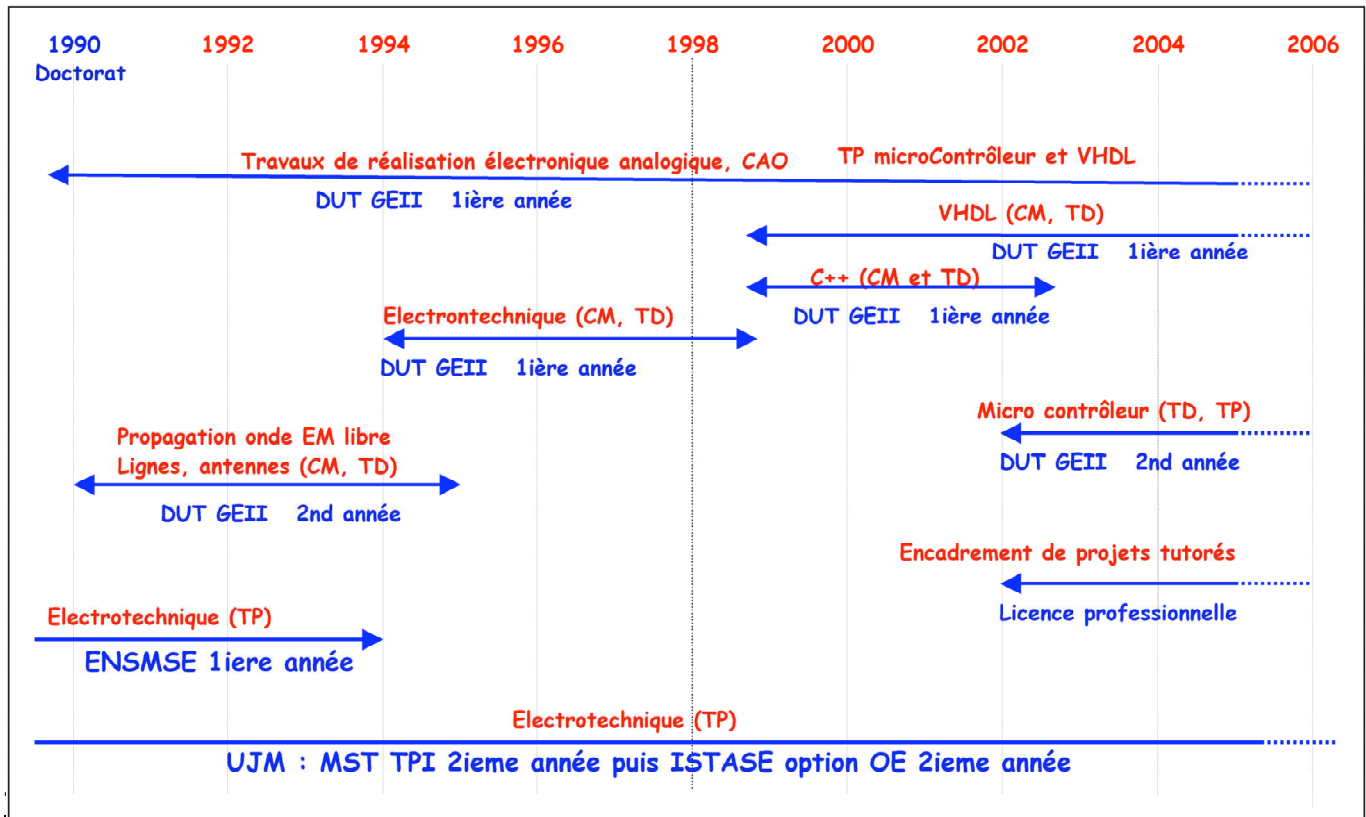
ENSMSE (Ecole nationale supérieure des Mines de St Etienne)

MST TPI (Maîtrise des sciences et techniques, techniques physiques et instrumentation) - UJM



ISTASE (institut supérieur des techniques avancées)(option OE : optique et électronique) – UJM  
UJM = université Jean Monnet (St Etienne)

Voici un résumé chronologique des enseignements dispensés :



Pendant les travaux de la thèse, j'ai eu la possibilité d'effectuer des travaux pratiques d'électronique au département Génie Electrique et Informatique Industrielle de l'IUT de St Etienne. Plus précisément, j'ai encadré des travaux de réalisation en première année.

Depuis, j'ai continué à assurer l'encadrement des travaux de réalisation en première année. L'objectif pédagogique est de permettre aux étudiants de réaliser des montages électroniques y compris le câblage de ceux-ci. La maîtrise de la réalisation de circuit imprimé et des moyen de CAO font partis des apprentissages de base.

Les thèmes abordés vont des circuits intégrés d'usage courant (type 555), aux fonctions analogiques classiques (amplificateur opérationnel, comparateur, ...), en passant par les circuits logiques classiques (portes et bascules) mais aussi par les circuits de logique programmable (Altera EPM 7128S), les microcontrôleurs (68HC11F1) et les cartes à micro processeur (6809).

A titre d'exemple, voici les montages abordés cette année :

Réalisation d'un simulateur d'alarme, d'un interrupteur crépusculaire et d'un oscillateur sinusoïdal.  
Réalisation d'un déchargeur-chargeur de batterie CdNi avec l'aide du logiciel Winboard, (générateur de courant, PWM comparateur, ...).

Exercices autour du EMP7128S,

(compteur-décompteur, afficheur 7 segments, commande de portail, ...).

Réalisation de 2 circuits imprimés avec l'aide du logiciel ORCAD, comportant les fonctions de commande d'un mobile opto guidé. (capteur IR, ampli soustracteur, PWM, ...).

Exercices autour du 68HC11 ,

(chenillard, compteur-décompteur, afficheur 7 segments, ...).

Cet enseignement est dispensé devant un groupe de 12 étudiants, sur 30 semaines et 4 h par semaine et par groupe.

Nous avons réalisé une platine d'essais comportant une carte CPDL (EPM7128S)(Entrées sorties bufferisées), une carte 68HC11, une carte comportant 8 DELs de visualisation et 8 interrupteurs et d'une carte afficheur (7 segments et LCD) – capteurs (lumière, température –numérique et analogique-) – moteur (PWM).

### **Electrotechnique**

J'ai assuré le cours magistral en première année (1h semaine sur les 30 semaines) de 1994 à 1999. La promotion est composée de 156 étudiants,

(Notion d'électromagnétisme, bobine, transformateur, triphasé, machine à courant continu).

En 1998-99, en parallèle, j'ai encadré 2 groupes en travaux dirigés (1,5 h semaine sur 30 semaines).

#### *Travaux pratiques d'électrotechnique*

De 1990 à 1994, j'ai pu assister Mr Félix Wosniak pour encadrer les travaux pratiques à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St Etienne. Cet établissement était équipé d'une salle de 8 postes prévus pour 4 TP : mesures de puissance, transformateur, machines continues et machines alternatives (4 groupes de 16 élèves par TP).

Depuis 1989, j'ai encadré les étudiants de seconde année de Maîtrise des Sciences et Techniques : techniques physiques et instrumentations de la faculté des sciences et techniques de St Etienne, puis les élèves de deuxième année de l'ISTASE (institut supérieur des techniques avancées de St Etienne) lorsque la transformation a eu lieu.

Là aussi, 4 TP sont proposés : mesures de puissance, transformateur, moteur asynchrone / moteur continu, et génératrice continue / alternateur. Les promotions étaient au début de 50 étudiants pour passer à 80 étudiants les dernières années. Jusqu'en 1994, ces TP avaient lieu dans les locaux de l'Ecoles des Mines puis dans les locaux de l'ENISE (Ecole Nationale d'Ingénieur de St Etienne).

En 2004, a été mis en place sous ma responsabilité, un système d'acquisition de mesures sur les moteurs continus et asynchrones, dispositif intégré au TP concerné.

### **Propagation des ondes**

De 1990 à 1995, j'ai assuré les cours magistraux et les TD en seconde année GEII en propagation des ondes électromagnétiques en espace libre, propagation sur les lignes (abaque de Smith)(7 heures de cours et 10 heures de TD sur 5 groupes de 24 étudiants par an).

### **Compatibilité électromagnétique.**

Exemples de TD : TD 1 : Couplage par impédance commune sur circuit imprimé  
TD 2 : Couplage capacitif  
TD 3 : Couplage champ à fil

### **Informatique industrielle**

En 1999-2000, j'ai pu mettre en place un enseignement du **langage VHDL**, langage de programmation de circuits logiques programmables (CPLD, FPGA). Cet enseignement est prévu pour les étudiants de première année GEII (6 groupes de 24 étudiants). J'ai pu assurer les 15 heures de cours les 15 heures de TD. Les 3 séances de 4h de TP sont incluses à l'enseignement des TR (cf plus haut). Le plan du cours est le suivant :

Circuits logiques programmables  
Syntaxe du langage V.H.D.L.  
Logique combinatoire  
Logique séquentielle  
Machine d'état (introduction).

L'apprentissage en TD et en TP se réalise avec l'outil de la société Altera : Max +II et les essais se développent sur une carte développée par nos soins avec un CPLD de la même société : EPM7128.

L'enseignement du **langage C** avec les étudiants de première année GEII (6 groupes de 24 étudiants) (1,5 h par semaine sur 30 semaines et pour 2 groupes) s'organise suivant un cours / TD dont voici le sommaire rapide :

- La démarche informatique (la machine informatique, la programmation, forme générale d'un programme, ...),
- les variables et les opérateurs relationnels,
- les structures (élémentaires, alternatives, répétitives),
- l'analyse structurée (fonctions paramétrées, le type tableau, les pointeurs).

