HAL
open science

Contribution de l 'Optique Appliquée à la Mécanique et aux Sciences des Risques

Pierre Slangen

To cite this version:

Pierre Slangen. Contribution de l 'Optique Appliquée à la Mécanique et aux Sciences des Risques. Optique [physics.optics]. Université jean Monnet, 2013. tel-01962570

HAL Id: tel-01962570

https://hal.science/tel-01962570

Submitted on 20 Dec 2018

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

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

Sciences pour l'Ingénieur

HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

Contribution de l'Optique Appliquée à la Mécanique et aux Sciences des Risques

Pierre SLANGEN

Soutenance le 14 juin 2013

JURY

Rapporteurs: Jean-José ORTEU, EMAC
Pascal PICART, ENSIM
Yvon RENOTTE, ULg

Examinateurs: Jacques BOURGOIS, EMSE
Jean-Marie BUCHLIN, IVK
Gilles DUSSERRE, EMA
Jean-José ORTEU, EMAC
Pascal PICART, ENSIM
Yvon RENOTTE, ULg

Contribution de l'Optique Appliquée à la Mécanique et aux Sciences des Risques

Manuscrit pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches

14 Juin 2013

Université Jean Monnet
« Sciences pour l'Ingénieur »

Saint Etienne

Pierre Slangen
Ecole des Mines d'Alès,
Laboratoire du Génie de l'Environnement Industriel (LGEI)
Institut des Sciences des Risques,
6 Avenue de Clavières
30319 ALES CEDEX

04.66.78.56.28
Pierre.Slangen@mines-ales.fr

Speckles…From grains to Flowers

Tiny, shiny little grain
Lighting up our brain
Subjective for clothed operators
Objective for naked sensors
Twinkling in the dark
Revealing surface mark
Destructive for interferences
Constructive for conferences
Seeds of illuminations
Flowers for applications

P. Slangen
Introd. Proc SPIE, SPIE Vol.6341, May2006

Se souvenir que l'air nous porte
Zéline Zonzon

Remerciements

"Ovrez turtos èssonle síns s'fé arèdjî !!!",
Voilà bien une expression liégeoise qui résume le compromis à la belge, qu'il soit géographique, de circonstances et hélas parfois tombé en décrépitude.
*"Que tout le monde travaille ensemble sans se disputer !!!"*peut également s'appliquer au long du parcours qui m'a amené à présenter mon habilitation à diriger les recherches, et je voudrais d'abord remercier toutes les personnes qui ont contribué à sa validation en Belgique ou en France. Qu'ils soient verts, jaunes ou bleus, grands ou petits, je remercie aussi tous ceux qui m'ont aidé, soutenu, secoué, écouté, conseillé ou même ceux qui ont gentiment ri à mes blagues et autres calembours.
Parmi ceux-ci et ceux-là, il y a les flibustiers du bateau de la Méca, usineurs, gaziers, prototypeurs, mécatroniciens et autres mécaniciens, qui après m'avoir testé 3 mois en 1992 m'ont recruté parmi eux (merci DD) en 1995 muni de mes moyens optiques à la vigie. Une dédicace spéciale à Stéphane Corn avec qui nous nous sommes cassés les dents sur plus d'un morceau de pain en partageant le même bureau et nos idées au quotidien pendant un bonne dizaine d'années. Au passage, j'exprime toute ma reconnaissance au Dr. Michel Fages, grâce à qui je ne regarde plus ma jonction amélo-dentinaire de la même manière, et aussi au Professeur Fred Cuisinier de la Faculté d'Odontologie de Montpellier.
Un tout grand merci à Christine Cerruti pour son soutien et son excellente collaboration avant et pendant le congrès Speckle06, mais aussi après lors des CCP. J'en profite pour témoigner ma reconnaissance à tous les personnels de l'EMA qui m'ont aidé dans les démarches administratives, financières, de secrétariat ou de logistique pendant toutes ces années, que ce soit en cuisine, à l'imprimerie ou au garage, aux laboratoires, à la division administrative ou à la direction des études ou des recherches.
Je suis reconnaissant à Yannick Vimont, Directeur des Recherches, de m'avoir encouragé à créer mon axe exploratoire de recherches ILOA en 2006, ce qui m'a permis des actions transverses interlaboratoires et d'apercevoir d'autres horizons que ceux de la mécanique.
En effet, après la terre, j'ai rencontré le feu, l'air et l'eau et j'exprime toute ma gratitude à Gilles Dusserre pour m'avoir convaincu de prendre le risque de rejoindre les "Risques". Merci à tous les membres de cette famille des cygnes pour leur dynamisme, et la chaleur de leur accueil qui perdure toujours. Les sujets abordés m'ont aussi permis une complète remise en question salvatrice et de découvrir une quantité impressionnante de phénomènes extrêmes où l'optique, si elle ne permet pas toujours de voir, permet parfois de distinguer. *Special thanks* à Lolo Aprin et Fred Heymes pour les longues discussions et les galères expérimentales. Un grand merci aux membres du CEA Gramat pour leur confiance et pour les clefs de leurs Formule1 sur leur magnifique circuit … presque aussi beau que Francorchamps.
Je remercie également les doctorants et stagiaires qui ont participé à tous ces travaux.
À l'international, j'exprime mes plus vifs remerciements à la communauté des "Knights of Speckle" pour m'avoir confié l'organisation de Speckle06, à Pierre Jacquot et à Dan Borza pour avoir rédigé ensemble un beau chapitre, ainsi qu'à Peter Somers. Toute mon amitié à Kay Gastinger, SINTEF puis NTNU…*"Without you a conference is different!"*

L'eau, la terre, l'air, le feu …
À Catherine pour le cinquième élément de la vie de tous les jours et de toutes les saisons. À mes enfants, si si, raison et patience sont les racines de l'intelligence.
Une pensée affectueuse à mes beaux-parents et à leurs familles et aux amis qui m'ont permis d'y arriver; … et à mes parents, à ma famille, qui m'ont permis de partir.

Enfin, je voudrais remercier tout particulièrement les membres du jurys, Messieurs Jean-José Orteu, Pascal Picart, et Yvon Renotte qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de cet ouvrage et Messieurs Jacques Bourgois, Jean-Marie Buchlin et Gilles Dusserre qui ont accepté de participer à l'évaluation de ce travail. Ils ont chacun fortement contribué à l'élaboration de ce manuscrit, *"een hartelijk bedankt"*.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières 7
Liste des symboles 9
Liste des figures 10
1 Préambule 13
2 Introduction générale 18
3 Contexte général des travaux de recherche 21
Résumé de la thématique *21*
Thématiques de recherche *21*
A. Speckle 23
1. Interférométrie speckle *25*
2. Holographie *36*
2.1. Holographie traditionnelle 36
2.2. Holographie numérique 37
B) Corrélation d'images 48
1. Corrélation sur solides *48*
2. Vélocimétrie par imagerie de particules *52*
C) Acquisition rapide d'images 58
1. Capteurs d'images *59*
2. Images *63*
3. Traitements *65*
Rupture brusque d'un réservoir atmosphérique de liquide 67
Perforation d'un réservoir composite sous pression par un projectile hyper véloce 80
D) Méthodes de densité 89
1. Ombroscopie *89*
2. Strioscopie *91*
3. Ombroscopie rétroréfléchissante *94*
Caractérisation de rejet de polluant dans l'eau 96
Interaction d'une onde de surpression avec des gouttes 101
4 Synthèse 105
5 Projet de recherche 108
6 Positionnement scientifique 111
Collaborations 111
Collaborations internes 111
Collaborations externes 111
Encadrement pédagogique 111
Réseau des contacts 112
Rayonnement scientifique 113
Organisation de manifestations scientifiques *113*
Activités contractuelles: 114
7 Références 115
8 Curriculum Vitae: Travaux et publications 118
CURRICULUM VITÆ 119
PUBLICATIONS (norme AERES) 122
RAPPORTS DE RECHERCHE 128
CONFERENCES INVITEES 129
CHAIRMAN 129
COURS EN LIGNE 130
ÉMISSIONS DE TÉLÉVISION 130
ANNEXE : Projection de franges 136

LISTE DES SYMBOLES

A	amplitude de l'onde
$\Delta A_{x,y}$	taille de l'objet
Δa	décalage de l'image source
α	décalage de phase
β	densité de probabilité
C	contraste
D	diamètre de l'ouverture de l'optique
D_0	diamètre initial de goutte
D_{dec}	distance de décorrélation
d_d	distance d'enregistrement DIPH
d_i	distance du plan image
d_o	distance du plan capteur à l'objet
d_r	distance de reconstruction de l'objet
d_s	taille du speckle subjectif
e	épaisseur de milieu optique
ε	bruit de phase
$\boldsymbol{\varepsilon}$	angle de déflection
F, ΔF	force ou charge, variation de charge
FQS	facteur de qualité visuelle
FTM	fonction de transfert de modulation
f	distance focale
ϕ, φ	phase
ϕ_D	ouverture du système optique
G, G'	noyau de convolution
γ	grandissement
H	intensité de l'hologramme numérique
h	noyau de diffraction
$I_{O, R, B, M}$	intensité: objet, référence, background, modulation
K, L	nombre de points de reconstruction
$\mathbf{K}$	constante de Gladstone-Dale
L	dimension de la surface rugueuse
l	distance de défocus
λ	longueur d'onde
M, N	dimension du capteur d'image
NF	fréquence de Nyquist
n	indice de réfraction
O	intensité de l'onde objet en holographie
$p_{x,y}$	dimension interpixel (pitch)
$p(\varepsilon)$	densité de probabilité de second ordre du bruit sur la phase
ψ_i	densité de probabilité de phase
$\rho_{x, y}$	résolution spatiale
$\boldsymbol{\rho}$	densité du fluide
S	sensibilité du schlieren
$\sigma_{\Delta,\varepsilon}$	ecart-type du bruit mesuré, réel
σ	tension de surface du liquide
T_{fr}	temps entre deux frames
T_L	facteur de transmission de l'optique
T_P	durée de pulse
θ	angle
u, v	décalage latéral
u_g	vitesse du souffle de gaz
μ	facteur de cohérence complexe
V_m	taille de la fenêtre de corrélation
V_S	vecteur sensibilité
We	nombre de Weber

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Formation du speckle objectif.
Figure 2: Formation du speckle subjectif.
Figure 3: Schéma récapitulatif de la métrologie à partir du speckle.
Figure 4: Principe du calcul de phase par 4 décalages de phase
Figure 5 : Déroulages de phase : spatial et temporel
Figure 6: Interféromètre speckle sensible aux déplacements tridimensionnels
Figure 7 : Interféromètre speckle : Sensibilité aux déplacements dans le plan IPI et mixte OPI
Figure 8 : Interférométrie speckle appliquée à une éprouvette entaillée
Figure 9 : Interférométrie speckle appliquée à l'étude de l'adhésion (sollicitation en wedge test)
Figure 10 : Indentation d'une membrane métallique (diam. 10cm, épaisseur 2mm)
Figure 11 : Principe de clonage d'une dent
Figure 12 : Essai en compression d'une dent par interférométrie speckle
Figure 13 : Comportement en compression de dents naturelle et prothétique
Figure 14 : Dent prothétique, charge statique de 52.78N après décharge de 30.07N
Figure 15 : Montage optique en holographie de Fresnel
Figure 16 : Montage optique en holographie d'image plane
Figure 17 : Décorrélation du speckle
Figure 18 : Reconstructions de l'objet en amplitude (1024*1360pixels)
Figure 19 : Différences de phase.
Figure 20 : Influence de l'ouverture.
Figure 21 : Résolution spatiale.
Figure 22 : Décorrélation du speckle pour différentes ouvertures en DIPH par rapport à la DFH.
Figure 23 : Motifs de corrélation d'images
Figure 24 : Bases schématiques de la corrélation d'image
Figure 25 : Exemple de fenêtre adaptative (essai de striction d'un acier)
Figure 26 : Instrumentation optique de l'essai Marciniak
Figure 27 : Essai de compression plane, limite de flambement
Figure 28 : Essai de traction-cisaillement sur tôle sandwich
Figure 29 : Principe de la corrélation d'images en PIV (source Dantec Dynamics)
Figure 30 : Principe de l'acquisition double trame, ici à 4000fr/s.
Figure 31 : Schéma de principe de PIV en nappe à balayage de profondeur
Figure 32 : Exemples d'image brute et de résultat de PIVSR
Figure 33 : Résultats de PIV sur l'air autour d'un danseur
Figure 34: Points caractéristiques et trajectoire d'une prothèse de course
Figure 35: Première décomposition de mouvement par photographie, Muybridge, « The farm », Stanford.
Figure 36: Types et architectures de capteurs (source DALSA)
Figure 37: Exemple de détermination de la FTM
Figure 38: Mire USAF1951, images non résolue et résolue
Figure 39: Sélection d'une optique adaptée
Figure 40: Mécanismes principaux de numérisation d'une image
Figure 41: Vue schématique du remplissage en électron d'un pixel
Figure 42: Principe de l'acquisition en buffer tournant
Figure 43: Collaboration avec des entreprises de l'incubateur (Innov'Up)
Figure 44: Conséquences de l'interaction d'un projectile hypervéloce sur un container atmosphérique
Figure 45: Premiers instants après impact
Figure 46: Vue latérale de traversée du container
Figure 47: Exemple d'image de calibration
Figure 48: Essai de perforation: Site d'essai CEA-CEG, Gramat
Figure 49: Synoptique des algorithmes de traitement à partir du film brut (cih)
Figure 50: Réalisation d'une image composite, avec cibles coopérantes sur capteurs chimiques.
Figure 51: Image composite: vue du dessus et vue latérale
Figure 52: Image composite: Configuration de tir, résultat et maillage
Figure 53: Cibles coopérantes rétroréfléchissantes
Figure 54: Mesure de vitesse du projectile par le temps d'obturation
Figure 55: Images de la vitesse du projectile avant et après impact
Figure 56: Détermination du déplacement bidimensionnel du jet

Figure 57: Containers transparents (épaisseur 20mm) pour mise en évidence de la cavitation
Figure 58: Cavitation d'un projectile en DENAL (alliage de tungstène), impact à ~1255m/s
Figure 59: Phases caractéristiques du coup de bélier, impact à 1255m/s sur container cubique
Figure 60: Déplacement du projectile au cours du temps, tiré de [34]
Figure 61: Vitesse du projectile au cours du temps, tiré de [34]
Figure 62: Effet du projectile au cours du temps, tiré de [34]
Figure 63: Libération brutale de fluide par un contenant après impact (champ 8m x 2m)
Figure 64: Photo d'illustration du lanceur ATHENA, chambre réceptacle ouverte
Figure 65: Photo du réservoir utilisé, avec cibles coopérantes
Figure 66: Positionnement du réservoir dans la chambre réceptacle
Figure 67: Capteurs de mesure de la surpression aérienne, montés sur support profilé
Figure 68: Schémas de positionnement des moyens d'imagerie rapide
Figure 69: Positionnement sur site d'essai des moyens d'imagerie rapide
Figure 70: Visualisation des impacts en face arrière à 500 000 fr/s.
Figure 71: Visualisation du projectile en face avant à 100 000fr/s.
Figure 72: Vue de l'impact et des éjections en face avant à 100 000fr/s.
Figure 73: Vitesse d'éjection en fonction de la distance à l'impact.
Figure 74: Mise en évidence d'un éclat de 8mm à 60m/s en face avant à 1000fr/s
Figure 75: Principe de l'ombroscopie
Figure 76: Déviation des rayons lumineux par différents dioptres (ndioptre > next)
Figure 77: Principe de la strioscopie
Figure 78: Filtrage dans le plan strioscopique, tiré de [36]
Figure 79: Montage en double traversée et montage en Z, simple traversée
Figure 80: Montage d'ombroscopie rétroréfléchissante
Figure 81: Visualisation de la chaleur d'un briquet en salle de cours par ombroscopie
Figure 82: Strioscopie double traversée: éjection de gaz et évaporation d'acétone
Figure 83: Mise en évidence d'une goutte de Methyl Ethyl Cetone (nMEK=1,377) par strioscopie en Z
Figure 84: Mise en évidence de la dissolution d'une goutte de n-butanol (nbut=1,399) dans la colonne d'eau
Figure 85: Colonne d'essai au Cedre et résultats obtenus
Figure 86: Schéma de PILS et ombroscopie pour la vidange gravitaire d'une urne de n-butanol
Figure 87: Résultat de PILS pour une goutte de n-butanol de 5mm
Figure 88: Schéma de principe de l'holographie numérique en temps résolu
Figure 89: Pré-traitement de l'hologramme
Figure 90: Obtention de l'hologramme de phase pure
Figure 91: Interaction du liquide éjecté avec une onde de souffle suite à une explosion
Figure 92: Représentations schématiques des mécanismes de fragmentation, d'après Lee [49].
Figure 93: Configuration expérimentale
Figure 94: Comportements phénoménologiques temporels de l'interaction goutte-souffle pour l'acétone et l'eau
Figure 95: Détermination des vitesses par TRPIV entre deux pulses de chaque cavité.
Figure 96: Formes caractéristiques de fragmentation pour l'eau et l'acétone

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau comparatif des méthodes de reconstruction
Tableau 2 : Stations PIV
Tableau 3 : Caméras rapides disponibles (gris : CMOS, blanc : CCD, sq.=pixel carré)
Tableau 4 **:** Fréquences de Nyquist limites en fonction de la taille de pixel (vision machine)
Tableau 5 **:** Techniques de traitement d'image
Tableau 6 **:** Valeurs expérimentales pour la série de tirs
Tableau 7 **:** Caractéristiques des prises de vue
Tableau 8 **:** Principe de mesure, quantité mesurée et technique de mesure de méthodes optiques

1 PRÉAMBULE

La Belgique est un triangle à quatre côtés, avec Bruxelles au milieu, et Liège au centre.
P. Slangen, discussion avec A. Vautrin†, Hommage

Historiquement, en ma Belgique natale, je fus séduit par l'optique dès ma seconde année d'études secondaires, et j'appréciais déjà la réalisation d'expériences de physique appliquée. Après des études secondaires techniques en sciences, c'est donc naturellement que je m'oriente vers des études de physicien.

En seconde année de physique, et suite à une visite scientifique à Paris et de son musée de l'holographie, cette technique d'enregistrement et de restitution d'image en trois dimensions m'apparut comme magique….et dès la troisième année de physique, je milite laser battant pour la création d'un petit laboratoire d'holographie dans le service de Physique Générale de l'Université de Liège. Beaucoup de motivation, un peu de chance et quelques crédits plus tard, le matériel est là et me permet de développer l'imagerie holographique et l'interférométrie holographique sur plaque photographique à haute résolution.

En 1988, je débute comme Moniteur d'Études pour dispenser les travaux pratiques et les travaux dirigés aux élèves ingénieurs en Physique Générale. Ce goût pour l'enseignement et la vulgarisation scientifique m'entraîne d'ailleurs à présenter l'Agrégation à l'Enseignement Secondaire Supérieur, conjointement avec mon diplôme de dernière année en Sciences Physiques. Je m'oriente ensuite vers un DEA en Optoélectronique pendant lequel je perfectionne les développements chimiques en holographie puis en transférant les acquis sur des supports en photorésine, nous avons réalisé des hologrammes emboutis (comme ceux que l'on trouve sur les cartes de crédit). On comprend d'ailleurs mieux leur présence en tant que moyen pour empêcher les contrefaçons en essayant de réaliser soi-même chaque étape de leur fabrication (enregistrement d'un hologramme d'hologramme sur photorésine, évaporation sous vide d'argent pour rendre le microrelief conducteur, transfert du microrelief sur matrice en nickel par croissance électrochimique, et finalement emboutissage d'un plastique par calandrage à chaud). Cette année me permet d'appréhender beaucoup de techniques différentes et de côtoyer des personnes de différents horizons. Après le DEA, mon premier stage de six mois à l'étranger est financé par le projet COMETT et me permet de travailler sous la direction de Paul Smigielski, pionnier du cinéma holographique, à l'ISL (Institut Franco-allemand de recherches de St Louis, St Louis, Alsace) où j'étudie par holographie les modes propres de vibration d'un cylindre en dépouillant au microdensitomètre optique les hologrammes en temps moyenné de la structure vibrante. J'effectue mon stage en collaboration avec le CETIM CERMAT (Mulhouse, Alsace) où je suis formé aux techniques de mesures mécaniques de ces mêmes modes de vibration par excitation de l'objet au marteau de choc et détection par accéléromètre couplés à un analyseur de fréquences.

De retour à Liège, j'encadre des étudiants de dernière année en Physique et en Sciences Appliquées (Ingénieurs) lors de leur travail de fin d'études, que ce soit pour optimiser des nouveaux matériaux photosensibles (gélatine bichromatée, photopolymères) ou pour appliquer l'interférométrie holographique au test non destructif et à l'analyse vibratoire.

Petite pause scientifique avec l'accomplissement du service militaire obligatoire, où je participe à l'enseignement de la physique à l'École des Sous-Officiers de Dinant (Belgique).
En septembre 1991, de retour au laboratoire de Physique Générale de l'ULg, j'entame ma thèse de doctorat en interférométrie speckle (SI, ESPI, TV Holography…), qui permet "tout simplement" d'obtenir le même type de données de déplacement que l'interférométrie holographique mais sans enregistrer d'hologramme sur un support photographique. Et pourtant, j'avais juré en 1988, au congrès d'holographie de St Louis (Alsace…), que je ne ferais jamais de l'ESPI, et ce malgré l'exposé pourtant brillant de Eiolf Vikhagen.
Les premières cartes d'acquisition d'images permettent d'enregistrer 4 images de 512x512pixels, même si les caméras électroniques de l'époque n'en délivrent que 480x480, et encore… à quelques images par seconde. Il faut donc (déjà…) rivaliser avec les compromis de résolution spatiale, de vitesse d'acquisition, et de quantité de lumière laser disponible (du petit laser He-Ne de 10mW au "gros" laser à argon ionisé, avec son transformateur électrique imposant et un circuit de refroidissement inamovible). Par contre le principal avantage de l'ESPI émerge vite en comparant avec des travaux voisins : pas de développement de l'interférogramme, et surtout une sensibilité bien moindre aux perturbations extérieures que l'holographie.
En 1992, j'intègre pour 3 mois d'échange ERASMUS, le Laboratoire de Mécanique et de Métrologie de l'École des Mines d'Alès (Gard, France). Je m'y spécialise plus particulièrement sur la formation du speckle et son utilisation en photographie speckle (mieux connue de nos jours sous le nom de corrélation numérique d'images, DIC) et le dépouillement de photographies speckle en plein champ par corrélateur optique.
Certains chercheurs de l'époque, et toujours actuellement pour les plus coriaces d'entre eux, continuent de penser que ces techniques photographiques et interférométriques sont antagonistes, alors qu'elles sont simplement complémentaires. Une utilisation intelligente de leurs performances respectives, comme par exemple le recalage par corrélation de specklegrammes, permet de passer au-delà des inconvénients de chacune.
L'année 1993 sonne la première publication dans une revue de rang A, et plus particulièrement pour doser, par fluorescence X, la quantité de bichromate d'ammonium dans de la gélatine bichromatée ; merveilleux support à haut rendement de diffraction fabriqué au laboratoire de Physique Générale, baptisé *HOLOLAB*, car capable de fabriquer, de caractériser et d'utiliser les supports holographiques. Parmi ceux-ci figurent notamment les photopolymères développés par l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, qui me permettront d'affirmer qu'*"il est possible d'enregistrer des hologrammes rainbow sur des photopolymères"* lors de ma thèse annexe.
Plusieurs conférences et articles au cours de la thèse principale ainsi que l'encadrement de projets de fin d'études d'ingénieurs me permettent de défendre à Liège mon doctorat d'État en juillet 1995, soit une semaine après mon recrutement… à l'École des Mines d'Alès où je débute comme Chargé de Recherches en septembre 1995, rattaché au Laboratoire de Mécanique et de Métrologie (LMM).
L'application des techniques optiques à la Métrologie et à la Mécanique des matériaux devient dès lors incontournable, de même que la responsabilité du cours plénier d'Électromagnétisme (cours et T.D.) puis d'Optique Appliquée en 1ère année (actuelle L2).

À l'époque, le laboratoire d'optique du LMM possède une table Newport sur pieds hydrauliques, quelques caméras, et surtout une caméra thermoplastique et un laser à argon ionisé de 2W CW. La thématique principale en mécanique est axée sur la mesure de déplacements par voie optique, et plus particulièrement par photographie speckle numérique. Le speckle subjectif de l'objet est enregistré directement par une caméra numérique (Kodak Megaplus) puis est traité par des algorithmes de PIV (vélocimétrie par imagerie de particules) en LabVIEW…1.0. Il manque donc un moyen de caractériser de très faibles déplacements que l'on ne peut atteindre par corrélation d'images. Il faut dès lors transférer les connaissances et les techniques développées pendant ma thèse, ce qui sera réalisé notamment par mon premier doctorant (J. Begorre) qui, hélas, sera absorbé par le milieu industriel six mois avant de soutenir. Son travail a notamment permis de caractériser toute la chaine d'acquisition et de traitement mais aussi d'intégrer des programmes en C dans l'environnement LabVIEW, bien plus sympathique pour l'utilisateur final.
Entre temps, le labo a obtenu un financement FEDER qui a permis d'acheter l'un des premiers lasers VERDI 2W de France (Nd-YAG doublé à 532nm, 2W continu), qui remplace utilement le vieil argon et génère un faisceau laser très cohérent (©). Il est de plus portable, et permet de travailler en corrélation d'images de speckle à l'extérieur du laboratoire. Ceci génère différents contrats avec les industriels en intégrant également des petits lasers aux développements de la corrélation d'images (Hutchinson, Sollac, Renault…) pour des applications en Mécanique du Solide (lois de comportement, courbes limites de formage, …). La surface utile éclairée en interférométrie frise le mètre carré et le VERDI est également appliqué pour des contrats avec l'Aérospatiale afin de caractériser des treillis en fibres de carbone en déplacement libre.
Si le speckle laser est bien utile comme marqueur en corrélation numérique d'images, il est toutefois sensible à de grands déplacements de la structure et aussi à des changements de rugosité. En 2000, le LMM devient l'équipe « Mécanique des Matériaux et des Structures », qui fait partie intégrante du Centre des Matériaux de Grande Diffusion (CMGD), actuellement C2MA (Centre des Matériaux des Mines d'Alès).
Je participe alors à optimiser les systèmes de corrélation d'images par observation de mouchetis déposé par peinture (flyspeck, dont le défocus est mieux maîtrisé lors de déplacement hors plan de l'objet), et qui remplace utilement le speckle laser dans certains cas. Plusieurs essais mécaniques sont instrumentés, tant d'un point de vue de l'acquisition d'images que pour l'interfaçage des moyens d'essai (presse hydraulique, synchronisation de la prise d'images, capteurs de force et de déplacement, …). Lors d'une thèse en collaboration avec Renault, l'interférométrie speckle est couplée à la corrélation numérique de mouchetis afin de déterminer, par la première, l'apparition du flambement, et par la seconde, les déplacements planaires générés par la compression plane d'une tôle échantillon.
Pour obtenir des déplacements suivant trois composantes, des méthodes comme la stéréocorrélation sont développées à l'École des Mines d'Albi-Carmaux, où je dispense aussi les cours d'Optique Appliquée pendant plusieurs années (2000-2002) aux élèves d'option et aux doctorants. Encore une fois on peut comparer cette technique à l'interférométrie speckle 3D, et on constate de nouveau que ces méthodes sont complémentaires en fonction du grandissement photographique choisi en corrélation d'image (MEB compris). La thèse de Benoit Gautier, dont je suis encadrant principal, est soutenue en 2005 et permet au laboratoire

de disposer d'une installation complète d'interférométrie speckle sensible aux trois composantes de déplacement. Ces résultats sont appliqués avec succès dans plusieurs domaines dont le collage composite et génèrent plusieurs publications et des participations à des conférences de niveau international.

Après une première participation à la conférence de Lausanne sur l'interférométrie speckle (EPFL, P. Jacquot, 2000), puis à celle de Trondheim (SINTEF, K. Gastinger, 2003) en tant que membre du comité scientifique, je suis alors chargé par le Comité Scientifique International d'organiser la prochaine conférence en 2006 à Nîmes. Ce congrès international, « Speckle06, from Grains to Flowers » sera un succès du point de vue scientifique, avec notamment la venue en Europe de Joe Goodman (professeur émérite à l'Université Stanford) et plus de 150 participants de 30 pays. Il restera également une référence pour l'organisation de congrès internationaux à l'EMA avec l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel réalisé en collaboration avec Christine Cerruti (EMA, Innov'Up). Les retombées de ce congrès sont également une manne de contacts académiques internationaux mais aussi et surtout l'affirmation locale des capacités de métrologie optique dont dispose l'EMA. Suite au congrès Speckle06, je deviens responsable de l'Axe de Recherche Exploratoire en Instrumentation Laser et Optique appliquée (ILOA), de 2007 à 2009 au sein du CMGD. Cette activité me permet d'affirmer mes collaborations transversales au sein et à l'extérieur du Centre des Matériaux.

En effet depuis 2005, je suis fortement sollicité par l'Équipe Risques Industriels et Naturels (une partie du LGEI, toujours à l'EMA) pour participer à la conception et à l'optimisation de systèmes d'imagerie rapide lors de contrats avec la Délégation Générale pour l'Armement, DGA, et le Centre d'Études de Gramat CEG. Il faut transférer, au milieu de recherche de pointe de la DGA, les travaux que j'ai réalisés en acquisition rapide et en traitement d'images pour l'optimisation d'une prothèse tibiale d'un coureur handisport aux Jeux Olympiques d'Athènes (Dominique André, médaille de bronze, 2004, projet Prothémée).

L'interférométrie speckle reste néanmoins bien présente car à la suite de Speckle06, la Faculté d'Odontologie de Montpellier s'intéresse à cette technique de mesure pour qualifier les couronnes dentaires en céramique. Ce partenariat perdure actuellement et a permis la publication de plusieurs articles et présentations dans des congrès internationaux.

L'évolution des contrats avec le CEG, récemment devenu CEA Gramat, et l'acquisition de nouveaux matériels en adéquation avec le type de recherches rencontrées (caméras rapides, lasers double pulses, …) ainsi que l'encadrement de différents doctorants me permettent de finaliser l'activité d'ILOA et de demander mon transfert à l'équipe Risques Industriels et Naturels. Ce transfert est effectif en janvier 2010, et j'intègre le tout nouvel Institut des Sciences des Risques (ISR) en mars 2011, après qu'ILOA ait passé avec brio l'AERES. Je contribue à développer l'instrumentation optique pour des essais de grande ampleur (ruptures brusques de container, explosion, interaction onde de souffle – gouttes, pollution marine) et ainsi à fournir des cartographies de déplacements optiques (déplacement et indice de réfraction) ou à visualiser des phénomènes hypervéloces avec des moyens d'acquisition d'images ultrarapides à la pointe de la technologie.

Pour résumer mon parcours pendant ces années de recherche, je me suis intéressé à la mesure du champ de déplacements (microscopique ou mésoscopique) lié à un solide portant des marqueurs (speckle, mouchetis, aspect), puis à la mesure de champ de déplacement de

particules, qui, distinctement ou en groupe, forment l'objet d'étude. Si cela est vrai pour le déplacement physique, ceci l'est également d'un point de vue du déplacement optique, où l'indice de réfraction devient une composante forte à mesurer ou à mettre en évidence, et ce à petite ou à grande échelle. C'est le chemin de ce parcours que je suivrai pour décrire mes travaux de recherche qui débouchent sur le projet de recherche que je souhaite développer après l'habilitation.

Si la recherche contractuelle occupe un temps important de l'enseignant-chercheur en École des Mines, il doit également participer aux missions d'enseignement, que ce soit en tronc commun ou en option. À mon arrivée en 1995, j'étais, et je suis toujours, le seul enseignant chercheur en optique. En plus de remonter une activité en optique appliquée à la Mécanique, j'ai aussi dispensé les cours d'Électromagnétisme (60h) aux élèves ingénieurs de première année, (L2 à l'époque). Ces cours magistraux en promotion complète étaient assortis de travaux dirigés dont j'étais également responsable du bon déroulement en ¼ de promotion ainsi que de la coordination des chargés de cours extérieurs. J'ai ensuite créé un cours d'optique appliquée, en cours électif, d'un volume de 30h, qui permettait d'aborder le côté expérimental et la mise en pratique des connaissances de bases des élèves sortant d'une année de classes préparatoires. Ce cours a ensuite évolué vers un cours plus appliqué à la mesure optique dans l'industrie, notamment avec le transfert des développements réalisés lors de contrats industriels, lorsque cela était autorisé. Ce cours électif a ensuite été rendu obligatoire puis intégré dans le volume horaire du cours d'électromagnétisme pour enfin renaitre en tant que cours d'optique appliquée et traitement d'images (40h), en L3, accompagné de travaux pratiques (expériences appliquées à la recherche). D'autre part, je dispense en parallèle le cours de « Capteurs Optiques et Instrumentation » en M2 et j'ai développé un cours en ligne sur les capteurs optiques dans le cadre du projet « Optique pour l'Ingénieur ». Actuellement, nous développons des travaux pratiques de PIV et de schlieren en M2 au département Risques et Crises.

Membre actif de différentes sociétés savantes (EOS, OSA, CMOI), je suis également régulièrement sollicité pour "reviewer" des articles dans des revues internationales de rang A, pour participer à des écritures d'ouvrages collectifs (nationaux et internationaux, imprimés ou en ligne) mais également en tant que membre de comité scientifique de conférences internationales.

Dans ce cadre de recherches et d'enseignement, le passage de l'Habilitation à Diriger les Recherches m'est donc logiquement apparu comme une étape clef de la progression vers la responsabilité scientifique et l'encadrement pédagogique d'élèves et de doctorants, qui sont naturellement générés par cette activité croissante d'optique appliquée, tant du point de vue industriel qu'académique.

2 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Brilliant people,
Unbearable shadow,
Let's speckle now.
P. Slangen

Pour visualiser des objets peu ou pas lumineux, on peut les éclairer tout en les observant avec un capteur. Les sources lumineuses peuvent être cohérentes ou incohérentes, en fonction de la monochromaticité, de la phase (et de la différence de phase) des photons émis ainsi que de la polarisation. Les sources de lumière incohérentes sont principalement utilisées en éclairage public et en recherche, en source d'éclairage chaude ou froide, à forte puissance lumineuse et pour des taux de modulation faible. L'avènement des LEDs superluminescentes a récemment permis d'utiliser des sources froides, intenses, et modulables en haute fréquence.

Contrairement aux sources incohérentes, et sauf cas particuliers, les sources cohérentes laser produisent un effet granuleux lorsqu'elles éclairent des objets optiquement rugueux, soient des objets dont la rugosité est voisine de la longueur d'onde utilisée. Cet effet peut apparaître avec ou sans lentille imageant la lumière de l'objet sur une surface photosensible. Ce phénomène est appelé le speckle, subjectif ou objectif, respectivement.

Les lasers sont utilisés pour enregistrer des hologrammes depuis les années 1960 avec les expériences de Gabor, de Leith et Upatnieks et de Powell et Stetson. Des hologrammes en transmission ou en réflexion (Denisyuk) peuvent enregistrer la modulation de phase provenant de l'interférence de la coque lumineuse de l'objet avec un faisceau de référence. Certains de ces pionniers (Smigielski, Brooks, …) ont aperçu des franges alors que les objets étaient statiques, puis ont montré que ces franges provenaient de microdéformations subies par l'objet lors du processus d'enregistrement. L'interprétation quantitative a conduit vers l'interférométrie holographique couplée au calcul de phase.

Les évaluations quantitatives de la phase ont été obtenues notamment grâce au décalage de phase et au déroulage de phase (temporels ou spatiaux, avec ou sans porteuse spatiale). Avec l'utilisation des caméras électroniques, les franges d'interférométrie holographique ont été enregistrées et le calcul de phase en fut grandement simplifié. La faible résolution spatiale et le manque de sensibilité forçaient les utilisateurs à de grandes ouvertures pour les lentilles … et donc le speckle n'était pas significatif à cette époque.

Pendant les années 1970, certains utilisateurs pensèrent à retirer la plaque holographique pour imager directement l'objet sur la surface du capteur, tout en conservant le faisceau de référence. Ceci fut réalisé en générant des gros grains de speckle par réduction de l'ouverture de l'objectif imageur. Le gain fut immédiat ; plus besoin d'enregistrer d'hologrammes, et donc une sensibilité moindre aux perturbations extérieures. L'interférométrie speckle (ou en lumière diffuse), encore appelée TV Holographie, était née. Des montages sensibles hors plan ou dans le plan de l'objet ont été conçus, ainsi que des dispositifs de cisaillement (shearographie). Des sources de basse cohérence peuvent également être utilisées pour des applications dédiées en interférométrie speckle basse cohérence et en interférométrie en lumière blanche.

Les résolutions (spatiale et dynamique) des caméras numériques permettent à présent l'enregistrement des fronts d'ondes interférométriques, presque comme un milieu enregistreur holographique. Comme la puissance informatique est devenue disponible, les équations de propagation de l'onde peuvent être résolues. L'holographie numérique est née. Ceci permet le traitement informatique de l'hologramme et la possibilité de l'envoyer par le web via des algorithmes de compression adaptés, et ce pour l'injecter dans des interféromètres distants. De nos jours, l'interférométrie holographique classique est toujours utilisée en couplant une caméra numérique (CCD ou CMOS) avec un cristal photoréfractif autodéveloppant (cristal de BSO) pour enregistrer l'hologramme. L'évolution des fibres optiques et des lasers a conduit à des systèmes d'éclairage puissants combinés avec cette caméra holographique en temps réel.
D'un autre côté, la photographie speckle (double exposition de la figure de speckle) permet la mesure de déplacements dans le plan par un processus de corrélation (optique ou informatique). Depuis la naissance de la photographie speckle, les caméras et l'informatique ont évolué. L'acquisition, le calcul de la phase et de la corrélation peuvent être réalisés en temps réel, rendant plus simple l'observation de phénomènes statiques et dynamiques.
Parfois le speckle laser peut être remplacé par un mouchetis de peinture déposé sur l'objet qui sert de motif à la corrélation. Cette procédure est maintenant couramment utilisée et est appelée corrélation d'images numériques. La figure de speckle est dès lors ce mouchetis ou bien même la texture naturelle de la surface de l'objet. Cette technique permet la mesure de champs de déplacements 2D et peut être étendue en 3D grâce à la stéréocorrélation. Ceci génère de nombreuses applications en mécanique des solides mais aussi en mécanique des fluides sous le terme de vélocimétrie par imagerie de particules.
La principale différence entre l'interférométrie speckle et la photographie speckle est la gamme de sensibilité. En interférométrie, la gamme de déplacement mesurable est liée à la longueur d'onde de la lumière et varie dans le visible entre quelques nanomètres et quelques dizaines de micromètres entre deux états. En photographie speckle, la gamme de déplacement est liée au grandissement optique de la scène, du microscope électronique jusqu'au fisheye…
Des nouveaux développements incluent maintenant la possibilité d'associer ces sensibilités. En corrélant les champs de déplacement dans le plan pour corriger la décorrélation de cartes de phase, les mesures interférométriques peuvent être étendues aux cas de grands déplacements de corps rigide. De plus, on peut maintenant contrôler activement le front d'onde, la longueur d'onde et la cohérence des sources lumineuses, ce qui permet l'émergence de techniques nouvelles de mesure des déplacements ou des déformations. L'utilisation de ces techniques au laboratoire et dans l'industrie pour obtenir de meilleures mesures, tant quantitatives que qualitatives, s'étend de plus en plus. Certains effets speckle sont également présents dans des techniques telles que l'imagerie à ouverture de synthèse numérique, l'imagerie en rayons X et bien d'autres. Enfin les cartes de phase portent elles-mêmes des singularités de phase, qui, tout comme le speckle à l'époque, permettent encore de tirer des informations relatives à l'état de l'objet ou de son environnement.
Même si on est tenté d'appliquer ces techniques de speckle dans diverses configurations, en détournant des montages classiques et en les dédiant à certaines applications, il faut parfois les oublier au profit d'autres, mieux adaptées. En effet, lorsque les épaisseurs traversées par les ondes lumineuses sont non négligeables, voire fortement perturbées, il faut soit coupler ces

techniques avec de l'imagerie rapide, soit développer de nouvelles techniques moins sensibles.
Plus particulièrement pour des applications en sciences des risques, l'ombroscopie directe et la strioscopie sont particulièrement bien appropriées à la visualisation de la propagation ou de la déformation de fluides, en interaction entre eux ou non. Une variante telle que la PILS a également été utilisée pour visualiser des mélanges de fluides.
Au gré de ce manuscrit, ces différentes techniques optiques - ESPI, SI, TVH, DHI, BOS, DIC, PIV, PLIF, PILS[1] … - seront décrites avec leurs avantages et inconvénients, et en présentant des applications dans différents domaines, de la mécanique du solide aux risques, en passant par le collage et les interactions de projectiles hyper véloce.
Cet ouvrage est structuré en techniques cohérentes et incohérentes, tout en précisant qu'actuellement elles sont toutes compatibles avec l'acquisition rapide d'images.
Le projet de recherche concerne principalement la caractérisation des risques industriels et plus particulièrement les phénomènes accidentels rapides. Afin de mieux appréhender les conséquences et la phénoménologie de ces événements, les perspectives de recherche y sont décrites, notamment en visualisation rapide couplée à différents capteurs ainsi que la possibilité de mettre en évidence certains phénomènes … invisibles sans transformation optique adéquate.

[1] *Acronyme*, nom masculin. Sens : Sigle que l'on n'épelle pas mais qu'on prononce comme un mot
Electronic Speckle Pattern Interferometry, Speckle Interferometry et TV Holography: Interférométrie speckle ou en lumière diffuse; Digital Holographic Interferometry: Interférométrie holographique Numérique ; Background Oriented Schlieren : strioscopie sur arrière-plan ; Digital Image Correlation : Corrélation Numérique d'Images ; Particle Image Velocimetry : Vélocimétrie par Imagerie de Particules ; Planar (ou Pulsed) Laser Induced Fluorescence : Fluorescence induite par nappe laser pulsée, Pure In Line Shadowscopy : Ombroscopie en Illumination et Observation Coaxiales.
OUFTI ! : Interjection signifiant la stupéfaction en wallon liègeois, soumis à variantes locales dans le sens…

Find out where the limits are,
And start from there.
A.Einstein

3 CONTEXTE GÉNÉRAL DES TRAVAUX DE RECHERCHE

RÉSUMÉ DE LA THÉMATIQUE

L'instrumentation laser et l'optique appliquée constituent les axes directeurs de ces travaux de recherche. Ils se focalisent principalement sur les applications de méthodes optiques (acquisition et traitement d'images) pour la détection et/ou la mesure de différents phénomènes physico-chimiques (carte de déplacements, de concentrations, d'indices..). Pour ceci, il faut développer et utiliser des systèmes d'éclairage laser, de lumière structurée, d'interférométries holographique et speckle ou de la vélocimétrie par imagerie de particules (acquisition rapide d'images). Certaines de ces techniques sont transférées dans le monde industriel et requièrent des calibrations mais aussi des interfaces conviviales pour un utilisateur non expert. Cette partie du développement est également assurée par nos soins.