L'outil utilisé est le compilateur de la société Borland.

Cet enseignement est complété par un exercice en TR de programmation en C d'entrées-sorties déportées par une liaison RS232.

Au département, l'enseignement du **microprocesseur** se déroule sur les deux années. J'ai eu la possibilité lors des séances de TR en première année de mettre en place des projets autour d'une carte à base de 6809 depuis le début. Depuis quelques années, les projets utilisent un **microcontrôleur** de même architecture 68HC11. Avant ces projets, un apprentissage de l'outil de développement (Control Boy) par une série d'exercices a été mis en place pour faciliter la réalisation de projets (utilisation de la platine d'essais en TR).

En seconde année, une autre série de TD et de TP est effectuée sur un plus **microcontrôleur** performant : 87C167 de la société Infineon. Là aussi, une platine d'essais a été réalisée avec des afficheurs 7 segments, LCD, un moteur en PWM, des potentiomètres, ... L'outil utilisé est microVision de la société Keil.

Dans les 2 cas, la programmation se réalise en langage assembleur.

Enfin, plus récemment, j'ai eu la possibilité de mettre en place avec l'aide d'un collègue, dans le cadre de la licence professionnelle LR2i, un ensemble de projets tuteurés sur le thème de l'instrumentation à distance. Cette licence se présente comme apportant les TIC (techniques de l'information et de la communication) au monde de l'automatisme. Aussi, l'instrumentation à distance devient un des moyens d'apprentissage des techniques de l'automatisme décentralisée et des services disponibles sur un réseau Ethernet. Cette année, nous avons développé une station météo mise sur le Net, un petit train électrique commandable par le réseau interne de l'IUT (pour l'instant) et d'une supervision des machines à commande numérique du département voisin GMP. Une collaboration avec des établissements accueillant des BTS de la région stéphanoise est en cours pour mettre en place dans leurs locaux des systèmes automatisés simples accessibles à distance.



## 4.2. Activités collectives et administratives

Cette présentation, sous la forme d'une liste des fonctions et des tâches qui m'ont été confiées, se décompose par entités administratives :

Laboratoire TSI,  
IUT, département GEII,  
Licence professionnelle,  
Université Jean Monnet,  
Autres établissements.

Ensuite, une figure montera la chronologie de ces différentes tâches.

### Dans le cadre du Laboratoire Traitement du Signal et Instrumentation

- Membre élu du conseil du laboratoire TSI depuis décembre 1992 à 2004 (3 mandats)
- Responsable de l'organisation de l'élection du directeur de l'unité en 1998 et 2002
  
- Formation et encadrement des techniciens en électronique du laboratoire  
Frédéric Celle dès son arrivée en 1990 jusqu'en 1995  
Eric Sigronde depuis son arrivée en 2002  
(formation en CAO de carte électronique, réalisation de montages électronique : conception et mise au point, programmation micro contrôleur, ...)
  
- Responsable de la gestion du matériel d'acquisition d'image et du fonctionnement des installations expérimentales de l'équipe SVEM (puis IMAGE) de 1993 à 2000. A cette date, un ingénieur de recherche a rejoint le groupe et a pris en charge ce travail.
  
- Responsable scientifique du thème "Architecture pour le traitement et l'échange des données" du groupe IMAGE
  
- Responsable scientifique de programme de recherche "SOCAVI" financé par la région Rhône Alpes.  
(Implantation de traitement d'images dans des rétines CMOS)
  
- Membre du GDR ISIS depuis 1996.

### Dans le cadre l'IUT et du département GEII

(Institut Universitaire de Technologie)(Génie Electrique et Informatique industrielle)

- Membre de la commission chargée de compléter et de porter un avis sur les dossiers "poursuite d'étude" au département G.E.I.I. de l'I.U.T. de St Etienne de 1988 à 1990
  
- Participation à la mise en place d'un système de tutorat en première année au département G.E.I.I., et suivi d'un groupe de huit étudiants de 1990 à 1992.
  
- Participation à la mise en place du système 'Dunot' en 1995. Ce diplôme d'université offrait la possibilité aux étudiants de première année des DEUG scientifiques de suivre des enseignements dans les différents départements de l'IUT en vue de préparer une éventuelle réorientation.
  
- Adjoint au chef de département GEII de 1996 à 2002 durant le mandat de Monsieur Mohamad Tafazzoli (animation pédagogique du département, participation aux conseils de direction de l'IUT).
  
- Responsable des stages 1996 à 1999, aide à la recherche d'entreprise lors des stages de deuxième année DUT GEII, mise en place et suivi d'un carnet d'adresse d'entreprise.

## **Dans le cadre de la mise en place de licence professionnelle**

Département GEII

- Animateur d'un groupe de travail composé d'enseignants du département et d'industriels pour la mise en place d'un diplôme d'université 'TR2i'.

TR2i = Technicien en réseaux et en instrumentation intelligente

C'est une formation ouverte aux titulaires de DUT ou de BTS des disciplines liées aux métiers de l'électricité qui propose un complément de compétence en informatique industrielle, en réseaux locaux et de terrain et en automatique.

Ce diplôme est associé à un certificat de qualification paritaire de la Métallurgie (CQPM) : Technicien en Instrumentation Intelligente et en transmissions de données (MQ 90 06 74 0072).

- Responsable pédagogique de la formation TR2i.

Cette formation par alternance a fonctionné trois années universitaires 98-99 ; 99-00 et 00-01 (en moyenne le groupe était composé d'une dizaine d'alternants).

- Porteur d'un projet de licence professionnelle basé sur la formation TR2i de 2000 à 2002.

LP A2i option RIISA = Licence professionnelle automatique et informatique industrielle, option réseaux et instrumentation intelligente pour les systèmes automatisés.

- Responsable pédagogique de la licence professionnelle LP A2i option RIISA de 2000 à 2005.

- Porteur d'un projet de licence professionnelle LP TOM en 2000

(TOM = Techniques optique et micro usinage)

Ce projet a ensuite été repris par des collègues de la faculté des sciences et techniques. Et la première promotion arrive en septembre 2005.

- Projets inscrits dans le cadre du contrat quadriennal de l'université :

Réflexions et mise en place d'un groupe de travail sur l'ouverture d'une nouvelle option à la licence professionnelle A2i orientée TIC pour l'informatique industrielle (TIC = techniques de l'information et de la communication) nommée WISE (= Web Industriel et systèmes embarqués).

Réflexions sur la possibilité de convertir une partie du département GEII en département informatique option informatique industrielle.

- Participation à des commissions mixte (IUT / CSE) de recrutement de maître de conférences à cinq reprises dans des sections CNU 28<sup>e</sup>, 30<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup>.

## **Dans le cadre de l'université Jean Monnet**

- Membre titulaire de la Commission de Spécialiste d'Etablissement 61<sup>e</sup> et 63<sup>e</sup> section CNU 3 mandats de 1992 à 2004, Vice président MC de 1996 À 2002.

- Membre élu du Conseil Scientifique de l'Université de 1997 à 2001

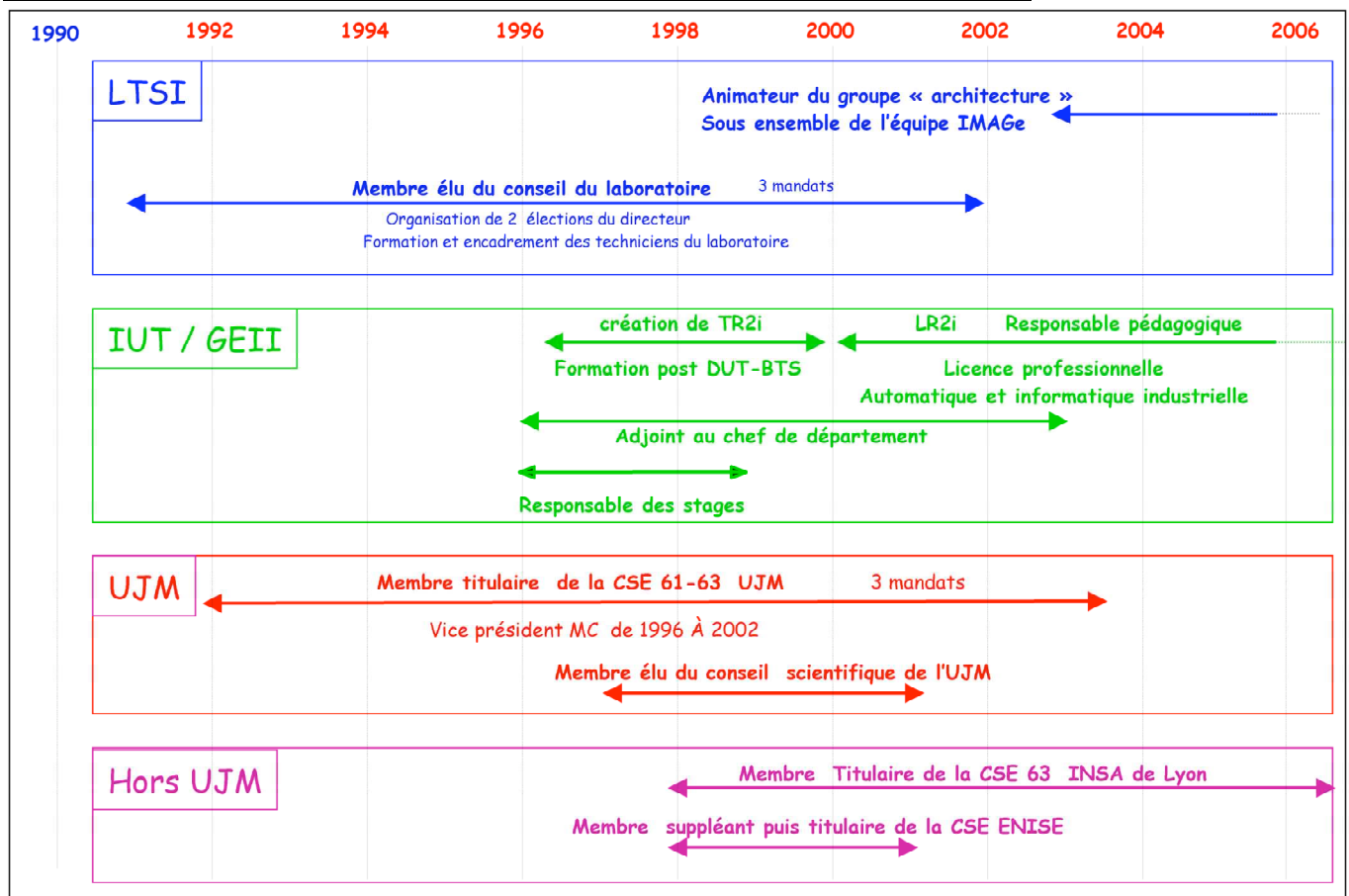
## **Autres**

- Membre du centre inter-universitaire de micro-électronique de Lyon (CIRMIRLY).

- Membre du pôle médical de St Étienne : ADRET (association pour le développement et le rapprochement des entreprises de technologies biomédicales) entre 1990 et 1993.

- Membre titulaire de la Commission de Spécialiste d'Établissement 63<sup>e</sup> section CNU de l'INSA de Lyon depuis 1998.
- Membre titulaire de la Commission de Spécialiste d'Établissement de l'ENISE de 1998 à 2002. (ENISE = Ecole Nationale d'Ingénieur de ST Etienne)
- Membre du club EEA depuis 1990.
- Membre de jury de concours BAP (recrutement de technicien de l'éducation nationale) en électronique et en électronique organisés en 1993 par l'Ecole centrale de Lyon et en 2001 et 2002 par l'ENISE.
- Président de jury de baccalauréat en 1994 et 1999
- Participation à trois jurys de concours ITRF (en 1993 à l'ECL, en 2003 et 2004 à l'ENISE)
- Expert ANRT pour avis sur bourse CIFRE en 2003

### Résumé des tâches administratives et collectives avec ordre chronologique



## 4.3. Contrats de recherche et transfert de technologie

L'environnement économique de la région stéphanoise est essentiellement composé de PMI/PME. Que se soit lors de visite de stage, ou de sollicitation directe, j'ai toujours voulu apporter une réponse aux demandes qui m'étaient faites. En effet, il me semble important de ne pas négliger cette tâche qui consiste à participer au développement économique. Aussi, dans la mesure de mes disponibilités, j'ai pu permettre à un certain nombre de PME d'effectuer un saut technologique par une aide à la réalisation d'un produit innovant.

Voici la liste des **contrats de recherche** auxquels j'ai participé :

- |     |  |       |
|-----|--|-------|
| CR1 | Institut Français du Pétrole. Lyon (1996-97)<br>Visualisation quantitative de l'écoulement dans la chambre d'admission d'un réacteur.<br>T. Fournel, J. Jay    | 75 KF |
| CR2 | EDF Clamart : Département Automatique, Mécanique et Vibration (1999)<br>Mesure de mouvement sur câble électrique par traitement d'images<br>J. Jay, J. Fayolle | 20 KF |

Ci dessous, une liste de **contrats de service** est présentée.

- E1 CIMIRLY, action JESSICA (1992).  
« Préétude : intégration par EPLD d'un système de mesure de déséquilibre de phase sur réseau triphasé »  
R. Fouquet, V. Fischer, J. Jay
- E2 Société MGB Electronique (Saint Martin la Plaine -42-)(1993)  
« Système de suréchantillonnage d'un signal audio numérique. »  
J. Danière, R. Fouquet, J. Jay.
- E3 Société FORETEC (Saint Etienne -42-)(1993-1994)  
*Convention CORTECHS (Région Rhône Alpes)*  
« Étude et réalisation d'un système d'interception téléphonique numérisé »  
R. Fouquet, J. Jay, J. Danière, F. Celle
- E4 Société HEF (Andrezieux -42-)(1995)  
« Etude de faisabilité d'un traitement numérique d'un signal de pesée en vue de l'extraction des paramètres fréquence cardiaque et respiratoire »  
R. Fouquet, J. Jay.
- E5 Société Atelier des Charrons (Saint Etienne -42-)(1995)  
« Réalisation d'une borne vocale numérique pour un musée »  
Celle F., Fouquet R., Jay J.
- E6 Société Save Diffusion. (Saint Etienne -42-)(1995)  
« Etude d'un décodeur pour système de radiodiffusion »  
J. Jay, R. Fouquet.
- E7 Degremont (Paris -75-)(1996) 1 mois  
« Numérisation et traitement d'images enregistrées sur camescope Hi8 »  
J. Jay, C Ducottet, J. P. Schon.
- E8 SAVE DIFFUSION (ST Etienne -42-)(1997, 1 an)  
« Etude d'un système électronique de pilotage à distance d'un émetteur de radio diffusion »  
J. Jay, R. Fouquet

- E9 Electronique Chambon sur Lignon SA (Chambon sur Lignon -43-)(1997)  
« Etude d'un plateau de rééducation kinésithésique »  
F. Soubeyrand, J. JAY, J.C. Dumas, R. Fouquet  
(collaboration avec l'ENISE)
- E10 Société GRIZARD AGENCEMENT (Pouilly sous Charlieu -42-)(1999-2000, 6 mois)  
« Etude d'un système de serrures sécurisées micro-informatisées »  
J. Jay
- E11 Société : Ganzoni (ST Etienne -42-)(2001, 1 mois)  
« Mesures et interprétations des résultats sur capteur de pression de contact, Etude sur bas de contention »  
Y. Ouerdan, J. Jay
- E12 Stanford Imaging Systems (Lyon -69-)(2000-2002, 6 mois)  
*Bourse « Ajité » ANVAR*  
« Etude et réalisation de télécommande de vidéoprojecteur en salle de conférence »  
J. Jay
- E13 Société : FCE (Fluide Control Europe)(Sorbières -42-)(2003, 1 an )  
*soutien de la région Rhône-Alpes : PTR*  
« Réalisation d'une centrale d'acquisition de données mécaniques pour treuils de puits de pétroles »  
J. Jay





## **5 Conclusions et perspectives**

## **5.1 Conclusions**

L'ensemble des travaux présentés dans ce dossier s'organisent en trois classes d'applications. Une première, la plus ancienne, regroupe les travaux liés au domaine médical. La deuxième concerne l'ensemble des systèmes de mesure par traitement d'images appliqués à l'étude des écoulements. Une troisième aborde l'utilisation des méthodes optiques pour des systèmes de mesure de température.

Sur l'aspect instrumentation médicale, nous avons atteint les objectifs qui étaient de répondre à des besoins de mesures et d'analyse de données physiologiques in vivo et in vitro. Nous avons mis les architectures matérielles et les algorithmes de traitement et d'analyse qui étaient adéquats au vue des moyens disponibles à cette période. Nous avons proposé un système de télémessure de la température centrale chez l'homme par une sonde afin d'étudier l'effet de la proximité de fortes sources de chaleur. Nous avons construit un appareil de vieillissement accéléré de tissus servant à fabriquer des prothèses artérielles afin de prévoir leur comportement à long terme in vivo. Et entre autres exemples de projets, nous pouvons citer l'analyse par transformée de Fourier de signaux issus de la mesure de la longueur des pas afin de déterminer le degré de gêne à la marche chez des patients atteints d'artériopathie.

Le fait d'être à l'interface entre deux domaines, ici scientifique et médical, est particulièrement enrichissant. L'apport sur les connaissances et sur les compétences est important, et sur le plan personnel, la confrontation avec d'autres modes de pensée est particulièrement riche. Pour ces raisons, j'ai toujours souhaité conserver cette particularité d'être à l'interface entre domaines scientifiques différents.

Le regroupement de deux équipes du laboratoire m'a permis d'entrer dans le domaine de la mécanique des fluides. Dans un premier temps, nous avons mis au point des installations entièrement instrumentées afin de fournir à la communauté scientifique des données expérimentales : des champs de vitesses, des profils de vitesses ou de suivi de structures particulières. Nous avons pour cela développé des plateformes d'acquisition et de traitements d'images ayant de très bonnes performances, en particulier, sur les fréquences images et sur les volumes de stockage. Nous pouvons citer à ce niveau, la réalisation d'une caméra à 100 i/s et le montage à deux caméras permettant de saisir la même scène à deux instants très proches pour l'étude de phénomènes rapides. Ces travaux se sont déroulés dans le cadre d'un programme Européen (EUROPIV).