THÉMATIQUES DE RECHERCHE

Le contexte général de ces travaux de recherches consiste à présenter les méthodes optiques existantes au laboratoire LGEI (équipe ISR) et développées par nos soins dans le cadre d'encadrements de doctorants et/ou de stagiaires depuis 1995 à l'EMA. Celles-ci s'articulent principalement autour des techniques suivantes :

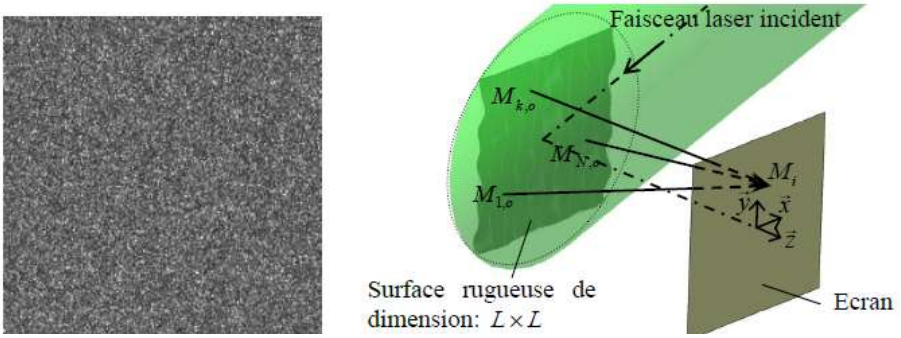
A. Speckle : Interférométrie, Holographie numérique,
B. Corrélation d'images,
C. Acquisition rapide d'images,
D. Méthodes de densité: Ombroscopie, Strioscopie.

Leurs applications principales sont notamment le contrôle non destructif et la métrologie de champs de déplacements 3D (solide ou fluide), à différentes échelles de mesure, tant spatiale que temporelle.
Les techniques optiques de mesures plein champ, et plus particulièrement en lumière diffuse (speckle) conviennent particulièrement à ce type d'application grâce à leur grande sensibilité et à leur excellente résolution spatiale. L'instrumentation d'essais mécaniques sur la base de techniques telles que la corrélation d'images et l'interférométrie en lumière diffuse (3D) peut conduire aux champs cinématiques. Ces champs sont à la base de l'identification du comportement des matériaux étudiés par un essai mécanique approprié. Une contribution porte notamment sur l'étude en compression plane et/ou en traction large de tôle d'emboutissage (projet Renault). Ce travail concerne notamment la qualification de ces méthodes d'un point de vue métrologique et l'évaluation de la dégradation de l'information liée aux sources d'erreur: on peut noter le bruit de speckle inhérent à la source cohérente, les distorsions intrinsèques aux caméras et objectifs associés, la transformation des mesures d'un repère optique (vecteurs sensibilité) vers le repère lié à l'objet.
L'extension des techniques interférométriques utilisées et le passage à l'holographie numérique peuvent être envisagés mais nécessiteront le recrutement d'un doctorant.

Le succès international de la conférence Speckle06, que nous avons organisée en septembre 2006, prouve l'intérêt porté à ces techniques dans le monde scientifique et a montré leur émergence dans le monde industriel. En effet, l'instrumentation optique est de plus en plus utilisée car sa principale caractéristique est d'être sans contact avec la scène étudiée.
D'autre part, l'acquisition d'images à très haute fréquence permet également l'étude en temps résolu de phénomènes ultra brefs … ou non. Cette dernière est en fort développement et autorise actuellement de capturer des scènes de taille respectable (numérisée sur 1024x1024 pixels) à des vitesses de l'ordre de 10000 images/s. Le partenariat réalisé avec le CEA Gramat permet d'ailleurs d'utiliser ces caméras de dernière génération dans des applications spectaculaires et originales. Parfois, la simple visualisation d'un phénomène ultrarapide permet de mieux appréhender son déroulement et/ou sa modélisation. De plus, l'acquisition rapide d'images peut utilement remplacer le capteur photographique pour des expériences classiques d'optique (strioscopie, ombroscopie, etc.).
Le couplage de l'interférométrie speckle avec l'acquisition rapide d'images rend possible la mesure de phénomènes jusqu'alors interdits à cette technique très sensible (par exemple le mélange rapide de milieux liquides d'indices de réfraction proches). Sur ce thème, une association vient de se terminer avec l'EPF de Lausanne (Laboratoire Nanophotonique et Métrologie - NAM), afin d'analyser de manière originale les interférogrammes ainsi obtenus.
Depuis deux ans, un recentrage de l'application de ces différentes techniques dans le domaine des risques industriels et naturels a été effectué. Ceci permet de transférer des résultats et notre expérience à des domaines qui relèvent plus de la dynamique des fluides que de la mécanique du solide. Le couplage de l'imagerie rapide et des techniques de corrélation d'images permet ainsi de quantifier des déplacements rapides de fluides par des applications en imagerie de particules (comme la Particule Image Velocimetry - PIV). Par ailleurs, des travaux de R&D sont également en cours de finalisation pour détecter des variations d'indice de réfraction entre milieux liquides, notamment en cas de pollution marine par des produits chimiques solubles et incolores.
Enfin, dans le cadre de recherches partenariales les moyens d'investigations optiques ont récemment pu être complétés par deux systèmes dédiés à la vélocimétrie par imagerie de particules (laser double pulse et caméra double trame, PIV Dantec Dynamics). Ceci s'ajoute à l'analyse de dynamique de particules par phase Doppler (vitesse 1D et taille, PDA Dantec Dynamics). Dans ces systèmes, on retrouve le souci d'obtenir des mesures globales et des mesures ponctuelles pour pouvoir vérifier les données obtenues par une méthode connexe et aussi de pouvoir réaliser des échantillonnages temporels et spatiaux complémentaires. De plus, la PIV a également été rendue compatible avec les systèmes d'acquisition rapide d'images. L'imagerie rapide existante, couplée avec les sources lumineuses disponibles est directement exploitable par les logiciels dédiés.
La dernière contribution menée de front avec les activités de R&D concerne la sécurité laser (RSL 3) et le respect des normes de sécurité au sein du laboratoire ainsi que pour les applications en extérieur (PIV, scanner laser 3D, …), en lien étroit avec le CHSCT de l'EMA.
D'un point de vue du développement scientifique, une piste émergente consiste à étudier la strioscopie couplée à la PIV.

A. SPECKLE

Fort d'une expérience en imagerie holographique et en interférométrie holographique, les techniques de speckle se sont naturellement imposées au laboratoire. Elles utilisent le speckle [1] inhérent à tout objet optiquement rugueux éclairé par un laser, ou, plus généralement par une source cohérente. Un objet optiquement rugueux peut être soit un objet dont la rugosité de surface est de l'ordre de la longueur d'onde λ du faisceau d'éclairement, soit un objet spéculaire éclairé par une source diffusante (ex: un faisceau laser sur verre dépoli). Le speckle peut être soit objectif (pas de système d'imagerie pour former le speckle sur le détecteur), soit subjectif (la taille du speckle dépend alors des paramètres d'ouverture et de distance focale du système lentille-diaphragme placé en amont du détecteur) **(**Figure 1 et Figure 2).

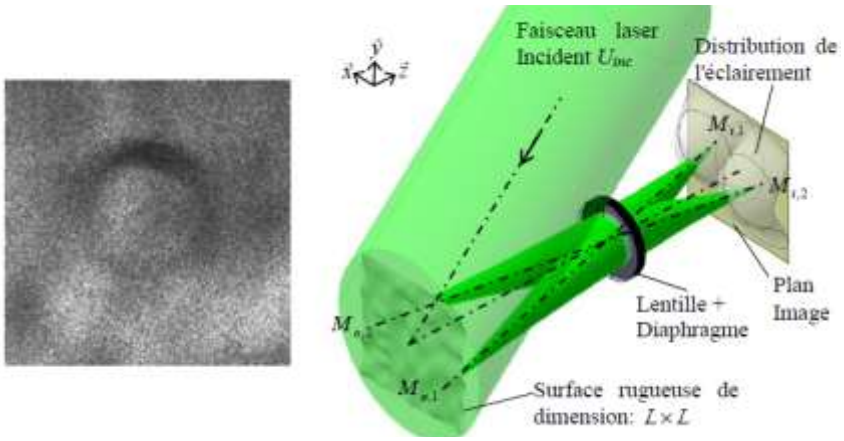


a) image de speckle objectif. *b) configuration d'observation du speckle objectif.*

Figure 1: Formation du speckle objectif.

La taille du speckle objectif est donnée par $d_S = \dfrac{\lambda \cdot z}{L}$ (eq 1)

et la taille moyenne des grains dépend uniquement de la surface L, sous incidence cohérente à la longueur d'onde λ, et de z la distance d'observation.



a) image de speckle subjectif. *b) configuration d'observation du speckle subjectif.*

Figure 2: Formation du speckle subjectif.

La taille du speckle subjectif est donnée par $d_S \approx d_{Airy} \approx 2{,}44 \cdot \dfrac{\lambda \cdot d_i}{D}$, (eq 2)

à la longueur d'onde λ et pour une ouverture circulaire du système imageur de diamètre D.

Cette taille correspond au diamètre d_{Airy} du premier disque d'Airy en négligeant les minima secondaires de la tache de diffraction dans le plan image à distance d_i.

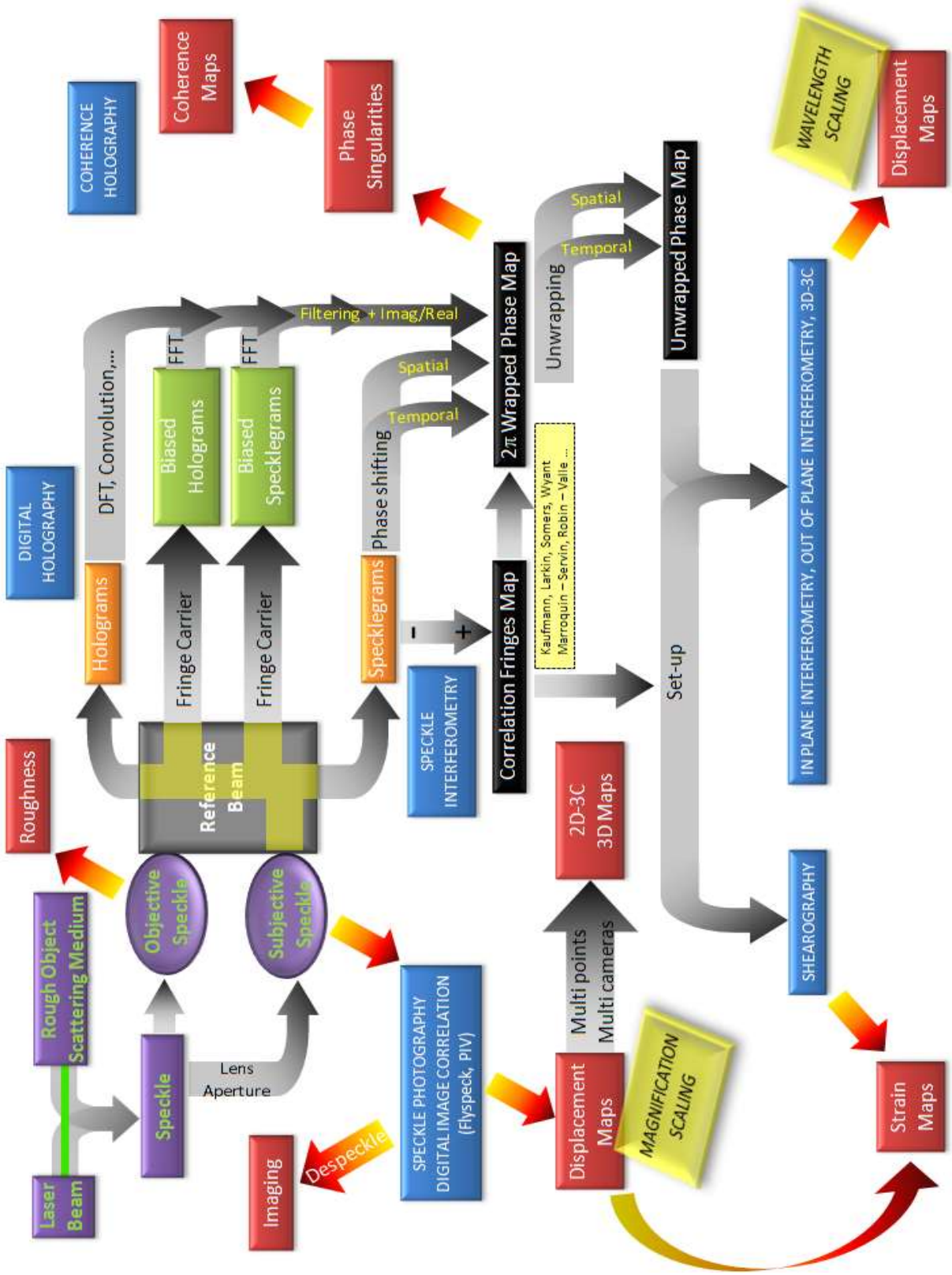


Figure 3: Schéma récapitulatif de la métrologie à partir du speckle.

Les techniques de speckle sont résumées à la figure 3 [2]. Nous avons également contribué à de nombreux ouvrages scientifiques décrivant la théorie et la pratique des techniques

interférométriques, qui seront utilisées dans cet ouvrage [3][4][5]. Les différentes techniques abordées sont interférométriques (speckle ou holographique), ou photographiques (corrélation, imagerie).
Notons récemment la fructueuse collaboration avec le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (Prof P. Picart) afin de mieux évaluer les performances de l'interférométrie speckle et de l'holographie numérique (cf. infra).

1. INTERFÉROMÉTRIE SPECKLE

Cette thématique est développée depuis 1995 au sein de notre laboratoire de l'Ecole des Mines d'Alès, suite à ma thèse d'état obtenue à l'Université de Liège (Belgique) en 1995. Comme technique interférométrique, elle permet d'obtenir des champs de déplacements tridimensionnels avec une résolution intrinsèque de l'ordre de 50nm, pour une gamme de mesure limitée à 20µm (en fonction de la taille du capteur et de la densité de franges souhaitée) entre deux états successifs.
Il faut pointer ici l'avantage des techniques interférométriques dont la résolution de mesure est indépendante de la surface investiguée. En effet, la résolution des mesures est essentiellement liée à la longueur d'onde de la lumière. Le but final des méthodes interférométriques décrites en figure 3 est de calculer la différence de phase (entre l'état final et l'état initial de l'objet étudié), qui contient l'information de position et de forme de l'objet.

- **Bases théoriques**

Sur le plan du capteur d'image, la forme mathématique de l'éclairement résultant de la superposition d'un faisceau objet et d'un faisceau de référence est donné par:

$$I(x,y) = I_O(x,y) + I_R(x,y) + 2\cdot\sqrt{I_O(x,y)\cdot I_R(x,y)}\cdot\cos(\phi_O(x,y) - \phi_R(x,y)) \qquad \text{(eq 3)}$$

où $I(x,y)$ est l'éclairement du specklegramme au point de coordonnées (x,y) dans le plan image.

$I_O(x,y)$ est l'éclairement du faisceau objet seul, $I_R(x,y)$ celui du faisceau de référence seul au même point. $\phi_O(x,y)$ et $\phi_R(x,y)$ correspondent aux phases de l'onde objet et de l'onde de référence au point de coordonnées (x,y), respectivement. Deux specklegrammes de la surface d'un objet sont enregistrés. L'expression de l'éclairement $I_i(x,y)$ du premier specklegramme (état initial) peut s'écrire :

$$I_i(x,y) = I_B(x,y) + I_M(x,y)\cdot\cos(\phi_{O,i}(x,y) - \phi_{R,i}(x,y)) \qquad \text{(eq 4)}$$

Et l'expression de l'éclairement $I_f(x,y)$ du second specklegramme (état final) est:

$$I_f(x,y) = I_B(x,y) + I_M(x,y)\cdot\cos(\phi_{O,f}(x,y) - \phi_{R,f}(x,y)) \qquad \text{(eq 5)}$$

avec:

$$\begin{aligned} I_B(x,y) &= I_O(x,y) + I_R(x,y) \\ I_M(x,y) &= 2\cdot\sqrt{I_O(x,y)\cdot I_R(x,y)} \end{aligned} \qquad \text{(eq 6)}$$

$I_B(x,y)$ est l'éclairement de fond continu (background) et $I_M(x,y)$ est l'éclairement de modulation. En appelant α le décalage de phase , on obtient une expression du type :

$$I = I_B + I_M \cos(\phi + ... + \alpha) \qquad \text{(eq 7)}$$

Il existe plusieurs méthodes pour observer des franges en interférométrie speckle. La plus couramment utilisée est la soustraction des specklegrammes de chaque état. La soustraction permet d'obtenir les franges les plus contrastées. Il existe de nombreuses méthodes pour calculer la phase $\phi(x,y)$ d'un specklegramme. Les techniques les plus employées sont la transformée de Fourier rapide (FFT: Fast Fourier Transform) à deux dimensions (2D-FFT) et le décalage de phase (PS: Phase Shifting). Le choix de la méthode dépend essentiellement de la distribution de phase et de la vitesse à laquelle la mesure doit être effectuée (en temps résolu ou avec de fortes variations). En interférométrie speckle, le calcul de phase par transformée de Fourier à 2 dimensions ne peut être utilisé que lorsque la distribution de phase est modulée par une porteuse (cf infra) alors que le décalage de phase est employé pour calculer toutes sortes de distributions de phase.

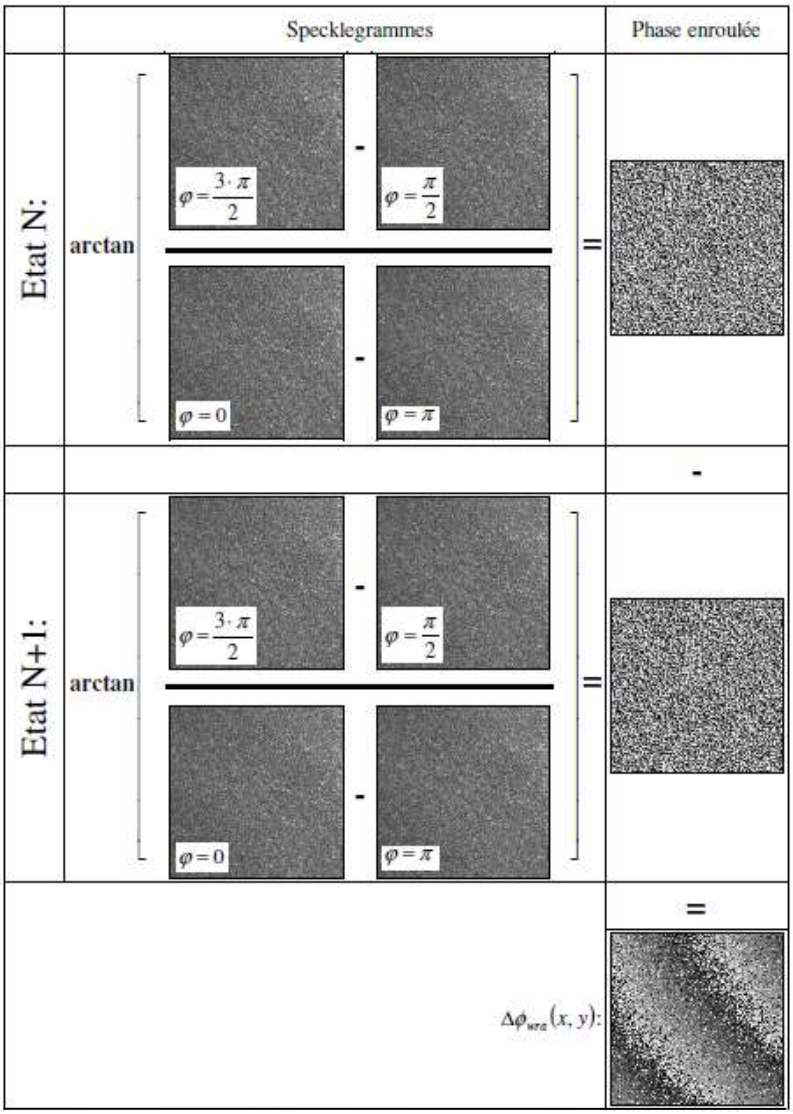
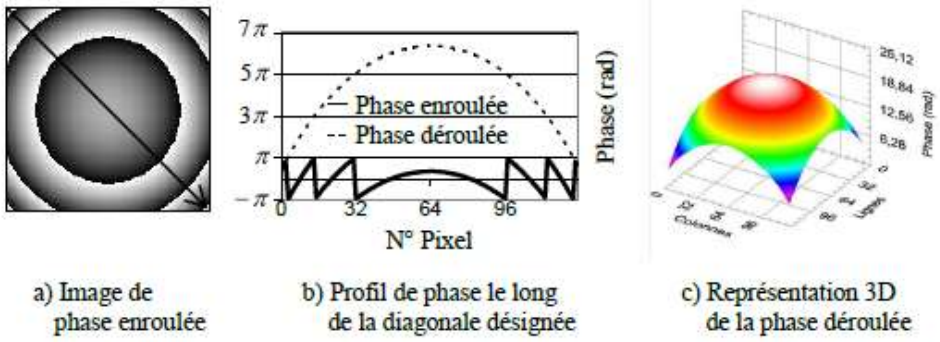


Figure 4: Principe du calcul de phase par 4 décalages de phase

Le décalage de phase à quatre incréments a été plus particulièrement retenu (Figure 4). Il présente un excellent compromis entre l'incertitude du calcul de la phase (~λ/10), la facilité de mise en place du décalage (transducteur piézoélectrique, lame à cristaux liquides …) et la rapidité d'exécution (différence de phase en temps vidéo réel). Il permet ainsi d'obtenir un système de 4 équations qui permet de lever l'indétermination de départ car une seule équation, (eq 7), contient les trois inconnues : $I_B(x,y)$, $I_M(x,y)$ et $\phi(x,y)$.

Ce type de décalage peut être appelé temporel quand l'incrément de phase est réalisé dans le temps, ce qui requiert soit des perturbations lentes, soit des décalages de phase très rapides pour des applications notamment en vibration [6]. Dans le cas de perturbations très rapides, il faut plutôt recourir au décalage de phase spatial, qui introduit des franges porteuses dans les specklegrammes. Ces franges sont obtenues en inclinant légèrement le faisceau de référence ou le faisceau objet par rapport au capteur. Les franges générées doivent être résolues par le capteur sans toutefois noyer le signal d'intérêt. On calcule la phase via une ou plusieurs transformée(s) de Fourier centrée(s) sur la fréquence de la porteuse. La phase est déduite du rapport entre la partie imaginaire et la partie réelle dans l'espace de Fourier. Une comparaison de la performance de cette technique a d'ailleurs été réalisée entre l'interférométrie speckle et l'holographie numérique (cf. infra).

Dans la majeure partie des cas, la phase est enroulée entre 0 et 2π à cause de l'opérateur arctangente. Pour obtenir un profil de phase continu, il faut effectuer le déroulage de phase. Cette opération est particulièrement complexe en présence de bruit important ou de fortes discontinuités.

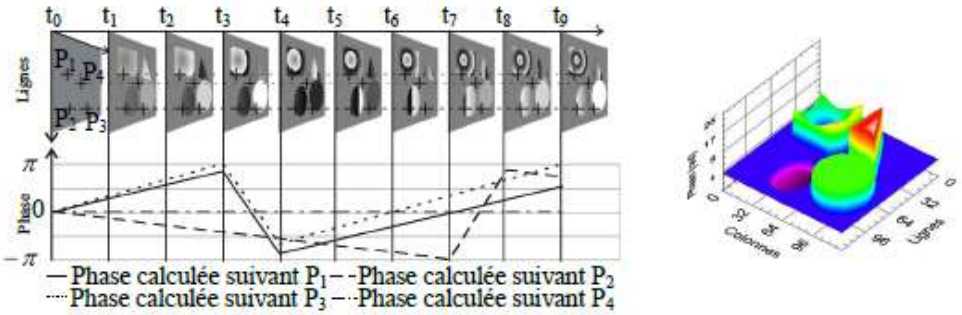


a) Image de phase enroulée

b) Profil de phase le long de la diagonale désignée

c) Représentation 3D de la phase déroulée

a) déroulage de phase spatial



a) Evolution de la phase calculée au cours du temps.

b) Différence de phase (de t_0 à t_9) déroulée.

b) déroulage de phase temporel

Figure 5 : Déroulages de phase : spatial et temporel

De nouveau, et comme indiqué à la figure 3, il est possible de dérouler, ou déplier, la phase d'un point de vue spatial ou d'un point de vue temporel (Figure 5). Le principal avantage du déroulage temporel est de suivre la phase d'un pixel au cours du temps. Ainsi pour un échantillonnage temporel rapide, il s'affranchit des discontinuités spatiales qui peuvent survenir en déroulage spatial. En s'associant à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne afin de dérouler des interférogrammes de speckle dont la phase varie fortement tant spatialement que temporellement [7], la variation de phase pour chaque état enregistré ou visualisé a pu être obtenue. Pour le déroulage spatial, l'algorithme développé au laboratoire se montre particulièrement robuste, performant et assez rapide pour les différentes figures de franges rencontrées [8].
Le déplacement est ensuite déduit de la variation de phase en tenant compte de la géométrie de l'interféromètre. La sensibilité au déplacement peut être sélectionnée par une géométrie appropriée de l'interféromètre. Au sein de notre laboratoire, un interféromètre sensible à des déplacements tridimensionnels a été développé (Figure 6) principalement lors de l'encadrement de la thèse de B. Gautier [9].

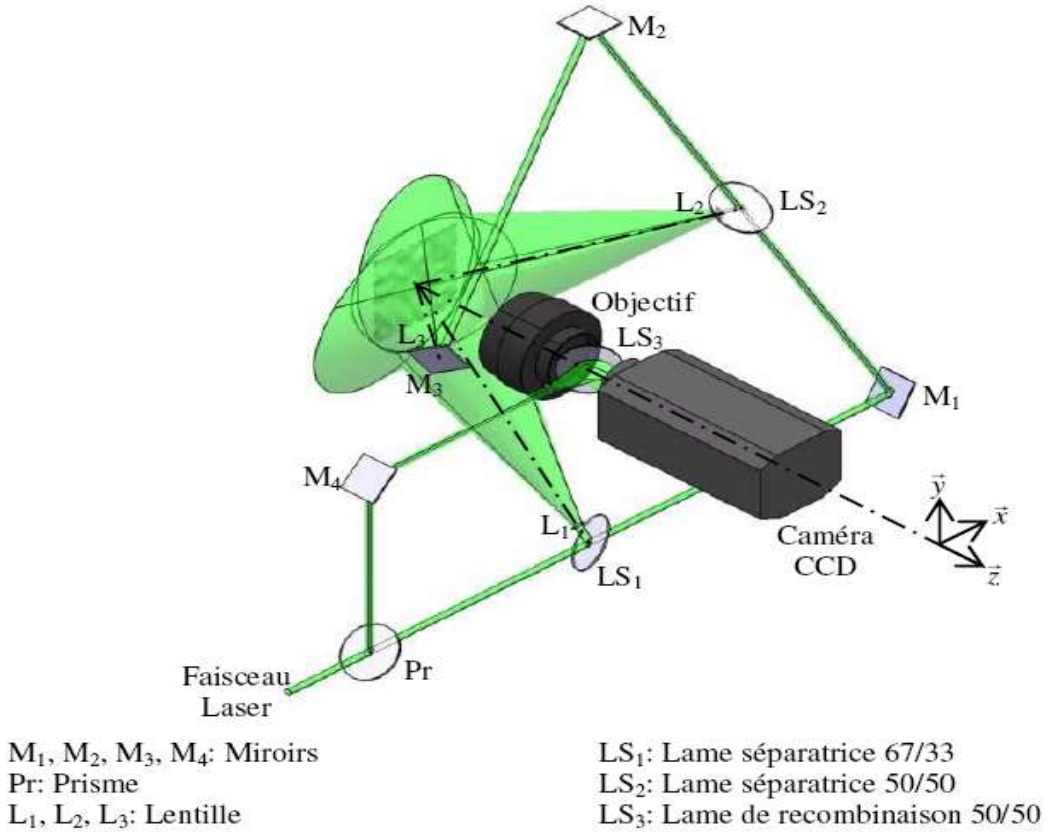


Figure 6: Interféromètre speckle sensible aux déplacements tridimensionnels

Cet interféromètre sensible aux 3 composantes de déplacement résulte de la combinaison judicieuse de trois interféromètres à sensibilité mixte. En effet, la sensibilité d'un interféromètre speckle est gouvernée par la géométrie des bras d'éclairement et d'observation. On distingue principalement l'interféromètre sensible aux déplacements hors du plan (OPI) de l'objet et l'interféromètre sensible aux déplacements dans le plan de l'objet (IPI). Le vecteur-sensibilité V_s est déterminé par la bissectrice des rayons d'illumination et d'observation et

c'est sur ce vecteur que se projette le déplacement à mesurer. Le principe de sélection de la sensibilité est illustré à la figure 7.
La sensibilité IPI à un déplacement *d* est donnée par

$$d = \frac{\lambda}{4\pi \sin\theta} \varphi_{x,y}, \qquad \text{(eq 8)}$$

tandis que la sensibilité OPI est donnée par

$$d = \frac{\lambda}{2\pi(1+\cos\theta)} \varphi_{z}, \qquad \text{(eq 9)}$$

où (x, y) est le plan objet et z la direction perpendiculaire.
On constate que l'interféromètre OPI peut être sensible également dans le plan si les directions de l'illumination et de l'observation ne sont pas confondues.

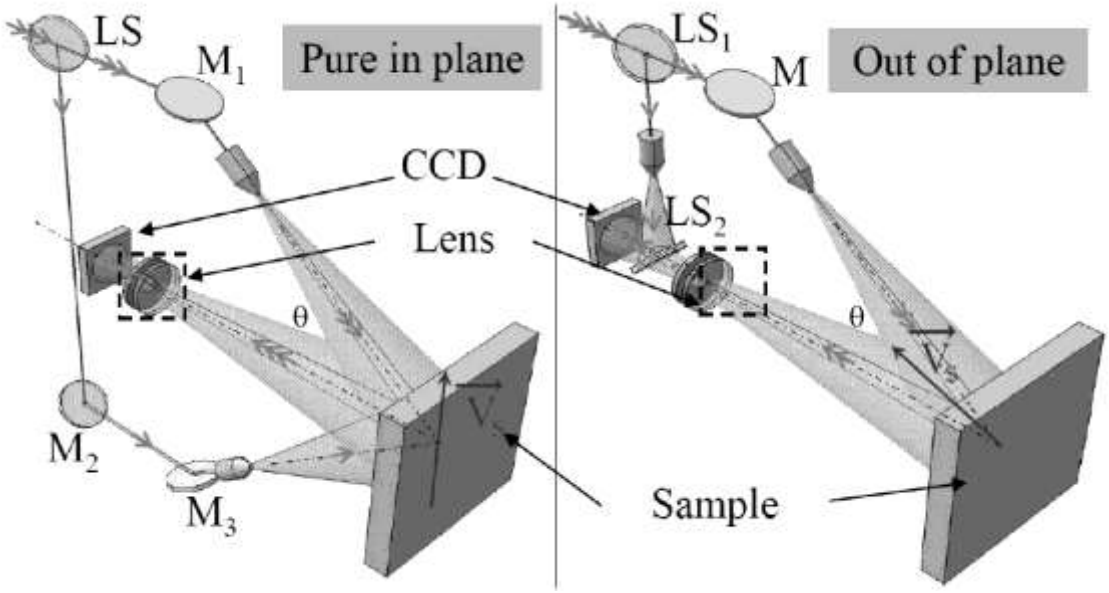


Figure 7 : Interféromètre speckle : Sensibilité aux déplacements dans le plan IPI et mixte OPI

Dans le cas de l'interféromètre repris à la figure 6, il est donc nécessaire d'appliquer la matrice de passage de la phase au déplacement en tenant compte de chaque vecteur sensibilité.

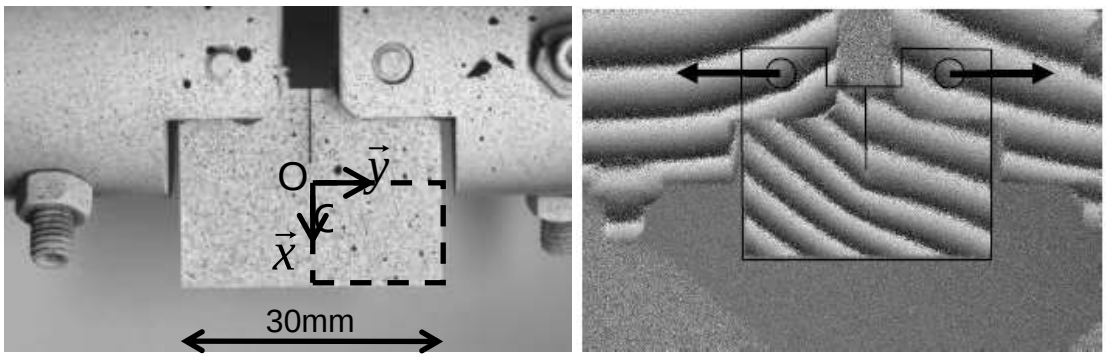
$$\begin{bmatrix} d_{/\vec{x}} \\ d_{/\vec{y}} \\ d_{/\vec{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S1/\vec{x}} & V_{S1/\vec{y}} & V_{S1/\vec{z}} \\ V_{S2/\vec{x}} & V_{S2/\vec{y}} & V_{S2/\vec{z}} \\ V_{S3/\vec{x}} & V_{S3/\vec{y}} & V_{S3/\vec{z}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \phi_{S1} \\ \phi_{S2} \\ \phi_{S3} \end{bmatrix} \qquad \text{(eq 10)}$$

Pour des objets non assimilables à un plan, il faut corriger les mesures de déplacement par la forme de l'objet. Et pour des faisceaux optiques fortement divergents, il faut corriger les déplacements par la forme des faisceaux d'éclairage et d'observation [10]. En effet, dans ces cas-là, il faut tenir compte du changement d'orientation du vecteur-sensibilité en fonction des angles et de l'effet projectif de la mesure. Ceci est d'importance particulière lorsqu'on veut déterminer des contraintes mécaniques.

- **<u>Applications</u>**

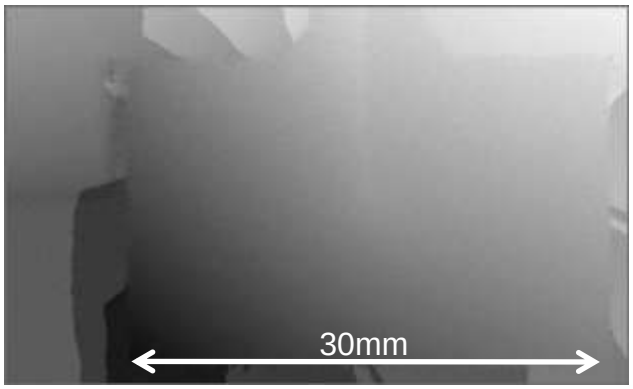
Les applications variées ont donné lieu à des publications et les développements réalisés ont été communiqués lors de manifestations scientifiques internationales avec comité de lecture [11][12][13].

La figure 8 présente les résultats obtenus pour une éprouvette en « tension compacte » préfissurée. Cet essai a notamment requis d'implanter le dispositif de traction sur la table optique afin de l'isoler du centre d'usinage voisin et ainsi de s'affranchir des vibrations parasites générées par ce dernier. Les franges d'interférences montrent un léger mouvement hors plan du solide rigide (ensemble de traction), qui génère un effet de rotation hors plan. Cet effet est mesuré et compensé

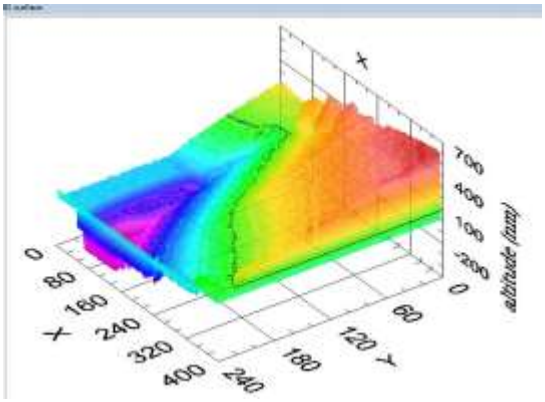


a) éprouvette entaillée en traction, acier bainitique16MND5, épaisseur 12.5mm, fissure de 13.8mm, E=210GPa, ν=0,3

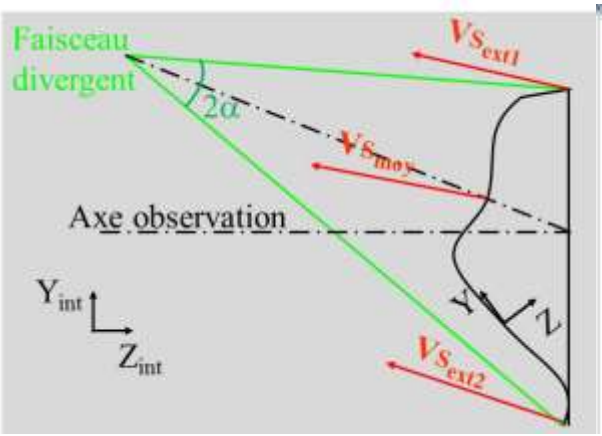
b) différence de phase enroulée après sollicitation sensibilité hors plan



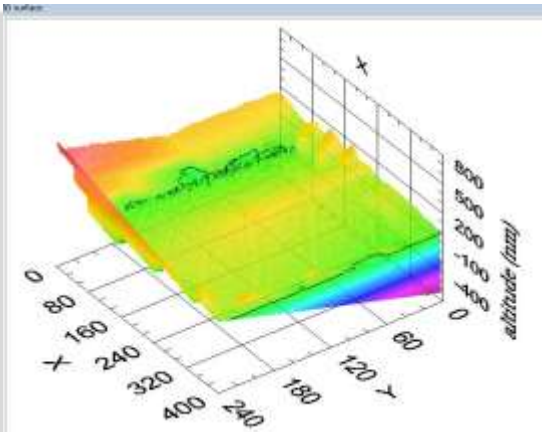
c) différence de phase déroulée en z



d) cartographie de déplacements (échelles X, Y en pixels)



e) correction des formes de faisceau

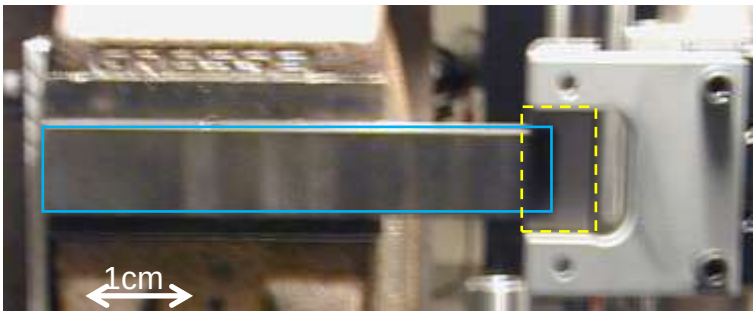


f) cartographie de déplacements : Plan moyen soustrait

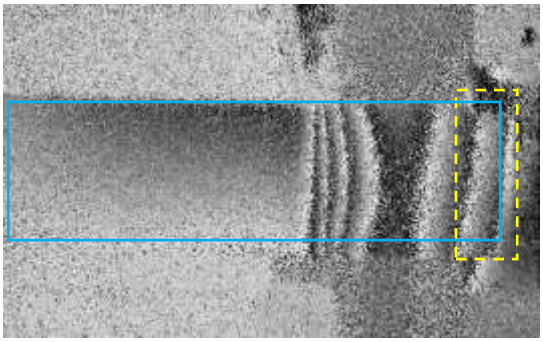
Figure 8 : Interférométrie speckle appliquée à une éprouvette entaillée

Les résultats obtenus suite à un test d'adhésion « Boeing wedge test » sont présentés à la figure 9. Ce test consiste à enfoncer un coin entre un collage de composite carbone et une lame d'aluminium intimement collés. La propagation de la fissure au cours du temps a été réalisée sur une période de plusieurs heures. Ces expériences ont notamment été menées en

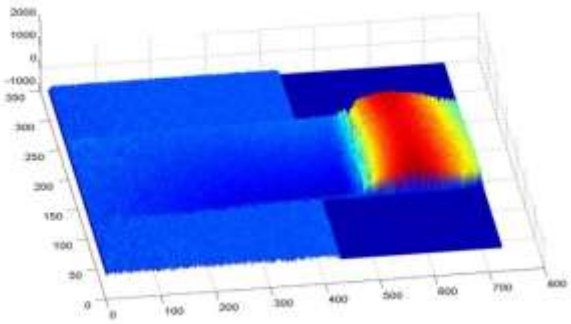
contrôle distant total, et pendant les week-ends afin d'obtenir une sensibilité maximale, et la suppression de toute composante extérieure (bruit du bâtiment, mouvements parasites, …). Les résultats très concluants ont été comparés aux simulations numériques et publiés dans le Journal of Adhesion [13].



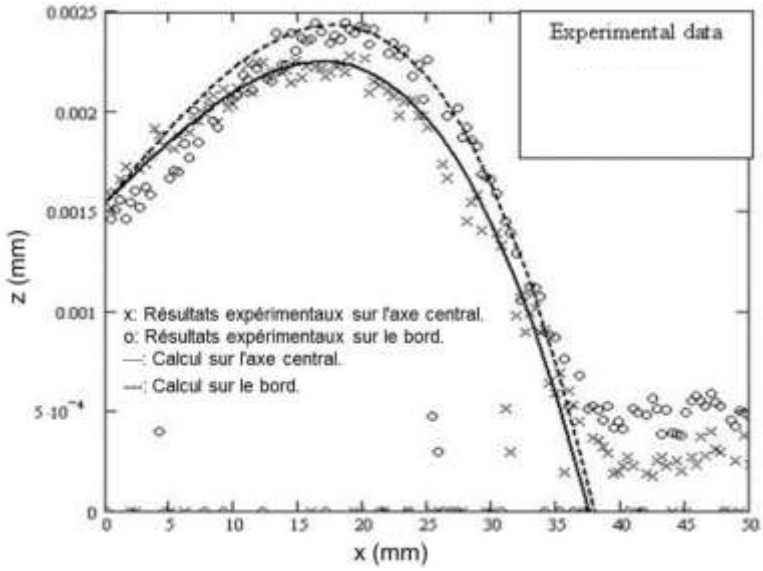
a) Boeing wedge test : Insertion d'un coin (- - - -) dans le collage sandwich carbone aluminium (_____)



b) franges d'interférométrie speckle après 24h



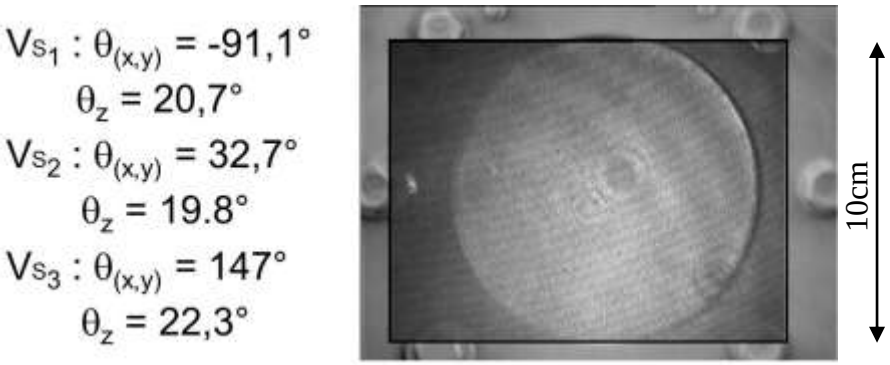
c) cartographie en Z (nm), x et y en pixels



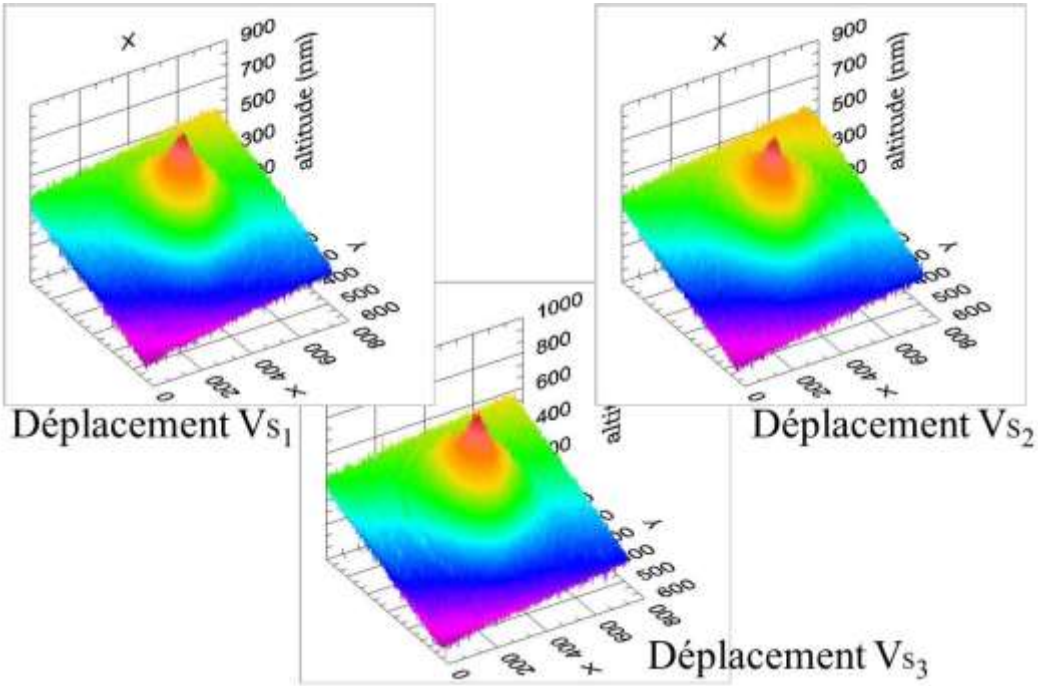
d) comparatif calcul et expérimental (SI) pour essai de clivage

Figure 9 : Interférométrie speckle appliquée à l'étude de l'adhésion (sollicitation en wedge test)

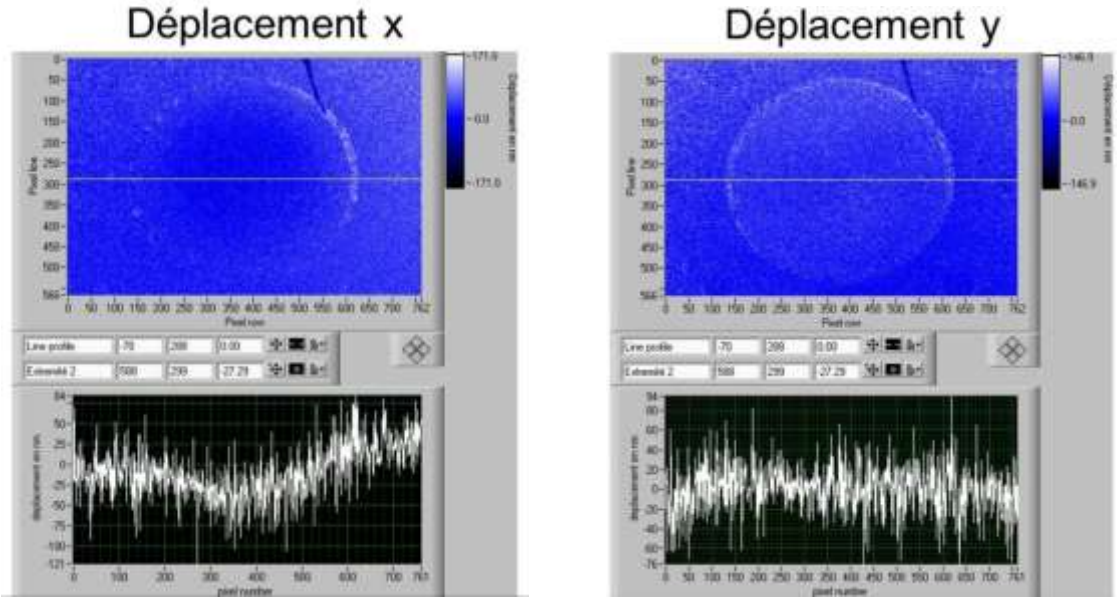
Une application permettant de qualifier l'interféromètre 3D-3C a également été réalisée (Figure 10). L'essai consiste à déformer de manière connue une membrane métallique maintenue sur son périmètre. Les déplacements suivant les 3 vecteurs- sensibilité sont obtenus puis projetés sur un trièdre (x, y, z) lié à l'objet. Les plans moyens de rotation sont également compensés.



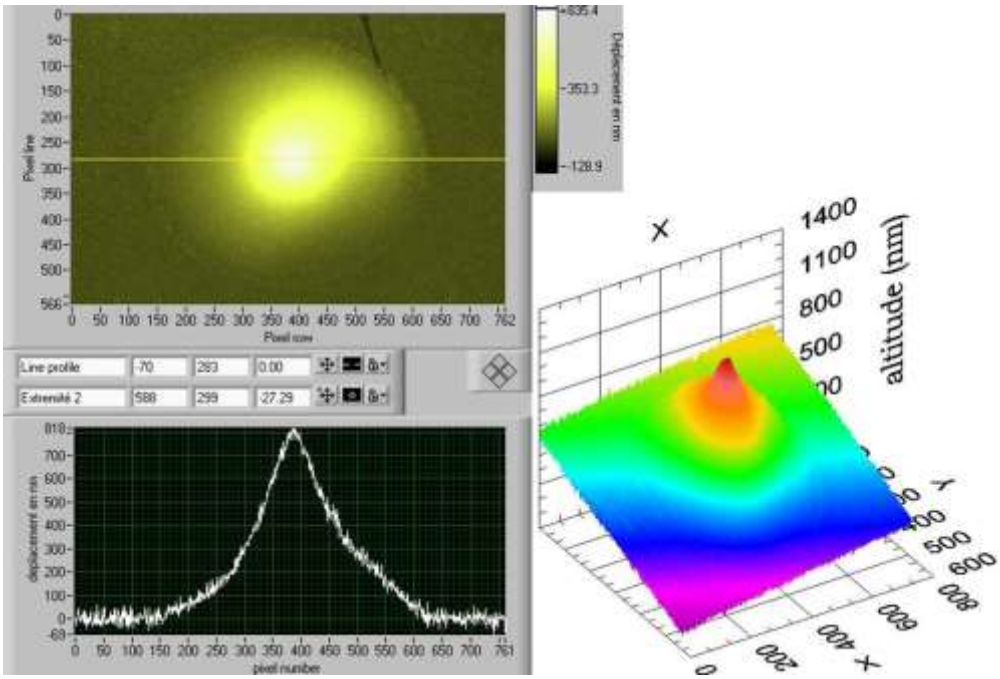
a) géométrie des vecteurs-sensibilité et image composite de la membrane métallique



b) cartes de déplacement selon les vecteurs-sensibilité Vs_i



c) cartes de déplacements selon les composantes x et y



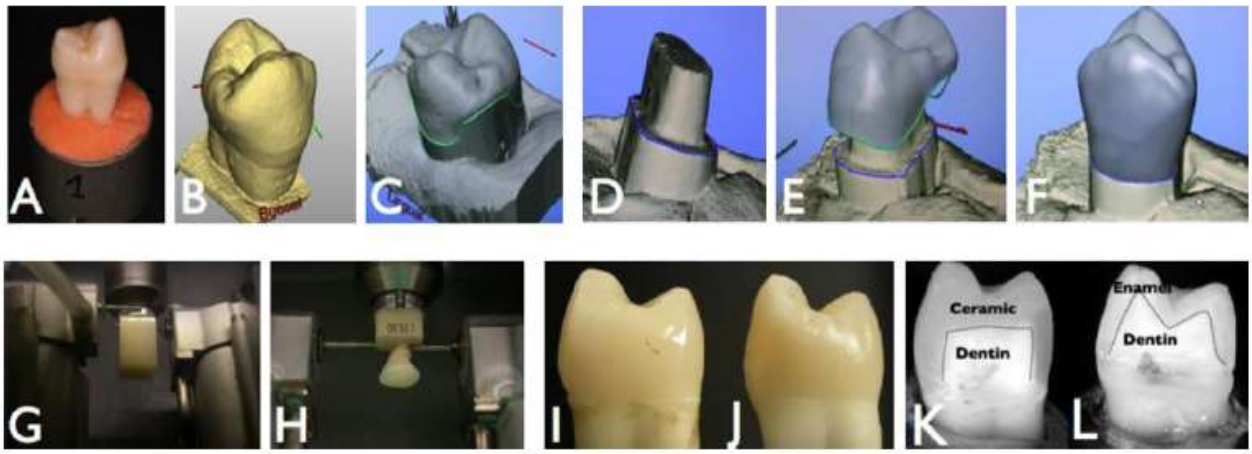
d) carte de déplacements selon la composante z

Figure 10 : Indentation d'une membrane métallique (diam. 10cm, épaisseur 2mm)

La sollicitation est un poinçonnement par l'arrière afin de ne générer qu'un déplacement hors plan de la membrane. Un palpeur par contact mesure l'enfoncement de la membrane par l'arrière, qui vaut 1µm. Les cartes finales de déplacement en *x* et en *y* montrent bien la limite de résolution de la mesure, soit environ 50nm. La carte finale de déplacement selon la composante *z* présente la qualité des traitements et du résultat obtenu. Le déplacement mesuré par interférométrie est d'environ 0.82µm, ce qui est en bonne adéquation vu la position du palpeur par contact.

Des variantes de montage ont depuis été réalisées et une application en métrologie dentaire a permis de développer une forte collaboration avec la Faculté d'Odontologie de l'Université de Montpellier I pour le développement de diagnostics optiques en sciences dentaires concernant les couronnes en céramique obtenues par CFAO (Figure 11). Les résultats générés par cette collaboration ont permis la rédaction de nombreuses communications et publications [14][15][16][17] et également de soulever l'intérêt pour ce genre d'application auprès d'un industriel réalisant des systèmes de fraises d'usinage dentaire. Cette collaboration a également permis d'établir des liens académiques avec l'UM1, et d'évaluer des candidats au Master TIC et Santé, ainsi que de participer à des jurys de doctorat en Odontologie.

La sensibilité interférométrique est tout à fait requise pour l'étude du joint amélo-dentinaire (entre l'émail et la dent) qui est un des premiers remparts aux contraintes mécaniques que supportent quotidiennement nos dents. Le but de l'étude, toujours en cours, est de comparer l'effet de la restauration de couronnes dentaires de clones en céramique par rapport aux dents naturelles et de montrer qu'un biomimétisme est possible et préférable lors de la chaine de reconstruction. La figure 13 présente les derniers résultats obtenus lors de récents travaux en compression sur une demi-dent, avec un interféromètre IPI dont la direction de sensibilité est perpendiculaire à la sollicitation en compression (charge de 5N à 120N, figure 12).



A couronne dentaire naturelle, B empreinte optique, C formage, D empreinte optique de la seconde dent réceptrice du clone, E adaptation du formage sur la dent préparée, F CAO terminé- FAO prête, G bloc de céramique dans unité d'usinage, H clone prothétique usiné, I clone prothétique collé sur dent préparée, J dent naturelle, coupes du clone K et de la dent L.

Figure 11 : Principe de clonage d'une dent

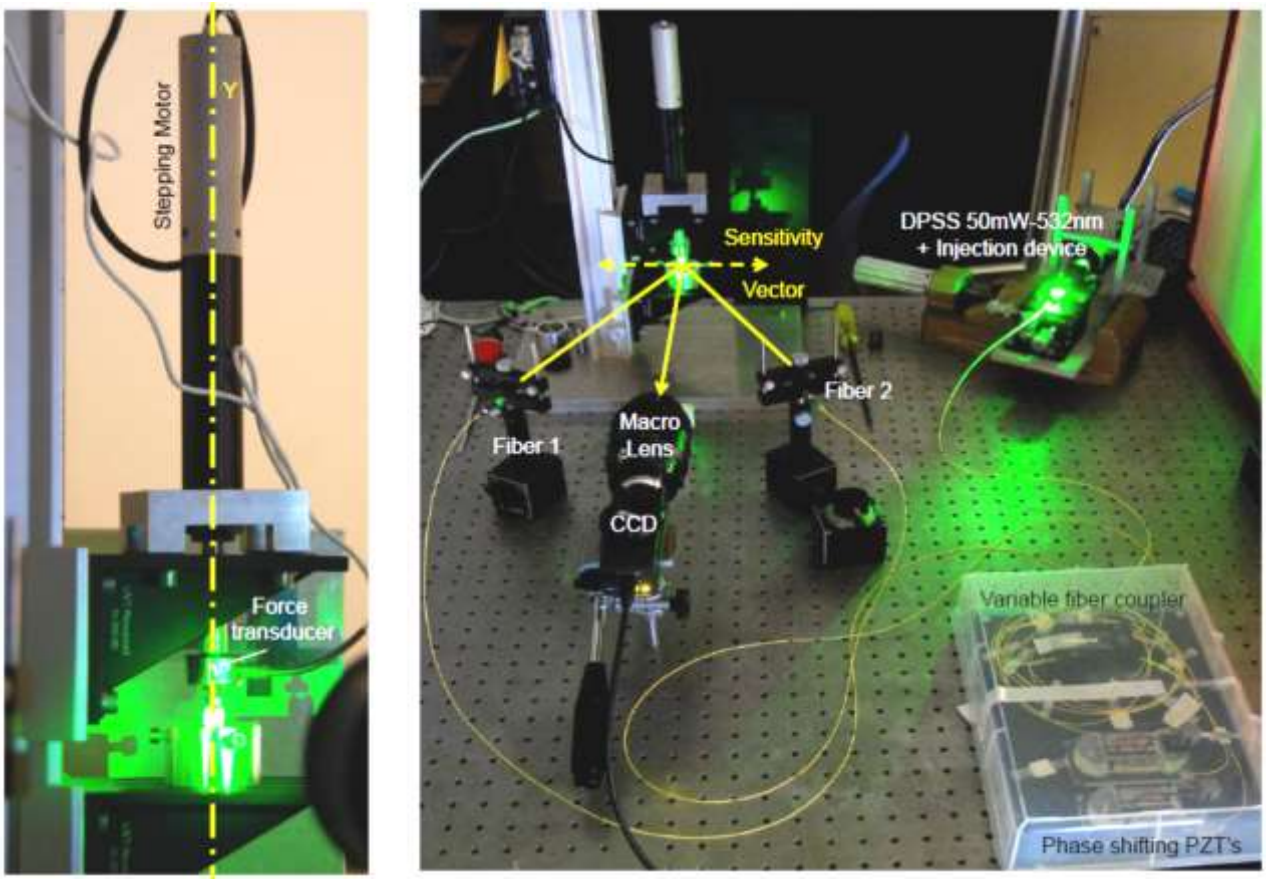
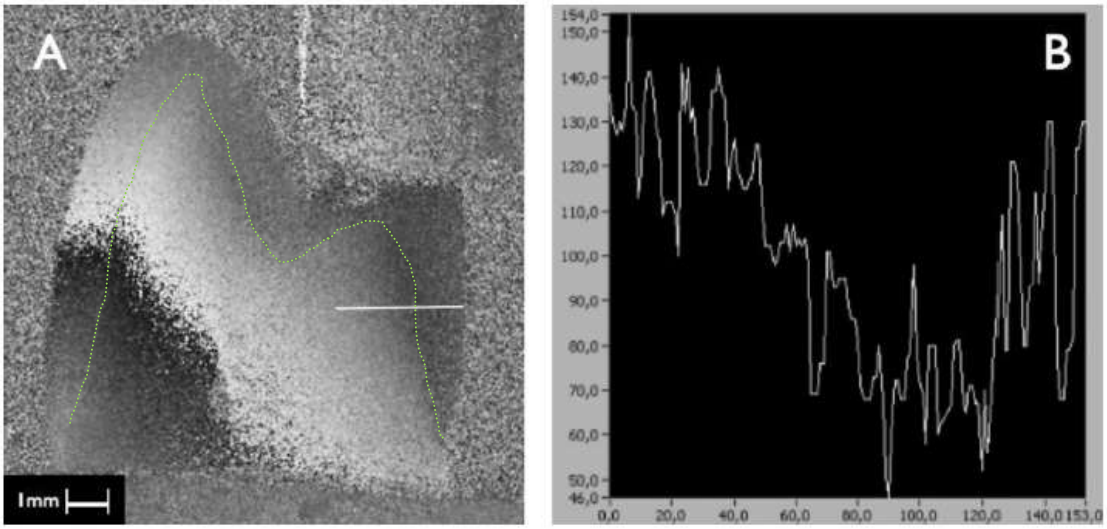
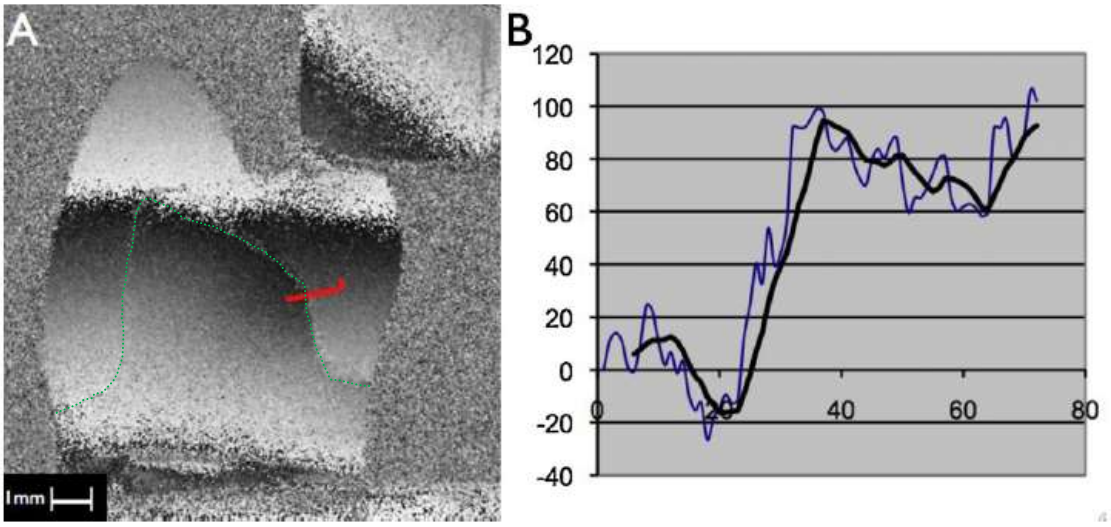


Figure 12 : Essai en compression d'une dent par interférométrie speckle

On remarque le rôle de la jonction amélo-dentinaire (JAD, Figure 13a) et surtout le rôle d'accommodation de la jonction céramo-dentaire (JCD, Figure 13b) [17]. Pour améliorer la qualité des échantillons, ils sont recouverts de poudre de ressuage qui permet une bonne diffusion de la lumière. Les jonctions sont donc complètement invisibles à l'œil nu et la sollicitation mécanique les révèle au cours de l'essai par l'apparition de cisaillement dans la (les) frange(s) d'isodéplacement. Les jonctions sont légèrement surlignées en pointillé vert sur les figures suivantes.



a) comportement de la dent naturelle à une charge de 38.65N, ΔF=1.74N. La courbe de déplacement est obtenue suivant le trait clair traversant la JAD. Le saut correspond à environ 43nm.



b) comportement de la dent prothétique à une charge de 72.85N, ΔF=10N. La courbe de déplacement est obtenue suivant le trait rouge traversant la JCD. La courbe noire est la moyenne selon 6 traits parallèles espacés d'un pixel. Le saut correspond à environ 70nm.

Figure 13 : Comportement en compression de dents naturelle et prothétique

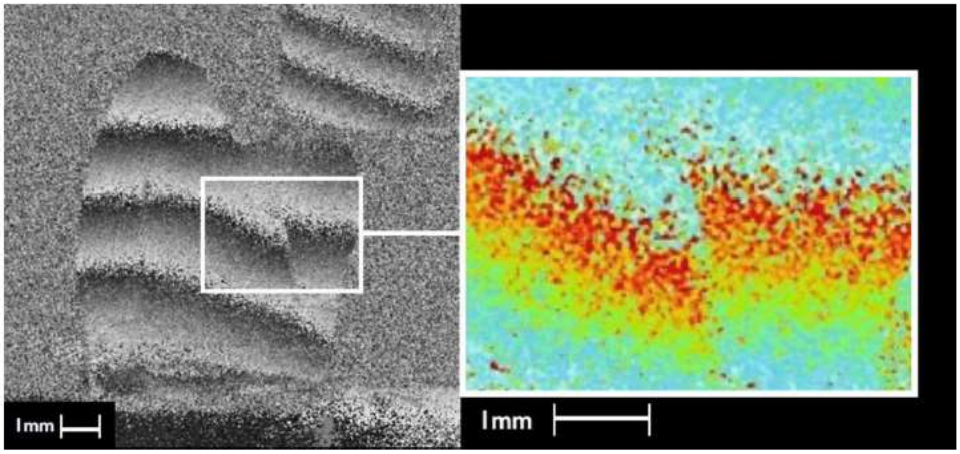


Figure 14 : Dent prothétique, charge statique de 52.78N après décharge de 30.07N

Comme la sollicitation est faible, le déplacement s'effectue à l'intérieur d'une frange et il n'est pas nécessaire de dérouler le profil de franges. Un exemple de sollicitation plus importante est proposé pour une sollicitation de 30N à la figure 14 et montre l'importance de la contribution de la JCD. On remarque aussi une légère tendance à un mouvement de rotation globale indiqué par des franges parallèles portées par l'ensemble du système (Figure 14).

2. HOLOGRAPHIE

Un hologramme résulte de l'interférence entre la lumière diffusée par un objet (faisceau objet) et un faisceau de référence qui permet de coder la variation de phase en variations locales d'intensité lumineuse. Ces faisceaux peuvent être en ligne sur l'axe optique (montage dit « de Gabor ») ou décalés entre eux d'un certain angle (montage dit « de Leith-Upatnieks »).

2.1. HOLOGRAPHIE TRADITIONNELLE

Après un développement approprié (chimique, thermique, …) l'hologramme porte la variation de phase enregistrée soit en variations d'amplitude soit en variations de phase. Lorsqu'il est éclairé par le même faisceau de référence, la microstructure enregistrée diffracte la lumière incidente et reconstruit la coque de lumière identique à celle de l'objet initial. Cette diffraction peut également générer plusieurs ordres de reconstruction, plus ou moins exploitables.

À mon arrivée au laboratoire, une caméra holographique à support d'enregistrement thermoplastique (*Steinbichler*) était disponible. Ce système permet d'enregistrer l'hologramme sur un matériau de phase dont la variation est générée par un effet de migration de charges suite à l'insolation par une figure d'interférences (ici l'hologramme). À l'époque, l'appellation caméra était utilisée car ce système était couplé à une caméra analogique. Celle-ci permettait de visualiser la superposition de l'image holographique (état de référence) avec l'objet illuminé sous contrainte : interférométrie holographique en temps réel. Il est également possible d'enregistrer deux états différents du même objet déformé. La superposition de ces deux états génère alors des franges d'interférences qui sont caractéristiques du déplacement subi par l'objet : interférométrie par double exposition. Si l'objet est en vibration stationnaire d'amplitude compatible avec la sensibilité interférométrique, il est également possible d'enregistrer un hologramme pendant un temps d'enregistrement assez long par rapport à la période vibratoire : interférométrie en temps moyenné. Le contraste des franges de ces différentes techniques permet de les différencier. Le temps réel et la double exposition sont caractérisés par une distribution d'intensité des franges en loi cosinus et le temps moyenné est modulé par la fonction J_0 de Bessel.

D'autres supports holographiques permettent d'enregistrer des hologrammes. Citons par exemple les plaques photographiques aux halogénures d'argent à grains ultrafins, la gélatine bichromatée et les photopolymères. Les deux premiers doivent être développés chimiquement tandis que les derniers sont autodéveloppants dans certaines conditions. Notons également la possibilité d'enregistrer des hologrammes dans des matériaux photoréfractifs, comme le BSO.

J'ai réalisé de nombreux montages holographiques et de très nombreux hologrammes, sur différents supports d'enregistrements « analogiques », mais ces travaux sont antécédents à ma thèse, et ne font donc pas l'objet d'une partie de ce manuscrit …

2.2. HOLOGRAPHIE NUMÉRIQUE

Avec l'avènement de capteurs photosensibles numériques dont la taille des pixels frise le micromètre (bien que leur résolution soit éloignée de la résolution des plaques holographiques, avec des grains de quelques dizaines de nm) et l'augmentation impressionnante des moyens de calcul, il est à présent possible d'enregistrer directement l'hologramme puis de re-propager l'image holographique numériquement. On parle alors d'holographie numérique ou d'interférométrie holographique numérique lorsqu'on utilise la phase de ces hologrammes pour calculer la différence de phase On se référera utilement à Kim et al pour plus de détails sur l'holographie numérique et l'imagerie 3D [18].

Soulignons à nouveau l'aspect complémentaire des travaux en interférométrie holographique et en interférométrie de speckle. Si dans certains cas l'une prévaut sur l'autre, il est préférable d'utiliser la plus appropriée. Ce discours est d'ailleurs identique à celui tenu concernant la corrélation d'image et l'interférométrie.

Afin de pouvoir utiliser l'interférométrie holographique numérique dans des cas particulièrement bien adaptés et notamment pour l'étude du mélange de fluides, un partenariat de recherche avec l'Université du Mans a été entrepris. Nous avons notamment comparé l'interférométrie speckle et l'holographie numérique en enregistrement simple, afin de les rendre compatibles avec l'acquisition rapide d'image. Cette contribution est présentée dans [19] et les résultats obtenus sont synthétisés ci-dessous.

L'holographie numérique a été réalisée expérimentalement dans les années 1990. Depuis, différentes architectures existent, jusqu'à ressembler fortement à de l'interférométrie speckle si on considère l'holographie d'image et non plus seulement l'holographie « sans lentille » (lens-less). Comme présentée à la figure 3, l'interférométrie holographique peut également s'appliqué via des traitements par transformée de Fresnel discrète, ou par transformée de Fourier, voire aussi après décalage de phase. Nous nous focaliserons principalement sur l'holographie de Fresnel (DFH) et l'holographie d'image plane (DIPH) utilisant une fréquence porteuse, afin de privilégier l'application de ces techniques interférométriques à des phénomènes rapides. L'onde de référence peut être considérée comme une onde plane, d'amplitude voisine de l'onde objet. L'objet est éclairé de manière identique pour chaque technique, DFH et DIPH. Les fréquences spatiales générées par l'inclinaison de l'onde de référence sont également les mêmes.

- **<u>Bases théoriques</u>**

On considère un objet étendu de taille $\Delta A_x \times \Delta A_y$ éclairé par une onde monochromatique à la longueur d'onde λ, et pour un ensemble de systèmes de coordonnées attaché à l'objet (X, Y, z) et au plan d'enregistrement (x, y, z). Le capteur qui va enregistrer le phénomène d'interférences est muni de MxN pixels, avec un pitch (espace entre centre des pixels) $p_x=p_y$. On parlera respectivement de "fresnelgramme" pour la configuration de Fresnel (DFH), et de specklegramme pour l'holographie numérique d'image plane (DIPH).

i. *Enregistrement et reconstruction : DFH*

En holographie numérique de Fresnel, l'objet diffracte l'onde incidente vers le plan d'enregistrement situé à une distance d_0 (Figure 15). C'est un champ de speckle de phase aléatoire :

$$O(X,Y,d_0) = -\frac{i\exp(2i\pi d_0/\lambda)}{\lambda d_0}\exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_0}\left(X^2+Y^2\right)\right) \iint A(x,y)\exp\left(\frac{i\pi}{\lambda d_0}\left(x^2+y^2\right)\right)\exp\left(-\frac{2i\pi}{\lambda d_0}(xX+yY)\right)dxdy$$

(eq 11)

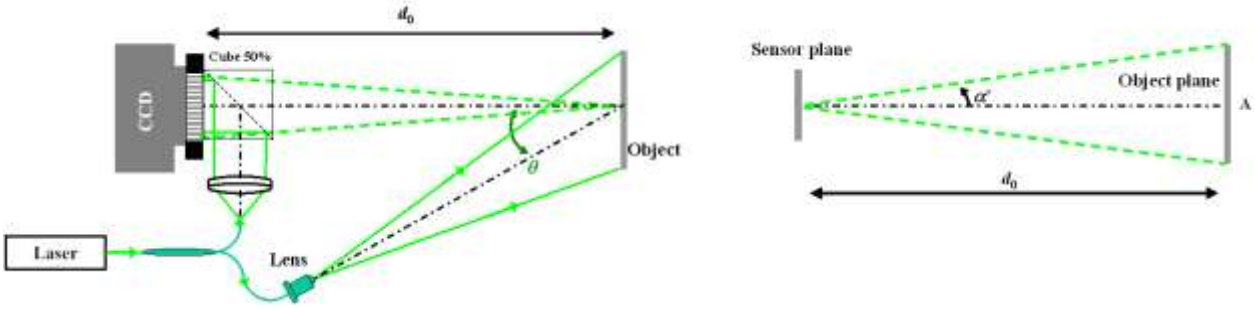


Figure 15 : Montage optique en holographie de Fresnel

L'onde de référence est mélangée dans le plan d'enregistrement:

$$R(X,Y) = a_r \exp\left(2i\pi\left(u_0X + v_0Y\right)\right) \qquad \text{(eq 12)}$$

avec $(u_0,v_0) \neq (0,0)$ en holographie hors d'axe et $(u_0,v_0) = (0,0)$ en holographie en ligne.
Dans le plan du capteur, l'intensité de l'hologramme numérique est donnée par

$$H = |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R \qquad \text{(eq 13)}$$

La séparation spatiale des ordres de diffraction requiert une distance d'enregistrement optimale donnée par :

$$d_0 = \frac{\left(2+3\sqrt{2}\right)p_x}{2\lambda}\Delta A \qquad \text{(eq 14)}$$

D'autre part, l'ajustement des fréquences spatiales de l'onde de référence peut s'effectuer également par un décalage latéral de l'objet :

$$\Delta X = \frac{\lambda d_0}{p_x}\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2+3\sqrt{2}}\right) \qquad \Delta Y = \frac{\lambda d_0}{p_y}\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2+3\sqrt{2}}\right) \qquad \text{(eq 15)}$$

Pour reconstruire l'objet en amplitude et en phase, on effectue une simulation numérique de la diffraction de la lumière. Le champ reconstruit est dès lors une version discrétisée de O(X, Y, d_r) et s'exprime en valeurs complexes. L'extraction de l'amplitude et de la phase de ces valeurs complexes s'effectue soit par transformée de Fresnel directe, soit via une convolution de la formule de la diffraction par une double transformée de Fourier. Dans ce dernier cas, le noyau de convolution est la réponse impulsionnelle dans l'espace libre de propagation et la fonction de transfert est la fonction de transfert du spectre angulaire.
Le champ reconstruit est obtenu à une distance d_r: ($\otimes$ dénote le produit de convolution),

$$A_r(x,y,d_r) = H(x,y) \otimes h(x,y,d_r) \qquad \text{(eq 16)}$$

où $h(x,y,d_r)$ est le noyau associé à la diffraction pour une distance d_r.

L'expression mathématique de ce noyau est donnée par Goodman [1] et doit être adapté à l'holographie hors axe [20].

$$h(x,y,d_r)=\frac{id_r}{\lambda}\frac{\exp\left[2i\pi/\lambda\sqrt{d_r^2+x^2+y^2}\right]}{d_r^2+x^2+y^2}\exp\left(-2i\pi\left(u_0x+v_0y\right)\right), \qquad \text{(eq 17)}$$

La fonction de transfert du spectre angulaire peut aussi être utilisée comme fonction de transfert lors du processus de reconstruction. Dans ce cas, l'expression mathématique est adaptée de [21] et donnée par:

$$G(u,v,d_r)=\begin{cases}\exp\left[2i\pi\, d_r/\lambda\sqrt{1-\lambda^2(u-u_0)^2-\lambda^2(v-v_0)^2}\right] \\ \qquad \text{si } |u-u_0|\le Lp_x/2\lambda d_r \text{ and } |v-v_0|\le Kp_y/2\lambda d_r\,, \\ 0 \qquad \text{ailleurs}\end{cases} \qquad \text{(eq 18)}$$

Plus de détails sont donnés dans les références [20][21] concernant le processus de reconstruction. En pratique, le calcul de cette équation s'effectue grâce aux propriétés de la transformée de Fourier et génère ainsi un algorithme à double transformée de Fourier (DFFT):

$$A_r = FT^{-1}\left[FT[H]\times FT[h]\right], \qquad \text{(eq 19)}$$

qui inclut 3 FFT en utilisant la réponse impulsionnelle, ou seulement 2 FFT en utilisant la fonction de transfert de spectre angulaire:

$$A_r = FT^{-1}\left[FT[H]\times G\right], \qquad \text{(eq 20)}$$

Pour les algorithmes de DFFT, l'objet reconstruit est échantillonné par un nombre de points qui peut être choisi librement avec un nombre de points $(K, L) \geq (M, N)$, tandis que pour l'algorithme DFT (Discrete Fresnel Transform), le nombre de points est donné par

$$(K, L) = (\Delta A_x/\Delta\eta;\ \Delta A_y/\Delta\xi). \qquad \text{(eq 21)}$$

Ainsi, l''échantillonnage des données détermine drastiquement la qualité de la résolution spatiale ainsi que le temps de calcul.

ii. Enregistrement et reconstruction : DIPH

On distingue bien, sur la figure 16**,** le système optique qui forme l'image sur le capteur de MxN pixels, avec un grandissement donné par :

$$|\gamma| = \min\left(Np_x/\Delta A_x;\ Mp_y/\Delta A_y\right). \qquad \text{(eq 22)}$$

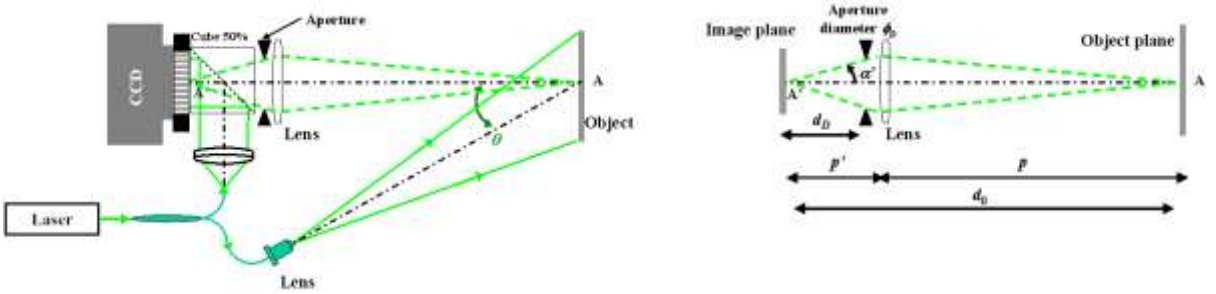


Figure 16 : Montage optique en holographie d'image plane

La largeur de bande des fréquences spatiales est donnée par :

$$(\Delta u \times \Delta v) = (\Delta A_x / \lambda p \times \Delta A_y / \lambda p) = (|\gamma|\ \Delta A_x / \lambda p' \times |\gamma|\ \Delta A_y / \lambda p') \qquad \text{(eq 23)}$$

Et finalement, le specklegramme enregistré est défini par

$$H = |A'|^2 + |R|^2 + A' R^* + A'^* R \qquad \text{(eq 24)}$$

L'extraction de l'amplitude et de la phase de ces valeurs complexes s'effectue via une convolution de la formule de la diffraction par double transformée de Fourier. Dans ce dernier cas, le noyau de convolution est une fonction Sinc 2D qui dépend de l'ouverture du système optique.

$$G'(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{if } |u - u_0| \le \Delta A_x / 2\lambda p \text{ et } |v - v_0| \le \Delta A_y / 2\lambda p \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}, \qquad \text{(eq 25)}$$

Et l'onde objet est alors reconstruite par:

$$A'_r = FT^{-1}\left[FT[H] \times G'\right]. \qquad \text{(eq 26)}$$

De nouveau, l'échantillonnage des données détermine drastiquement la qualité de la résolution spatiale ainsi que le temps de calcul.

iii. Critères de qualité

Cinq critères de qualité ont été proposés afin de montrer objectivement les avantages et inconvénients de chaque technique, et plus particulièrement l'influence de l'ouverture du système optique dans le cas de système imageur utilisé en DIPH.

Les cinq critères proposés sont :

- Filtrage et traitement numérique
- Influence de l'ouverture
- Efficacité photométrique
- Résolution spatiale
- Bruit de décorrélation

Ces différents points seront évalués en comparant les résultats de reconstruction obtenus sur le même objet, avec quasiment la même sollicitation.

La qualité de la réponse de chaque technique aux spécificités demandées est évaluée par des mesures appropriées telles que le bruit, le contraste, ou simplement le temps de calcul et la complexité des traitements.

Encore une fois, ces critères peuvent être librement interprétés par l'utilisateur final, y compris, et a fortiori, lorsque les conditions expérimentales dévient de conditions optimales (stabilité, distance de travail, rapport d'intensité des faisceaux de référence et objet.

1) Filtrage et traitement numérique

On peut considérer que les algorithmes utilisés ont de fortes similitudes. Les résultats sont présentés de manière synthétique dans le tableau 1.

On constate que la méthode la plus simple est la DFT utilisée en holographie numérique. La complexité la plus élevée est obtenue pour la méthode de convolution à grandissement ajustable, mais l'objet peut être reconstruit avec le même nombre de points que le capteur d'enregistrement.

	DH		DIPH
Méthode de Reconstruction	Transformée Discrète Fresnel	Convolution	Convolution par filtrage spectral
Nombre de FFT	1	2 ou 3	2
Nombre de points de données pour les FFT	libre, $(K, L) \geq (M,N)$	libre, $(K, L) \geq (M, N)$	libre, $(K, L) \geq (M,N)$
Nombre de points de données pour l'objet	imposé, $\Delta A_x L p_x/\lambda d_0 \times \Delta A_y K p_y/\lambda d_0$	libre, $\geq M\times N$	$M\times N$
Filtrage	NON	OUI	OUI
Fonction de Filtrage	-	phase quadratique	binaire
Besoin d'un terme de phase quadratique additionnel	NON	OUI, pour grandissement ajustable	NON
Echantillonnage de l'objet reconstruit	$(\lambda d_0/Lp_x, \lambda d_0/Kp_y)$	(p_x, p_y)	(p_x, p_y)
Temps de calcul	2.703s pour (K, L)=(1024, 1360)	7.25s pour (K, L) = (1024, 1360)	3.203s pour (K, L) = (1024, 1360)
Degré de complexité	**	*****	***

Tableau 1 : Tableau comparatif des méthodes de reconstruction

Rem : Les temps de calcul sont donnés pour un PC Pentium 4CPU 2.99GHz muni de 2Go de RAM équipé de MATLAB 5.3.

2) Ouverture

On peut souligner, même si ceci est peu ou pas évoqué dans la littérature, que le specklegramme est aussi l'hologramme numérique de l'ouverture. Ceci entraine donc que la méthode de la porteuse spatiale doit être optimisée sur les mêmes règles que celles utilisées en holographie numérique de Fresnel décrite par (eq 14). On a dès lors :

$$d_D = \frac{\left(2+3\sqrt{2}\right)p_x}{2\lambda}\phi_D, \qquad \text{(eq 27)}$$

Et l'ouverture numérique doit donc être:

$$\sin\alpha' \cong \frac{\phi_D}{2d_D} = \frac{\lambda}{\left(2+3\sqrt{2}\right)p_x} \qquad \text{(eq 28)}$$

Ce point est critique pour comprendre que la méthode de la porteuse spatiale ne donne de bons résultats que si l'ouverture numérique est petite. En effet, si (eq 28) n'est pas satisfaite,

les trois ordres de diffraction de l'hologramme se recouvrent, et l'ordre +1, fidèle à l'objet, est corrompu par l'hologramme du diaphragme. Remarquons que l'(eq 28) s'applique également en DH, mais où l'ouverture numérique dépend de la distance objet-capteur et vaut environ 0.6degré pour un pitch de 8µm à la longueur d'onde de 532nm. Cette valeur est certes faible mais permet à l'utilisateur de mieux considérer le montage à utiliser, et notamment en fonction du recul dont il dispose dans ses installations.