A titre d'exemple d'application, on peut citer l'étude d'instabilités dans des jets d'air à faibles vitesses. Les travaux se sont déroulés dans le cadre d'une collaboration avec un laboratoire de mécanique des fluides de Monastir en Tunisie. Nous avons pu réaliser des comparaisons entre les profils de vitesses mesurés et ceux obtenus par simulation, ce qui a donné de bon résultats et permis de valider le modèle. Actuellement, des algorithmes sont mis au point pour extraire des séquences d'images le suivi spatio temporel des instabilités de Kelvin Helmholtz existantes dans ce type de jet afin de mieux connaître les phénomènes qui leurs donnent naissance et qui les amplifient.

Dans l'objectif de proposer des systèmes de mesure toujours plus performants, nous avons adapté les algorithmes utilisés afin de les implanter sur des circuits logiques programmables, le but étant d'approcher le traitement temps réel des images. Aussi, nous mettons au point un système permettant de calculer en temps réel les paramètres optimaux pour le réglage d'un système de mesure de champs de vitesse bi caméras.

Certaines conditions expérimentales nous ont conduit à utiliser des caméras IR pour mesurer des températures, notamment lorsque les conditions aux limites de l'écoulement présentent des gradients de température. Ce savoir faire a été utilisé pour l'étude de la physique de l'interface meule pièce dans le cas de la rectification à grande vitesse. Ceci a permis d'améliorer la modélisation des phénomènes et de montrer que les propriétés mécaniques des surfaces usinées dépendaient fortement de la vitesse de rotation de la meule. Un autre travail en cours est d'estimer la quantité de chaleur échangée entre une flamme et un réservoir d'eau, nous étudions les performances de méthodes comme la photographie de Speckle ou l'holographie numérique pour mesurer les gradients de température contre une paroi.

Les technologies sur lesquelles nous basons nos systèmes de mesure ont énormément évoluées au cours de toutes ces années, et celles-ci ouvrent en permanence de nouveaux horizons. L'utilisation

de FPGA de grandes tailles, les capacités de calcul et de stockage des micro ordinateurs et les performances des imageurs CMOS permettent d'imaginer des architectures performantes pour l'acquisition et le traitement des images. Ainsi il est possible de proposer pour de nombreux de domaines scientifiques des moyens de mesures inexistantes auparavant. Ce qui permet des apports significatifs à ces disciplines.

Cette volonté d'appliquer mes compétences à divers domaines scientifiques explique l'apparente diversité des thèmes de recherche abordés et présentés dans ce dossier. Hormis la partie médicale, dans le reste des travaux, l'image, en tant que support d'information, est omniprésente. Comme nos systèmes de mesure intègrent aussi l'acquisition des images, je peux dire que mes thèmes de recherche se situent dans le domaine global de l'optique et de l'image, ce qui est en adéquation avec les thèmes du laboratoire TSI.

Un certain nombre de nos des systèmes de mesure répondent aux critères qui permettent de définir la notion de systèmes embarqués. En effet, l'intégration d'algorithmes sur PFGA offre la possibilité de miniaturiser nos systèmes et de fournir des résultats de traitement d'images en temps réel.



## **5.2 Perspectives**

Le choix de mes thèmes de recherche et l'organisation de mes activités ont suivi et continueront de suivre deux lignes directrices. La première est d'intégrer en permanence dans nos réflexions, dans nos méthodes et dans nos outils, les évolutions des technologies de la micro électronique et les fortes mutations des outils du génie logiciel. La deuxième est le maintien d'une cohérence scientifique dans le cadre de l'équipe de recherche (IMAGE), à l'intérieur du laboratoire (LTSI), mais aussi en fonction du pôle optique Rhône Alpes. Il y a aussi la volonté d'être acteur dans l'organisation de ces entités, et cela commence par l'animation scientifique d'un thème.

Une première partie explicitera les objectifs à court terme (1 à 2 ans) sur les projets en cours. Une seconde étape permettra de situer le champ de recherche projeté et de donner quelques pistes à moyen terme. Les objectifs à moyen terme s'inscrivent dans le cadre collectif du thème de recherche 'architecture pour la mesure et l'échange de données' de l'équipe IMAGE au LTSI. L'activité de ce groupe s'oriente vers des outils de portage qui permettent de traduire des langages de haut niveau comme le C vers des plateformes matérielles génériques. Le domaine applicatif reste la mesure de paramètres physiques par traitement d'image. Plus précisément, la création ou l'amélioration d'outils diminuant le temps de prototypage, donc dans l'automatisation des tâches de portage, permettra d'envisager le développement de systèmes de mesure beaucoup plus complexes et performants.

### **5.2.1. Objectifs à court terme**

Trois projets entrent dans la catégorie des objectifs à court terme :

- L'optimisation temps réel des paramètres de réglage en PIV
- Le suivi spatio temporel des instabilités des jet à faible vitesse.
- L'authentification de visage par traitement d'images

#### L'optimisation temps réel des paramètres de réglage en PIV

Dans le but de réaliser des séquences d'image dans les meilleures conditions, nous souhaitons proposer un système ajustant automatiquement les paramètres de réglages des installations expérimentales de mesure par traitement d'image pour la caractérisation d'écoulements. La valeur optimale du délai  $\Delta t$  entre la prise d'images des deux caméras doit être calculé à partir des champs de vitesses. Lesquels sont obtenus par les fonctions de corrélation appliquées à la paire d'image. Le calcul des champs de vitesse a été implanté dans un FPGA de la famille Stratix (Altera). L'ensemble des fonctions permettant l'estimation de la qualité des résultats (par exemple, rapport signal sur bruit des images de corrélation) ainsi que la gestion des mémoire de stockage restent à implanter. Dans un second temps, nous prévoyons pour ce système de mesures PIV d'autres possibilités d'actions sur le jet ou de configuration des caméras, comme le contrôle de la concentration en marqueurs ou le choix automatique des temps d'intégration.

#### Le suivi spatio temporel des instabilités des jets d'air à faible nombre de Reynolds.

Le travail commencé sur la détection de points caractéristiques sur les frontières de jet à faible nombre de Reynolds a pour but de permettre d'étudier plus finement le mécanisme de formation des instabilités et de comprendre les phénomènes qui produisent le passage d'un état laminaire du jet vers un état turbulent. Les algorithmes de suivi spatio temporel des points caractéristiques des instabilités ne sont pas encore complètement finalisés. L'analyse des évolutions des instabilités devraient permettre une étude fine des mécanismes de formation de ces instabilités. L'objectif suivant est de relier les caractéristiques des instabilités aux paramètres de formation du jet afin de mettre en évidence d'éventuelles corrélations exploitables. En effet, le but des collègues de Monastir est de pouvoir contrôler le jet afin d'obtenir des longueurs de zones laminaires les plus longues possibles pour réaliser des isolations par rideau d'air.

#### L'authentification de visage par traitement d'images

Ce travail de portage d'algorithmes d'adaptation d'image et de classifieur doit permettre de proposer un système industrialisable capable de remplacer la saisie de mot de passe sur les organisateur personnel par exemple. Les choix des algorithmes de traitement des images avant l'authentificateur (réseau de neurones) est en cours de validation. Ce prétraitement des images issues du capteur a deux fonctions principales, celle qui permet de localiser un objet dans l'image dont les caractéristiques géométriques peuvent correspondre à un visage et celle qui permet de présenter au réseau de neurones des images avec un niveau de luminosité

normalisé. Chacune des fonctions nécessite un travail d'optimisation et d'implantation. Ensuite, un prototype de l'ensemble devra être réalisé puis caractérisé. Une base d'images de test devra être mise en place pour estimer correctement les performances du système. Il est prévu une implantation sur une rétine CMOS de ce système en collaboration avec le laboratoire LE2I à Dijon, partenaire de ce projet.

### **5.2.2. Objectifs à moyen terme**

Une formidable mutation des outils de développement logiciel nous permet d'envisager une réduction des temps de prototypage. L'utilisation d'outils d'aide au portage des algorithmes écrit en langage C ou testés dans des environnements tel que le logiciel Matlab vers des cibles matérielles configurables dans un langage de description spécifique (VHDL par exemple) devrait réduire le temps d'adaptation des algorithmes.

L'activité du groupe s'oriente vers ces outils qui permettent de traduire des langages de haut niveau comme le C vers des plateformes matérielles génériques. Toutefois, notre objectif se restreint à une classe d'applications particulières. En effet, les systèmes de traitement d'images présentent une caractéristique particulière d'avoir un flot de données d'entrée très important et un flot de données de sorties faible. Ceci va nous permettre de proposer des architectures de plateformes matérielles spécialisées et donc plus optimisées.

Même si des outils comme Matlab ou Labview proposent des traducteurs de leurs codes en C ou en VHDL, il n'existe pas aujourd'hui d'outil présentant un processus complet de développement suffisamment performant pour intégrer des traitements complexes. Et surtout, ces outils ne prennent pas suffisamment en compte l'aspect architectural flexible des cibles de type FPGA. En effet, il est très important d'avoir la meilleure adéquation entre l'algorithme et l'architecture souvent hétérogène de la cible matérielle.

Les objectifs à moyen terme concernent l'étude et la caractérisation des outils de portages existants, aussi bien l'offre universitaire que l'offre commerciale. Dans cette offre, on peut citer des outils comme le couple Syndex, Syncex-IC, comme StreamC ou SystemC. L'état de l'art des outils de portage existant devra mettre en évidence les « briques de bases » existantes et non existantes dans les flots de conception actuellement proposés. Par exemple, notre espoir est de proposer un outil capable de fournir un ordonnancement et une partition logiciel / matériel (Processeur / FPGA) automatiques et optimisés sur une palette d'architectures matérielles prédéfinies.