3) Résolution spatiale

En DFH, la résolution spatiale est donnée par

$$\rho_x = \frac{\lambda d_0}{N p_x} \qquad \rho_y = \frac{\lambda d_0}{M p_y} \quad . \qquad \text{(eq 29)}$$

Il s'agit de la largeur de la figure de diffraction numérique d'une ouverture rectangulaire numérique de taille ($Np_x \times Mp_y$) et de transmittance uniforme. On voit qu'elle dépend directement du capteur, de la longueur d'onde et de la distance de travail. Elle peut aussi être comparée à la taille d'un grain de speckle objectif qui serait issu d'une surface équivalente à la surface utile du capteur à la distance de reconstruction d_0… lors de la repropagation.

Dans le cas de DIPH, la résolution spatiale est directement liée au système d'imagerie utilisé… et équivaut quant à elle, à la taille du grain de speckle subjectif généré par une optique de distance focale ϕ_D qui fabrique une image à la distance d_D, soit :

$$\rho'_x = \rho'_y = \frac{\lambda d_D}{\phi_D} = \frac{\left(2+3\sqrt{2}\right)p_x}{2} \quad . \qquad \text{(eq 30)}$$

On constate que ces résolutions spatiales sont équivalentes si on tient compte du grandissement en holographie numérique [19].

4) Décorrélation du speckle

Le speckle peut être soit résolu, soit non résolu. On parle de speckle résolu si, dans le meilleur des cas, la taille du grain de speckle est au moins échantillonnée par deux pixels du capteur. Dans le pire des cas, le speckle est non résolu si sa taille est inférieure à la taille du capteur.

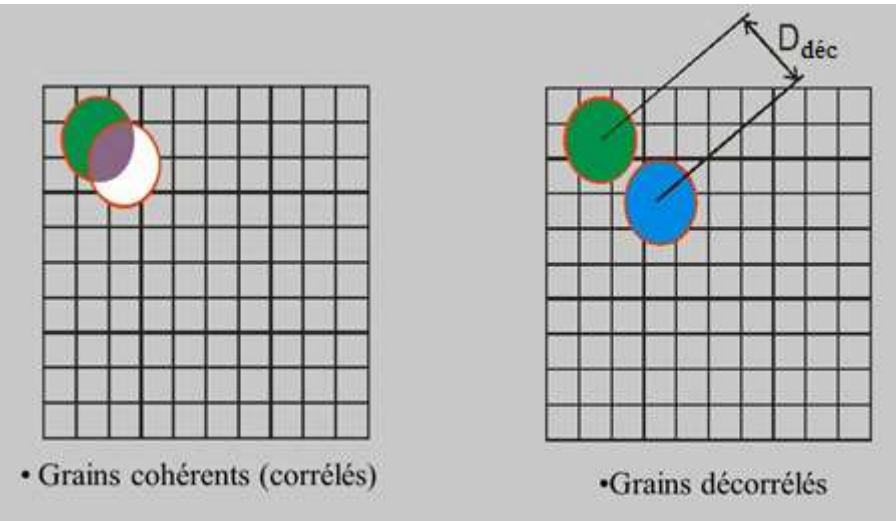


Figure 17 : Décorrélation du speckle

La décorrélation du speckle se produit lorsque les grains de speckle « se déplacent » suite à une déformation de l'objet **(**Figure 17**)**, voire même parfois à cause d'un déplacement de

solide rigide (le plus souvent une rotation). La décorrélation peut également être générée par un déplacement important de l'objet dans son propre plan. Le capteur enregistre alors une distribution de grains de speckle décalée de $\boldsymbol{D_{déc}}$ par rapport à la position précédente, et l'information de phase est ainsi "décorrélée" de l'état précédent. Si, par exemple en DIPH, on obtient la différence de phases entre deux états par soustraction, le résultat sera entaché de nombreux « trous » de corrélation là où le speckle est décorrélé. Certains auteurs [22] utilisent alors la technique de corrélation d'images (cf. infra) pour calculer le déplacement $\boldsymbol{D_{déc}}$. Celui-ci est calculé pour chaque fenêtre d'intérêt d'un maillage de l'image de phase. Cette image de phase est ensuite corrigée en chaque point du maillage pour "ré-apparier" la phase qui est ensuite soustraite normalement de l'état précédent. De nouveau, ceci montre que les techniques interférométriques et de corrélation sont complémentaires et tout à fait connexes pour différents types d'application.

La décorrélation peut être caractérisée par le bruit qu'elle engendre en modifiant la fonction de densité de probabilité de phase ψ_i de chaque état, soit le bruit $\varepsilon=\psi_1-\psi_2$ induit par la décorrélation entre deux états d'un objet qui a subi un changement de phase $\Delta\varphi$ généré par la déformation à mesurer de l'objet. On considère dès lors $\psi_2=\psi_1+\varepsilon+\Delta\varphi$, et que $\Delta\varphi$ est une variable déterministe. La fonction de densité de probabilité de ε dépend du module du facteur de cohérence complexe $|\mu|$ entre deux champs de speckle. Si on appelle $\beta=|\mu|\cos(\varepsilon)$, la densité de probabilité du second ordre du bruit sur la phase ε est alors donné par :

$$p(\varepsilon)=\frac{1-|\mu|}{2\pi}\left(1-\beta^2\right)^{-3/2}\left(\beta\sin^{-1}\beta+\frac{\pi\beta}{2}+\sqrt{1-\beta^2}\right). \qquad \text{(eq 31)}$$

On utilisera cette dernière comme un indicateur pertinent pour comparer la sensibilité à la décorrélation de différentes méthodes. Les mesures seront réalisées en comparant la soustraction de la différence de phase ayant subi un filtrage passe-bas de la différence de phase brute. Ceci conduit à une estimation de l'écart-type du bruit pour les données brutes, qui, sous certaines conditions de filtrage passe-bas par un noyau $n\times n$ de convolution $h_f(l,k)$ permettent de relier l'écart-type du bruit mesuré σ_Δ à celle du bruit réel σ_ε en utilisant la formule donnée par (eq 32) :

$$\sigma_\Delta=\sigma_\varepsilon\sqrt{1-2h_f(0,0)+\sum_{k=-n}^{k=+n}\sum_{l=-n}^{l=+n}\left|h_f(l,k)\right|^2}\,. \qquad \text{(eq 32)}$$

5) Efficacité photométrique

L'objet est circulaire, éclairé par un laser de puissance P_0, et considéré comme un diffuseur lambertien d'albédo R_d. Si on compare la quantité de lumière reçue en DFH et en DIPH (où le facteur de transmission de l'optique utilisée vaut T_L), alors on obtient le rapport :

$$\frac{I_{DFH}}{I_{DIPH}}=\frac{1}{T_L}>1, \qquad \text{(eq 33)}$$

Ce résultat ne dépend pas de la taille de l'objet. En pratique, la distance de travail de la DFH pour des objets de taille imposante peut être élevée. On peut alors utiliser une optique pour former l'image de l'objet, et retrouver ainsi un rapport photométrique comparatif unitaire…

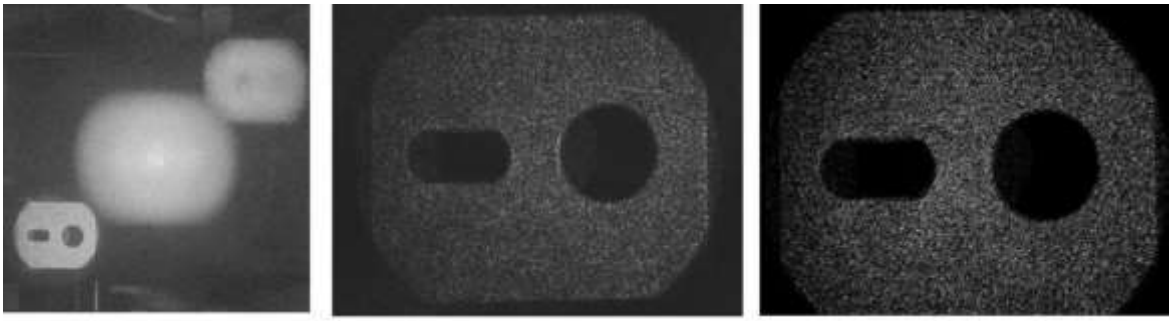
iv. *Vérification expérimentale*

Le montage holographique est basé sur un interféromètre de Mach-Zender. Dans ce cas, un laser He-Ne a été utilisé (un laser YAG doublé à 532nm a également été employé pour d'autres expériences utilisant une caméra rapide, cf. infra). La caméra est munie de 1024x1360 pixels carrés de 4.65µm de côté. L'objet est une structure mécanique de taille $\Delta A_x \times \Delta A_y = 40\times35\text{mm}^2$, qui sera chargée en statique et éclairée sur une surface circulaire de 40mm de diamètre. Pour la DIPH, le grandissement de la lentille assure que l'image couvre l'entièreté du capteur. Les fréquences spatiales sont ajustées suivant l'équation 15.

Dans chaque configuration optique, 5 états de l'objet ont été enregistrés, correspondants à 4 états de charge. Le filtrage à moyenne glissante utilisé pour calculer le bruit de décorrélation est un noyau $n\times n=7\times7$ pixels, conduisant à $\sigma_\varepsilon=\sigma_\Delta/0.989$.

1) Reconstruction de l'objet

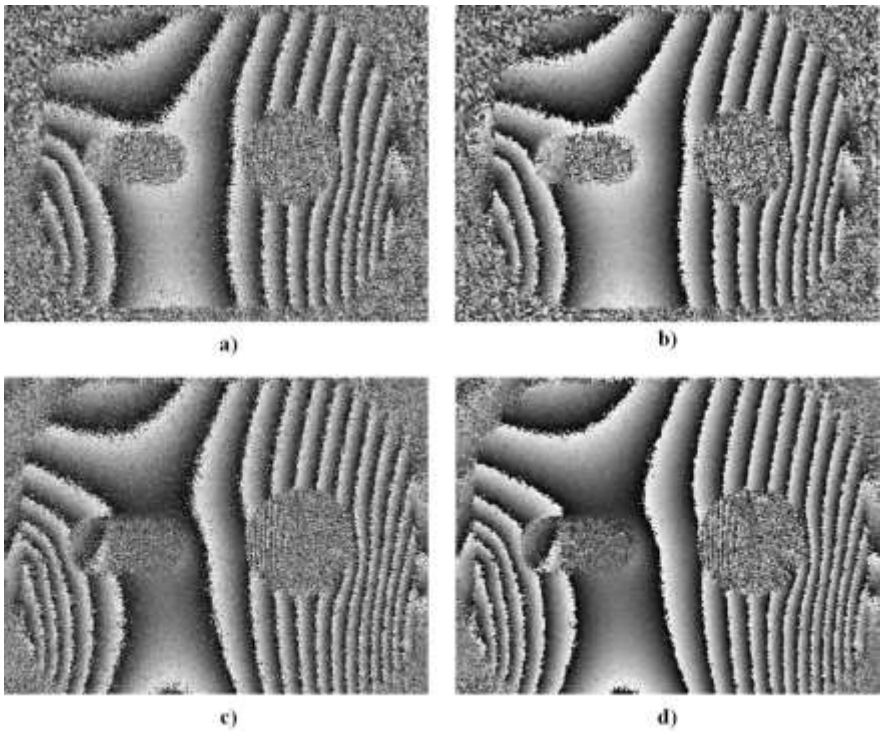
Un exemple de reconstruction de l'objet pour chaque technique est présenté à la figure 18.



a) DFH par DFT (complète) *b) DH : convolution + grandissement* *c) DIPH*

Figure 18 : Reconstructions de l'objet en amplitude (1024*1360pixels)

On remarque une légère différence de taille qui provient du grandissement transverse de la DIPH qui n'est pas exactement égal à 0.146.



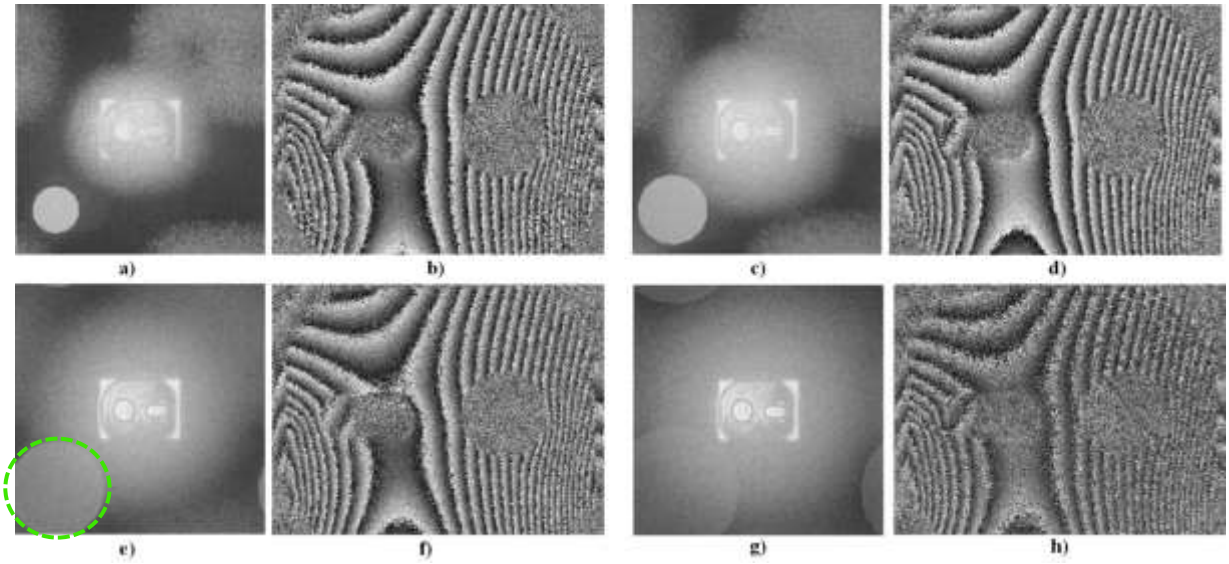
a) DFH (convolution, brute), b) DFH: filtrée, c) DIPH: brute, d) DIPH: filtrée

Figure 19 : Différences de phase.

La figure 19 présente, pour chaque technique, les changements de phase obtenus pour approximativement la même différence de charge. On peut constater la profonde ressemblance des profils de phase pour chaque configuration, même si on distingue de légères différences de reproduction de la charge appliquée.

2) Influence de l'ouverture

Le specklegramme est aussi le fresnelgramme de l'ouverture. L'ouverture peut donc être reconstruite depuis le fresnelgramme en calculant la DFT avec d_r=–d_D=–145mm.
Les résultats sont présentés à la figure 20. On voit clairement apparaitre l'effet de recouvrement de l'ouverture pour des tailles de celle-ci qui dépassent la valeur idéale de ϕ_D>6.3mm (cercle vert sur le profil e). Les franges de plus hautes fréquences spatiales sont les premières perturbées comme on peut le constater sur les profils de franges f et h.

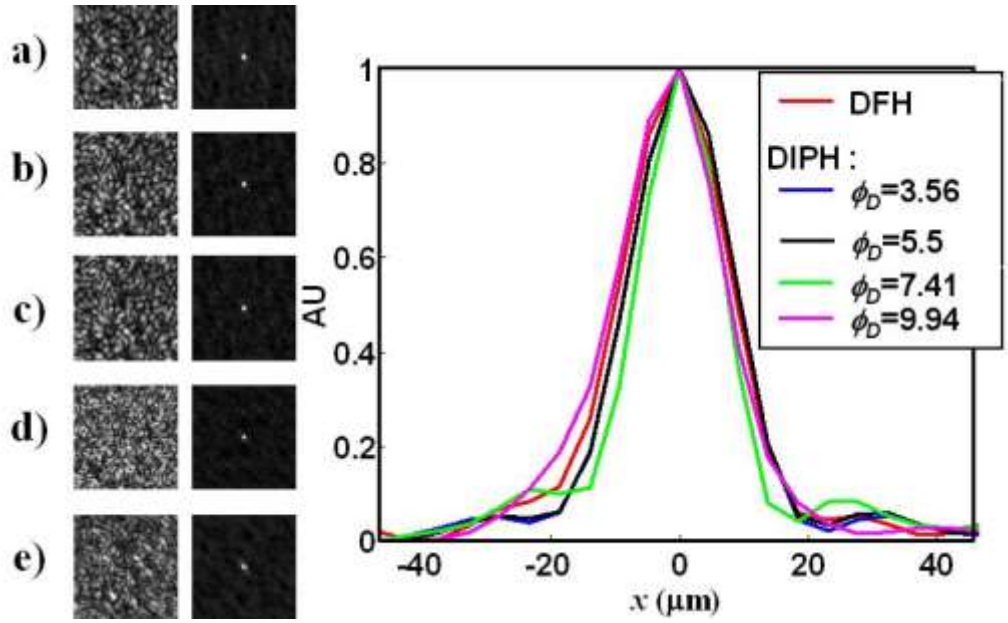


Reconstructions holographiques a) ϕ_D=3.56mm, c) ϕ_D =5.5mm, e) ϕ_D =7.41mm, g) ϕ_D =9.94mm
Différences de phase obtenues par DIPH b) ϕ_D =3.56mm, d) ϕ_D =5.5mm, f) ϕ_D =7.41mm, g) ϕ_D =9.94mm.
Figure 20 : Influence de l'ouverture.

Ceci démontre que la DIPH est seulement utilisable pour des ouvertures numériques petites, typiquement avec un f# >20.

3) Résolution spatiale

D'après la discussion précédente et les paramètres expérimentaux, les résolutions spatiales théoriques sont ρ'_x=15.03µm et ρ'_y=19.85µm pour la DFH et ρ'_x=ρ'_y=15.51µm pour la DIPH. En pratique, pour évaluer la résolution spatiale, on considère une zone carrée de 101x101pixels extraite de l'objet, englobant suffisamment de grains de speckle. L'autocorrélation de la zone est réalisée par FFT et les profils en x normalisés sont obtenus.
La figure 21 montre les différents pavés choisis, l'image d'autocorrélation et les profils d'autocorrélation superposés en DFH, et en DIPH avec des ouvertures de ϕ_D=3.56mm, ϕ_D=5.5mm, ϕ_D=7.41mm et ϕ_D=9.94mm.
On constate que la résolution est comparable pour chaque cas. La courbe s'étale un peu pour ϕ_D=9.94mm. Plus l'ouverture est grande, plus le speckle est petit, et on pourrait tendre vers une résolution plus élevée. Mais, comme décrit précédemment, augmenter l'ouverture entraine une superposition des ordres de reconstruction qui dégrade la résolution.



Grains de speckle et fonctions d'autocorrélation pour a) DFH, et DIPH avec b) ϕ_D=3.56mm, c) ϕ_D=5.5mm, d) ϕ_D=7.41mm e) ϕ_D=9.94mm ; et profils en x des fonctions d'autocorrélation respectives.

Figure 21 : Résolution spatiale.

4) Décorrélation du speckle

La décorrélation du speckle est engendrée par le déplacement de l'objet. Des charges croissantes identiques ont été appliquées à l'objet et *p(ε)*, la densité de probabilité du bruit, a été estimée pour chacune. La figure 22 présente les résultats pour différentes ouvertures.

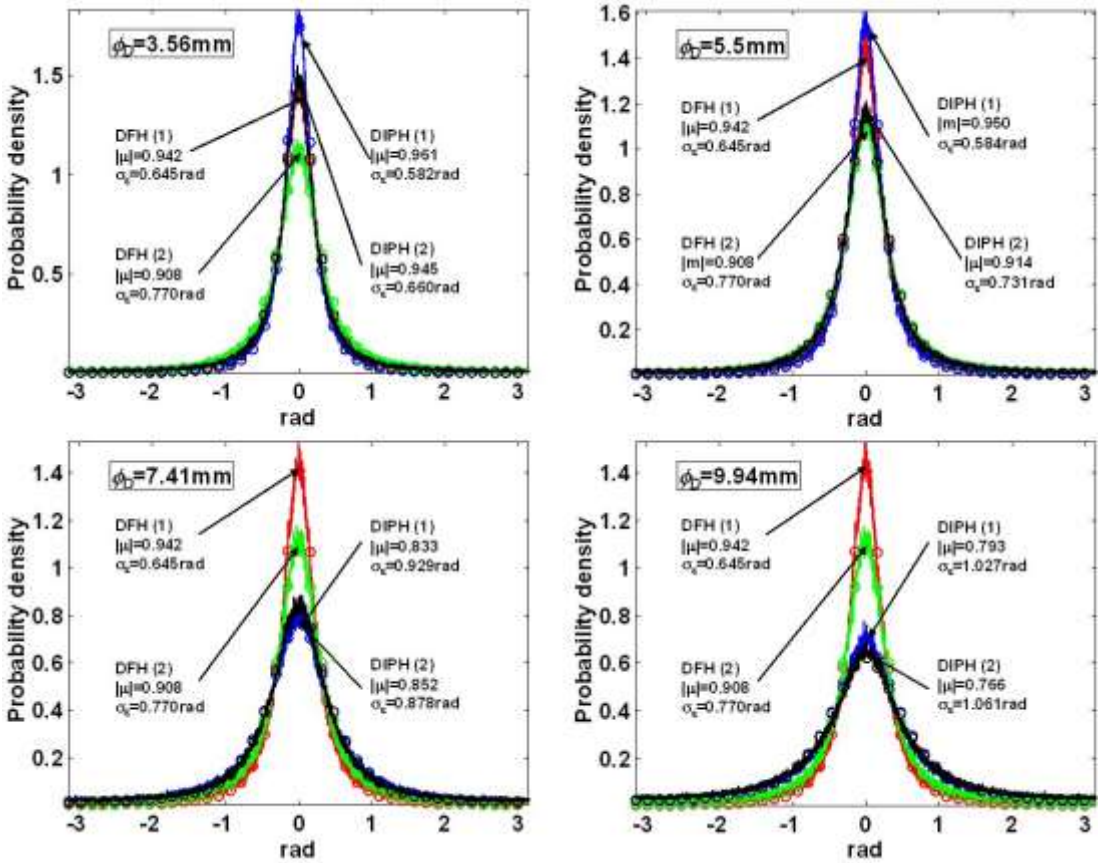


Figure 22 : Décorrélation du speckle pour différentes ouvertures en DIPH par rapport à la DFH.

L'indice (1) dénote la carte de déplacement obtenue entre le 3ème et le 1er état de charge, et l'indice (2) la carte de déplacement obtenue entre le 5ème et le 1er état de charge. La valeur estimée pour $|\mu|$ et pour l'écart-type du bruit σ_ε sont également précisées. On constate que plus l'ouverture est petite, plus la décorrélation est faible. Pour une ouverture de 3.56mm, la DIPH est même meilleure que la DFH, pour toute sollicitation. Comme attendu, la décorrélation augmente fortement pour la DIPH lorsque l'ouverture devient trop importante. Ceci provient particulièrement du mode de calcul de la phase via la transformée de Fourier, qui ne peut pas être comparé à des méthodes standards à décalage de phase utilisées en sollicitation statique.
Une étude dynamique sera présentée dans la partie traitant des méthodes de densité de ce manuscrit.

N.B. : *Pour tous les cas d'interférométrie (speckle ou holographique), des lasers de puissance continue (100mW et 2W) émettant à la longueur d'onde de 532nm, avec une longueur de cohérence de quelques mètres, sont disponibles. Ce paramètre est prépondérant pour pouvoir enregistrer des interférences. Par contre, il peut s'avérer nécessaire d'atténuer cette cohérence (par rotation d'un milieu diffuseur ou par fluorescence par exemple) ou d'utiliser des lasers peu cohérents (laser de PIV), pour diminuer le speckle présent dans les applications d'imagerie ou de corrélation.*

B) CORRÉLATION D'IMAGES

La corrélation d'images consiste à rechercher dans une série d'images le déplacement d'un motif connu ou imagette. À ses débuts, la corrélation était effectuée optiquement, en filtrant dans le plan de Fourier des doubles expositions de l'objet. Le signal de corrélation était le speckle généré par un objet rugueux éclairé en lumière cohérente.

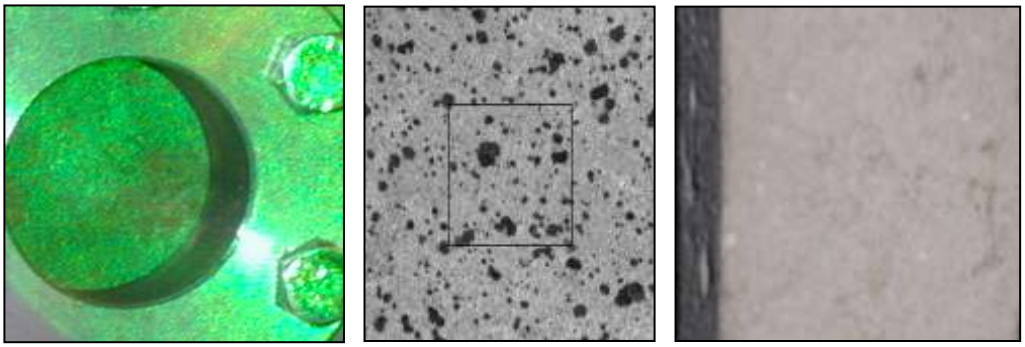
La corrélation d'images numériques (CIN) est étudiée à l'École des Mines d'Alès (EMA) depuis plus de 15ans, d'abord par des dépouillements optiques puis informatiques avec des algorithmes de corrélation qui provenaient de l'imagerie par particules. Plusieurs essais mécaniques ont été instrumentés par ces systèmes laser, dont j'ai participé au développement (optimisation de puissance lumineuse, choix de la source, injection dans fibre monomode, optique d'imagerie…). Depuis, l'EMA dispose de son propre logiciel de corrélation (CINema, écrit en langage C), et qui permet la corrélation d'images à fenêtre adaptative. Celle-ci est capable d'évoluer avec la déformation du motif et de corréler deux images successives dont la variation de déformation approche les 100%, avec une incertitude relative de l'ordre de 5.10^{-5}.

Actuellement, la corrélation d'images repose principalement sur un mouchetis de peinture habilement déposé sur l'objet d'intérêt. Cette technique a été appliquée avec succès sur des matériaux (ex: silicone) dont le taux de déformation pouvait atteindre 1600% en fin d'essai. Les choix des optiques et des caméras doivent être effectués scrupuleusement afin de fournir des images de grande qualité au logiciel de corrélation. Des procédures de calibration du système d'acquisition doivent également être réalisées. Une forte plus-value dans ce secteur consiste également à interfacer des moyens d'essais mécaniques avec les systèmes d'acquisition optique.

- **Bases théoriques**

1. CORRÉLATION SUR SOLIDES

Comme le souligne la figure 3, la corrélation d'images est une technique photographique. Donc la résolution spatiale de la mesure du déplacement dépend du grandissement photographique. Cette technique est également transférable sous MEB (Microscope Électronique à Balayage) pour de petits échantillons, ou en vue aérienne pour de larges surfaces. Le principe de base consiste à retrouver un motif connu d'une image à l'autre au cours de l'évolution de l'objet étudié. Cet objet peut être un objet solide, avec un mouchetis lié à sa surface de manière intime, ou un ensemble de particule indépendantes qui se déplacent et créent ce motif par leur distribution spatio-temporelle (Figure 23).



a) speckle *b) mouchetis de peinture* *c) texture naturelle*

Figure 23 : Motifs de corrélation d'images

Les techniques de corrélation d'images appliquées en Mécanique font en France le sujet d'un GDR (2519) auquel notre laboratoire a participé. Pour la description des méthodes utilisées, on se référera utilement à [3, chap.6] et [4, chap.5].
Dans tous les cas l'acquisition d'image doit être en adéquation avec l'échantillonnage futur des données, tant d'un point de vue spatial que temporel. En effet, les décalages entre les motifs porteurs de l'information entre chaque image doivent être compatibles avec la technique de corrélation, et notamment le périmètre de recherche du motif autour de son point précédent, déterminé par V_m. D'autre part, la résolution spatiale de l'image conditionne directement le plus petit détail résolu et également l'identification du point matériel le plus petit assimilable au plus petit motif de surface C_S qui sera reconnu au cours du traitement. Le pic de corrélation (obtenue par corrélation directe ou via transformée de Fourier) détermine la position du motif dans la nouvelle image (Figure 24).

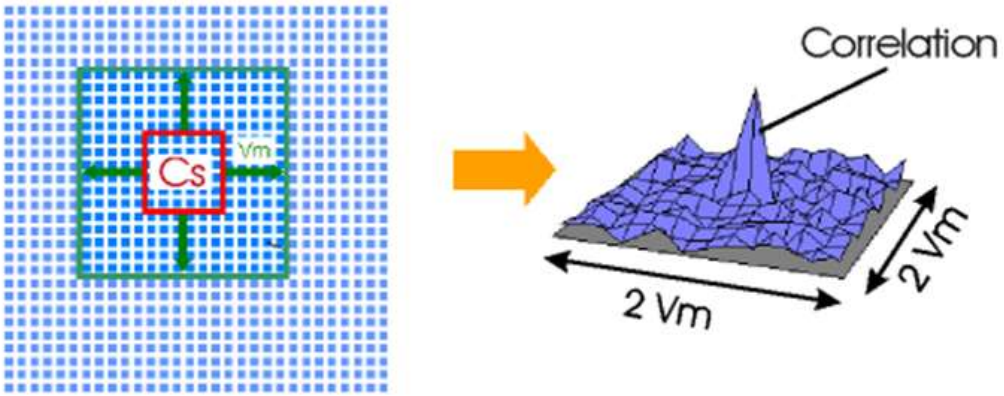
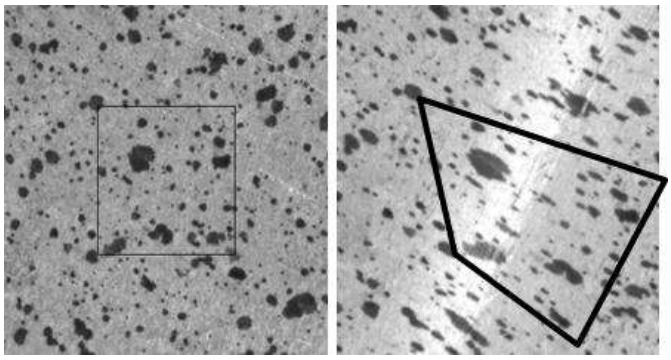


Figure 24 : Bases schématiques de la corrélation d'image

Typiquement, les fenêtres de corrélation ont une taille de l'ordre de 15 à 30 pixels de côté. La taille des fenêtres est directement liée à la forme du motif ou du mouchetis. En fonction des algorithmes de corrélation, une résolution de l'ordre de 1/100pixel est atteinte sur le déplacement du pavé initial. Cette incertitude peut être mesurée par l'autocorrélation d'une image de référence. Les résultats de corrélation sont également influencés par le recouvrement potentiel des fenêtres de corrélation.
Les principales sources d'erreurs proviennent des déplacements de l'objet et notamment de ses changements de planéités qui affectent la projection de 3D en 2D par le dispositif imageur, du dispositif imageur lui-même par ses éventuelles aberrations géométriques, et également du capteur qui va numériser les images (CCD, CMOS, sonde MEB, …).



a) image de départ *b) image déformée*

Figure 25 : Exemple de fenêtre adaptative (essai de striction d'un acier)

Les déplacements de l'objet peuvent être globaux (mouvement de solide rigide) ou locaux (changement de forme locale de l'objet). Certains algorithmes de corrélation peuvent plus ou moins bien s'affranchir de ces différentes contraintes, inhérentes soit à l'optique utilisées (non télécentrique) soit au type de sollicitation de l'objet. Dans certains cas, la fenêtre de corrélation peut se déformer au gré de la déformation du motif, on parle alors de corrélation adaptative, car elle s'adapte au changement local du motif (Figure 25).
La corrélation adaptative permet de mesurer des taux de déformations plus importants entre deux états (>20%), et aussi d'éviter un cumul de l'erreur intrinsèque dans le cas de la corrélation en mode absolu. En mode absolu, on corrèle chaque image avec l'image de départ, tandis que le mode incrémental corrèle chaque image avec l'image précédente. Il existe aussi le mode mixte, qui ressemble au mode incrémental mais tout en minimisant le nombre d'incrément par rafraîchissement de l'image de référence.
On comprend immédiatement que plusieurs méthodes de corrélation existent et sont plus ou moins privilégiées suivant les utilisateurs et les mesures à effectuer.
Un autre point crucial est l'optimisation des ressources informatiques, dont découle directement le temps de calcul lié à la quantité d'information à traiter. Cette quantité d'information augmente avec la résolution spatiale et la dynamique des images, et également avec la finesse du maillage et du taux de recouvrement. Dans certains cas, et notamment en corrélation adaptative avec CINema, un premier passage peut s'effectuer avec une grande fenêtre de départ, sur toute la série d'images, puis la taille de fenêtre est diminuée afin d'optimiser la résolution spatiale, le temps de calcul et l'incertitude finale.
Certains points de l'objet peuvent également « disparaitre » au cours du processus de corrélation, par absence de corrélation locale. Il est alors nécessaire, comme dans toute technique de champ, de combler ces manquements par des interpolations idoines. Une étude récente de ces interpolations a été réalisée par Baldi et Bertolino [24].
Enfin, il est également possible de coupler la corrélation avec des algorithmes de stéréovision et d'utiliser plusieurs vues pour obtenir les trois composantes du déplacement [23].

- **Applications**

Notre expérience en corrélation d'images peut se résumer en deux phases. La première est liée au rattachement au Centre des Matériaux pendant une dizaine d'années et la seconde à notre affectation actuelle à l'Institut des Sciences des Risques.
Depuis 1995, ce travail a principalement contribué à l'optimisation de la qualité des images et des montages optiques relatifs à l'application de la corrélation d'images en mécanique. Cette contribution comprend notamment la conception, la fabrication et le pilotage d'outils optiques (capteurs, lasers) mais aussi d'outils mécaniques (pilotage) en collaboration avec les équipes de recherche en Mécanique des Matériaux ou avec des industriels dans le cadre de contrats.
Citons par exemple, la révision d'une station de mesure de courbe limite de formage à Sollac (Usinor, Fos/mer). Cette révision consistait à remplacer la gravure chimique de cercles sur des tôles d'acier par un éclairage laser approprié couplé à de la corrélation d'images afin de mesurer la striction du matériau lors d'un essai de poinçonnement. Auparavant, des cercles gravés se déformaient au cours de l'essai mécanique (essai Marciniak, Figure 26), et leur transformation en ellipse était mesurée par traitement d'images. Le temps de préparation des échantillons était de l'ordre d'une heure, et demandait surtout un retraitement important des eaux usées de la gravure chimique.

En corrélation d'images, le même échantillon de métal était simplement dégraissé, puis placé dans les mêmes conditions de sollicitation sous éclairage laser qui générait le motif de corrélation. L'éclairage laser a ensuite été remplacé par un mouchetis de peinture éclairé par un anneau lumineux concentrique à l'optique de la caméra [25]. Un exemple du mouchetis obtenu avant et à la striction est présenté à la figure 25. Dans ce cadre précis, l'opérateur sélectionnait l'endroit de la striction pour définir le maillage de la zone d'intérêt. Cet essai montre également la performance de la corrélation adaptative, car en fin d'essai, des incréments de déformations de l'ordre de 64% entre deux images consécutives peuvent être atteints.

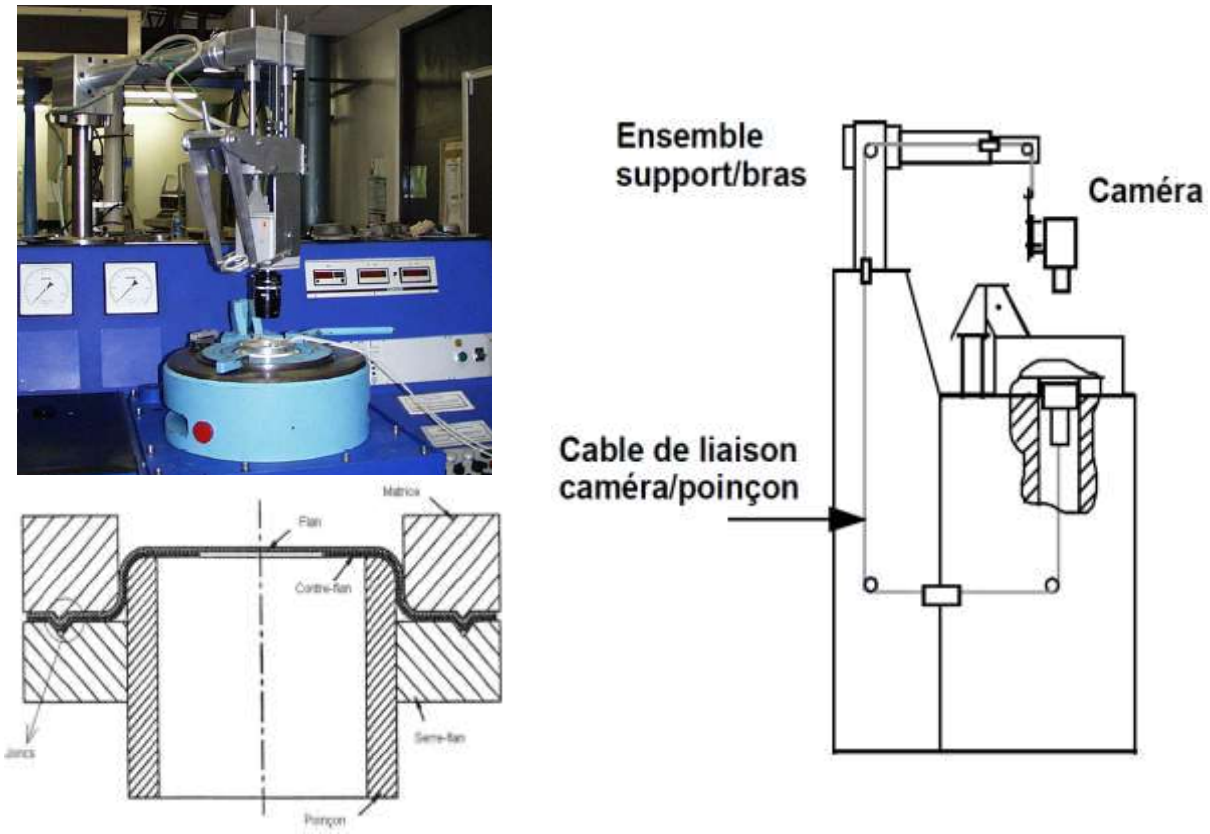


Figure 26 : Instrumentation optique de l'essai Marciniak

De nombreuses applications ont été réalisées en interne avec le Centre des Matériaux de l'École des Mines d'Alès (compression plane, tractions, flexions …) lors des thèses que j'ai suivies sans encadrement direct (Laraba, Wattrisse, Wienin, Giton, …), y compris le couplage de la corrélation avec l'interférométrie speckle, en compression plane pour la détection du flambement par mesure de la composante hors plan d'un côté et la détermination des déformations planes de l'autre côté (thèse JS Wienin, [26]) (Figure 27**)**. Le développement de cet essai a requis de positionner l'entièreté du système d'acquisition d'image sur la table optique, mais également de synchroniser les moyens d'essais et d'acquisition d'images. Le choix des optiques, et des caméras est prépondérant pour ce type d'application, ainsi que le type de décalage de phase utilisé (temporel, à 4 incréments) afin d'obtenir un intervalle de recouvrement entre la sensibilité des mesures par corrélation, directement liée au grandissement photographique, et celle des mesures interférométriques liée à la longueur d'onde.

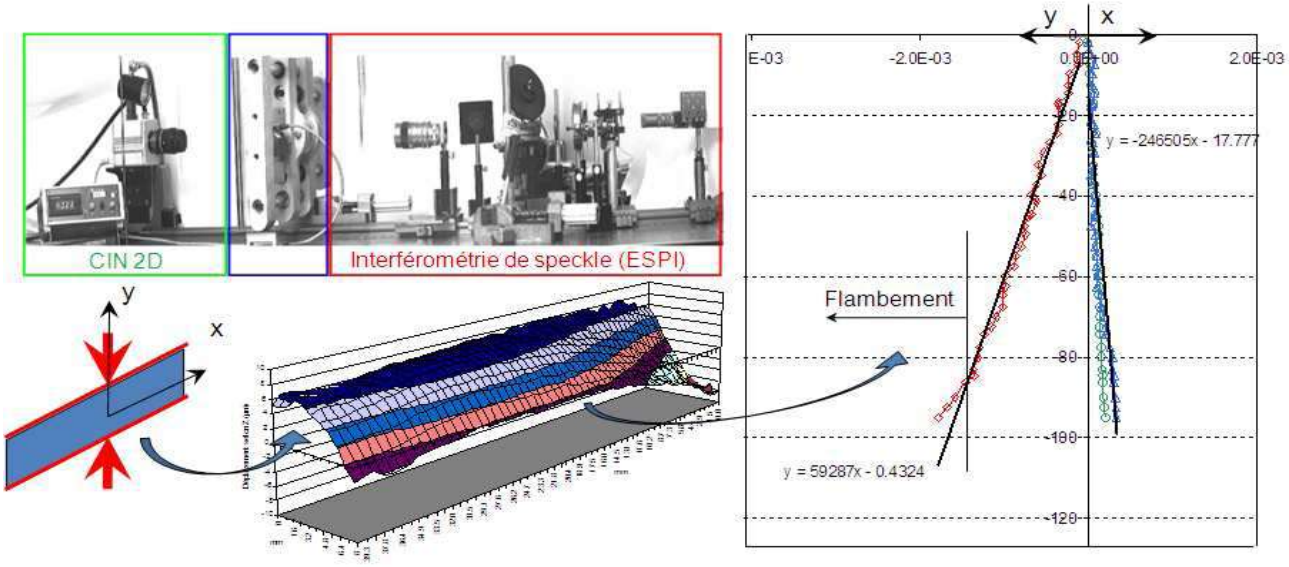


Figure 27 : Essai de compression plane, limite de flambement

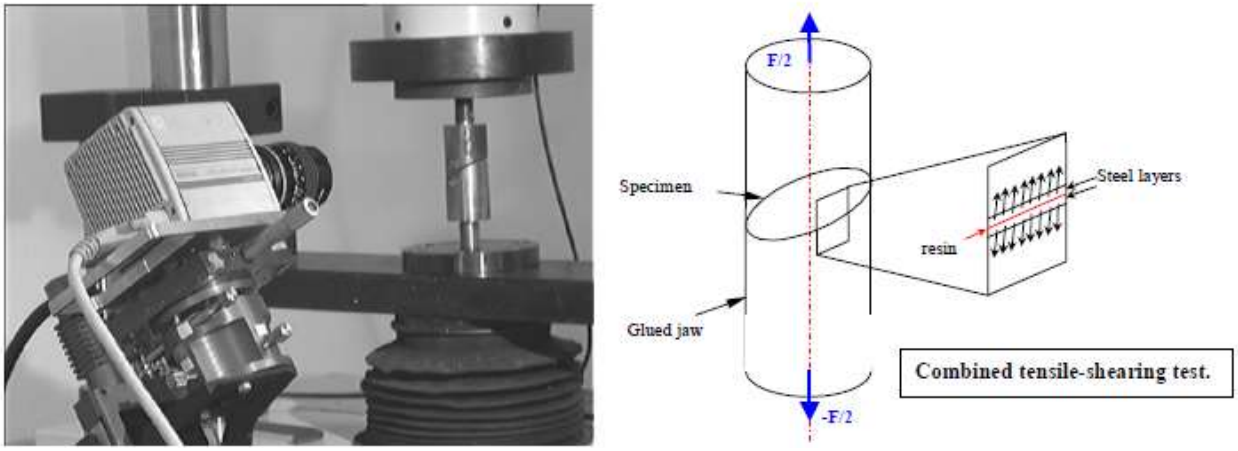


Figure 28 : Essai de traction-cisaillement sur tôle sandwich

En effet, rappelons que grâce aux méthodes optiques, le mécanicien obtient des cartographies de déplacement sans contact, et surtout en haute résolution spatiale. Jusqu'alors, il n'avait accès qu'à quelques points de mesure en fixant des jauges de contraintes sur les échantillons ou en en positionnant au contact des capteurs de déplacement (ex : capteur inductif LVDT *Linear Variable Differential Transformer*). Le passage des mesures par contact aux mesures sans contact a véritablement révolutionné le monde de la métrologie en mécanique. Certains essais historiques ont d'ailleurs été revus suite aux résultats obtenus par corrélation d'images. A titre d'exemple, l'essai de cisaillement pur a révélé qu'il exerçait également de la traction sur l'échantillon. Tous ces développements permettent donc une meilleure compréhension soit de matériaux, soit des moyens d'essais mis en pratique (Figure 28) [27].

2. VÉLOCIMÉTRIE PAR IMAGERIE DE PARTICULES

Depuis le changement d'affectation et le passage au sein de l'équipe Risques Industriels et Naturels, je me suis plus particulièrement intéressés à la vélocimétrie par imagerie de particules (PIV : *Particle Image Velocimetry*). Le laboratoire a acquis le logiciel de corrélation industriel développé par Dantec Dynamics, pour étudier les travaux en

vélocimétrie de particules par corrélation d'images. Il permet de traiter un grand nombre d'images, y compris en double trame, mais aussi de synchroniser le système d'acquisition et de coupler des moyens d'analyse et d'affichage pour un nombre d'images très élevé. Le schéma de principe est repris ci-dessous (Figure 29).

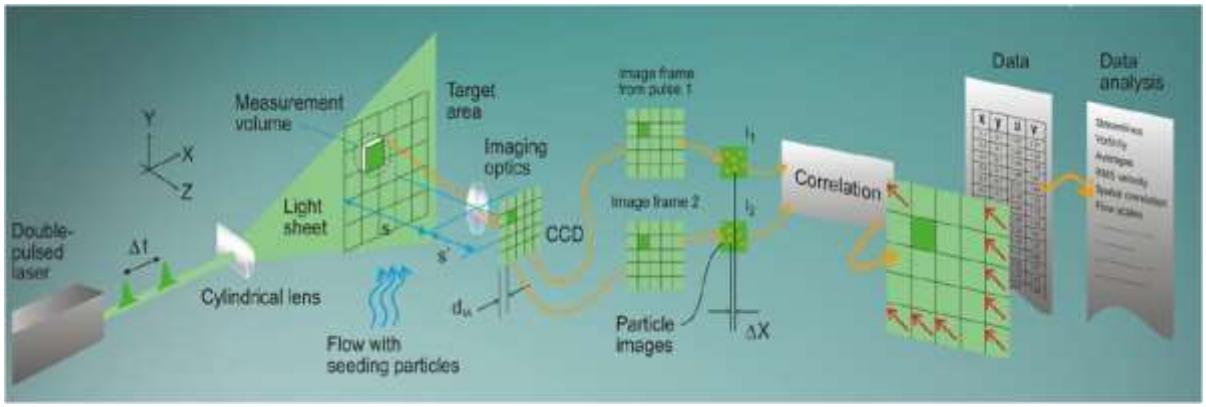


Figure 29 : Principe de la corrélation d'images en PIV (source Dantec Dynamics)

Le principal avantage est de disposer d'un logiciel fiable et qui permet un traitement enchaîné de plusieurs opérations, (de la corrélation à l'affichage des données en passant par différents opérateurs de masquage et de filtrage des données obtenues) sur un grand nombre d'images. De plus, le système peut également être utilisé pour effectuer de la détection et de la reconnaissance de particules (tracking), ce qui s'avère strictement nécessaire pour des applications de suivi de trajectoire de fluide en mouvement (ex. gouttes en dispersion, cf.infra). D'autre part, l'acquisition par notre institut de sources à double cavité laser pulsée permet également l'étude de phénomènes dynamiques.

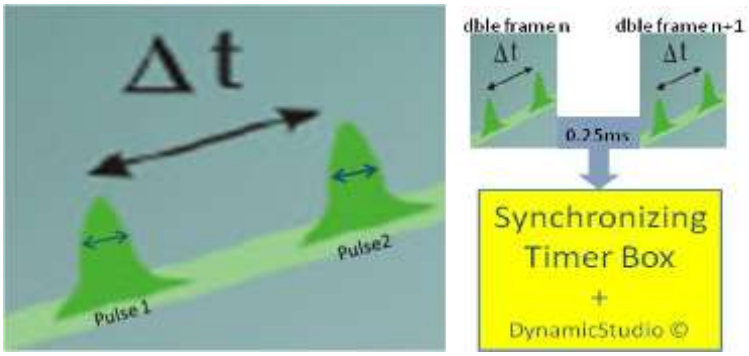


Figure 30 : Principe de l'acquisition double trame, ici à 4000fr/s.

Dans ce cadre précis, une image figée par le pulse laser de durée T_p est corrélée soit avec celle émanant du second pulse (acquisition double trame), soit avec la suivante du même train d'acquisition séparée de T_{fr} = 1/(fr/s), où (fr/s) est la fréquence d'acquisition d'images généralement plus faible.

Il est dès lors possible de comparer des instants très proches (interpulse Δt) pendant le temps d'enregistrement de la séquence complète (Figure 30). C'est un énorme avantage par rapport à une acquisition simple trame, car la résolution temporelle des mesures ne dépend que de la vitesse de rafraîchissement de chaque trame, et non plus de la cadence d'enregistrement d'image. En fait, il existe différents types d'acquisition double trame, soit lié à l'architecture

du capteur qui possède réellement deux trames d'acquisition (capteur « lent »), soit lié au temps d'enregistrement et de rafraîchissement de l'image courante qui est ultrabref (~300ns), permettant ainsi d'enregistrer la « seconde » image juste après la précédente. Ce dernier mode d'acquisition en double trame permet d'acquérir des images en temps résolu avec des sources lumineuses continues intenses (spots HMI[2], soleil, …). En plus des sources continues intenses (laser continu, spot halogène, réseau de diodes superluminescentes), le laboratoire s'est équipé de deux types de sources laser pulsées. Elles sont caractérisées par la longueur d'onde d'émission, l'énergie et la largeur à mi-hauteur temporelle (ou durée) de chaque pulse, et la fréquence de répétition du double pulse. L'intervalle entre chaque pulse est réglable par l'utilisateur et varie typiquement dans l'intervalle [0, 50] ms, en fonction de la cadence double trame. Pour un intervalle de 0 ms, on bénéficie de la puissance additionnée de chaque cavité, ce qui peut être un énorme avantage en acquisition à grande vitesse simple trame.
En synchronisant ces sources d'émissions avec des caméras numériques scientifiques (CCD ou CMOS), deux stations d'analyse permettent de répondre à différentes contraintes dans notre domaine d'investigations (Tableau 2).

Station PIV	Matériau lasant	Longueur d'onde	Énergie par pulse	Répétition double pulse	Caméra (pixels)
PIVSR	Nd-YAG	532nm	250mJ (6-8µs)	15Hz	2048x2048
PIVTR	Nd-YLF	527nm	15mJ (<150ns)	1000Hz	1024x1024

Tableau 2 : Stations PIV

La première station d'analyse, PIVSR, est obtenue en couplant le laser Nd-YAG à une caméra double trame à haute résolution spatiale (2048x2048pixels) qui permet un suivi des pulses à une cadence double trame de 15Hz. PIVSR est principalement dédiée à l'observation en haute résolution spatiale de phénomènes lents ou stationnaires (type écoulement en soufflerie urbaine).
La deuxième station d'analyse, PIVTR, est obtenue en couplant le laser Nd-YLF à une caméra rapide simple ou double trame à résolution spatiale voisine du mégapixel, qui permet un suivi des pulses à une cadence de l'ordre de quelques kHz. PIVTR est plutôt dédiée à l'observation en haute résolution temporelle de phénomènes lents, ou à l'analyse en temps résolu de phénomènes rapides ou brefs (type onde de choc ou explosion). Ces deux stations d'analyse sont couplées avec des accessoires comme des objectifs photographiques lumineux, des générateurs de nappes laser ou des collimateurs fibrés afin de répondre à différents besoins d'éclairage spécifique.
N.B. : *Un collimateur (fibré ou pas) constitué d'une lentille de Fresnel éclairée via un diffuseur fluorescent peut également être adapté en sortie de tête laser afin d'obtenir un faisceau collimaté (ou pas) et permettre une observation colinéaire après traversée du phénomène d'intérêt. L'avantage du diffuseur fluorescent est d'obtenir un système d'éclairage qui ne génère pas de speckle, notamment pour des applications d'imagerie pure où le speckle viendrait bruiter l'image. De plus, comme ces applications d'imagerie* sont très

1 [2]HMI : Hydrargyrum medium-arc iodide: lampe à arc à vapeur de mercure

souvent en haute cadence d'acquisition, les temps d'obturation sont très courts. Ceci demande un bilan photométrique élevé, et donc l'utilisation des systèmes imageurs à pleine ouverture, ce qui engendre des grains de speckle, certes petits, mais souvent de taille proche des particules investiguées.

La nappe laser convient parfaitement pour de la PIV par diffusion sur ensemencement en observation à 90° de la nappe. Elle est obtenue par incidence du faisceau émergent sur un ensemble de lentilles cylindriques. Les faisceaux des lasers pulsés de PIV sont fortement en forme d'ellipse. Ceci nécessite d'optimiser l'orientation de la nappe avec la direction du plus grand axe de l'ellipse du faisceau de sortie. Le montage réalisé au laboratoire est présenté schématiquement à la figure 31. Le système d'éclairage en nappe est couplé à une table de microdéplacement 3D qui permet de balayer la zone d'étude perpendiculairement au plan de la nappe laser. Ceci est seulement possible dans le cas de régime établi. Le système peut accueillir les moyens PIVSR ou PIVTR.

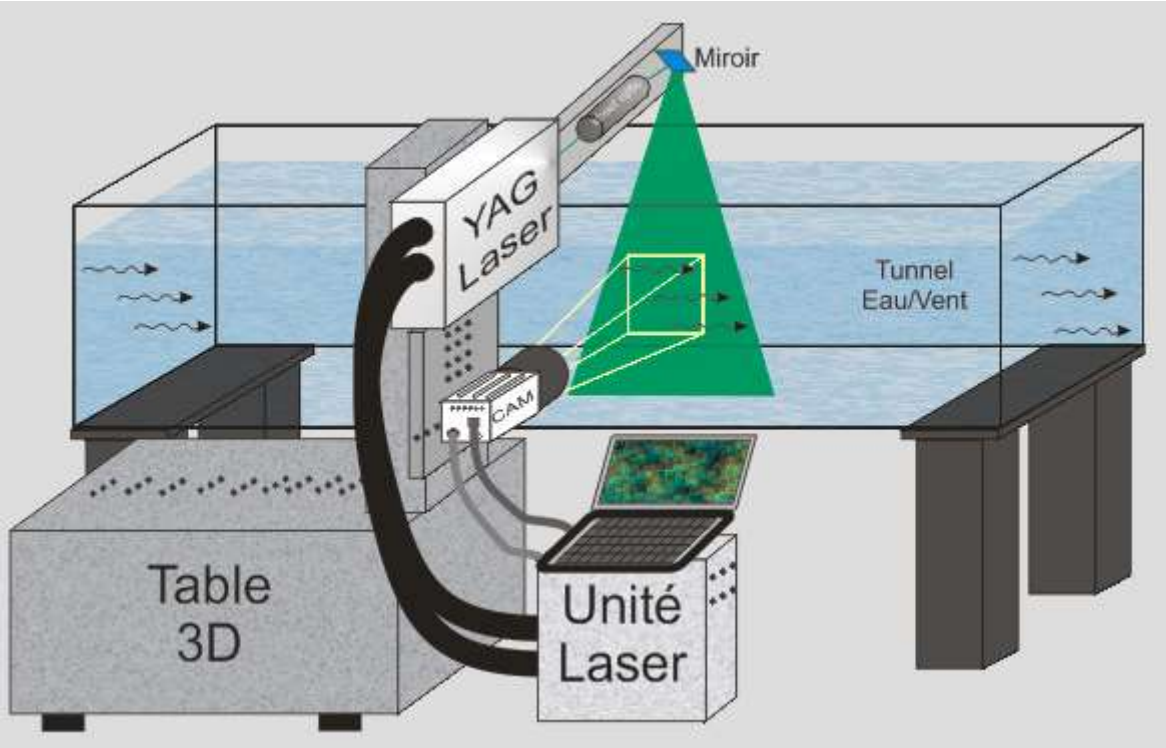


Figure 31 : Schéma de principe de PIV en nappe à balayage de profondeur

Cette configuration a été utilisée pour des essais d'évaporation de liquide en soufflerie avec PIVSR. L'instrumentation réalisée permet l'observation d'un fût de produit industriel (170L) par un hublot et l'éclairage à 90° par une nappe laser (thèse S. Forestier). L'ensemencement est réalisé par de la fumée injectée à la prise de vent de la soufflerie. Les résultats ont été obtenus après acquisition pendant une minute du phénomène en régime stationnaire puis traitement de corrélation via DynamicStudio.

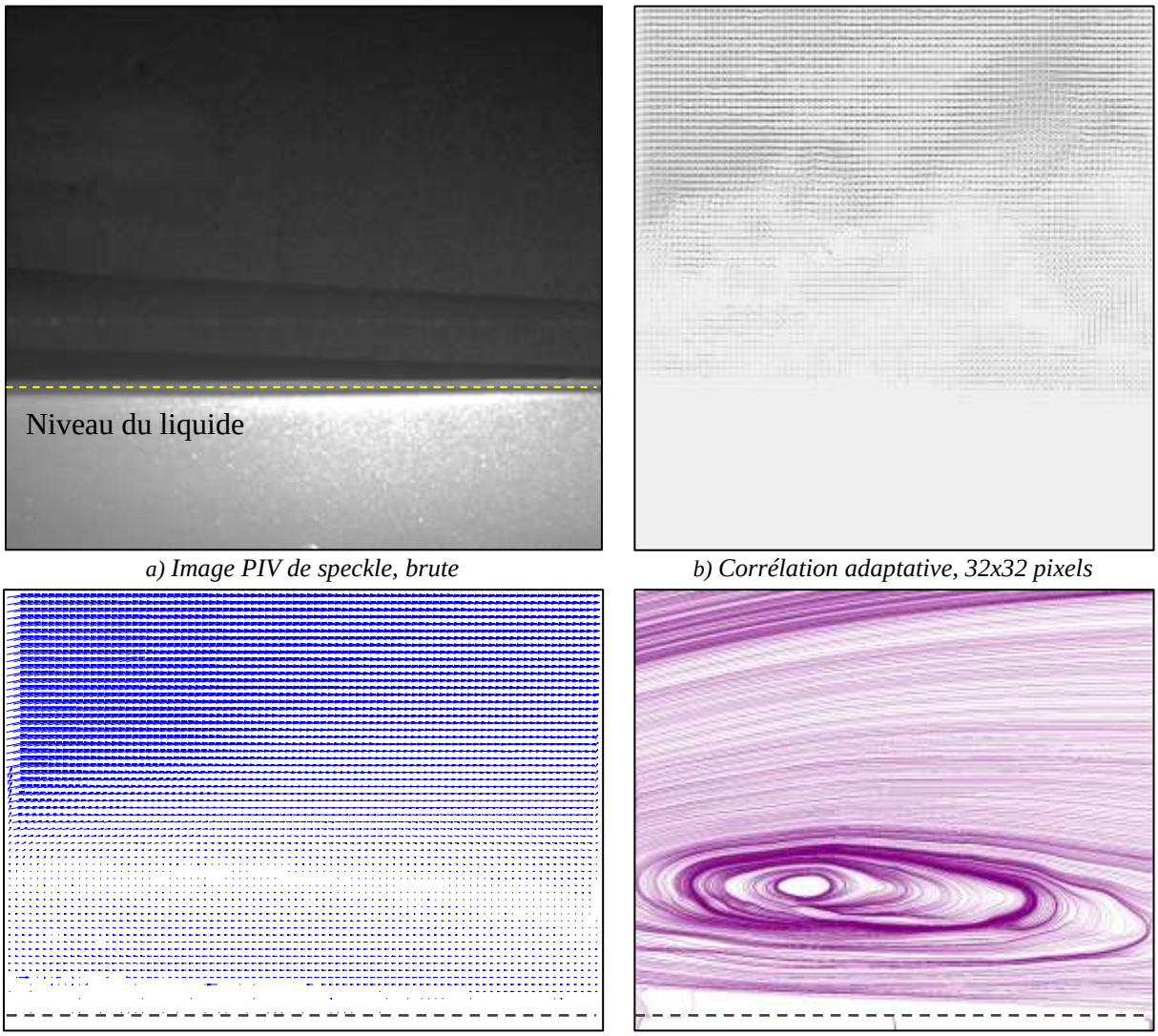
L'analyse par corrélation adaptative permet de déterminer les vecteurs-vitesse des particules. Les caractéristiques de cette analyse sont:

- Taille finale de la fenêtre de recherche : 32x32 pixel.
- Taux de recouvrement : 50%, horizontal et vertical.
- Nombre d'itérations : 2.

Un exemple des résultats d'acquisition et de traitements postérieurs (champ moyen, lignes de courant) est présenté à la figure 32. Les images sont issues d'expériences de PIVSR au-dessus d'une nappe d'eau contenue dans un fût cylindrique de 170L. Le diamètre du fût est de 48 cm. Le bord d'attaque du fût est à 13 cm du plancher d'une galerie à vent. La nappe de liquide est 3 cm sous le bord d'attaque [28].

Les objectifs de l'essai consistaient à

- Déterminer le profil vertical de vitesse au-dessus de la nappe de liquide
- Déterminer les vitesses d'écoulement au voisinage de la surface.



a) Image PIV de speckle, brute

b) Corrélation adaptative, 32x32 pixels

c) Moyenne de (b) sur 1 minute, rognage sous la surface

d) Ligne de courant, depuis (c)

Figure 32 : Exemples d'image brute et de résultat de PIVSR

La PIV en haute résolution spatiale a également été appliquée en collaboration avec une compagnie de danse (Cie Zéline Zonzon, Nîmes, zelinezonzon.eu) afin de visualiser les mouvements de l'air autour des danseurs. Les danseurs étaient protégés par du tissu noir et des masques laser pendant leur évolution dans la nappe issue d'un laser 200mJ pulsé à 15Hz. Les prises de vue ont été réalisées au théâtre de Nîmes, sur la scène complètement obscurcie et dont l'air portait des particules de talc en suspension afin de générer le signal de PIV.

Ces résultats ont été intégrés à un spectacle de la compagnie ("Se souvenir que l'air nous porte"). Un exemple de résultats est présenté après intégration des vecteurs déplacements (Figure 33).

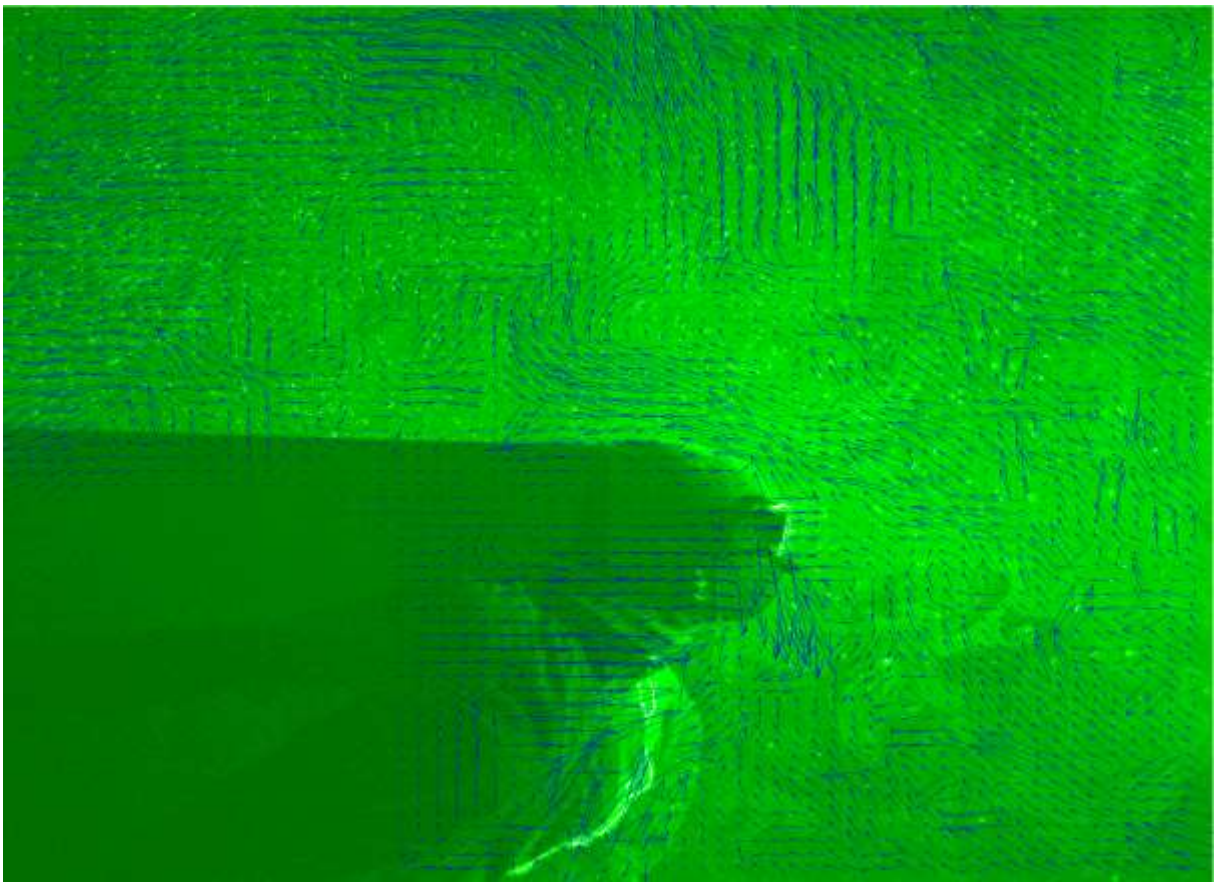


Figure 33 : Résultats de PIV sur l'air autour d'un danseur

N.B. : *Bien que très séduisants d'un point de vue énergétique et du temps de pose, ces lasers ne peuvent pas être utilisés en interférométrie car leur faisceau est loin d'être gaussien et encore moins monomode. Leur cohérence temporelle est également très faible. De plus, le front d'onde en sortie est fortement en amande et ceci doit être pris en compte lors de la génération de nappe laser. Depuis quelques mois, ces sources lasers commencent à être sérieusement concurrencées avec des systèmes à superleds pulsées, dont un des avantages est de ne pas générer de speckle, ce qui est critique pour certaines applications. Des lampes à plasma, très compactes et froides deviennent également disponibles.*

C) ACQUISITION RAPIDE D'IMAGES

HSI: Hiding Speed Intelligently
J. Smith

Depuis 2005, des essais en imagerie rapide sont réalisés. Au départ, l'acquisition rapide d'images et le traitement associé ont permis d'améliorer les performances d'une prothèse de course handisport, puis de mieux caractériser les performances des matériaux de prothèses (Figure 34), grâce à une collaboration humanitaire avec Dominique André, athlète paralympique, multiple médaillé aux Jeux Paralympiques. À l'époque, la caméra ne peut enregistrer que 1000 images de 640x480 pixels à 250 images/seconde. Les points d'intérêt sont matérialisés par des cibles rétroréfléchissantes et la scène est éclairée par des projecteurs halogènes continus, situés à côté de la caméra pour optimiser le retour lumineux. Un algorithme industriel de suivi de cibles a été utilisé (*Motion Analysis Studio, alliancevision, Montelimar*) après calibration.

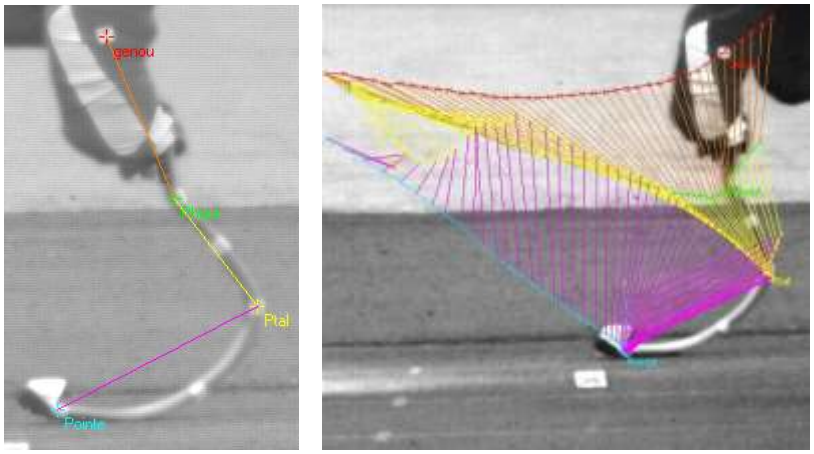


Figure 34: Points caractéristiques et trajectoire d'une prothèse de course

L'acquisition rapide d'images permet non seulement de pouvoir enregistrer des images à une vitesse bien supérieure que celle perçue par l'œil, mais elle permet surtout de restituer le phénomène et de pouvoir l'analyser à différentes bases de temps. Ces bases de temps peuvent être des ralentis ou des accélérés du phénomène investigué. Si le ralenti parait comme une évidence à ce type d'application, il est toutefois nécessaire de garder à l'esprit qu'un phénomène complexe peut montrer plusieurs bases de temps lors de son déroulement. L'observation à vitesse réelle voire accélérée peut également être une source d'informations non négligeable pour sa compréhension.

- **<u>Bases théoriques</u>**

L'enregistrement est la clef de voûte du système d'acquisition rapide d'images. Il peut soit être embarqué soit être déporté. L'avantage du système embarqué est principalement lié à la rapidité du transfert dans la mémoire *in situ* (y compris sur le site de collection de la charge à même le pixel). Son inconvénient majeur peut être la limite de taille de la mémoire embarquée. L'enregistrement déporté requiert le transfert de l'information très rapidement vers des réseaux de disques rapides. Si son principal avantage réside en une taille mémoire quasiment infinie, son inconvénient majeur est la vitesse de transfert entre la caméra et le système porteur de la mémoire externe. Toutefois, de nets progrès sont en cours grâce notamment à la génération de nouveaux disques durs du type mémoire flash de grande capacité (SSD). Depuis l'avènement des caméras électroniques dans les années 2000, les

derniers progrès réalisés en acquisition rapide permettent d'acquérir une série de 180 images, de résolution 924 x 768 pixels, ….à 2 millions d'images par seconde (caméra Kirana, http://www.specialised-imaging.com/news_articles.php). Chaque pixel de 30µm comprend une photodiode et un ensemble de 180 cellules de stockage en buffer circulaire. On est dès lors bien loin des premiers instantanés, réalisé par Muybridge en 1878 avec des appareils photos déclenchés les uns après les autres…avec des bouts de ficelle (Figure 35).

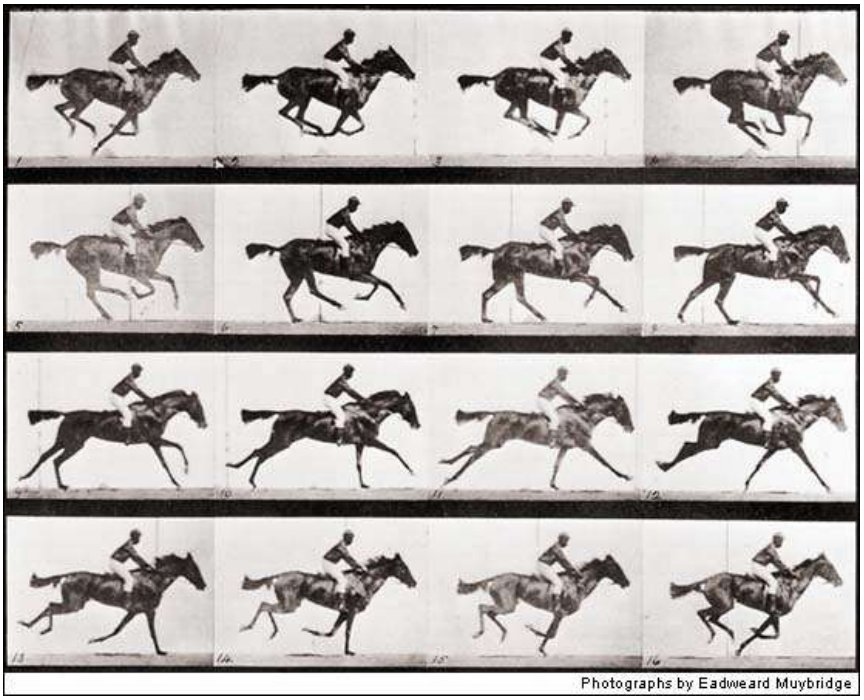


Figure 35: Première décomposition de mouvement par photographie, Muybridge, « The farm », Stanford.

1. CAPTEURS D'IMAGES

Pour enregistrer une image, il faut transformer le signal lumineux reçu en signal électrique. Il existe principalement deux types de capteurs optiques qui permettent de réaliser cette opération : les capteurs à transfert de charges (CCD : Charge Coupled Device) et les capteurs à conversion de charge sur site de création (CMOS : Complimentary Metal Oxyde Semiconductor) [29].

La technologie et les bases principales sur les capteurs d'images sont développées dans un cours en ligne, produit avec P. Picart, et qui est hébergé sur le site Optique pour l'Ingénieur (http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C06/co/OPI_fr_M05_C06_web.html).

Les grandes lignes qui gouvernent les choix d'acquisition et d'utilisation d'un système d'imagerie rapide sont présentées dans les paragraphes suivants.

Par rapport à une émulsion photographique argentique, les capteurs numériques sont environ 100x plus sensibles. On atteint de nos jours des sensibilités, en ISO, proche de 25600. Ceci provient du fait que la principale technologie utilisée est celle de l'effet photoélectrique dans les semiconducteurs. Dans une jonction semiconductrice, et sous certaines conditions, un photon incident génère une paire électron-trou. L'électron est ensuite piégé dans la bande de conduction par application d'un champ électrique afin d'empêcher la recombinaison avec le trou. Par rapport aux capteurs CCD, les capteurs CMOS sont beaucoup plus rapides et moins consommateurs d'énergie. En effet, dans le cas des CCD, la charge doit être transférée de

proche en proche jusqu'à un convertisseur en bout de ligne d'un registre à décalage. Pour le CMOS, la conversion de la charge se produit directement sur site via un amplificateur intégré au pixel (Active Pixel Sensor) et chaque pixel peut donc être lu indépendamment des autres.

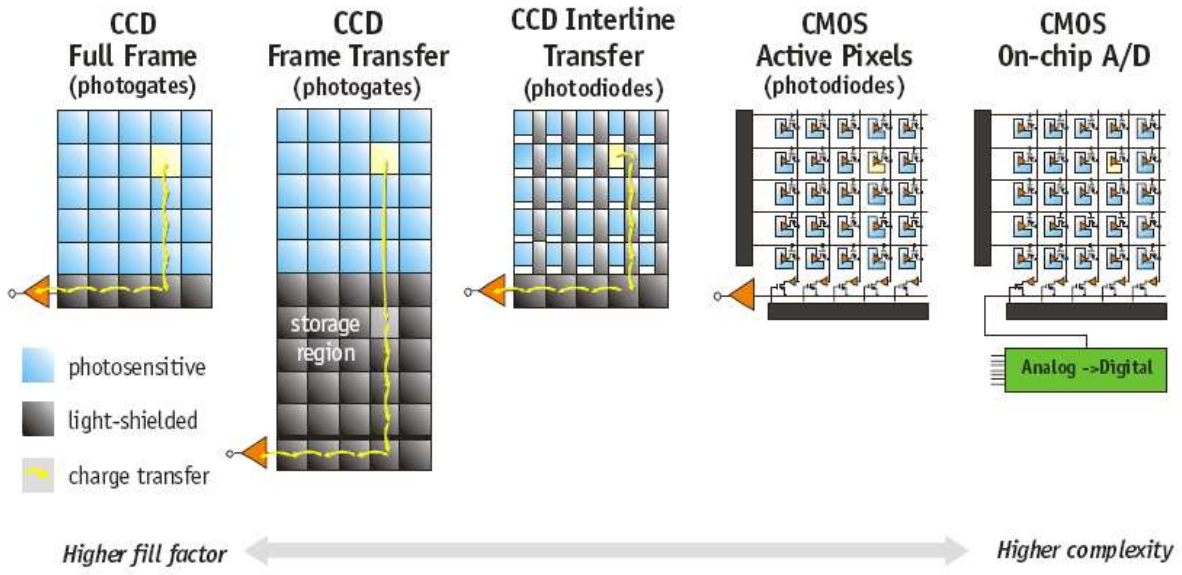


Figure 36: Types et architectures de capteurs (source DALSA)

La qualité d'un capteur est principalement liée à la taille des pixels et à leur efficacité de conversion de la lumière en charge ou en tension. Un autre paramètre est le bruit électronique, principalement thermique, qui caractérise une image obtenue à capteur obturé (courant d'obscurité). Ce paramètre est prépondérant pour un temps de pose long, mais également pour permettre une image uniforme notamment avec des capteurs CMOS. La complexité architecturale permet d'optimiser soit le transfert de charge, soit la performance intrinsèque du capteur, jusqu'à l'obtention finale d'une information directe en sortie du « CMOS On-chip A/D », qui n'a plus rien à voir avec l'image de départ. La figure 36 représente l'évolution des capteurs disponibles de nos jours et les principales architectures.
L'Institut des Sciences des Risques dispose à présent de caméras rapides de résolution et de sensibilité différentes (Tableau 3).

Propriétés / Type de Caméra	Résolution (pixel)	Résolution décimable	Taille pixel (µm)	Cadence (fr/s) Pleine résolution	Sensibilité	Mémoire embarquée	Connectique	Taux de transfert	Coût approximat
Photron SA3	1024*1024≤10bits	O	17sq.	2000	VIS +++	O	RJ45	2Go/s	30k€
Photon Focus MV1-D1312(I)-100	1312*1082 ≤12bits	O*	8sq.	67	VIS-NIR +	N	GiGE	800Mo/s	2k€
AlliedVision PikeF032b	640*480 ≤16bits	O	7.4sq.	202	VIS ++	N	IEEE 1394b	800Mo/s	1.5k€

Tableau 3 : Caméras rapides disponibles (gris : CMOS, blanc : CCD, sq.=pixel carré)

Le plus souvent ces caméras sont couplées à des sources lumineuses puissantes (spots HMI, diodes superluminescentes, lasers…) afin de pouvoir réduire le plus possible la durée d'exposition, qui conditionne directement la vitesse de transfert. La vitesse de transfert d'une image dépend non seulement de l'exposition de chaque pixel, mais aussi de l'architecture (multicanaux, multiplexage par « taps », …), qui peut permettre ou pas, une réduction de la surface sensible et donc une augmentation de la cadence image au détriment de la résolution spatiale. La taille des pixels joue également un rôle clef dans le processus d'acquisition et dans la qualité de l'image. De gros pixels sont plus sensibles, mais la résolution et aussi la fonction de transfert de modulation du capteur seront plus faibles. Il faut donc réaliser, lors du choix du capteur, un compromis entre sensibilité, vitesse et résolution. Enfin, notons que la fonction de transfert de modulation du capteur doit être accordée avec celle de l'optique, afin d'obtenir un intervalle de recouvrement les plus étendu possible. Ceci permet notamment de ne pas tronquer l'information fréquentielle (ex. petits détails) lors de la numérisation (Tableau 4). Cette résolution limite, encore appelée NF pour fréquence de Nyquist s'exprime en paire de lignes par millimètre (lp/mm) et on a :

$$\mathbf{NF = 1/(2*taille_{pixel})}. \qquad \text{(eq 34)}$$

Pixel (µm)	1.45	2.7	3.4	4.6	5	6.4	7	10	13
NF (lp/mm)	345	185	147	109	100	78	71	50	38

Tableau 4 : Fréquences de Nyquist limites en fonction de la taille de pixel (vision machine)

La fonction de transfert de modulation (FTM) du système optique dépend principalement de l'ouverture de l'optique, du nombre de lentilles et de leur agencement.

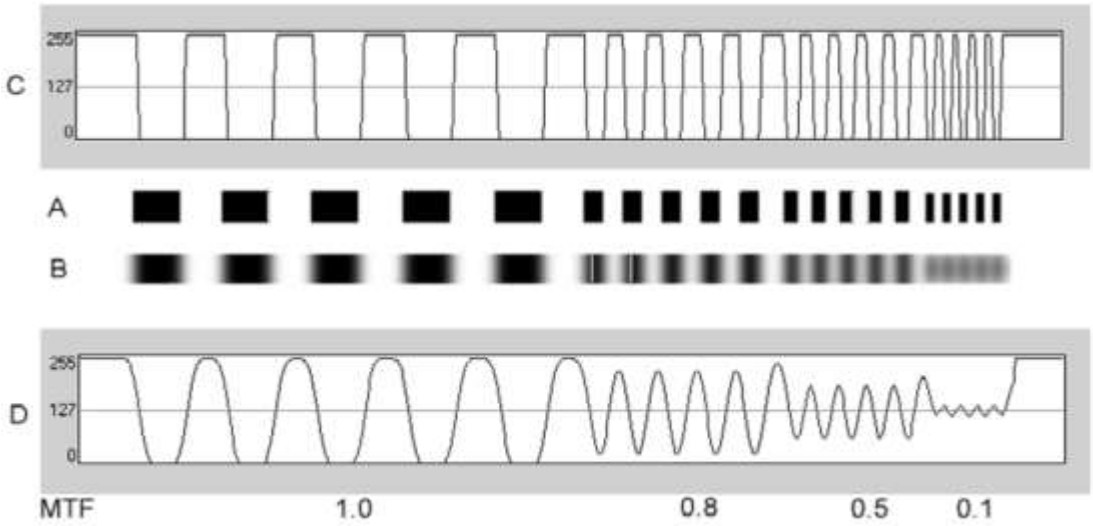


Figure 37: Exemple de détermination de la FTM

Elle mesure le transfert de la modulation ou du contraste de l'objet vers l'image finale. On l'obtient en imageant une mire étalon binaire **A**, ou sinusoïdale en niveaux de gris **B** (Figure 37), puis en analysant le contraste donné par :

$$\mathbf{FTM= (I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min})} \qquad \text{(eq 35)}$$

On peut également procéder de même avec une mire binaire du type USAF 1951 (Figure 38).

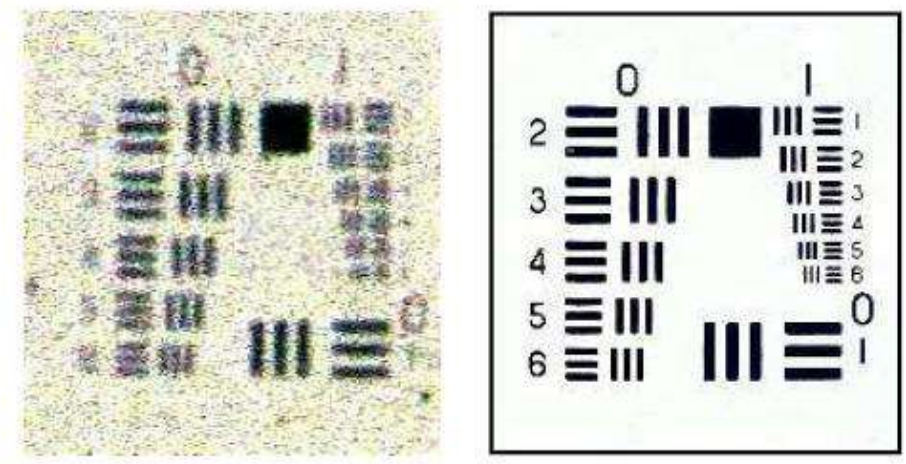


Figure 38: Mire USAF1951, images non résolue et résolue

N.B. **:**

- *Il est toujours préférable d'utiliser la FTM plutôt que le FQS (Facteur de Qualité Subjective), qui est relatif à l'œil (soit un capteur à 20lp/mm).*
- *Pour l'imagerie couleur, la* FTM_{bleu} *est meilleure que la* FTM_{rouge} *puisque* $\lambda_{bleu} < \lambda_{rouge}$.