Je propose, après un état de l'art des méthodes et des outils de portages existants, de mettre au point une méthodologie de portage d'un système d'analyse d'image sur une plateforme à base de FPGA. La possibilité de faire cohabiter dans un FPGA, des structures à processeur et des structures câblées (VHDL) doit être intégré dans les outils le plus en amont possible dans les processus d'ordonnancement et de partitionnement. Il faut maintenir un degré de performance suffisant pour maintenir les objectifs de traitement temps réel de nos applications.

Mon objectif est de réfléchir à un systèmes de recherche de solutions optimales dans toutes es combinaisons envisageables offertes par les capacités de calculs de la plateforme matérielle modélisée par les collègues du groupe et les propriétés des algorithmes sélectionnés et adaptés.

Nous envisageons, assez rapidement, et ceci me concerne plus directement, de mettre en place un système de test de l'efficacité des outils de portage par comparaison avec des solutions implantées manuellement. Par exemple, le système d'authentification de visage, en cours d'implantation, pourrait servir de test pour les outils développés et le système réalisé de référence vis à vis d'autres plateformes.



## 6. Annexes

**Chronologie des opérations de recherche pour les systèmes d'étude des écoulements par traitement d'images**

Période	Type de jet	Caméras	Carte d'acquisition	Type d'images	Type de mesure	Boîtier de synchronisation	Publications
1992 à 1995	Jet plan (air) St Etienne	Caméra 25 i/s intensifiée (Hamamatsu)	PIP1024 (Matrox)	Séquences d'images multi-exposées	PIV, Suivi de frontières	Version 1 (1 à 7 expositions, résolution 50ns)	P3 1994 C4 1993 C5 1996 A1 1993
1993 à 1997	Jet plan (air) St Etienne	Caméra 100 i/s intensifié (LTSI)	Magic (Matrox)	Séquences d'images bi-exposées	PIV, Suivi de frontières	Version 1 bis (adaptation caméra 100 i/s)	P6 1998 C3 1993 C6 1996 A3 1995 Thèse H. Zara
1995 à 1998	Jet rond (air) (europiv)	Caméra 25 i/s intensifiée et Caméra 100 i/s intensifié	Meteor (Matrox) et Magic (Matrox)	Paires d'images mono-exposées ou Paires d'images bi-exposées	PIV	Version 2 Adaptation deux caméras asynchrones	P7 1999 C7 1998 R7 1996-98
1998 à 2000	Jet rond (eau) St Etienne	2 TM6705 (Pulnix) 2 XCD700 (Sony) Dicampro (PCO) Sensicam (PCO)	Meteor II MC (Matrox) IEEE1394 (PCO) (PCO)	Paires d'images mono-exposées ou Paires d'images bi-exposées	PIV, Suivi de bulles, Stéréo, calibrage	Version 3 1, 2 ou 3 caméras asynchrones ou non multi exposition ou non	P8 2000 C8 1998 C11 2000 Thèse L. Riou
2000 à 2003	Jet rond (eau) St Etienne Jet rond (air) Monastir	2 TM6703 (Pulnix)	Meteor II MC (Matrox)	Paires d'images mono-exposées ou Images bi-exposées	PIV, Calcul vitesse et concentration, Comparaison calcul mesures		P10 2001 R10 00 à 05 Thèse Y. Zaouali
2000 à 2003	Canal d'eau Cemagref	TM6705 (Pulnix)	Meteor II MC (Matrox)	Série de séquence d'images mono exposées	Débit solide		P13 2003 C15 2002 R6 00 à 03
2003 à 2005 et +	Jet rond (air) Monastir	2 TM6703 (Pulnix)	Meteor II MC (Matrox)	Séquence d'images mono exposées	Suivi de frontières, Instabilités de KH		P14 2004 C17 2004 C20 2005 R10 00 à 05
2003 à 2005 et +	Jet rond (air) Monastir	2 TM1300 (Pulnix)	Meteor II Digital (Matrox)	Séquence de paires d'images mono exposées	Optimisation paramètres PIV en temps réel		C18 2005 C21 2005 R10 00 à 05 Thèse N. Filali

## 6.2. Liste des travaux

Une liste exhaustive de tous les travaux est donnée ci après. Elle est classée par type de publication :

- publications dans des revues à comité de lecture,
- communications avec actes et comité de lecture,
- Communications orales
- Affiches
- communications sans actes.

### Publications dans une revue à comité de lecture

- P1 Automatic tracking system of a miniaturized transmitter for telemetry of physiological parameters  
Jay J., Fouquet R., Rougny R.  
Medical & Biological & Engineering & Computing 1993, 31, 201-203
- P2 Système de mesure et d'exploitation de la puissance développée sur cycloergomètre.  
Fouquet R., Belli A., Jay J., Dumas J.C., Denis C., Louis P., Bonnefoy R., Rougny R.  
Innovation et Technologie en Biologie et Médecine, 1993, vol 14, n°6, 709-718
- P3 Control system of an intensified video camera dedicated to the numerical storage of multiexposed images.  
Fouquet R., Jay J., Courbon M., Celle F., Schon J.P.  
Measurement Science and Technology, 1994, 5, 919-924
- P4 Dépense énergétique et dégradation des performances en gymnastique sportive. Etude prospective et méthodologique.  
Dumas J.C., Fouquet R., Hansali G., Jay J., Lopez J., Midol A.  
Revue EPS 03/1995 n° 25 p45-52
- P5 Banc de stimulation hydrodynamique pour l'étude du vieillissement accéléré de prothèses vasculaires.  
Jay J., Boissier C., Fouquet R., Favre J.P., Zara H., Moulin F., Darnis TH., Celle C.  
Innovation et Technologie en Biologie et Médecine, 1996, vol 17, n°4, 273-280
- P6 High speed video camera applied to flow study  
Zara H., Fischer V., Jay J., Fouquet R., Tafazolli E., Jacquet G.  
Measurement Science and Technology, 1998, 9, 1522-1530
- P7 Study of fast flows illuminated by a continuous laser using two intensified cameras and a synchronization system  
Zara, H.; Jay, J.; Fouquet, R.; Riou, L.; Jacquet, G.; Fischer, V.  
Book Title: Particle Image Velocimetry : toward industrial applications,  
Editors : M. Stanislas, J. Kompenhans, J. Westerweel, Kluwer Ed, 1999, 418-428
- P8 A calibration method of a two camera system in a face to face configuration designed for fast flow study  
Riou, L.; Jacquet, G.; Fayolle, J.; Jay, J.; Fouquet, R.  
Journal of Flow visualization and image processing (2000)
- P9 Microencapsulation par évaporation de solvant  
André-Abrant A., Taverdet J.L., Jay J.  
European polymer journal, 2001, 37, 955-963



- P10 Etude expérimentale de la transition laminaire-turbulent d'un jet axisymétrique  
Ben Aissia H., El Golli S., Jay J., Fournel T.  
Les anales Maghrébines de l'Ingénieurs, 2001, 00-13
- P11 Compact diffractive inetrferometric displacement sensor in reflexion  
Jourlin Y., Jay J., Parriaux O.  
Precision Engineering, Vol 26 (1), 2002, 1-6
- P12 Wafer scale submicron optical grating for the picometre measurement of aberrations and stitching errors in step and repeat cameras  
Y. Jourlin, J. Jay, F. Pigeon, G. Bouchet, O. Parriaux, P. van Dijk, R. Pellens, S. Topc,u, Y. Alayli, M. Bonis  
Microelectronic Engineering (Elsevier), 61–62 (2002) 1101–1106
- P13 Fluctuations of bed load solid discharge and grain size distribution on steep slopes with image analysis.  
P. Frey, C. Ducottet et J. Jay  
Experiments in Fluids 35(6), 589-597, 2003
- P14 Experimental study of the instabilities in the laminar turbulent transition zone of an axisymmetric jet at low Reynolds number  
Y. Zaouali, H. Ben Aissia, N. Kechiche, J. Jay And J-P. Schon  
Journal of Flow Visualization and Image Processing, vol. 11, n° 3, pp. 1 – 16, 2004
- P15 A silicon integrated opto-electro-mechanical displacement sensor  
S. Fourment, P. Arguel, J. -L. Noullet, F. Lozes, S. Bonnefont, G. Sarrabayrouse, Y. Jourlin, J. Jay and O. Parriaux  
Sensors and Actuators A: Physical, Volume 110, Issues 1-3, 1 February 2004, Pages 294-300.

## **Communications avec actes et comité de lecture**

### **Communications orales**

- C1 Ingestible sensor for human central temperature telemetry.  
Jay J., Fouquet R., Rougny R.  
V mediterranean conference on medical and biological engineering : Medicon 89.  
I.F.M.F.E., Patras (Grèce), 1989, 150-151.
- C2 System for measurement and analysis of the heart rate for several subjects simultaneously.  
Dumas J.C., Fouquet R., Jay J., Fischer V., Rougny R.  
IV International symposium on biomedical engineering, Peniscola (Espagne), 1990.
- C3 High speed CCD camera with digital output  
Jay J., Fischer V., Fouquet R., Schon J.P.  
International Conference on Digital Signal Processing Kosice, Slovaquie, 1993
- C4 Application de la tomographie laser à la mesure des vitesses de diffusion d'une image de particules dans un écoulement turbulent  
Fayolle J., Azema J., Jay J., Fouquet R., Schon J.P.  
Visualization and Fluidics, Vol 2, p. 983-987, Toulouse, août-septembre 1994
- C5 Three PIV technique comparisons in hydrodynamic flows  
L. David, A. Texier, J. Fayolle, J. Jay  
4th Asian Symposium on Visualization, Pekin, mai 1996, 273-276

- C6 Système d'acquisition d'images en vidéo rapide 512x512 pixels à 100 images/s  
H. Zara, J. Fayolle, J. Jay, V. Fischer, E. Tafazzoly, R. Fouquet, J.P. Schon  
Colloque de l'ANRT : Colloque d'Imagerie Rapide et Photonique, Anthony, juin 1996  
*Conférence sur invitation*
- C7 Système bi-caméras pour la vidéo instantanée  
H. Zara, J. Jay, R. Fouquet, L. Riou, G. Jacquet, V. Fischer  
Colloque de l'ANRT : Colloque d'Imagerie Rapide et Photonique, Strasbourg, juin 1998, 70-74
- C8 Mise en œuvre de la VIP stéréoscopique 3 composantes dans la configuration angulaire  
L. Riou, J. Fayolle, J. Jay, R. Fouquet  
6<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Saint-Louis, 1998, 22-25, D.3.1-D.3.8
- C9 Analyse ambulatoire de la marche chez l'artériopathe  
Boissier C., Geoffroy P., Jay J., Perrot G.  
Congrès Sports et Physiologie, Angers, 1998
- C10 Mesure automatique de taille et de vitesse de gouttes dans un jet diphasique.  
C. Ducottet, B. Trouillet, J. Hocquet, J.P. Bigot, J. Jay, R. Fouquet  
FLUVISU 99, 8<sup>ème</sup> colloque national de visualisation et de traitement d'images en mécanique des fluides, Toulouse, 1-4 juin 1999, 227-232
- C11 Long range, nanometer resolution microoptical sensor.  
O. PARRIAUX, Y. JOURLIN, J. JAY, Y. ALAYLI, F. LOZES and J.L. NOULLET  
1st International Conference and general meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), Bremen, Germany, may 31st-june 4th 1999, Vol.2, p. 264-269.
- C12 Architecture Parallèle pour la Vélocimétrie par Images de Particules  
Dubois, J.; Jacquet, G.; Motyl, G.; Jay, J.; Celle, F.; Fouquet, R.  
XVIII Ème Colloque Photonique et Imagerie Rapide, ANRT, Arcueil, 2000, 50-55
- C13 Codeur optique miniature haute résolution  
Y. Jourlin, O. Parriaux, J. Jay, F. Lozes, J.L. Noullet, P. Arguel, G. Sarrabayrouse, S. Fourment  
Colloque « méthodes et techniques optiques pour l'industrie », 21-24 novembre 2000  
Volume 1, 208-213, Club CMOI (contrôles et mesures optiques pour l'industrie)
- C14 Réalisation d'un codeur optique miniature  
Y. Jourlin, O. Parriaux, J. Jay, F. Lozes, J.L. Noullet, P. Arguel, G. Sarrabayrouse, S. Fourment  
Colloque interdisciplinaire en instrumentation 3 janvier – 1 février 2001, Vol 2, 163-170
- C15 Fluctuations of bed load solid discharge and grain size distribution at equilibrium steep slopes. Hydraulic measurement and experimental methods,  
Frey Ph. Ducottet C. and Jay J.  
Estes Park, Colorado, 28 July-1 August 2002, ASCE/AI
- C16 A silicon integrated opto-electro-mechanical displacement sensor.  
S. Fourment, P. Arguel, J-L. Noullet, F. Lozes-Dupuy, S. Bonnefont, G. Sarrabayrouse, Y. Jourlin, J. Jay, O. Parriaux  
Eurosensors XVI, Prague, 15-18 Septembre 2002, pp.395-396.
- C17 Evolution spatio temporelle des instabilités de Kelvin-Helmholtz dans un jet d'air rond par tomographie laser bi-couleur (visualisation horizontale et verticale simultanée).  
Y. Zaouali, N. Filali, H. Ben Aissia, Jacques Jay, M. Courbon, C. Barat et C. Ducottet  
Colloque CMOI (Club de la mesure optique pour l'industrie) St Etienne octobre 2004

- C18 Etude d'un corrélateur en niveaux de gris pour le suivi temps réel des vecteurs champs de vitesses des mesures PIV  
Nabila FILALI, Habib BEN AISSIA, Jacques JAY et Taoufik FILALI  
Colloque JFAAA, Dijon Janvier 2005 (Journées francophones de l'adéquation algorithmes architectures) pp230-235
- C19 Normalisation de la luminosité d'image appliquée à un système d'authentification de visage.  
L. Pierrefeu, A. Aubert, J. Jay et M. Courbon  
Colloque READ'05, Paris 1 à 3 juin 2005
- C20 Titre de l'article : Caractérisation des évolutions spatio temporelles des instabilités de Kelvin-Helmholtz dans un jet rond  
Y. Zaouali, N. Filali, H. Ben Aissia, J. Jay, M. Courbon, C. Barat, Ch. Ducottet  
Colloque Fluvisu, Lyon 7 à 9 juin 2005  
(visualisation et traitement d'images en mécanique des fluides)
- C21 Optimisation d'un corrélateur d'images PIV par réduction des niveaux de gris pour le calcul temps réel des vecteurs champs de vitesses  
N. Filali, H. Ben Aissia, T. Filali, J. Jay  
Colloque Fluvisu, Lyon 7 à 9 juin 2005  
(visualisation et traitement d'images en mécanique des fluides)
- C22 Grinding temperature measurement by infrared thermography  
G. Thomas, H. Hamdi, J. Jay, J. Rech  
5<sup>th</sup> International Conference THE Coatings in Manufacturing Engineering, the 2<sup>nd</sup> International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN)
- C23 *Mesure par thermographie IR des champs thermiques en rectification*  
G. Thomas, J. Rech, J. Jay, P. Bertrand, H. Hamdi,  
CFM 2005, XVII<sup>e</sup> congrès français de mécanique, avril 2005

### **Affiches ou posters**

- A1 Application de la tomographie laser à la mesure des vitesses de diffusion d'une image de particules dans un écoulement turbulent  
J. Fayolle, J. Azema, J. Jay, R. Fouquet, J.P. Schon  
3<sup>ème</sup> Conférence Internationale Laser M2P, Lyon, octobre 1993
- A2 Utilisation d'ondelettes biorthogonales pour caractériser les propriétés dispersives d'un écoulement à partir d'images obtenues par tomographie laser.  
C. Ducottet, J. Jay, M. Courbon  
Colloque Temps Fréquence, Ondelettes et Multirésolution : Théorie et Applications  
Lyon, 10-11mars 1994, 37.1-37.4
- A3 Plate-forme de génération de fumées et de caractérisation d'écoulements par vidéo rapide(100i/s) et instantanée.  
H. Zara, J. Jay, V. Fischer, M. Courbon, R. Fouquet, J.P. Schon.  
6<sup>ème</sup> Colloque National de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, Saint-Etienne, mai-juin 1995
- A4 Evaluation du vieillissement de prothèses vasculaires: test in vitro  
Boissier Ch, Jay J., Moulin F., Fouquet R, Zara H., Celle F., Favre J.P., Darnis TH.  
Congrès "thérapeutique et médecine vasculaire", Saint Etienne, octobre 1995
- A5 Mesure de flux de chaleur convectifs par voie optique : Comment passer du 2D vers le 3D ?  
Philippe Gervais, Didier Varieras, Jacques Jay et Maxime Jacquod

**Communications sans actes, sans comité de lecture)**

- A6 Détermination par traitement d'images des paramètres position, vitesse et accélération d'un sprinter.  
R. Fouquet, J. Jay, V. Fischer, F. Celle, P. Louis, J.C. Dumas  
Action Thématique Région Rhone Alpes: "Adaptations physiologiques aux conditions extrêmes".  
Colloque bilan 1ère année, Lyon, juin 1995
- A7 Intégration photonique dans un capteur de déplacement.  
S.Fourment, P.Arguel, J.Valentin, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, S.Bonnefont, G.Vassilief, J-L.Noullet, Y.Jourlin, J.Jay, O.Parriaux, S.Reynaud  
Horizon de l'optique Congrès Optix'03/Coloq 8 Toulouse, 3-5 septembre 2003.



## 6.3. Diplômes encadrés

Cette annexe présente deux volets, une première phase décrit le travail d'encadrement de doctorants, puis une seconde phase pour les autres diplômes (DEA, Master, PFE, DUT, ...).

### 6.3.1 Encadrement de doctorants

Afin de rendre lisible ce travail d'encadrement de doctorants, nous donnons pour chaque thèse, si le travail est seulement collaboratif, s'il y a eu participation à l'encadrement, s'il y a eu participation au jury, ou s'il y a eu co-direction. Aussi, ci dessous, un tableau présentera pour chaque thèse, le type d'encadrement, ensuite, une liste exhaustive de ces thèses sera donnée, puis une figure montera un aperçu chronologique de cette activité d'encadrement.