Avant de s'enquérir de sa FTM, le type d'objectif potentiellement utilisable doit pouvoir couvrir l'entièreté du capteur et avoir une baïonnette de montage compatible avec la monture de la caméra. Sur site d'essais, les contraintes environnementales (dégagement du site, contraintes de sécurité, …) peuvent en effet amener un changement soudain de l'optique adéquate…

Enfin, lorsqu'on travaille en résolution réduite (pour augmenter la cadence ou le nombre total d'images enregistrables dans une taille mémoire donnée), il ne faut pas calculer la formule optique de l'objectif en tenant compte de la taille réelle du capteur, mais bien en fonction de sa taille décimée correspondant à la cadence image.

Le choix de l'optique optimale peut s'effectuer avec quelques critères simples (Figure 39**)**, afin de se rapprocher au mieux du choix disponible, soit dans le commerce avant l'essai, soit dans son stock d'objectifs sur site. En connaissant le champ de vision et le capteur utilisé, on calcule la distance focale optimale en fonction de la distance de travail :

f' = (taille capteur*distance de travail) / (champ de vision+taille capteur) (eq 36)

Si la distance de travail est figée, le choix de f' est limité. Et si la distance de travail est très courte et l'objet large, f' est très petite et la distorsion de l'image est forte, auquel cas il faudra corriger l'image de ces fortes aberrations en imageant une mire connue de distribution de points équidistants par exemple. Si par contre la distance de travail est élevée, le recours à de grandes distances focales est nécessaire mais ceci implique souvent une réduction de la profondeur de champ (inversement proportionnelle à f') et l'acquisition d'optiques lumineuses très coûteuses (grandes focales, grandes ouvertures ex. : 300mm, 2.8). Il faut en permanence optimiser le compromis entre distorsion et champ de vision, et aussi réduire, ou compenser, les aberrations optiques et chromatiques par une calibration préalable.

Figure 39: Sélection d'une optique adaptée

2. IMAGES

Une image est le résultat de la transformation optique d'un objet éclairé ou lumineux. En imagerie rapide, on l'assimile à son signal numérisé soit « une matrice 2D de valeurs de l'intensité lumineuse, où I(x, y) est la luminosité du point (x, y). Cette numérisation peut principalement être réalisée par balayage d'un capteur linéaire ou par échantillonnage spatial par un capteur matriciel (Figure 40). Le plus petit élément d'image est le pixel (contraction de "picture element").

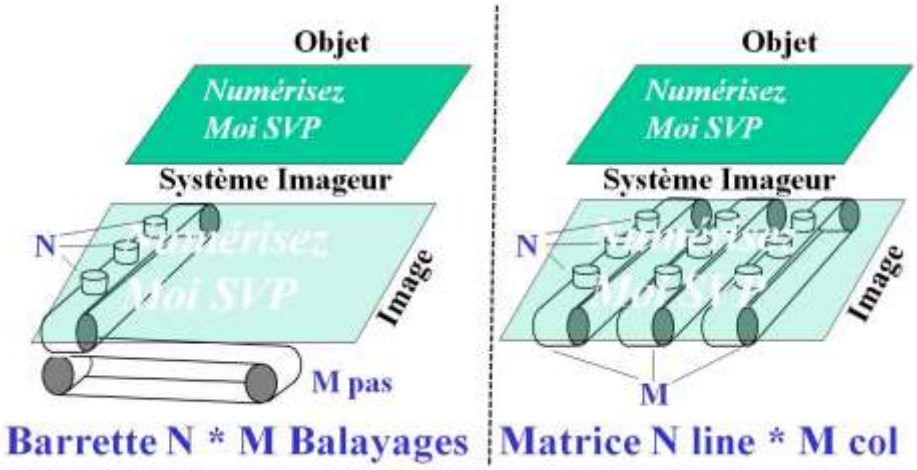


Figure 40: Mécanismes principaux de numérisation d'une image

Il en résulte donc une image numérique caractérisée principalement en termes de :

- ✓ Résolution spatiale: nombre de lignes et de colonnes MxL
- ✓ Codage du niveau d'intensité: en bits... 2, 8, 10, 12, 14,16, 32 bits, floats
- ✓ 1 à 4 couches de représentations: gris ou couleur + overlay (alpha)
- ✓ Format de fichier numérique: RAW, TIF, BMP, JPG, ...

Les critères de résolution spatiale ont été abordés précédemment. Concernant la résolution « énergétique », le codage en bits de l'image est directement lié à la taille du puits à électrons

réalisé dans la jonction du semiconducteur. Le nombre de bits correspond à l'échantillonnage du signal de remplissage du puits et de la capacité du puits plein (FWC, Full Well Capacity), qui se mesure en nombre d'électrons. La FWC peut toutefois contenir d'autres électrons que ceux générés par l'effet photoélectrique de l'image (Figure 41). Dans ce cas la qualité de l'image observée dépendra directement des autres électrons collectés et qui peuvent provenir de différentes sources (dark current, smearing, blooming[3] et pixels défectueux).

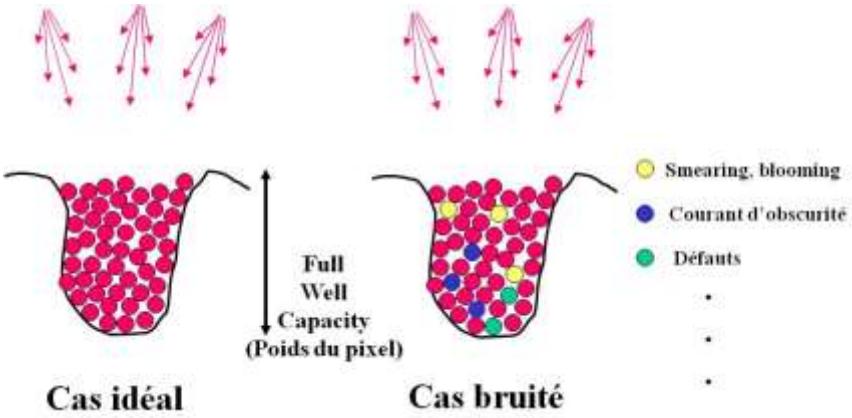


Figure 41: Vue schématique du remplissage en électron d'un pixel

Les principales images scientifiques sont codées de 8 à 32bits afin de discrétiser au mieux la variation lumineuse enregistrée. Toutefois en imagerie rapide, la dynamique est souvent restreinte à 8 ou 12 bits afin de conserver un taux de transfert de l'information (en pixel/seconde ou en Mo/s) qui autorise une fréquence d'acquisition élevée. On peut réaliser des images en couleurs soit grâce à des filtres de Bayer disposés à même le capteur (au détriment de la résolution), soit par agrégation de trois images issues de trois capteurs différents après passage dans un système de prismes dispersifs (pleine résolution). Il est également possible de sélectionner la longueur d'onde par sa pénétration dans le semiconducteur (capteur *Foveon*, *www.foveon.com*). Chaque niveau lumineux est discrétisé en un certain nombre de bits (le maximum disponible en format RAW) puis différents systèmes d'encodage pour le stockage peuvent exister, les uns maximisant la qualité de l'image (TIFF) et les autres laissant à l'utilisateur la possibilité de décimer celle-ci (JPEG). Notons qu'à l'affichage, il existe principalement 4 couches de représentations en couleur : une pour chaque couleur fondamentale (rouge, vert et bleu, en synthèse additive) et la dernière, dite couche alpha ou overlay, permettant d'incruster des informations dans l'image sans modifier son contenu.

Dans nos cas d'étude, les images sont le plus souvent sauvegardées en format bitmap (BMP) qui réalise un bon compromis entre taille de la mémoire et qualité de l'image. Si les scènes enregistrées présentent des variations importantes de contraste, dans des régions spatiales différentes, il est primordial de les enregistrer en format TIFF, qui permet de conserver une dynamique de 10bits à 16bits. On peut ensuite optimiser l'affichage ou le traitement sur une palette glissante de 8 bits (shift bits), centrée sur les niveaux hauts ou les niveaux bas par

[3] Blooming (éblouissement) : apport d'électrons par le puits voisin, lorsque celui-ci déborde (CCD seulement). Smearing (trainée) : apport d'électron pendant le transfert si le capteur reste en mode de collection de photons. Dark Current (courant d'obscurité) : apport d'électron par bruit thermoionique des capteurs, principalement non refroidis.

exemple. L'overlay peut apparaitre en permanence afin d'afficher les conditions de prises de vue (cadence, temps d'obturation, résolution …).

3. TRAITEMENTS

L'acquisition rapide d'images est un merveilleux outil, qui, paradoxalement peut devenir très chronophage…après l'acquisition. Le traitement des séquences acquises peut s'avérer simple si l'aspect du phénomène investigué change peu pendant toute une séquence. Le plus bel exemple est donné par une séquence d'images PIV d'un écoulement établi. Dans ce cas, il est possible de masquer la séquence entière d'images avec les mêmes contours et d'appliquer les mêmes paramètres de dépouillement tout au long de cette séquence. Le travail en temps déporté (batch processing) est dès lors possible et peut également exploiter toutes les ressources de tous les processeurs d'un ou de plusieurs ordinateurs. Par contre, dès que le phénomène étudié change rapidement (rupture brusque, explosion), l'aspect des images varie énormément de l'une à l'autre et certains traitements (seuillage, binarisation, …) ne peuvent plus s'appliquer sur l'entièreté de la séquence mais seulement sur des parties de celle-ci. L'opérateur doit donc intervenir au cours du développement, et la quantité d'informations à traiter, ou le nombre d'interventions à effectuer, peut devenir considérable. Certains critères très humains sont également parfois difficilement traduisibles vers un logiciel de dépouillement, *a fortiori* si celui-ci est industriel et fermé. Une forte contribution des travaux de recherche menés concerne l'exploitation de ces films rapides et le développement des interfaces de traitement qui sont conviviales, ouvertes, adaptables et calibrées. Elles ne seront pas décrites de manière exhaustive dans ce manuscrit mais les principaux axes du projet effectué seront commentés.

En ce qui concerne directement le choix du matériel d'imagerie rapide, il doit permettre de s'adapter à différentes configurations, tout en réalisant le compromis entre fréquence d'acquisition d'images, résolution …et éclairement disponible. Ces critères de choix sont évidemment pondérés par le coût des matériels existants. Il est également possible de développer des montages optiques permettant des éclairages spécifiques (éclairage diffusant uniforme, éclairage collimaté en grand champ, …). Les sources lumineuses sont également choisies en fonction de l'application. Récemment, les LEDs superluminescentes permettent d'atteindre des flux lumineux très élevés, même en régime pulsés, consommant peu d'énergie avec d''excellents rendements. Certaines sources sont directement interfaçables avec des logiciels commerciaux (ex *DynamicStudio de Dantec*).

Par contre, si certains fabricants de caméras rapides (*Photron, Phantom*) vendent leur matériel avec le logiciel d'acquisition et d'affichage, ce n'est pas le cas pour d'autres types de caméras (*Pike, PhotonFocus*) qui doivent être interfacées pour l'utilisateur. Il est donc nécessaire de développer une interface utilisateur qui permette au plus grand nombre non spécialiste (technicien, doctorant …) d'utiliser le matériel dans l'environnement de recherche.

Ceci concerne en particulier l'acquisition en buffer tournant qui permet de stocker les images directement dans une mémoire tampon, résidente dans la caméra, en RAM du PC, ou sur disque dur rapide par streaming (Figure 42). L'acquisition en buffer tournant permet d'enregistrer un certain nombre d'images, lié à la capacité de la mémoire allouée. Lorsque l'événement d'intérêt se produit, un signal de déclenchement peut alors arrêter l'acquisition

du buffer tournant à différents endroits (début, fin, position utilisateur), ce qui permet par exemple de pouvoir "revenir en arrière" après l'acquisition.

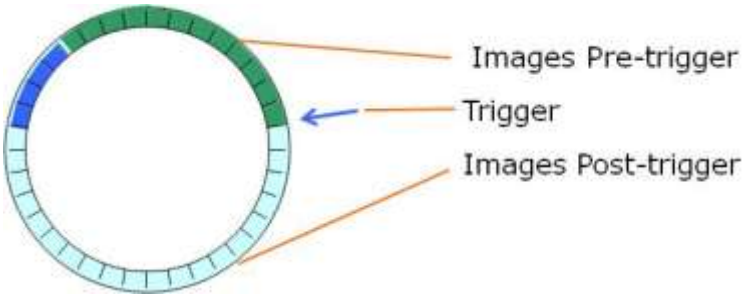


Figure 42: Principe de l'acquisition en buffer tournant

Ce type d'acquisition est prépondérant pour des phénomènes très rapides (cf.infra). Certains types de caméras sont même capables de déclencher sur des variations de niveau de gris d'une section de l'image « live ». Dans le cadre de ces travaux, un déclencheur manuel a été réalisé, ou des déclencheurs acoustiques ont été utilisés. Ils envoient un signal de 5V TTL et à la caméra et au système d'acquisition de données (pression, température, …). Le système complet permet de disposer d'une interface permettant également d'afficher l'effet des différents paramètres d'acquisition et de vérifier la bande passante et la quantité mémoire allouée à l'acquisition en cours. Pour synchroniser plusieurs caméras, on peut soit asservir les caméras compatibles en fréquence "hardware" ("master-slave frequency sync" chez Photron), soit générer un signal périodique de synchronisation externe qui pilote chaque caméra en acquisition synchrone "software". Le nombre croissant de caméras et leurs différents types de transmission ont conduit à l'acquisition d'un système industriel qui permet ces différents réglages (*DyVas, alliance Vision, Montelimar*).

Enfin les formats de sortie (codage, dynamique, extension) doivent être compatibles avec les logiciels d'affichage courant, et aussi avec les algorithmes de traitement. L'édition, la retouche, et la sauvegarde de ces fichiers doivent également être aisées et pérennes.

Les traitements des séquences enregistrées peuvent être de différentes natures, du simple redimensionnement de la zone d'intérêt à une analyse morphologique complète, comprenant :

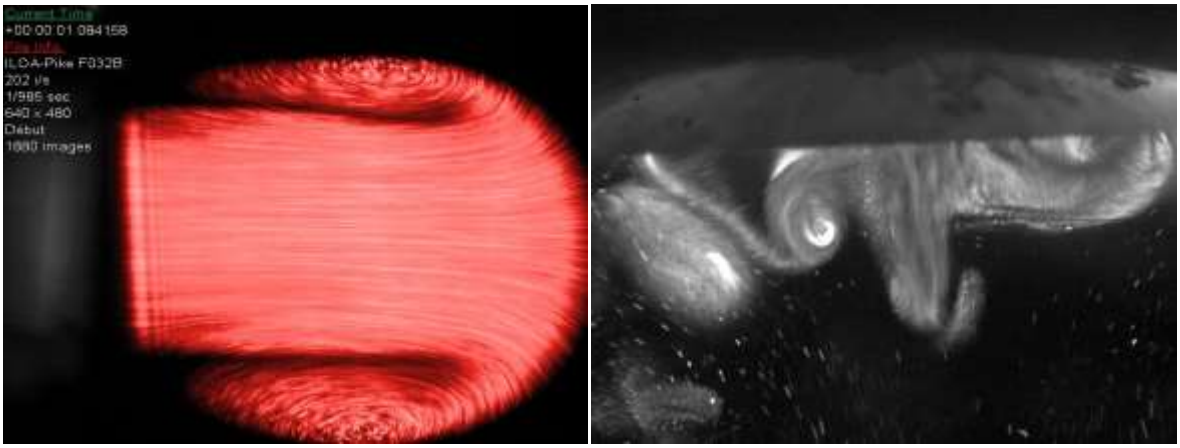
- masquage,
- soustraction de référence ou de fond continu
- filtrage,
- seuillages et/ou binarisation
- morphologie binaire ou niveau de gris
- détection d'objets spécifiques (disques, fronts, …)
- classification et filtrage des objets
- édition d'un fichier de rapport (position, taille, surface, circularité, vitesse, …).

Une partie dédiée à l'assemblage d'images spatialement successives a également été réalisée (stitching sur mires). Cette opération permet d'obtenir une scène étendue à pleines résolutions spatiale et temporelle.

- **<u>Applications</u>**

Au laboratoire, l'imagerie rapide a permis d'étudier des jets liquide-gaz et de caractériser les particules éjectées (taille, vitesse, forme du jet) en couplant la caméra rapide à une nappe de lumière laser (100mW). Deux exemples de résultats d'acquisition à 200 images/seconde (fr/s)

simple trame sont illustrés à la figure 43 en collaboration avec des entreprises présentes dans l'incubateur de l'EMA.



a) Jet d'huiles Versane© (surface 12cm^2) *b) mélange gaz-liquide Kemstream© (surface 2cm^2)*

Figure 43: Collaboration avec des entreprises de l'incubateur (Innov'Up)

De nombreuses réalisations importantes ont été obtenues en collaboration avec le CEA Gramat, et notamment en visualisation de phénomènes hautement transitoires. Les interfaces utilisateurs-caméra et les logiciels d'interprétation d'images ont été développés ainsi que la mise en place du système complet sur site pour des essais en grande ampleur (optimisation et choix des caméras en acquisition ultra rapide d'image à 10^6images/s au maximum, mise en forme, fusion, et interprétation des images provenant de plusieurs caméras synchronisées). Les développements ont notamment porté sur l'optimisation de la prise de vue en situation réelle d'essais en grande envergure. Ils ont permis la détermination de la propagation de fluide en interaction avec une onde de choc en champ libre après impact d'un projectile super véloce.

RUPTURE BRUSQUE D'UN RÉSERVOIR ATMOSPHÉRIQUE DE LIQUIDE

Les phases d'éjection de liquide suite à la rupture d'un container (fût industriel de 60L, 620mm de haut pour 320mm de diamètre) soumis à un impact de projectile à très grande vitesse ont été filmées par des caméras rapides lors de différents essais, et dans différentes configurations (Convention ARMINES n°40827). Ces essais ont été décrits dans les différents rapports relatifs à cette étude et les principaux résultats ont été publiés lors de la thèse de Nicolas Lecysyn [30][31][32].

Trois points principaux se dégagent de l'observation visuelle de ces essais:

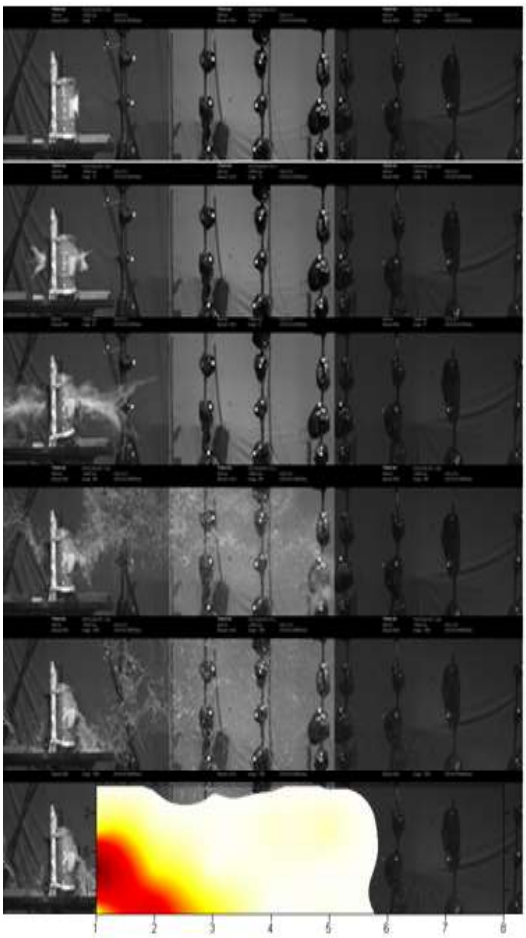
- l'abondance des données relatives au grand nombre d'images enregistrées par chaque caméra,
- l'étendue spatiale du phénomène d'éjection,
- le caractère transitoire et la diversité des phénomènes observés.

On en déduit aisément qu'il est humainement très difficile d'exploiter l'ensemble des prises de vue sans mettre au point des méthodes et outils de traitement automatique ou semi-automatique des données et séquences enregistrées.

Le résultat de l'acquisition d'images pour un essai consiste en une série d'images relative à chaque caméra. Cette série d'images est caractérisée par un fichier généré lors de son enregistrement par le logiciel d'acquisition Photron (fichier "cameraXXvueYYimageZZ.cih).

Afin d'alimenter une base de données expérimentales par des résultats émanant de l'analyse en imagerie rapide, il est donc primordial de générer des résultats de cette analyse qui sont compatibles (spatialement et temporellement) avec ceux obtenus par d'autres moyens d'essais (radars, fluxmètres, capteurs de pression, …) afin que l'utilisateur final puisse en disposer aisément, et les relier aux images correspondantes. L'objectif final, au terme de cette étude était donc de disposer d'un module d'analyse par imagerie rapide, qui permet d'extraire un certain nombre d'informations comme :

- durée et vitesse de certains phénomènes hydrodynamiques (jet inertiel, formation d'une "langue" liquide, déplacement du nuage liquide) ;
- répartition des éléments constitutifs du jet liquide (filament, nébulosités, gouttes,…) par mesure de déplacement et de dimension ;
- choix de tranches particulières du jet à caractériser.



Phase 0 : Impact et traversée du fût

Dissipation d'énergie cinétique dans le fût Déchirure et déformation du fût.

Phase 1 : Projection initiale rapide

Gouttes relativement petites
Jet fortement dirigé selon l'axe du tir selon une forme de cône creux (cavitation).

Phase 2 : Jet à vitesse moyenne

Gouttes plus grosses
Vitesses plus faibles.

Phase 3 : Jet à vitesse faible

Gros paquets de fluide
Etirement, détachement
Films liquides
Fragmentation / coalescence.

Phase 4 : Vidange Bernoulli

Phase 5 : Evaporation

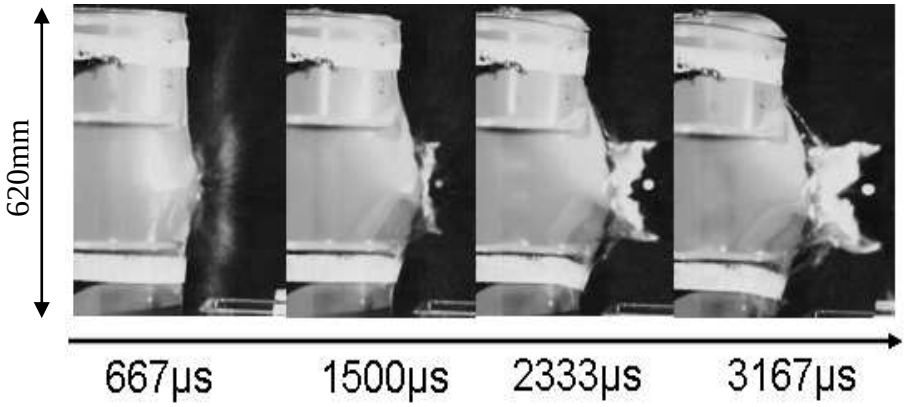
Figure 44: Conséquences de l'interaction d'un projectile hypervéloce sur un container atmosphérique

Le projectile est constitué d'une bille métallique de 10mm de diamètre véhiculée avant libération par un sabot qui est propulsé à environ 1200m/s à la sortie d'un canon à poudre. La figure 44 synthétise l'enchainement des différents phénomènes dégagés pour chaque phase identifiée et permet de mieux comprendre le terme source d'une pollution potentielle après rupture de confinement d'un tel stockage. Six phases ont été identifiées, dont quatre requièrent une attention particulière pour un traitement d'images approprié après acquisition à 4000fr/s. La phase 5 présente une image composite, résultant de l'addition d'une cartographie d'évaporation d'ammoniaque (contenu dans le fût) obtenue par un maillage de capteurs

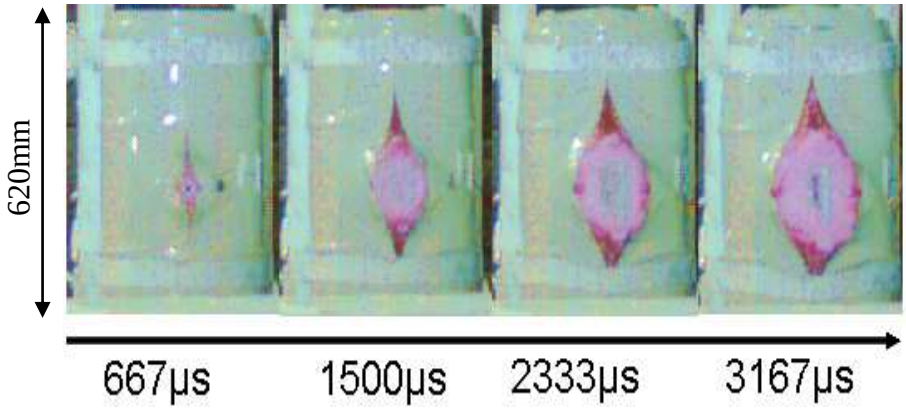
chimiques (type PID, détection par photo ionisation) pour le même essai d'impact. Le container et son environnement portent également des cibles coopérantes optiquement afin d'identifier des distances au cours de l'essai.
Le champ de vue présenté résulte de l'assemblage composite de trois caméras rapides latérales, avant correction des luminosités de chacune d'entre elles. Le champ complet correspond environ à 18m. L'acquisition, réalisée en plein jour, en extérieur, utilise conjointement l'éclairage solaire et des spots HMI additionnels de 4kW. La distance de sécurité des caméras, protégées par des abris munis de hublots, est de l'ordre de 20m.

Phase 0. Impact et traversée du fût:

Les images aux premiers instants après impact sont présentées en figure 45 et portent également les temps caractéristiques.



a) vue latérale



b) vue de face (côté canon)

Figure 45: Premiers instants après impact

La vue latérale permet d'obtenir les vitesses d'éjection aux premiers instants ainsi que la forme caractéristique (en langue de serpent) du jet. Cette forme caractéristique persiste jusqu'à sa déchirure en ligaments. La vue de face peut être utilisée pour mesurer l'évolution de la brèche aux tous premiers instants.
Un essai a été réalisé avec du liquide coloré et une acquisition rapide en couleurs. Ce type d'essai permet d'obtenir également une cartographie au sol du rejet. Toutefois, l'utilisation d'un colorant nécessite un nettoyage conséquent du site de tir et peut entraîner des changements physico-chimiques du liquide étudié.

Phase 1. Projection initiale rapide

Figure 46: Vue latérale de traversée du container

Deux phénomènes d'intérêt peuvent coexister: l'éjection de gouttes relativement petites et un jet fortement énergétique dirigé selon l'axe de tir, en forme de "langue de serpent" (Figure 46). Si la scène est zoomée, les petites gouttes peuvent éventuellement être résolues (soit à 20m, une métrique de 80µm/pixel pour un objectif à longue distance focale type téléscope Questar FR1 MKIII 1400mm couplé à une caméra rapide mégapixel). Dans ce cas, l'information pertinente est de mesurer la vitesse par tracking et si possible la taille de ces gouttelettes (granulométrie). Si la vue est en plan plus large, seule la vitesse de progression du liquide peut être prise en considération, par exemple par corrélation.

Phase 2. Jet à vitesse moyenne

L'éjection de plus grosses gouttes à vitesse plus faible est prédominante, les particules sont donc mieux détectables en plan large, et leur séparation d'image en image bien prononcée aux cadences classiques de travail des caméras (par tracking et pas par corrélation).

Phase 3. Jet à vitesse faible

En fonction de l'extension spatiale de la scène, on distingue plusieurs phénomènes dont la formation de paquets liquides, leur étirement et leur détachement, l'apparition de films liquides, puis la fragmentation et/ou la coalescence. Toute la difficulté d'un traitement uniforme d'une scène de forte extension spatiale se révèle ici. Il existe par exemple le besoin de mesurer les vitesses de particules en fin de trajet (caméra la plus loin du fût), et aussi des vitesses de progression de films liquides. Ceci conditionne l'utilisation d'un logiciel de dépouillement spatialement fenêtré.
Les principales contributions sont relevées et commentées dans ce paragraphe, et ont d'ailleurs fait l'objet d'une communication orale [33]. L'exploitation des premières images a mis en évidence qu'un certain nombre de techniques d'analyses d'images doivent être appliquées successivement afin d'aboutir à des images exploitables. Par ailleurs, en fonction des types de résultats souhaités, les traitements d'image à mettre en place diffèrent.

Le tableau 5 récapitule de manière succincte différentes techniques de traitement d'images qui ont été mises en œuvre lors de l'exploitation des premières campagnes d'essai. Le tableau fait apparaître différentes techniques utilisées en fonction des grandeurs physiques étudiées.

Phase d'éjection	Données expérimentales extraites	Technique utilisée
Impact et pénétration du projectile	**Vitesse du projectile avant et après impact**	**Flou optique, filtrage spatial, morphologie, seuillage**
Éjection de liquide à haute énergie	**Suivi lagrangien des composantes caractéristiques du jet**	**Reconnaissance de forme, suivi de particules**
Éjection de liquide à basse énergie, expansion	**Suivi lagrangien des composantes caractéristiques du jet**	**Segmentation d'image, détection de contours**
Fragmentation du liquide en filament	**Granulométrie, vélocimétrie**	**Seuillage, analyse de particules, reconnaissance de circularité**

Tableau 5 : Techniques de traitement d'image

Les données de calibration géométrique sont obtenues en positionnant une mire calibrée (Figure 47) à différents endroits de la scène investiguée (Figure 48).

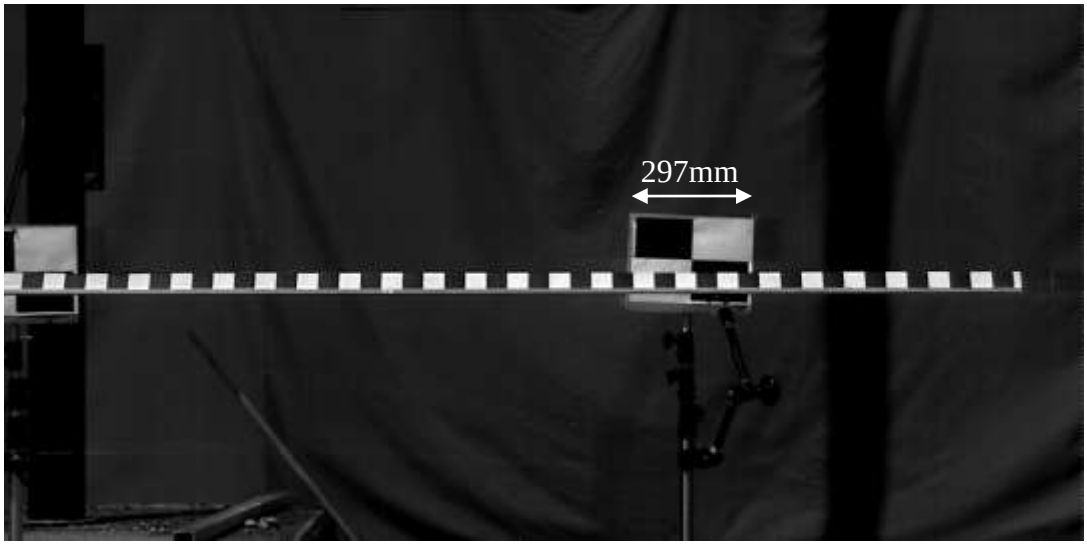


Figure 47: Exemple d'image de calibration

La figure 49 présente un synoptique des algorithmes qui doivent permettre l'extraction des données expérimentales. Les encadrés ovales représentent les données ajoutées par l'utilisateur (fichier de calibration spatiale, remarques…) et ceux en grisé les résultats souhaités.

a) vue du site de réception (après tir avec liquide coloré)

b) vue globale du site (rétroéclairage sur container transparent,)

Figure 48: Essai de perforation: Site d'essai CEA-CEG, Gramat

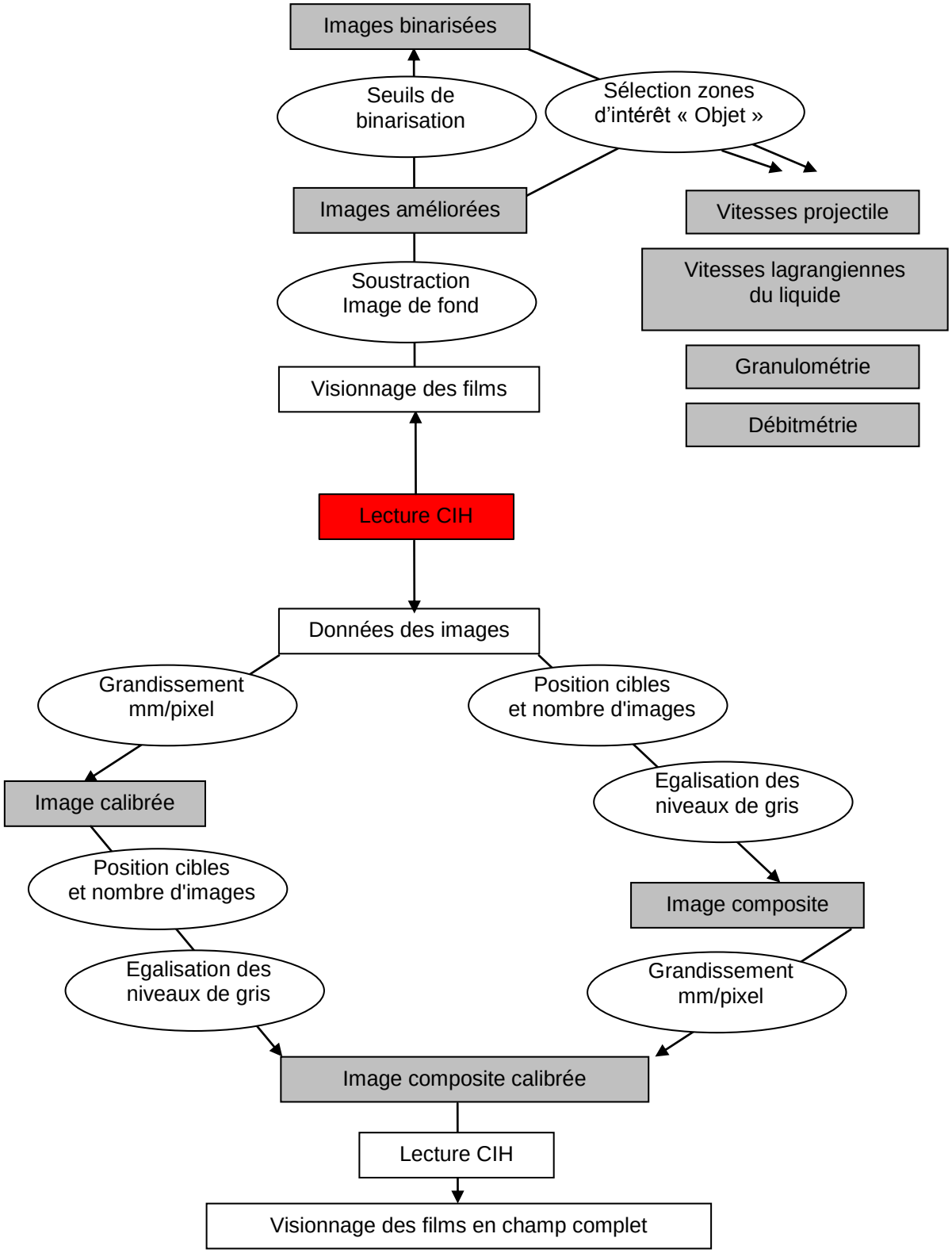


Figure 49: Synoptique des algorithmes de traitement à partir du film brut (cih)

Un exemple d'image composite par raccordement est présenté à la figure 50. L'utilisateur rentre les coordonnées de chaque cible de raccordement correspondant à chaque caméra ainsi que la taille de l'image de raccordement souhaitée. Rappelons que l'avantage principal de ce

raccordement est de fournir une vue complète en pleine résolution. Il est toutefois conseillé de l'utiliser avec parcimonie car le poids des films générés devient important.

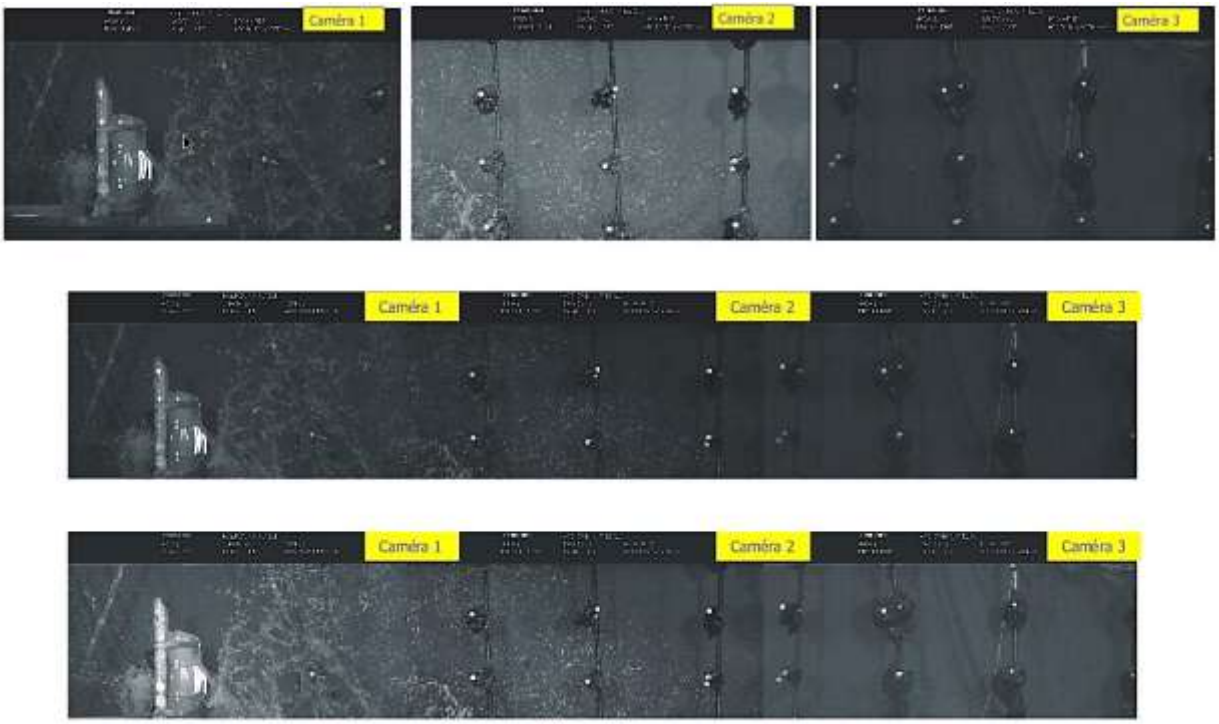


Figure 50: Réalisation d'une image composite, avec cibles coopérantes sur capteurs chimiques.

La première ligne montre les images de chaque caméra à raccorder (1024x512pixels). L'image raccordée (3072x512pixels) est présentée à la seconde ligne. Il peut être noté que l'opérateur a la possibilité de corriger chaque image afin d'optimiser la distribution des niveaux de gris pour obtenir une image raccordée homogène. La dernière ligne présente le résultat final, avec une optimisation de l'image raccordée entière afin de visualiser au mieux le phénomène d'intérêt. Le logiciel peut raccorder tout type de scène. Il a également été utilisé pour fabriquer des vues composites qui sont stockées dans une base de données d'images. La figure 51 montre une vue composite des vues supérieures et latérales

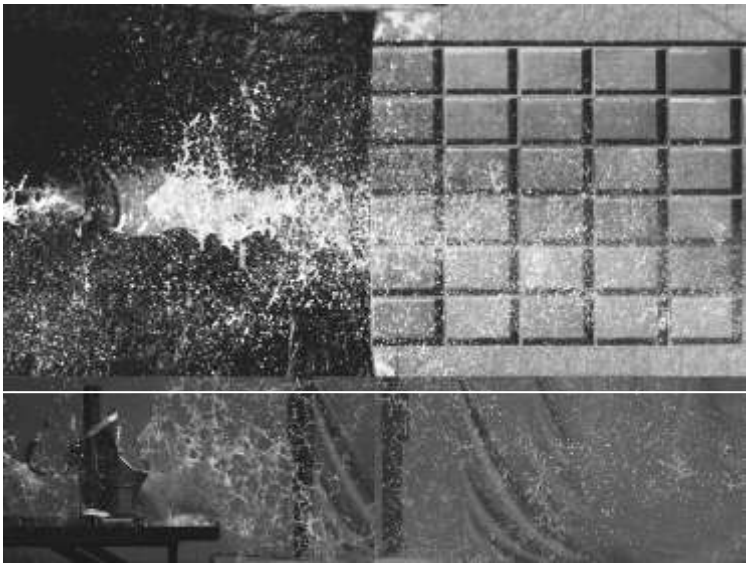


Figure 51: Image composite: vue du dessus et vue latérale

Afin d'obtenir une description complète tant du dispositif expérimental de prise de vue que du résultat obtenu, on peut également associer ces images ensembles pour mise à disponibilité dans une base de données. Ceci permet de décrire chaque essai simplement et de retrouver aisément les configurations de tir. La figure 52 reprend le principe de vue composite raccordée pour 2 caméras horizontales et une caméra verticale, ainsi que le maillage associé pour les localisations des phénomènes d'intérêt et le plan de tir.