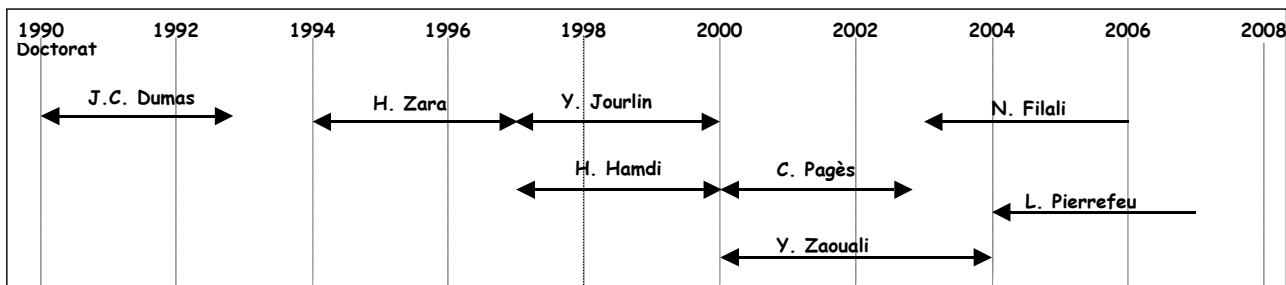
Nom du doctorant	Année de soutenance	Travail collaboratif	Co direction	Co tutelle	Participation à l'encadrement	Participation au jury
Lionel Pierrefeu	2007	80 %	oui	/	80 %	...
Nabila Filali	2006	50 %	oui	oui	70 %	...
Yassine Zaouali	2004	80 %	oui	oui	30 %	oui
Christian Pagès	2003	20 %	/	/	/	oui
Yves Jourlin	2000	30 %	/	/	20 %	oui
Heïdi Hamdi	2000	50 %	/	/	30 %	oui
Laurence Riou	1999	20 %	/	/	/	/
Henri Zara	1997	50 %	/	/	30 %	/
Jean Claude Dumas	1993	30 %	/	/	/	oui

### Liste des thèses :

- T1 Lionel Pierrefeu (début novembre 04)  
« Implantation d'un système d'authentification de visage dans une rétine CMOS »  
Direction : R. Fouquet et J. Jay
- T2 Nabila Filali (début septembre 03)  
« Implantation d'algorithme sur circuits logiques programmables pour des mesures PIV en temps réel pour l'étude des écoulements de type jet »  
Direction : H. Ben Aissia et J. Jay
- T3 Yassine Zaouali soutenue en février 2004  
« Étude tomographique des instabilités d'un jet axisymétrique à bas nombre de Reynolds par PIV et analyse des frontières »  
Direction : H. Ben Aissia, J.P. Schon et J. Jay
- T4 Christian Pagès soutenue en novembre 2003  
« Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec »  
Direction : J. Rousseau et J. Lopez
- T5 Yves Jourlin soutenue en décembre 2000  
« Codeur optique miniature de haute résolution pour (micro)systèmes électro-mécanique »  
Direction : O. Parriot
- T6 Heïdi Hamdi soutenue en décembre 2000  
« Contribution à l'étude de l'interface meule pièce dans le cadre de la rectification conventionnelle et à grande vitesse »  
Direction : J. M. Bergheau (ENISE)

- T7 Laurence Riou soutenue en décembre 1999  
« Méthodes de calibrage d'un système stéréoscopique pour la mesure de vitesse d'écoulement 2D et 3D »  
Direction : R. Fouquet
- T8 Henri Zara soutenue en septembre 1997  
"Système d'acquisition vidéo rapide. Application à la mécanique des fluides »  
Direction : R. Fouquet
- T9 Jean Claude Dumas soutenue en janvier 1993  
« Système d'enregistrement de la fréquence cardiaque en multiposte avec synchronisation vidéo. Application à l'évaluation du rendement énergétique sur le terrain. »  
Direction : R. Rougny

Figure représentant la chronologie de l'activité d'encadrement de doctorant :



### **6.3.2 Autres diplômes**

#### **DEA**

- 1989 Michel Bory (encadrement à 20%)  
« Mise en place d'un système de développement d'une carte DSP »
- Jean Claude Dumas (encadrement à 20%)  
« Mesure ambulatoire de la fréquence cardiaque »
- Henri Zara (encadrement à 50%)  
« Etude du vieillissement de prothèses artérielles. »

- [1] Pascal Vocanson (encadrement à 100%)  
« Etude de faisabilité d'une interface entre un disque SCSI et un système vidéo rapide »

#### **Master**

- Du 3 Mai au 9 Juillet 2004 Claire DUCLOS (encadrement à 100%)  
Master Optique, Image et Vision 1ière année  
Etude de faisabilité de méthodes optiques pour la mesure de champs de température 3D  
Collaboration avec le CETHIL (centre d'étude thermique de l'INSA de Lyon)

#### **PFE et stages ingénieurs**

- 1996 PFE INSA Lyon (encadrement à 20%)  
Cibrano Michel, Combaret Christophe et Da Silva Joaquin  
« Synthèse en ASIC d'un système de stockage en RAM dynamique d'images vidéo rapide »
- 1997 PFE ENISE (encadrement à 100%)

Frédéric Soubeyrand  
« Etude d'un plateau de rééducation kinésthénique »

1999 PFE ENISE (encadrement à 100%)  
Sébastien Bourson  
« Mise en place d'un système de visualisation d'acquisition d'image sur un canal simulant le charriage d'un torrent »

[2] stage élève ingénieur Italien (Université de Padou)  
S. Luise  
Kinematic analysis of one-directional motion of subjects by digital image processing

2001 PFE INSA Lyon CETHIL (P. Gervais) (encadrement 50%)  
Caroline Laurent et David Sciascia  
Caractérisation thermique des textiles  
Collaboration Institut Français du Textile et de l'Habillement (Eculy 69)

2002 PFE INSA Lyon CETHIL (P. Gervais) (encadrement 50%)  
Sylvain Masson et Loïc Rathat  
Caractérisation thermophysique des textiles humides par imagerie infrarouge  
Collaboration Institut Français du Textile et de l'Habillement (Eculy 69)

2004 – 2005  
Stage ingénieur CNAM ENISE (H. Hamdi) (encadrement 50%)  
Gilles Thomas  
Mesure par thermographie IR des champs thermiques en rectification

**Projets industriels 2<sup>ème</sup> année ISTASE : (encadrement à 100%)**

2000 « Réalisation d'un boîtier de synchronisation multi-caméras 1 »

2001 J. C. Barriol et C. Brandon  
« Réalisation d'un boîtier de synchronisation multi-caméras 2 »

2001 G. Bretin, J. Moreau Et N. Varraz  
« Réalisation d'une télécommande de vidéoprojecteur autoprogrammable »  
Société Stanford Imaging systems (Lyon)

2002 Michel Nowak, Vincent Bertheas et Benoît Suffran  
« Interface à micro contrôleur entre un optoasic et un ordinateur »

2003 Sestier Florent, Tarea Olivier, Royon Sebastien  
« Réalisation d'une télécommande de vidéoprojecteur par internet »  
Société Stanford Imaging systems (Lyon)

**DUT (encadrement à 100%)**

1996 Stage pendant poursuite d'étude post DUT au Québec  
Jean Luc Soucy  
« Etage-tampon d'un système d'acquisition et d'enregistrement vidéo rapide »

2000 DUT GEII  
Sébastien Deneuve  
« Etude et réalisation d'une télécommande de vidéoprojecteur »  
Société Stanford Imaging systems (Lyon)

2001 DUT GEII  
Bertrand Verrière

- « Instrumentalisation d'une cuve à eau pour expérimentation en mécanique des fluides »  
Dilaver Karagos
- « Mesures de sensibilité et de la linéarité des photodiodes d'un optoAsic »

#### DUT Mesures physiques

Frédéric ...

- « Réalisation d'un adaptateur automatique de tension dans le cadre d'une interface de capteur optique »

#### DUT GEII

Noël Jot

- « Réalisation d'une interface entre un capteur d'images CMOS et un afficheur LCD »

#### 2005 DUT GEII Sylvain Chalavard

- « Transfert dans l'environnement Window CE d'un logiciel de mesure (projet CATELOC) »  
Collaboration avec les entreprises FCE (Fluid Control Europe) et RS automatismes industriels situées à Sorbiers (42)

#### 2005 DUT Jérémy Robert

- « Réalisation d'un système autonome d'enregistrement de vitesse de vent (projet EVVA) »  
Collaboration société Hélios (ST Chamond 42)





## 6.4. Programmes financés

Dans cette annexe, l'ensemble des programmes de recherche auxquels j'ai participé est présenté. Une figure, placée ensuite, donne la chronologie de ces programmes.