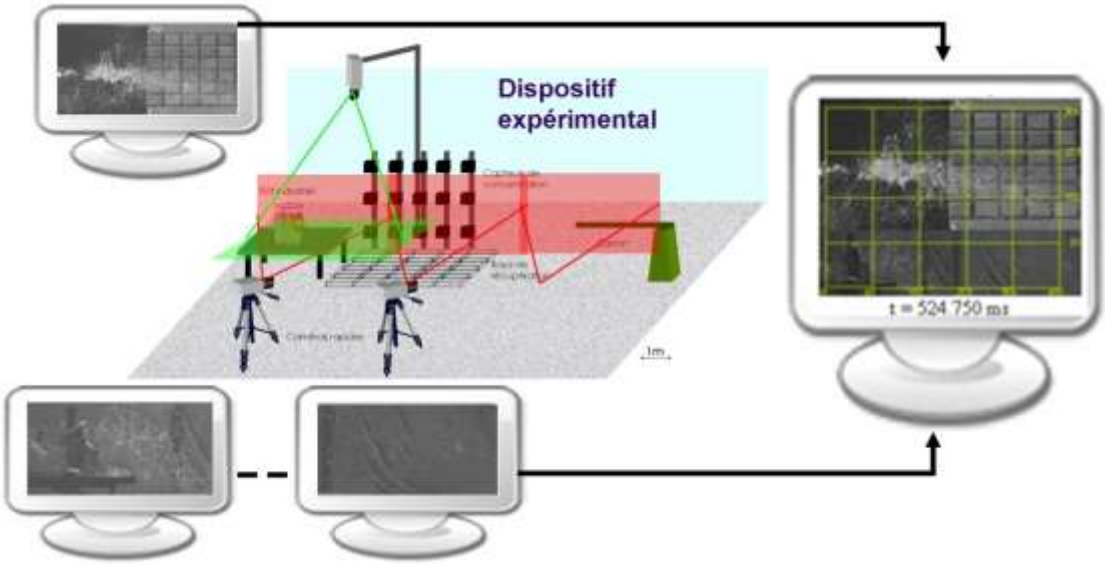


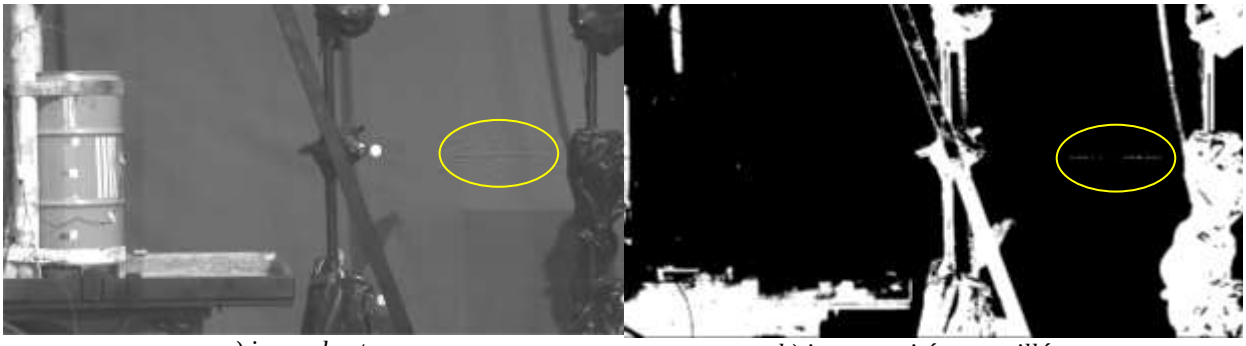
Figure 52: Image composite: Configuration de tir, résultat et maillage

En équipant le fût et la table de cibles coopérantes (type microbilles ou prismes *Scotchlite*), la vue latérale permet également de déterminer un repère de référence pour la mesure des distances et aussi de mesurer le déplacement du fût par un suivi des cibles.

Figure 53: Cibles coopérantes rétroréfléchissantes

En plan large, la vue latérale permet également de déterminer la vitesse du projectile avant et après l'impact. En effet, si le temps d'obturation de la caméra est suffisamment long par rapport au temps de vol du projectile, une traînée optique apparait. La longueur de cette

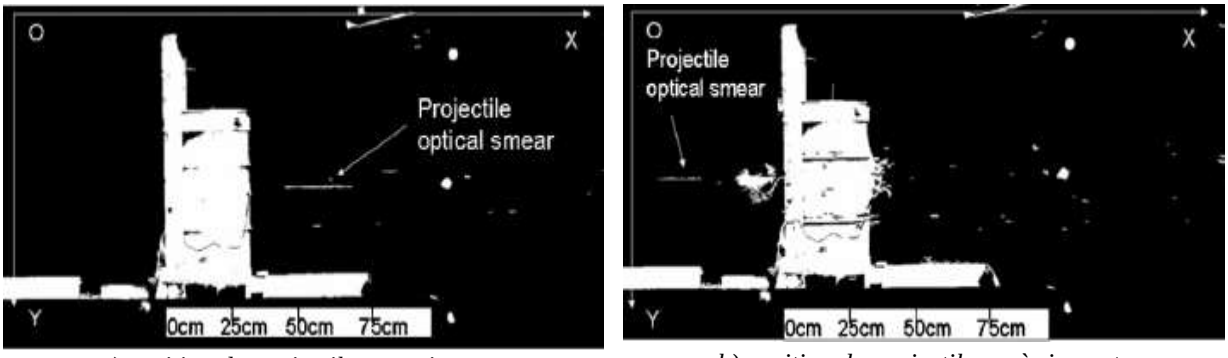
traînée est la distance parcourue par le projectile pendant le temps d'obturation, et la vitesse du projectile en est déduite. Cette vitesse, obtenue après traitement (Figure 54) par la longueur du "flou optique" a été comparée avec celle mesurée entre deux images latérales et également par un système de deux écrans coupe-circuit placé sur la trajectoire du projectile.



a) image brute *b) image traitée et seuillée*

Figure 54: Mesure de vitesse du projectile par le temps d'obturation

La comparaison de ces techniques montre une excellente correspondance entre les mesures de vitesse. Les incertitudes sur la vitesse dépendent principalement des aberrations optiques (estimées à 2% par distorsion de cibles) et de la caméra (1pixel représente 3mm). On obtient une erreur de l'ordre de 12m/s, soit une incertitude relative comprise entre 0,8 et 1,8% selon les vitesses initiales mesurées à la sonde à coupe-circuit. L'atténuation du projectile lors de la traversée du fût est déduite des mesures optiques (Figure 55). Différents essais ont été réalisés en variant la vitesse d'impact et le liquide contenu dans le fût. La masse volumique de l'eau est modifiée en additionnant du PEG400 (poly-éthylène glycol 400) en différents pourcentages. Les résultats de la décroissance sont présentés au tableau 6.



a) position du projectile avant impact *b) position du projectile après impact*

Figure 55: Images de la vitesse du projectile avant et après impact

Tir	Vitesse entrée (m/s)	Vitesse sortie (m/s)	Perte (%)	%PEG400
1	1192	731	39	0
2	1472	881	40	0
3	1003	680	32	40
4	1235	816	34	40
5	1042	645	38	74
6	1044	650	38	74

Tableau 6 : Valeurs expérimentales pour la série de tirs

L'analyse des films rapides lors de l'impact a principalement consisté à caractériser le flux de sortie et son évolution spatio-temporelle. Des outils d'analyse d'image du type "peigne" permettent de déterminer des transitions locales des niveaux de gris de l'image d'intérêt dans une zone qui peut suivre le jet liquide. En comparant les détections verticales et horizontales du contour, on peut obtenir la forme de l'éjection (Figure 56).

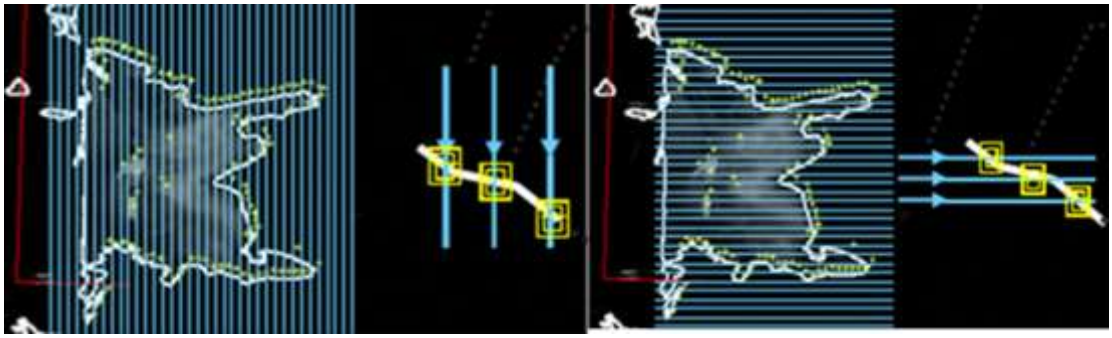


Figure 56: Détermination du déplacement bidimensionnel du jet

Plusieurs campagnes de tir ont été réalisées en changeant différents paramètres comme la vitesse d'impact, le liquide contenu dans le fût (eau, ammoniaque) et le dosage d'additif pour varier ses paramètres physico-chimiques (PEG400). Ces travaux ont également mis en évidence des effets de cavitation du projectile lorsqu'il circule à l'intérieur du container.

Ceci a été mis en exergue par des essais spécifiques mettant en œuvre des containers transparents en PMMA, de forme cubique ou cylindrique (Figure 57).

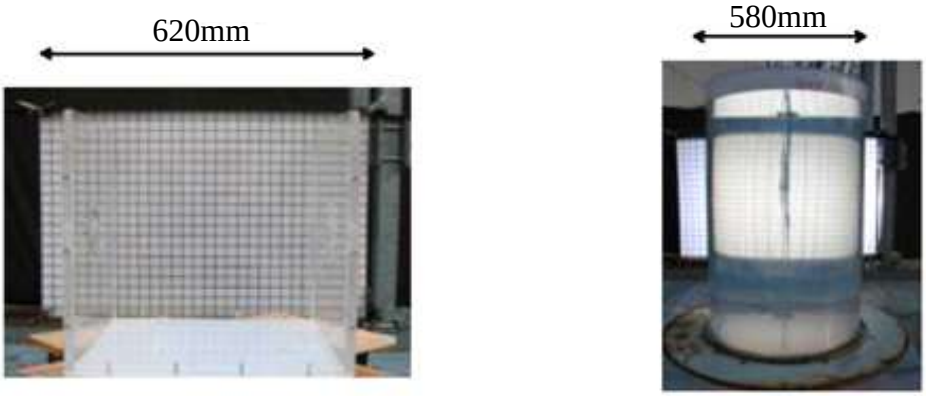
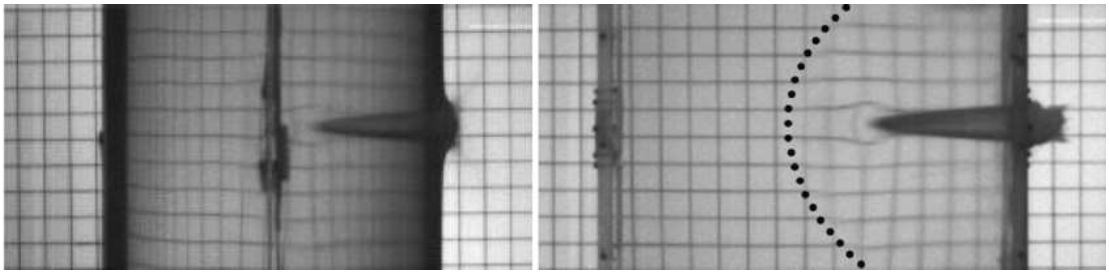


Figure 57: Containers transparents (épaisseur 20mm) pour mise en évidence de la cavitation

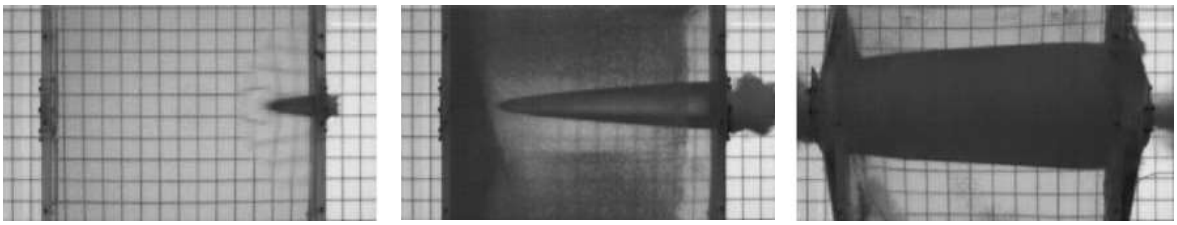
L'acquisition rapide d'images a été mise en œuvre en résolution réduite à 30000fr/s. La détection de l'impact est donnée par un accéléromètre positionné près du point d'entrée qui déclenche l'acquisition des images. L'éclairage rétrodiffusant arrière, placé contre les containers et muni d'un quadrillage, permet aussi de mesurer aisément les distances.



a) container cylindrique *b) container cubique*

Figure 58: Cavitation d'un projectile en DENAL (alliage de tungstène), impact à ~1255m/s

Ce quadrillage montre l'influence du container cylindrique qui se comporte comme une lentille cylindrique. On distingue clairement que les sauts de continuités du quadrillage mettent en évidence le front de pression (Figure 58). De plus ce projectile conserve sa forme sphérique et sa déformation peut être négligée (mesure après récupération du projectile). À titre d'exemple, pour le container cubique, la vitesse d'impact est de 1243m/s, le temps de traversée est de 820µs et la vitesse résiduelle à la sortie du container est de 569m/s .
Trois phases du coup de bélier hydraulique ont pu être observées : pénétration de la paroi, formation d'une cavité qui croît derrière le projectile à l'intérieur du liquide (cône de cavitation), et croissance de la cavité dans le sillage de sortie du projectile (Figure 59).



a) impact *b) cavitation* *c) expansion après sortie*

Figure 59: Phases caractéristiques du coup de bélier, impact à 1255m/s sur container cubique

Les containers sont également équipés de capteur de surpression immergé. Les données expérimentales obtenues ont permis de générer des modèles permettant de simuler les conséquences de la rupture (phase d'éjection, temps caractéristiques, volumes rejetés, …) [34] et ont également été comparées lors de travaux communs avec le CEA Gramat et le groupe SMASH, UMR CNRS 6595, IUSTI, Marseille.
Pour les temps caractéristiques, la modélisation donne 815µs pour le temps de traversée comparativement aux 820µs mesurées. La vitesse résiduelle de sortie modélisée est de 530m/s, contre 569m/s pour les données expérimentales. Les courbes de comparaison de la trajectoire du projectile sont illustrées à la figure 60.

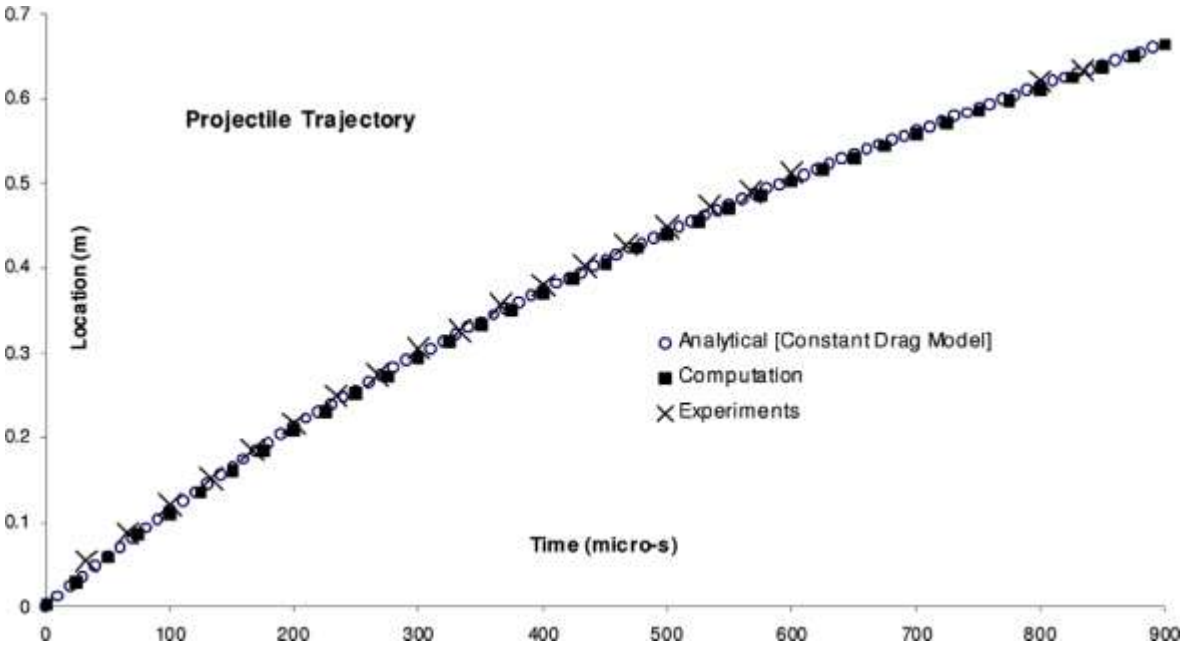


Figure 60: Déplacement du projectile au cours du temps, tiré de [34]

Les courbes de comparaison de la vitesse du projectile sont illustrées à la figure 61**.** Ces courbes montrent de nouveau l'excellent accord entre modèles et expériences pour tout temps.

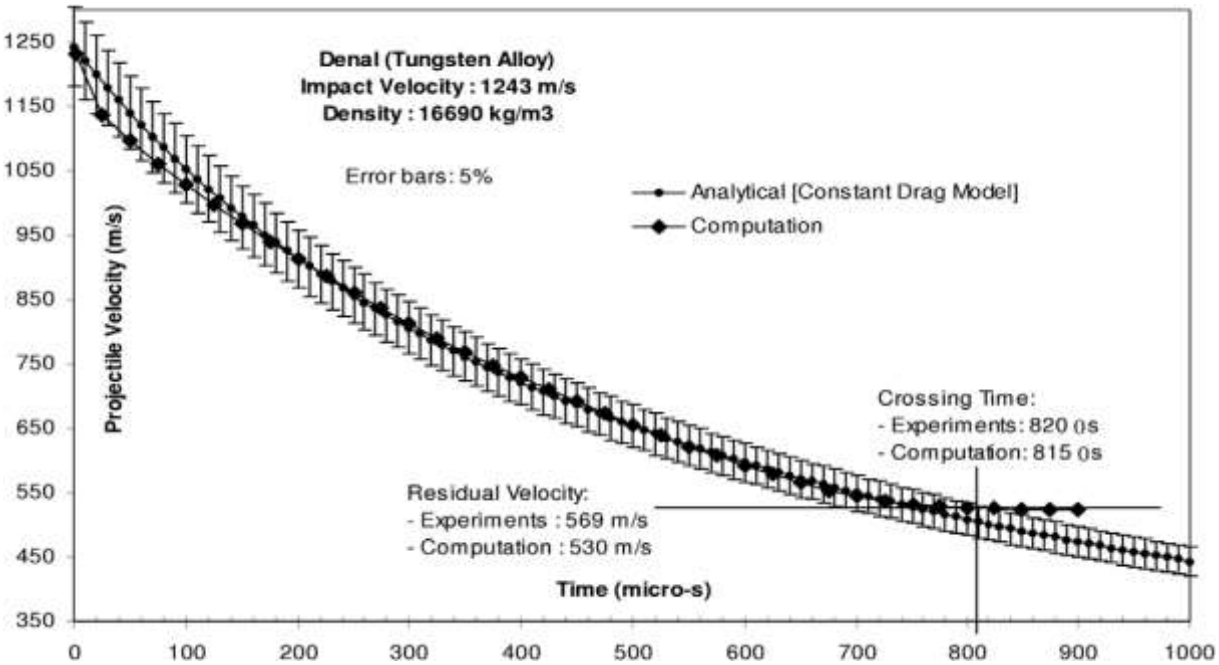
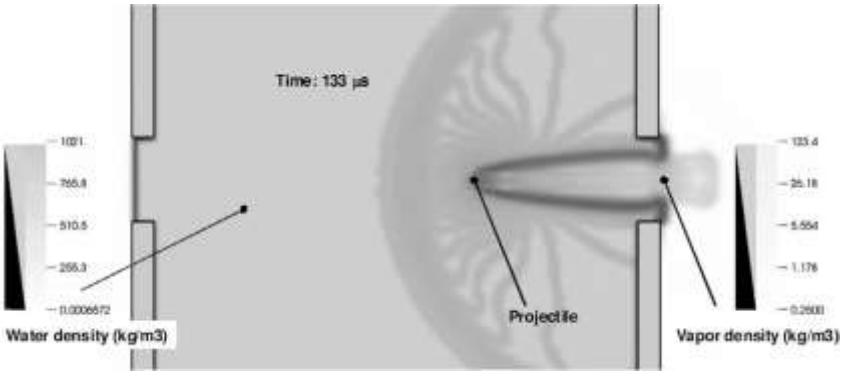
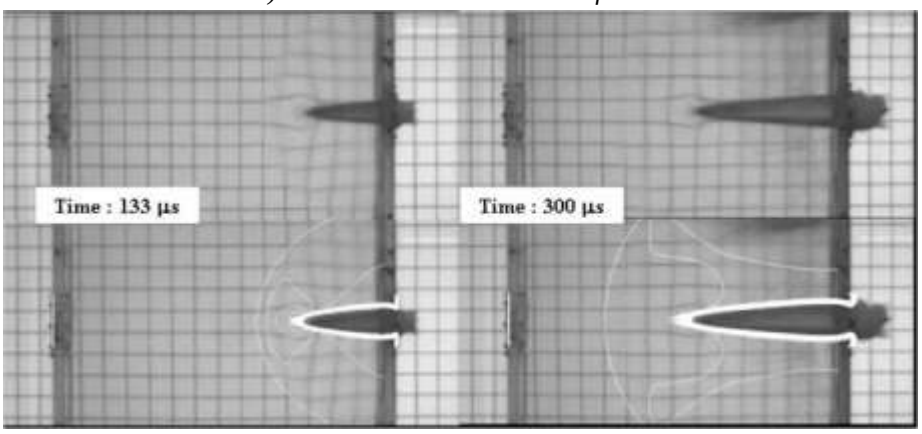


Figure 61: Vitesse du projectile au cours du temps, tiré de [34]

Un autre exemple de l'excellente adéquation entre la modélisation et l'expérience est illustré à la figure 62 pour le modèle de densité des fluides où les contours de densité calculée sont superposés aux instantanés de l'imagerie rapide pour 133µs et 300µs après impact.



a) modélisation des densités de fluides



b) comparaison expérience modèle à t=133µs et t=300µs

Figure 62: Effet du projectile au cours du temps, tiré de [34]

La dernière partie de l'étude présentée ici est toujours en cours dans le cadre d'un contrat avec le CEA Gramat (contrat METEHOR). Les précédents résultats ont permis d'identifier et de quantifier les différentes phases de la rupture brusque d'un réservoir atmosphérique de liquide. L'étude en cours consiste à présent à étudier l'interaction de ce terme source avec une onde de souffle générée par une explosion voisine, dans le cadre d'un accident industriel par exemple.

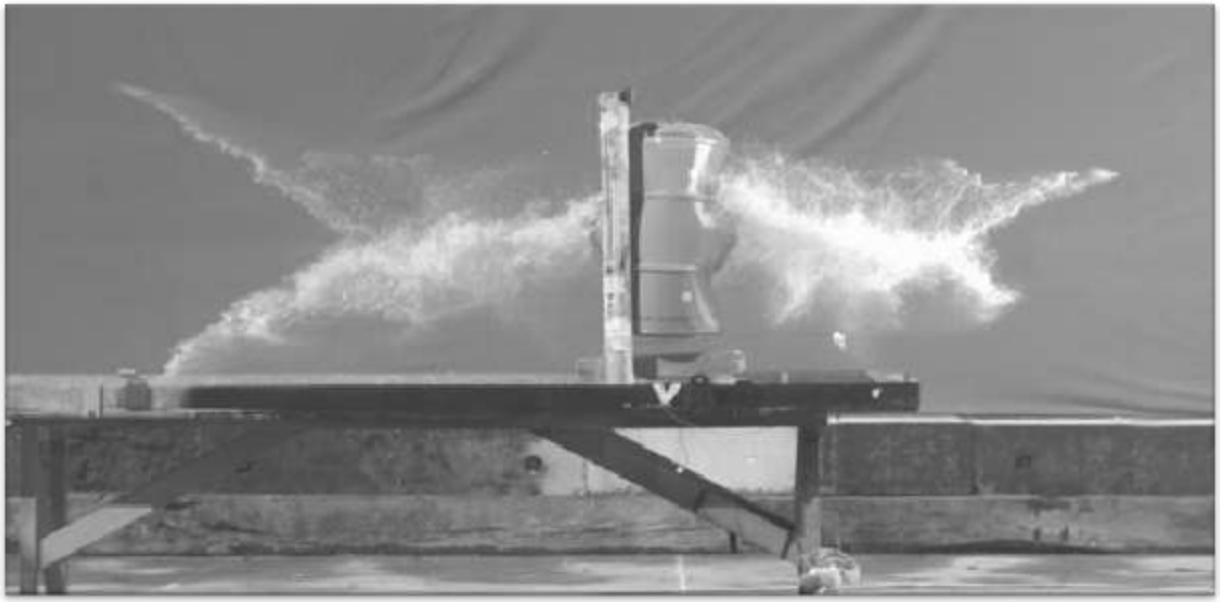


Figure 63: Libération brutale de fluide par un contenant après impact (champ 8m x 2m)

La figure 63 présente les premiers résultats obtenus par imagerie rapide à 4000fr/s pour l'interaction avec le liquide éjecté d'une onde de choc générée juste après l'impact d'un projectile à 1200m/s sur un réservoir atmosphérique. Les premières gouttes qui forment le début de la langue de serpent subissent deux phénomènes différents. Le premier, très bref, est une illumination intense générée par l'explosion de la charge distante. Cette illumination renforce la difficulté de traitement des images en mode automatique. Le second phénomène est directement lié à l'interaction entre le liquide éjecté et l'onde de souffle. Les gouttes sont atomisées et accélérées par l'onde de souffle porteuse. Elles peuvent ainsi complètement changer leur interaction avec l'environnement extérieur et une modification importante du terme source s'en suit. Il faut dès lors caractériser l'interaction de l'onde de souffle avec les gouttes, d'abord en laboratoire puis sur site. Cette étude sur site fait l'objet d'une partie du projet de recherche de ce manuscrit consacré à la caractérisation des risques industriels et plus particulièrement des phénomènes accidentels rapides.

PERFORATION D'UN RÉSERVOIR COMPOSITE SOUS PRESSION PAR UN PROJECTILE HYPER VÉLOCE

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un contrat avec le CEA Gramat sous la référence ARMINES 92728. L'objectif de ce projet est d'étudier les conséquences de l'impact d'un projectile hypervéloce sur un réservoir contenant un fluide sous pression. Le projet est toujours en cours de réalisation pour sa seconde phase ("phase 1" remplissage gaz, "phase 2" remplissage liquide). Ce projet de recherche s'est déroulé sur le site du CEA Gramat et notamment sur la plateforme du lanceur hypervéloce ATHENA. Ce projet collaboratif a

consisté à mettre en commun les moyens techniques propres au CEA Gramat et ceux de l'ISR dans l'optique d'optimiser le système d'imagerie rapide.
L'objectif de l'expérimentation est de déterminer les conséquences suite à l'impact d'une bille métallique de quelques millimètres de diamètre, projetée entre 3000 et 4000m/s sur un réservoir sphérique en matériaux composites, rempli d'azote, sous une pression d'environ [redacted]bar. Les résultats attendus lors de cet essai concernent :

- visualisation par imagerie rapide (HSI) de l'endommagement de la cible,
- visualisation par HSI de l'expansion et détermination de la vitesse du nuage d'aérosols provenant de l'endommagement de la face avant,
- détermination des niveaux de surpression à l'intérieur du réservoir
- évaluation de la cinétique de vidange du réservoir.

Dans le cadre de ce manuscrit, la description de l'étude est restreinte aux deux premiers points.

i. Lanceur ATHENA

Le lanceur ATHENA (Figure 64) fait partie des dispositifs hypervéloces du CEA Gramat. D'une trentaine de mètres de long, il est constitué d'un canon à deux étages en gaz léger capable de propulser différents types de projectiles (sphérique, flèche…), de taille comprise entre 1 à 10cm, à des vitesses de l'ordre de 2 à 4km/s. Une charge explosive propulse un cylindre de téflon qui comprime l'hydrogène contenu dans un premier tube obturé par une membrane métallique qui cède au-delà d'une pression limite. Après cette première chambre, le projectile, encapsulé dans un sabot de maintien, est propulsé dans un second tube de lancement sous azote. Une première chambre sous atmosphère appauvrie d'azote permet la libération du projectile par rupture du sabot. La seconde chambre (2,5m de long pour 1,74m de diamètre), également sous atmosphère appauvrie en azote (300mbar), contient la cible à impacter par le projectile. Cette chambre réceptacle est équipée de borniers étanches qui permettent d'interfacer les moyens de mesures (pression, température …) et de hublots blindés de qualité optique. La trajectoire et la vitesse du projectile sont mesurés par imagerie sur plaques photographiques via des faisceaux de rayons X déclenchés par des barrières laser.

Figure 64: Photo d'illustration du lanceur ATHENA, chambre réceptacle ouverte

Les autres moyens d'investigation sont déclenchés par un accéléromètre collé à la cible, au plus près du point d'impact. Pendant la phase de mise en place, la ligne de tir et le point d'impact sont matérialisés par un laser d'alignement.

ii. Caractéristiques de la cible " réservoir sous pression"

La cible se présente sous la forme d'une sphère de [redacted] mm de diamètre environ (Figure 65). Cette sphère est réalisée par soudure de deux demi-coquilles métalliques recouverte de matériaux composites imprégnés de résine. Le réservoir présente, à ses deux pôles, des goujons de fixation servants aussi d'orifices de remplissage. Il a été peint en blanc afin d'augmenter sa visibilité et sa réflectivité. Des prétests ont permis de montrer que le rayonnement des éclairages HMI (4x4kW) entrainait une augmentation de la température limite de surface de la cible et donc une dégradation rapide de celle-ci.

Rem.: La cible étant en exemplaire unique, un premier tir de faisabilité sur un autre type de cible, proche de celle-ci, a permis d'optimiser la configuration du tir et des mesures.

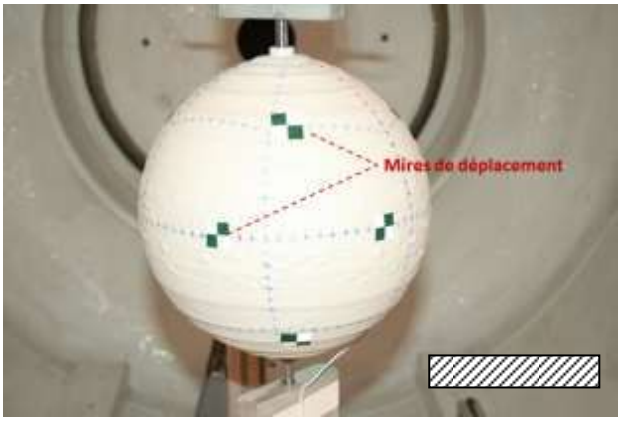


Figure 65: Photo du réservoir utilisé, avec cibles coopérantes

Pour le tir, le réservoir cible est positionné au centre de la chambre réceptacle dans l'axe de tir et est maintenu en suspension par un système de chaînes et de tendeurs fixés sur les parois de la chambre (Figure 66). Des brides en aluminium ont été réalisées pour pouvoir suspendre le réservoir et pour fixer le système de remplissage ainsi que les capteurs de surpression interne.

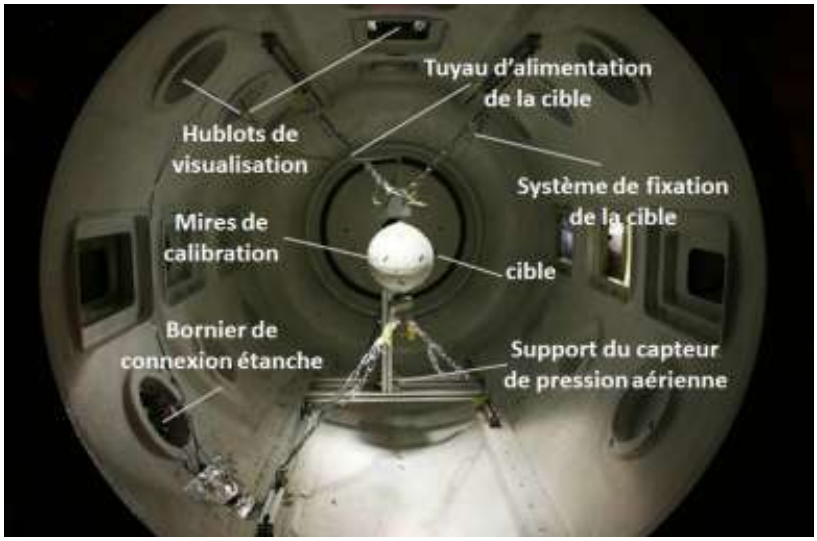


Figure 66: Positionnement du réservoir dans la chambre réceptacle

iii. Remplissage et mesure de pression

Le remplissage en azote de la cible s'effectue en plusieurs étapes afin de garantir l'absence d'air. Ce remplissage à [redacted] bar s'effectue après la mise en vide partiel de la chambre réceptacle. Après stabilisation de la température dans la ligne de remplissage, la ligne est désaccouplée de la bouteille d'azote, et les capteurs en tête de cible permettent de mesurer l'évolution de la pression. La température dans le réservoir lors de l'essai est de 14°C, soient les conditions dans une halle d'essais.

La surpression interne est mesurée avec deux capteurs piézoélectriques *PCB 113B22* à la fréquence d'acquisition de 500kHz. La gamme de mesure de ces capteurs est de 345bar avec une précision de 0.14kPa; le temps de réponse est inférieur à 1µs et la sensibilité est de l'ordre de 14.5mV/MPa. Ces deux capteurs sont vissés sur la bride de fixation du réservoir.

La mesure de la surpression aérienne, générée après l'impact, est mesurée au moyen de 4 capteurs piézoélectriques à une fréquence d'acquisition de 500kHz. Ces capteurs sont montés affleurant sur un support profilé afin d'éviter toute perturbation de la mesure liée à la vitesse d'expansion du jet gazeux. Les capteurs sont espacés de 10cm pour pouvoir mesurer la vitesse du front gazeux. Le support profilé, spécialement conçu, est positionné sous l'axe de tir et orienté vers le point d'impact (Figure 67).

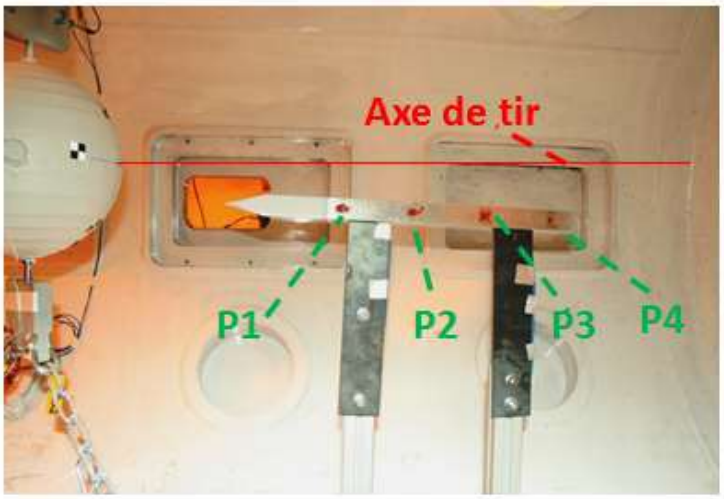


Figure 67: Capteurs de mesure de la surpression aérienne, montés sur support profilé

iv. Imagerie rapide

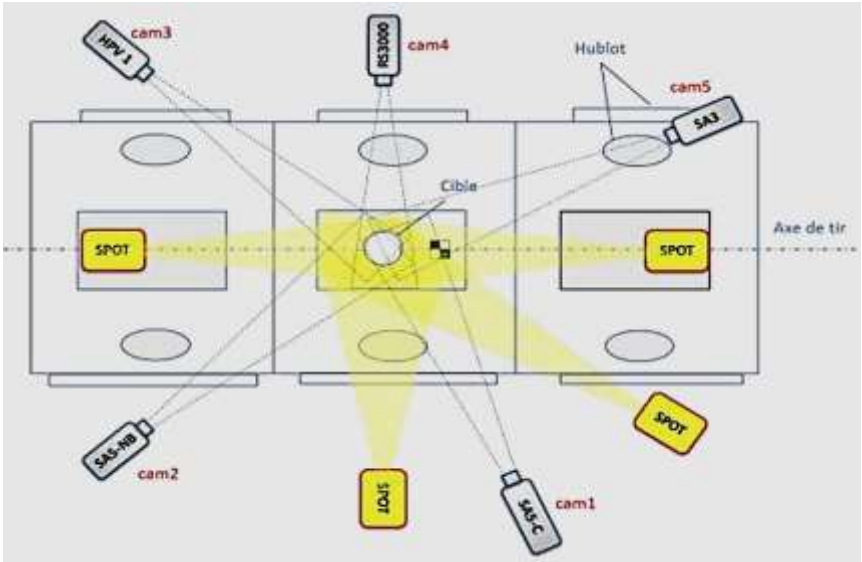
Comme la cible est unique, six caméras ont été utilisées, afin de maximiser le nombre de prises de vue, et de disposer d'une éventuelle redondance en cas de défaillance. La vitesse d'impact attendue est d'environ 3000m/s. Si les vitesses des particules générées sont de l'ordre de la vitesse d'impact, et comme il faut plusieurs images pour calculer ces vitesses par imagerie, les cadences de la plupart des caméras sont proches de 100kfr/s. Les configurations des caméras ont été choisies afin d'avoir un bon compromis entre le suivi des éclats et la visualisation du nuage de gaz à l'extérieur de la zone d'impact. Les caractéristiques des caméras utilisées pour les essais sont données dans le tableau 7. L'éclairage HMI doit également être optimisé pour chaque type de prise de vue, sachant que les temps d'obturation sont de l'ordre de quelques microsecondes pour la majeure partie des caméras. Ce genre d'essai très particulier est difficilement modélisable d'un point de vue photométrique, et

requiert une calibration des moyens d'éclairage bien avant le tir. On constate notamment que chaque type de caméra doit être dans la même gamme de sensibilité afin de ne pas être éblouie par l'éclairage ambiant (la chambre de réceptacle a été peinte en blanc avant l'essai).

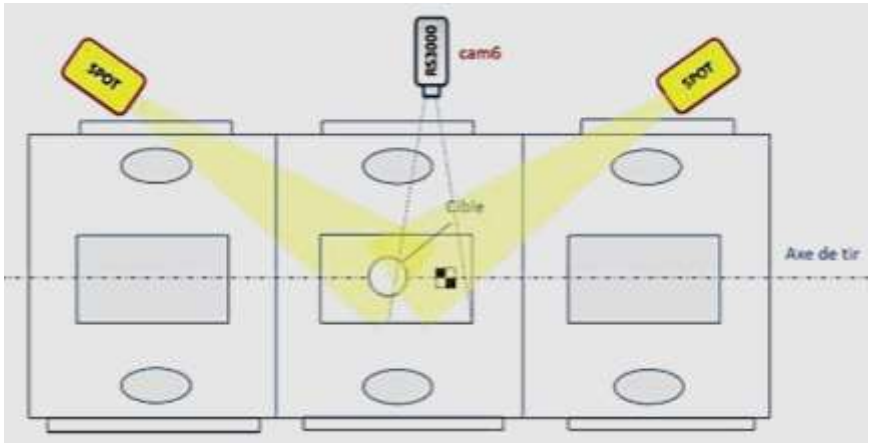
N° Caméra	Caméra	Cadence (fr/s)	Temps Obturation (s)	Résolution spatiale (pixels)	Objectif (f', mm)
1	***Photron SA5C***	100 000	1/236 000	320*192	17-35
2	***Photron SA5NB***	100 000	1/517 000	320*192	17-35
3	***Shimadzu HPV1***	500 000	1/500 000	312*260	105
4	***Photron APX RS 250K***	31500	1/246 000	256*208	24-70
5	***Photron SA3***	1000	1/500 000	384*224	70-300
6	***Photron APX RS 250K***	31500	1/246 000	256*208	24-70

Tableau 7 : Caractéristiques des prises de vue

Le positionnement des six caméras et des quatre sources lumineuses HMI 4kW est présenté schématiquement à la figure 68 et sur site d'essai à la figure 69.



a) vue de dessus



b) vue de face

Figure 68: Schémas du positionnement des moyens d'imagerie rapide

Figure 69: Positionnement sur site d'essai des moyens d'imagerie rapide

Une attention particulière a été portée à la caméra ultra rapide *Shimadzu*, qui permet d'enregistrer à 500 000fr/s en stockant 100images (312x260 pixels) sur le site de collection du capteur. Son positionnement en vue arrière (sortie du projectile de la cible) permet de ne pas éblouir ni l'image très lumineuse de la triboluminescence lors de l'impact du projectile sur la cible, ni les images proches de celle-ci par blooming des puits de stockage voisins, comme constaté lors du tir de faisabilité lorsque cette caméra était positionnée en face avant.
Le déclenchement de toutes les caméras est assuré par le signal de l'accéléromètre positionné sur la cible. Afin d'assurer un accord temporel précis entre chaque image des caméras identiques (caméras 1 et 2, caméras 4 et 6), celles-ci sont utilisées en synchronisation de fréquence d'acquisition, l'une étant le maître de l'autre, respectivement. On dispose donc de deux types de caméras, trois sont ultra rapides et permettent d'enregistrer juste les premiers instants, et trois autres ont des fréquences d'acquisition plus faible, mais pour une durée d'enregistrement sur une période de temps plus longue. Ceci permet de mettre en évidence différents types de phénomènes, de temps d'apparition et de durée différents.
Dans ce manuscrit, les résultats les plus significatifs sont présentés.

v. *Résultats*

L'exploitation des images obtenues par la caméra Shimadzu permet de mettre en évidence l'apparition de plusieurs éclats sur la face arrière et également de mesurer des vitesses d'éjection en sortie de cible. Cette caméra requiert à elle seule deux spots HMI plus la luminosité ambiante. L'optique de 105mm de distance focale est fermée à 8 et permet d'obtenir une profondeur de champ importante et ainsi une netteté sur tout l'objet. La région observée intéressante (ROI) est de Les impacts ont été détectés par:

- Soustraction de l'image de départ (au trigger) et multiplication par une constante
- Lissage par moyenne locale, kernel 7x7
- Seuillage sur objets clairs
- Élimination des petits objets (<3pixels),
- Dilatation 3x3 et Remplissage des trous
- Détection de contour de Roberts
- Incrustation par OU EXCLUSIF

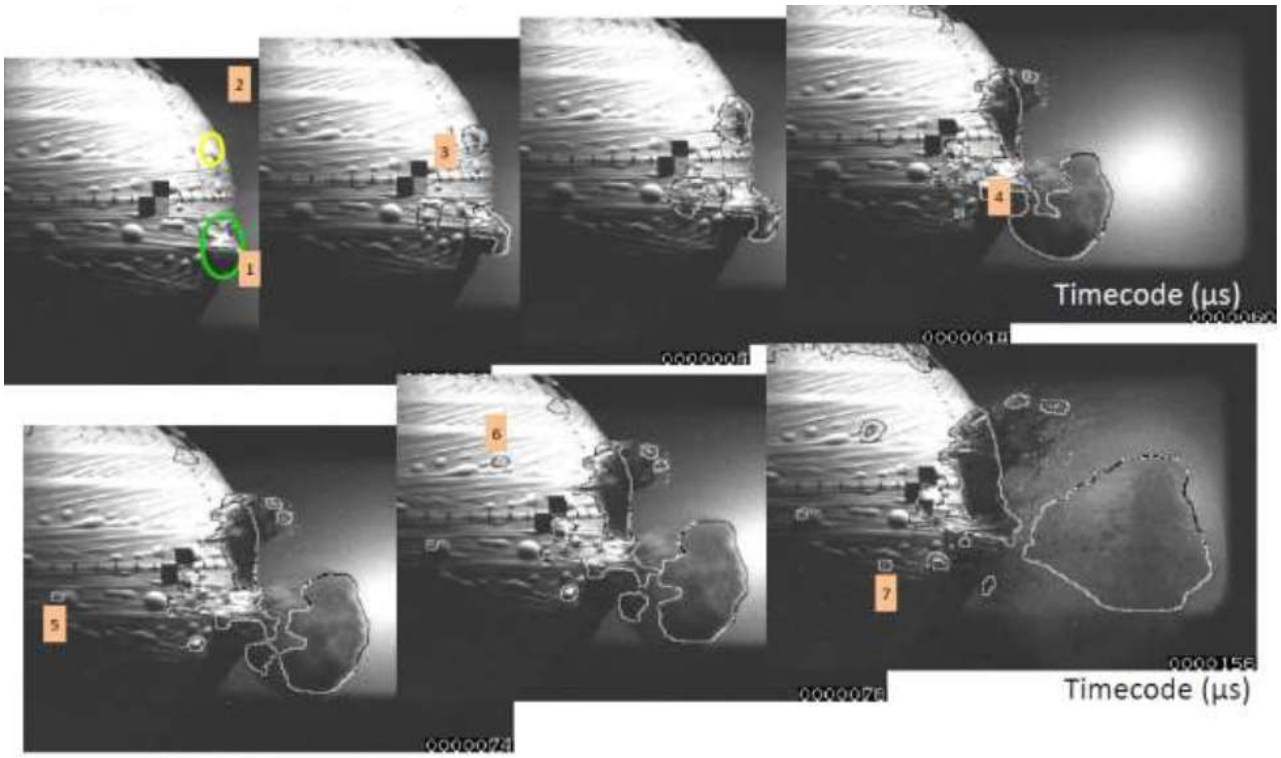


Figure 70: Visualisation des impacts en face arrière à 500 000 fr/s.