- R1 Action Thématique Région Rhône Alpes (1994).  
*Adaptations physiologiques aux conditions extrêmes*  
*Système d'évaluation automatique par traitement d'images de l'activité physique*  
Collaboration laboratoire de Physiologie-Physiopathologie de l'Exercice et du Handicap, CHRU St Etienne  
Coordination : CHRU St Etienne.  
R. Fouquet, J. Jay, V. Fischer, E Tafazzoli, F. Celle, P. Louis, J.C. Dumas
- R2 Action Thématique Région Rhône Alpes (1992)  
**Etude du vieillissement de prothèses artérielles**  
Collaboration Service d'angiologie, CHRU St Etienne, société CARDIAL, St Etienne.  
Coordination : CHRU St Etienne.  
R. Fouquet, J. Jay
- R3 Programme Actions Thématiques Région Rhône Alpes ». (1997-2000)  
**Etude des interfaces entre pièces outils et machines en Usinage Très Grande Vitesse**  
Collaboration Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne., Université Claude Bernard Lyon, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne. Coordination : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne.  
J. P. Schon, J. Jay
- R4 Programme Actions Thématiques Région Rhône Alpes (1997-2000)  
Jet diphasique formé lors de la décharge accidentelle à l'atmosphère d'une capacité de gaz liquéfié  
Collaboration Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne. Elf-Atochem, Rhône-Poulenc Industrialisation, Gaz de France. Coordination : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne  
C. Ducottet, J. P. Schon, J. Jay
- R5 Fonds d'Incitation au Transfert de Technologie, Région Rhône Alpes (1998).  
Société IPI  
*Préétude d'une caméra vidéo rapide.*  
R. Fouquet, J. Jay, V. Fischer, H. Zara
- R6 Programme Avenir Région Rhône Alpes (1999-2002)  
**Etude par traitement d'images du charriage de sédiments par des crues torrentielles**  
Collaboration ENISE, CEMAGREF, société SOGREAH. Coordination : Université Jean Monnet  
C. Ducottet, J. Jay
- R7 Programme Européen EUROPIV (1996-1998)  
*A cooperative action to apply Particle Image Velocimetry to problems of industrial interest*  
T. Fournel (responsable scientifique local)
- R8 Action incitative du CNRS 2000-2002  
Réalisation d'un capteur de déplacement de très grande résolution par l'utilisation de réseaux diffractant

Collaboration avec l'équipe "Microsystèmes optiques" du LTSI, Laboratoire LAAS, AIME (Toulouse). Coordination : Université Jean Monnet  
O. Parriaux, Y. Jourlin, J. Jay

R9 Programme Actions Thématiques région Rhône-Alpes 2003-2006

Implantation dans des rétines CMOS d'algorithmes de traitement de visage, application à l'authentification de visage

Collaboration avec le laboratoire LE2i (Laboratoire d'électronique, d'informatique et de l'image) (Université de Bourgogne), Société Atmel (Grenoble). Coordination : Université Jean Monnet  
J. Jay, L. Pierrefeu

R10 Programme TEMPRA : Région Rhône Alpes (2000)

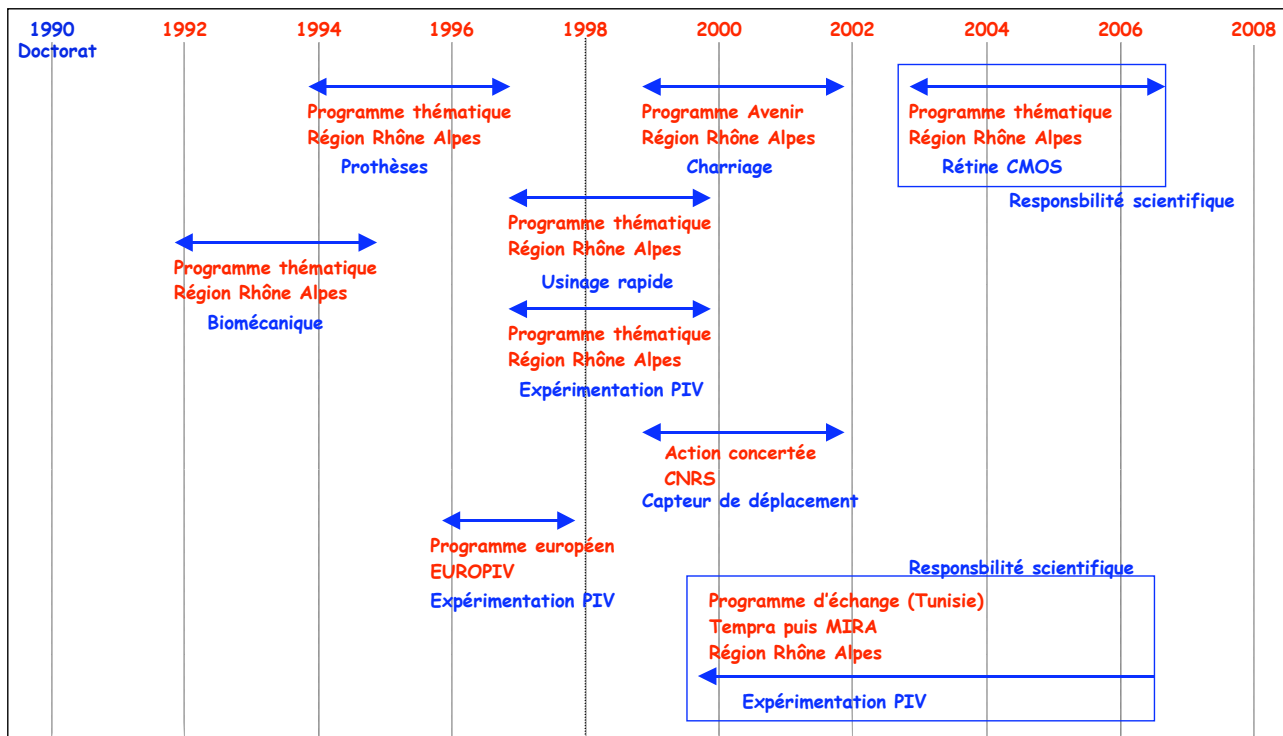
Programme MIRA : Région Rhône Alpes (2001, 2002, 2003, 2004 et 2005)

Mobilité internationale :

*Echange avec l'Unité de Mécanique des Fluide et Thermique de l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Monastir en Tunisie*

J.P. Schon, J. Jay

Chronologies des programmes financés



## 6.5. Coopérations scientifiques

### Mobilité internationale :

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir en Tunisie,  
Unité de métrologie, de mécanique des fluides et thermique (UMMFT)

Thème :

- Instrumentation temps réel de mesure de vitesse d'écoulement par PIV
- Etudes expérimentales des instabilités d'un jet d'air libre à faibles nombres de Reynolds
- Auto étalonnage de systèmes à deux caméras

Une thèse en Co-tutelle soutenue en février 2004, deux thèses en co tutelle en cours

5 ans de programme d'échange financés par la Région Rhône-Alpes (MIRA)

- Accueil de chercheurs confirmés et de doctorants au LTSI à ST Etienne pour des séjours allant d'une semaine à 3 mois de 1999 à 2005

- j'ai pu réalisé 4 séjours à Monastir allant d'une semaine à 1 mois entre 2000 et 2004.

Directeur de l'UMMFT : Habib Ben Aissia

Chercheur : Taoufik Filali

Chercheur et ancien doctorant en cotutelle : Yassine Zaouali

Doctorants : Hanène Louhichi et Nabila Filali

### Laboratoires avec lesquels il y a ou il y a eu travail en collaboration

LTDS (laboratoire de Tribologie des surfaces), Ecole Centrale de Lyon, site de l'ENISE (Ecole Nationale d'ingénieur de St Etienne) Hédi Hamdi, Christian Pages, Michel Bergeau

CETHIL (centre d'étude thermique de l'INSA de Lyon), Philippe Gervais, Didier Varierras

CEMAGREF (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement), Campus de St Martin d'hère (38), Philippe Frey, Mohamed Naim

LE2i (Laboratoire d'électronique et d'informatique de l'image), Université de Bourgogne (Dijon),

Michel Paindavoine, Fan Yang, Julien Dubois, Lew von ... Olivier Aubreton

Société Atmel : Pierre Damien Berger, Jean François Mainguet

### Plus anciens :

LAAS (laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes)(Toulouse), Mr Arguel, F. Lose

AIME (Atelier inter universitaire micro électronique), (Toulouse), J.L. Noulet

IMFT (Institut de mécanique des fluides de Toulouse), Georges Charnay

ISL (Institut franco allemand de St Louis) Mr Royet

LMFA (Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique), Ecole Centrale de Lyon,

Jean Claude Champoussin

Service de médecine du travail des hôpitaux de St Etienne : Christian Cabal

Service d'angiologie CHRU St Etienne Christian Boissier

laboratoire de Physiologie-Physiopathologie de l'Exercice et du Handicap, André Geysant, A. Belli, R. Bonnefoy.

### A l'intérieur du LTSI :

Instrumentation médicale (§ 3.2) Robert Rougny, Robert Fouquet

Système de traitement d'image :

Application à l'étude des écoulements phase 1 (§3.3.1.2) :

Jean Paul Schon, Robert Fouquet, Michel Courbon, Viktor Fischer, Henri Zara

Application à l'étude des écoulements phase 2 (§3.3.1.3) :

Jean Paul Schon, Laurence Riou, Thierry Fournel, Henri Zara, Christophe Ducottet, Michel Courbon, Cécile Barat.

Application à l'étude des écoulements : optimisation de paramètres en PIV (§3.3.1.4) :

Jean Paul Schon

Application à la thermographie IR (§3.3.2) : Jean Paul Schon

Application à la biométrie IR (§3.3.3) : Lionel Pierrefeu, Michel Courbon, Alain Aubert

Système de déplacement (§3.4) : Yves Jourlin, Olivier Parriot

### **Divers**

Organisation et suivi pendant le mois de mars 1992 du séjour de cinq enseignants-chercheurs de l'université de Craiova (Roumanie) dans le cadre d'un programme Tempus.