La figure 70 présente l'évolution des impacts en face arrière pour quelques temps caractéristiques. Celle-ci met en évidence deux impacts très énergétiques en sortie, entourés en vert et en jaune, dont les éclats sont précédés d'une onde de choc. Les cinq autres éclats, non équatoriaux, apparaissent avec différents retards, de xµs à xxxµs.Les deux caméras Photron SA5 C et NB, respectivement en couleur et en niveau de gris, ont été utilisées pour mesurer la vitesse d'impact du projectile et pour caractériser l'éjection de fluide ainsi que l'endommagement de la cible. La région observée intéressante (ROI) est de xxxxx mm, via un objectif 17-35mm fermé à 4. Une calibration géométrique préalable dans l'angle de vue permet de calculer la vitesse du projectile. On remarque sur la figure 71 que le projectile est quasiment net, grâce au temps d'obturation très court utilisé (Il ne parcourt que xxx cm pendant xxx µs, soit 9pixels).

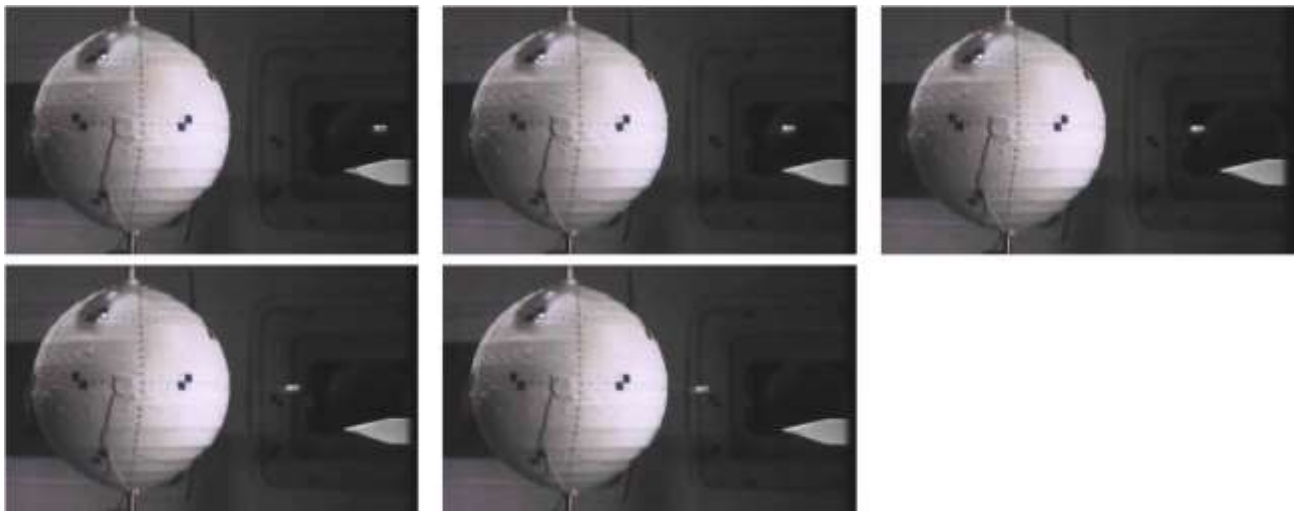


Figure 71: Visualisation du projectile en face avant à 100 000fr/s.

La vitesse moyenne obtenue par mesure optique avant impact est en excellente adéquation avec la vitesse calculée par les barrières RX.
En comparant les vues avant et arrière, on obtient également le temps de traversée, d'environ xxxµs. En tenant compte des incertitudes de détection du dernier niveau de gris significatif sur le front de mesure des éjections, l'incertitude de mesure pour les vitesses d'éjection liées aux images présentées à la figure 72 vaut environ 50m/s.

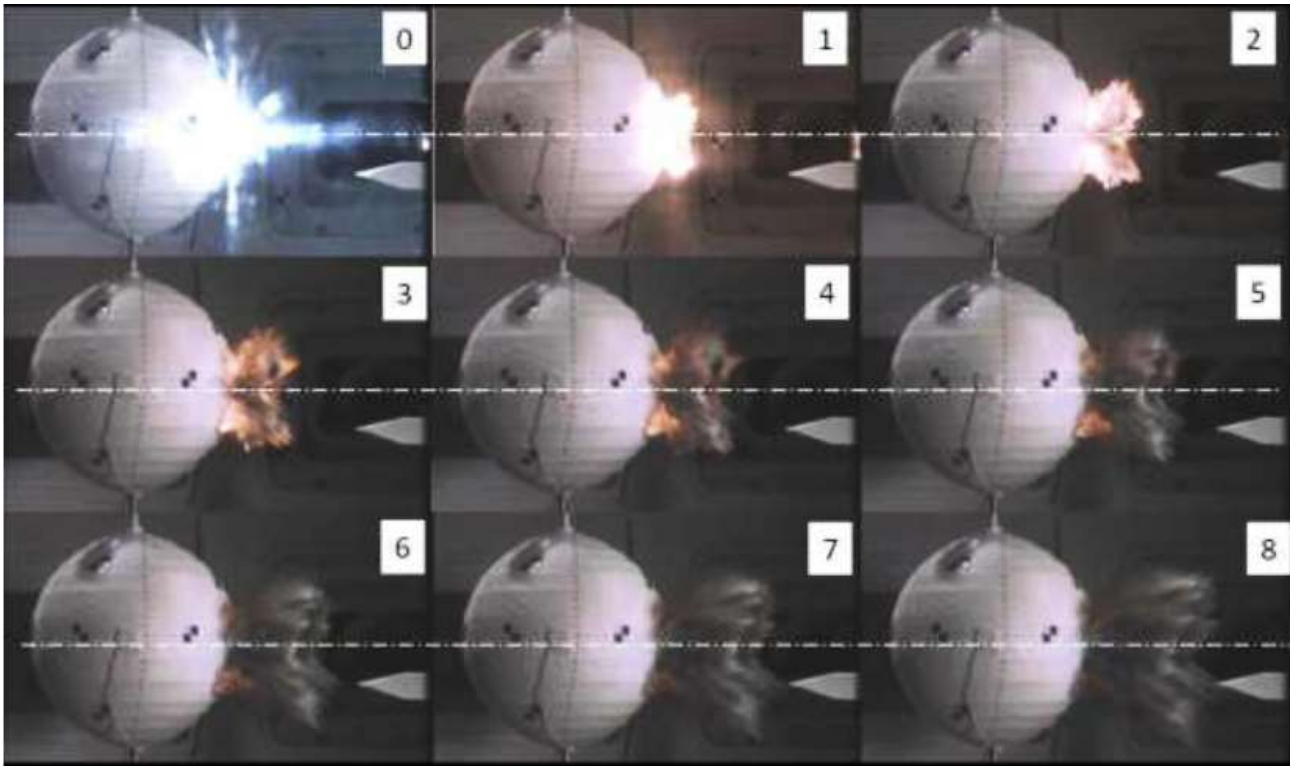


Figure 72: Vue de l'impact et des éjections en face avant à 100 000fr/s.

Lorsque ces vitesses sont raccordées avec celles obtenues par les mesures de surpression aérienne, situées à une distance plus éloignée de la cible grâce aux capteurs positionnés sur le support profilé, l'évolution de la vitesse d'éjection en fonction de la distance est ainsi mesurable sur l'entièreté du champ (Figure 73, *page suivante*).
Les nombreuses vues obtenues par les caméras permettent de raccorder les différents éléments observés, comme par exemple le décollement de la bande équatoriale, ainsi que les éjections visualisées par les vues latérales et la vue du dessus. Les vitesses de différents débris ont également pu être mesurées et sont dans une gamme comprise entre xxm/s et xxxm/s, en fonction du sens et de la taille des débris, mais aussi du moment où la mesure est effectuée. La dernière caméra utilisée en vue de face à fréquence plus faible (1000fr/s) permet de qualifier l'essai sur une plus longue durée (environ 7s). Munie d'un objectif de 50mm fermé à 8, elle fournit une image nette pour une région observée intéressante de xxxxxmm en résolution élevée (768x512pixels). Elle met en évidence la rupture mécanique des attaches *quelques* ms après l'impact et permet aussi de mesurer la vitesse de recul global de la cible, soit m/s pendant ms, et de montrer des éclats importants en face avant (Figure 74).

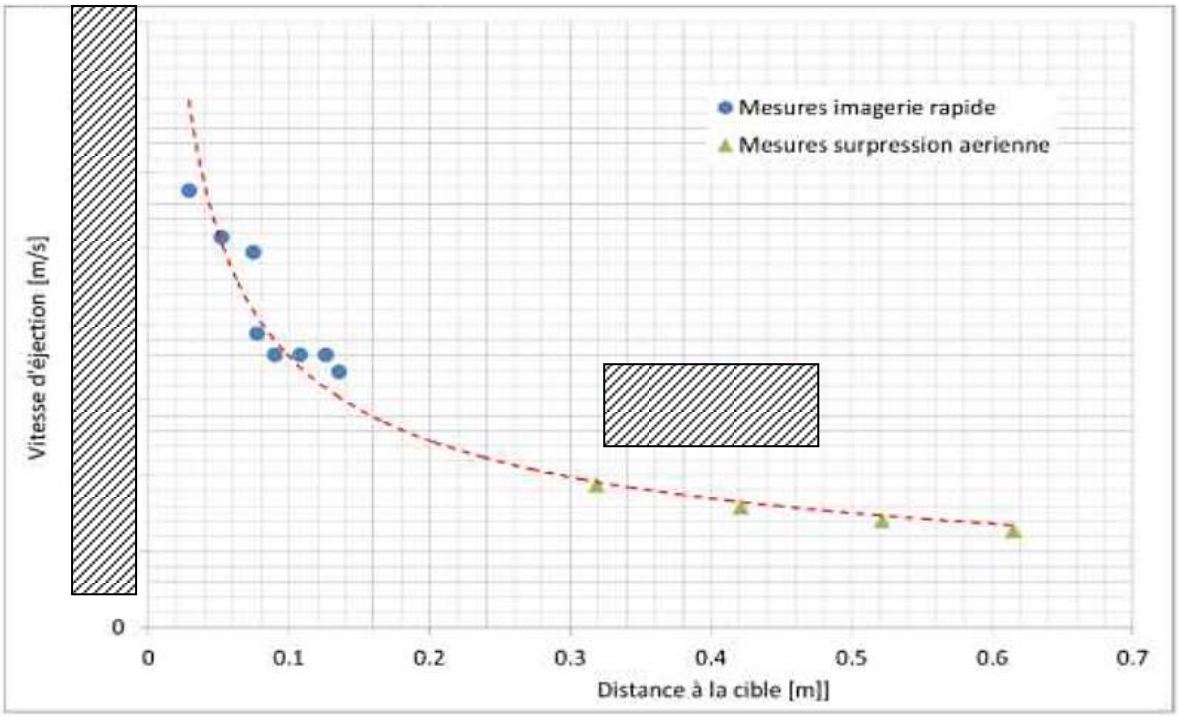


Figure 73: Vitesse d'éjection en fonction de la distance à l'impact.

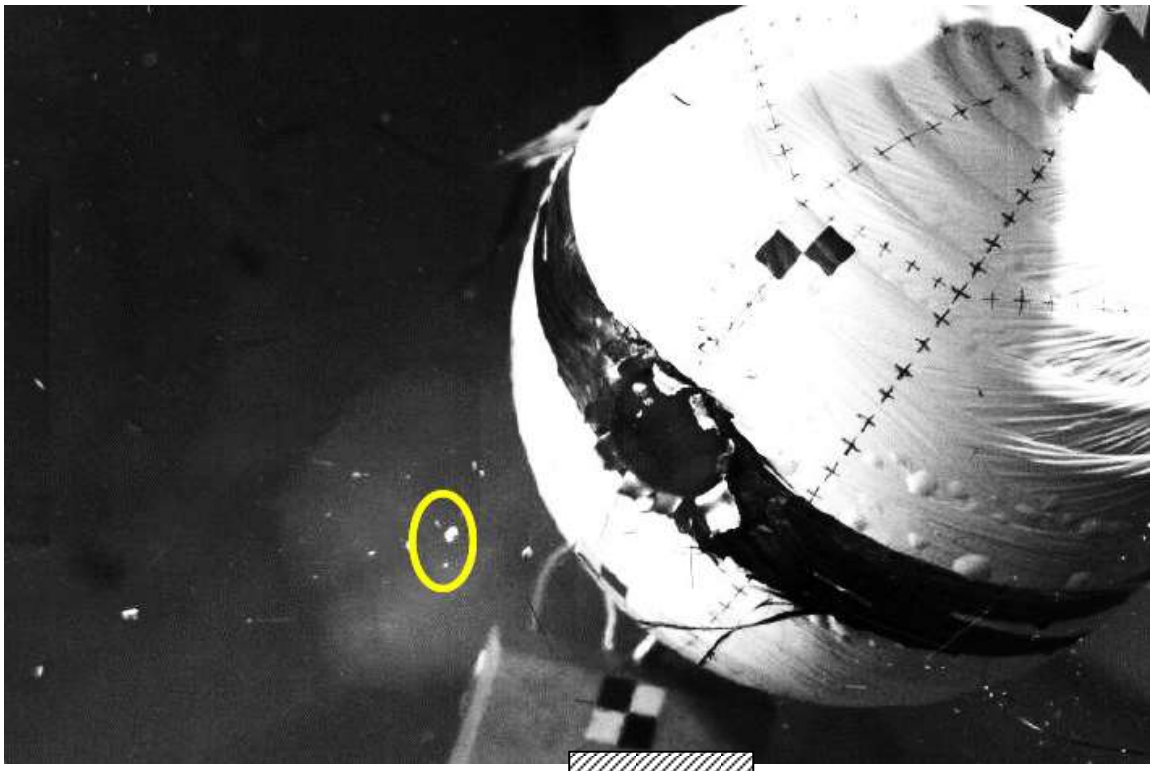


Figure 74: Mise en évidence d'un éclat en face avant à 1000fr/s

Contrairement au miroir,
Réfléchissez avant de renvoyer votre image
adapté de J. Cocteau

D) MÉTHODES DE DENSITÉ

Les méthodes de densité parmi lesquelles on retrouve l'interférométrie et le moiré permettent d'obtenir des informations sur l'état d'un fluide en utilisant la lumière et des optiques adaptées [35] [36]. Dans le cadre de cette étude, cette partie va décrire les méthodes qui permettent de visualiser des variations d'indice de réfraction des fluides à des échelles bien plus importantes que celles que l'on peut obtenir en interférométrie ($n_x e \sim 10^{-6} m$), ou qui permettent surtout de s'affranchir de la très grande sensibilité aux perturbations extérieures de celle-ci. Parmi ces méthodes, dites de densité, l'ombroscopie et la strioscopie (ou schlieren) permettent de répondre à différents problèmes survenant en sciences des risques et plus particulièrement pour caractériser des phénomènes accidentels. Le mélange de fluides d'indices de réfraction différents, comme en pollution marine et le changement d'indice généré par le passage d'une onde de choc sont des exemples qui seront développés. Ces méthodes d'observation sont fondées sur la déviation des faisceaux lumineux par le phénomène d'intérêt s'appliquent dans de nombreux cas [37], et peuvent également utiliser des imageurs rapides si nécessaire. Une étude récente les a comparées pour la cavitation en canal [38]. Hargather et Settles continuent à les développer pour obtenir des évaluations quantitatives de la déviation et de la variation d'indice [39].

- **Bases théoriques**

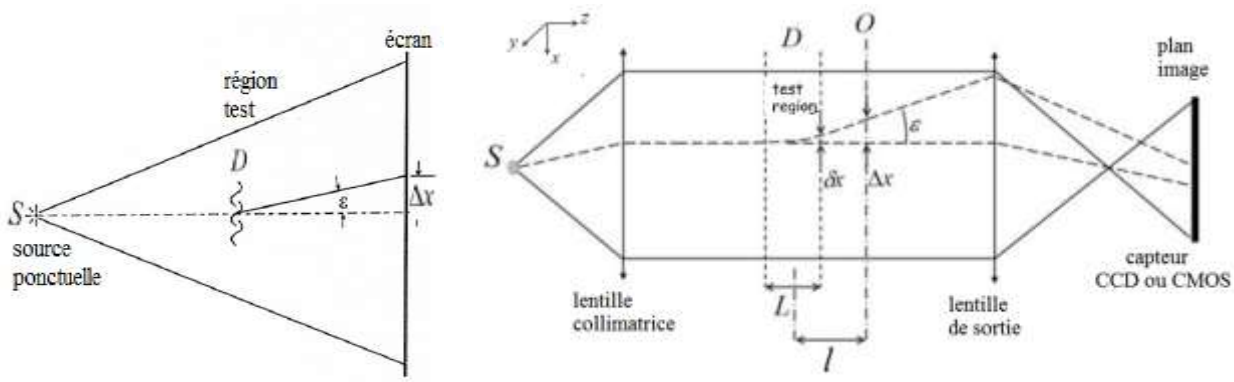
La plupart des méthodes de densité reposent sur la modulation de l'indice de réfraction du fluide par le phénomène d'intérêt. L'indice de réfraction est lié à la densité du fluide par l'équation de Clausius-Mosotti (ou encore Lorenz-Lorentz) qui se réduit à sa forme plus simple, de Gladstone-Dale, dans le cas des gaz:

$$\mathbf{n-1 = K\,\rho} \qquad \text{(eq 37)}$$

avec ***n*** indice de réfraction, ρ masse volumique du gaz et ***K,*** la constante de Gladstone-Dale.
Pour l'air, **K** vaut environ 0.23cm^3/g dans le visible et **n**=1.000292 (0°C, 1bar, raie D du sodium). Pour d'autres gaz, **K** peut varier entre 0.1 et 1.5cm^3/g. Toutefois, la variation d'indice de la plupart des gaz ne se mesure qu'à la troisième ou quatrième décimale. La relation de Gladstone-Dale montre également qu'une variation de deux ordres de grandeur de la densité ne provoque que 3% de variation de l'indice de réfraction. Si pour des gaz, la réfractivité (n-1) est assez faible, elle peut atteindre plus de 30% pour les liquides (n_{eau}=4/3). Merzkirch [36] décrit précisément l'établissement des relations de déviations et est repris dans [35]. Une synthèse de ces résultats est présentée dans ce manuscrit.

1. OMBROSCOPIE

L'ombroscopie (ou shadowgraphy) permet de mettre en évidence la dérivée seconde de l'indice de réfraction. La région de test perturbe les rayons lumineux, et le contraste local de l'image de la source lumineuse varie. Un déplacement δx latéral génère une déviation angulaire ε par rapport à un rayon non dévié lors de la traversée du milieu d'intérêt d'épaisseur D (Figure 75).
Settles [37] décrit de nombreux phénomènes de la vie courante qui génère ce type d'effets (fond d'une casserole où l'eau entre en ébullition). On peut également l'observer au fond d'une piscine en générant des tourbillons à sa surface … en plein soleil.



a) Ombroscopie en lumière diffuse *b) Ombroscopie en lumière parallèle*

Figure 75: Principe de l'ombroscopie

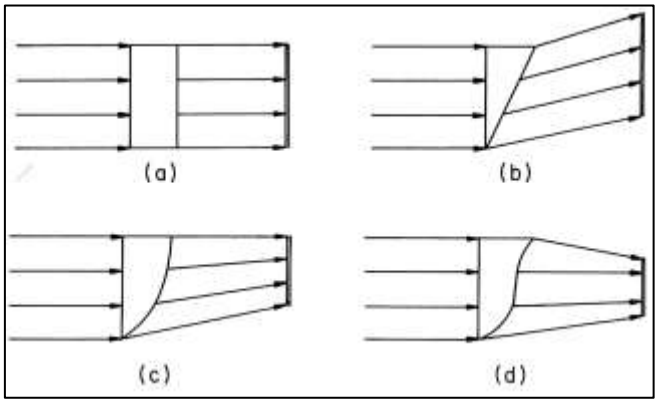
En éclairage parallèle, l'angle de déflection est donné par:

$$\varepsilon \approx \int \frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial x} ds, \qquad \text{(eq 38)}$$

où **s** est la trajectoire du rayon lumineux dans le milieu **D** d'indice de réfraction n.
Afin d'amplifier optiquement le phénomène, on focalise parfois le système imageur légèrement à côté de la région test, auquel cas on observe le déplacement **Δx**, qui dépend principalement de la distance de défocalisation, **l**, et de l'angle **ε**. Toutefois, ceci n'est pas toujours possible, en particulier lorsque l'on veut en même temps faire du tracking sur des particules présentes dans le fluide (cf. infra). Comme ε est petit, il peut s'assimiler à la pente du rayon réfracté (aux conditions des petits angles), soit **ε~tanε=dx/dz**.
Dans le cas bidimensionnel, on retrouve le rapport entre l'intensité perturbée et non perturbée qui vaut, d'après [38]:

$$\frac{\Delta I}{\mathrm{I}} \approx -lL\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)(\ln n(x,y)). \qquad \text{(eq 39)}$$

Si cette dernière équation peut être intégrée afin d'obtenir la distribution d'indice, l'ombroscopie est néanmoins très souvent utilisée de manière qualitative. On retrouve ce résultat par simple analogie en considérant la traversée d'une lame de matériau homogène d'indice constant, puis en regardant la déviation en fonction du changement de forme du dioptre (Figure 76).



a) lame à faces parallèles b) prisme c) lentille sphérique d) changement de courbure

Figure 76: Déviation des rayons lumineux par différents dioptres ($n_{dioptre} > n_{ext}$)

Le cas (a) de la lame à faces parallèles, correspond à un fluide de densité constante. En incidence normale, le faisceau n'est pas dévié. Le cas du prisme (b) est l'équivalent d'un fluide avec $dn/dy=C^{te}$ (y est la direction normale à la lumière incidente). Les rayons lumineux sont déviés avec un angle constant, et le plan d'enregistrement est uniformément éclairé. Dans le cas d'une lentille, une des surfaces de la lame est sphérique ou cylindrique, et on retrouve l'équivalent d'un fluide avec $d^2n/dy^2=C^{te}$. Dans le cas présenté, les faisceaux convergent et le plan d'enregistrement, bien que plus lumineux, est toujours uniformément éclairé. Si la courbure du dioptre change, comme au cas (d), cela signifie que $d^2n/dy^2 \neq C^{te}$ dans le fluide et que l'éclairement du plan d'enregistrement n'est plus uniforme. On peut dès lors utiliser cette non-uniformité d'éclairement pour en tirer une information visible des changements induits par le fluide sur la propagation des rayons lumineux.

2. STRIOSCOPIE

La strioscopie (ou schlieren) (Foucault en 1859 ou Toepler en 1864) permet de mettre en évidence la dérivée première de l'indice de réfraction. La région de test perturbe les rayons lumineux, et le contraste local de l'image de la source lumineuse varie. On peut également considérer la strioscopie comme un corrélateur de Fourier où l'objet se trouve dans le tube de mesure éclairé par la lumière collimatée de la première lentille. Sa transformée de Fourier est réalisée par la lentille de strioscopie et est filtrée par le couteau dans le plan focal. La lentille d'imagerie de la caméra réalise la dernière transformée qui fournit l'image de strioscopie finale. L'image initiale de la source lumineuse peut être déviée dans les deux sens (sortant ou rentrant dans le filtre) en fonction du signe du gradient de la perturbation (Figure 77). L'image de la zone d'intérêt est parfaitement focalisée sur le capteur.

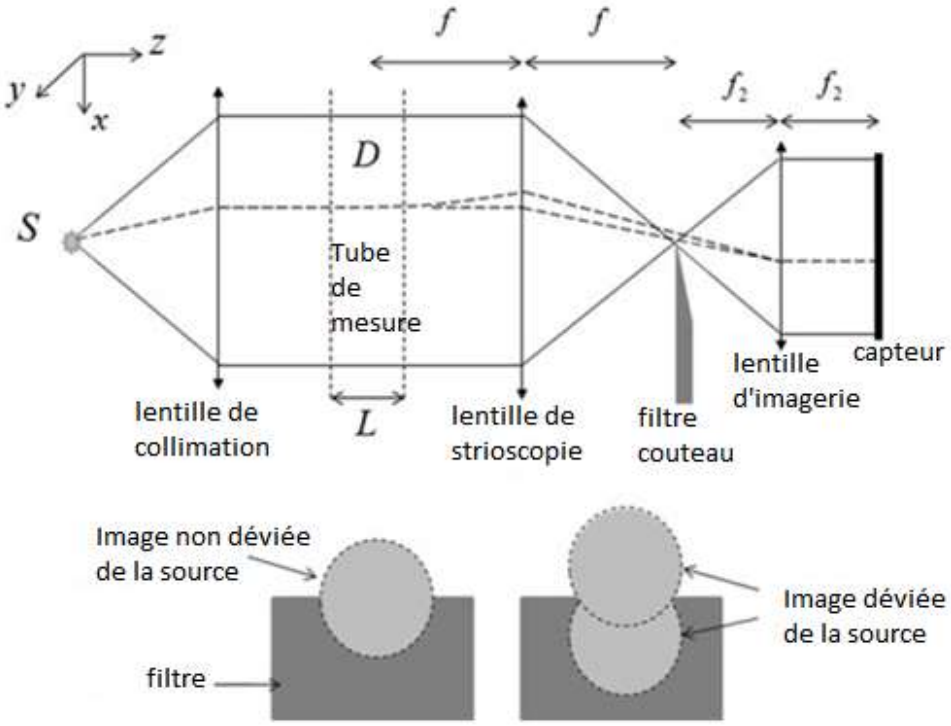


Figure 77: Principe de la strioscopie

Cette focalisation permet d'éviter une sensibilité du type ombroscopique.

Des variantes consistent à utiliser des filtres locaux à la place des "couteaux", ce qui permet à l'utilisateur de choisir des orientations ou des amplitudes. Ces filtres locaux sont générés par des valves à cristaux liquides qui modulent spatialement la lumière incidente (Spatial Light Modulator). Actuellement, on trouve des SLM avec des éléments de 8µm et d'étendue 1920x1080, qui peuvent être rafraichies à 60Hz (*PLUTO*, www.holoeye.com). Ces mêmes SLM peuvent d'ailleurs être employées pour le décalage de phase en interférométrie speckle. Des montages de strioscopie en couleurs sont également utilisés avec des prismes de Wollaston pour obtenir des mesures quantitatives [40].

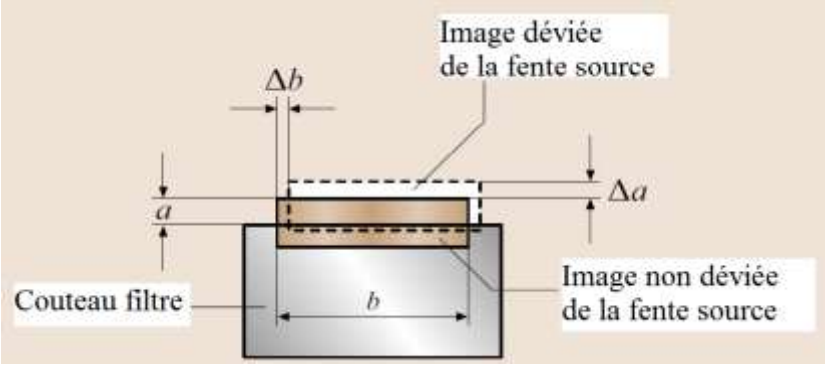


Figure 78: Filtrage dans le plan strioscopique, tiré de [36]

Comme en ombroscopie, on peut supposer que les rayons lumineux ne subissent que de faibles déviations. Les optiques utilisées sont également de qualité suffisante pour considérer les aberrations (coma et astigmatisme) comme négligeables, même si la conjugaison à l'infini du montage diminue fortement la coma par essence. Dans ce cas, si on considère que ***f*** est la distance focale de la lentille strioscopique et que **a** est l'étendue réduite par le filtre de la source lumineuse rectangulaire (Figure 78), le décalage de la source est donné par:

$$\Delta a = f \tan\varepsilon_y \approx \varepsilon_y f \qquad \text{(eq 40)}$$

Comme l'éclairement au capteur dépend principalement de la taille de la source ($I \propto I_0 ab/f_2^2$) la variation relative d'intensité lumineuse est donnée par:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta a}{a} = \varepsilon_y f/a \qquad \text{(eq 41)}$$

et donc

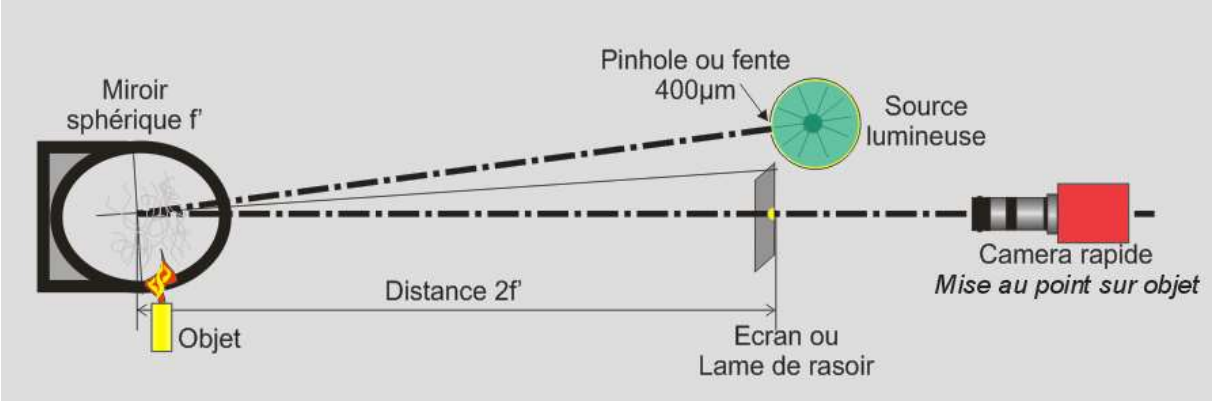
$$\frac{\Delta I}{I} \approx \frac{fL}{a\,n}\frac{\partial n}{\partial y} \qquad \text{(eq 42)}$$

On constate que la strioscopie est sensible à la dérivée première de l'indice de réfraction. Toutefois, la sensibilité peut être adaptée à la direction de la déviation en choisissant le sens ou la forme du filtre (couteau) [4], ou à l'amplitude du gradient en masquant plus ou moins le point focal par le filtre. Si on définit la sensibilité **S** du schlieren comme la dérivée du contraste on a:

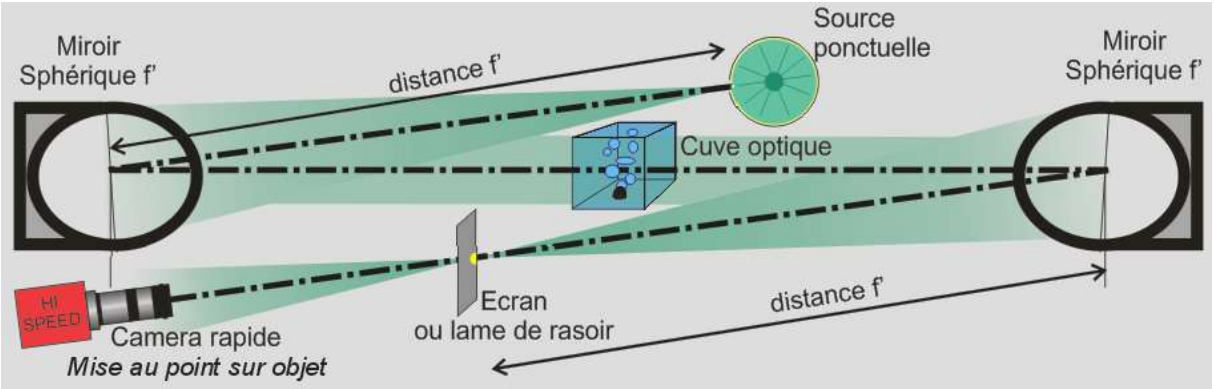
$$C \approx \frac{\Delta I}{I} \; et \; S = \frac{dC}{d\varepsilon} = \frac{f}{a} \qquad \text{(eq 43)}$$

[4]On retrouve ainsi le même comportement propre au corrélateur optique qui peut aussi être utilisé pour dépouiller des photographies speckle en double exposition par la méthode du champ complet, par exemple.

Cette équation montre que la sensibilité ne dépend que de la distance focale du système optique de sortie et démontre qu'il est préférable d'utiliser de grandes distances focales. La sensibilité **S** augmente avec la diminution de la surface libre de la source lumineuse dans le plan du couteau. Donc plus le couteau "s'enfonce" dans l'image de la source, plus la sensibilité augmente. Ceci correspond en fait à un filtrage passe-haut des fréquences spatiales les plus élevées. Par contre, l'éclairement reçu par le capteur chute drastiquement. Il existe donc un compromis entre sensibilité et détection optique à réaliser. Très souvent, il faudra limiter la sensibilité pour conserver des temps d'obturation courts, permettant ainsi d'obtenir des cadences d'acquisition rapide. Un traitement d'images a posteriori peut parfois permettre de retrouver une certaine sensibilité, soit par renforcement des contours ou par égalisation de l'histogramme ou encore en maximisant le nombre de niveaux de gris en sortie sur la bande de niveaux de gris d'entrée (bits shift).
Afin de pouvoir utiliser pleinement la strioscopie ou l'ombroscopie, il est également possible de réaliser de systèmes à simple traversée (montage en Z) ou en double traversée (Figure 79).



a) montage double traversée



b) montage en z, simple traversée

Figure 79: Montage en double traversée et montage en Z, simple traversée

Le montage en double traversée est plus sensible, mais le montage en simple traversée permet plus facilement d'insérer une veine d'essai large dans le champ de mesure, au détriment des optiques supplémentaires.
Concernant les sources lumineuses, pour tous ces types de montage, le recours aux lasers n'est pas indispensable, voire même à éviter pour ne pas générer de speckle. Les sources à incandescence sont suffisantes pour les petites surfaces. Pour des surfaces plus importantes,

ou pour l'imagerie rapide, on privilégiera principalement des sources de lumière froide et intense, du type lampe à Xénon ou diode superluminescente. L'avantage de ces dernières est de pouvoir fonctionner en régime pulsé. On peut également utiliser les lasers pulsés de PIV, en les munissant d'une optique de collimation portant une plaque de PMMA. En effet, lorsqu'il est excité aux environs de 530nm, le PMMA réémet par fluorescence à environ 592nm et l'extension spatiale de la plaque permet de supprimer ainsi complètement le speckle, indésirable dans ces techniques d'imagerie.
Une contrainte forte des méthodes d'ombroscopie et de strioscopie réside en la réalisation d'un tube de lumière parallèle. Le diamètre de ce tube conditionne directement la surface de la région observée d'intérêt. Si le phénomène investigué se déroule dans des champs restreints, on peut indifféremment utiliser des lentilles ou des miroirs pour générer le tube de lumière. L'extension de ces techniques à des phénomènes de taille importante demande donc d'acquérir des moyens optiques permettant d'obtenir une surface importante. De plus, il faut limiter au possible les aberrations des optiques, ce qui entraine des rapports $f/D \geq 8$, où D est le diamètre de l'optique. Pour conserver la sensibilité, il faut dès lors utiliser des grandes lentilles de Fresnel ou des miroirs paraboliques … ce qui peut générer des dépenses "astronomiques" rien que pour les optiques qui sont souvent des miroirs du type "grand téléscope d'astronomie".
Des méthodes permettent l'extension à de grandes surfaces, en utilisant un arrière-plan rétroréfléchissant [37] [41]. Celle qui a été développée est présentée au paragraphe suivant.

3. OMBROSCOPIE RÉTRORÉFLÉCHISSANTE

Edgerton fut le premier à utiliser cette technique afin de visualiser les changements de densité sur des surfaces plus importantes (explosions, onde de choc). On parle parfois de "Retroreflective Edgerton Shadowgraphy". Le principe de cette technique consiste à utiliser un arrière-plan rétroréfléchissant sur lequel on projette le phénomène d'intérêt (Figure 80).

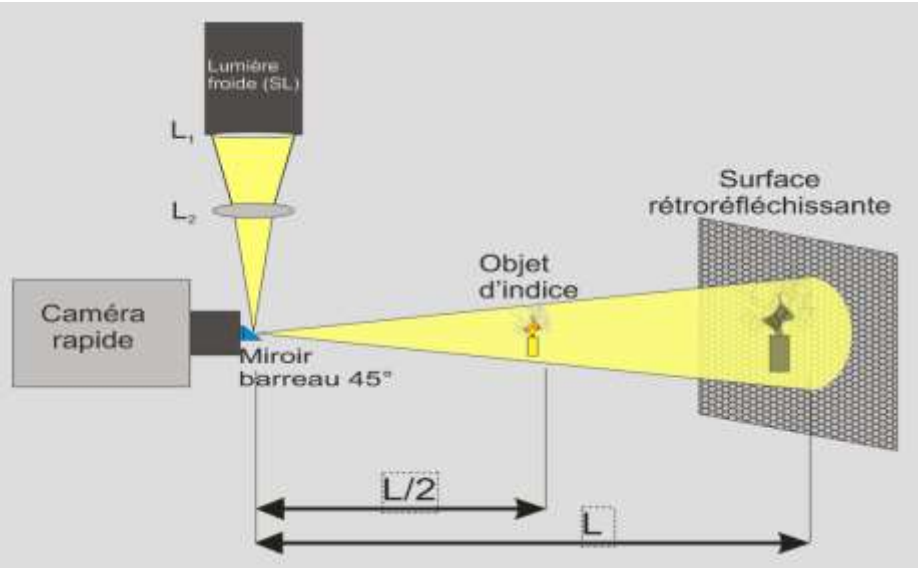


Figure 80: Montage d'ombroscopie rétroréfléchissante

L'optique de la caméra est munie d'un miroir barreau incliné à 45° qui renvoie la lumière focalisée de la source lumineuse. Le diamètre du miroir barreau peut être de 2 à 4mm.

Après traversée de l'objet d'indice, la lumière est renvoyée par la surface réfléchissante constituée par exemple d'un panneau rigide recouvert par de l'adhésif de signalisation routière muni de microbilles (type ORALITE 5300). L'optique de la caméra doit être suffisament large pour pouvoir porter le miroir sans estomper trop de lumière incidente. Dans ce cas, le capteur enregistre directement le signal d'ombroscopie superposé à celui de l'objet lui-même. Toutefois, le signal de l'objet peut être très faible si la source est très intense. Dans le cas où l'objet se trouve exactement à mi-chemin entre la caméra et l'arrière-plan, l'objet et son ombre sont confondus pour l'angle de vue depuis la caméra. Afin de maximiser le signal d'ombroscopie, la mise au point de l'optique de la caméra est effectuée sur l'arrière plan.
Ce genre de montage permet d'obtenir des informations par ombroscopie pour des surfaces de l'ordre du mètre carré, en fonction de la source lumineuse et du type de caméra utilisées. Afin de retrouver un acronyme proche de ceux utilisés dans ce domaine (PIV, PLIF), la "Retroreflective Edgerton Shadowgraphy" a été rebaptisée en en "Pure In Line Shadowscopy" (PILS) ou encore ombroscopie parfaitement alignée, puisque la source lumineuse et l'optique de la caméra peuvent être rendues parfaitement coïncidentes. L'utilisation du miroir barreau permet également de bénéficier de toute la puissance lumineuse de la source et de la réflexion de l'arrière-plan, contrairement à des systèmes qui utilisent un séparateur 50/50.

- **Applications**

L'ombroscopie est une technique très aisée à mettre en œuvre pour des démonstrations simples en grand public, et notamment pour l'enseignement. Il suffit d'utiliser la lumière d'un rétroprojecteur ou d'un vidéoprojecteur qui émet une image uniformément blanche. En interposant un objet d'indice (flamme ou éjection de gaz d'un briquet), on visualise nettement les zones de turbulence sur l'écran de la salle de cours, au grand ébahissement des étudiants (Figure 81).

Figure 81: Visualisation de la chaleur d'un briquet en salle de cours par ombroscopie

Pour la strioscopie, il faut utiliser des miroirs et aligner le système tel que présenté à la figure 79. Deux résultats obtenus au laboratoire pour des phénomènes classiques (éjection de gaz et évaporation d'acétone sous flux d'air) sont présentés à la figure 82. Le système à double traversée utilise une simple lampe à incandescence à courant continu et un miroir concave de 12cm de diamètre et de 1m de distance focale. Le couteau est réalisé avec une lame de rasoir peinte en noir.

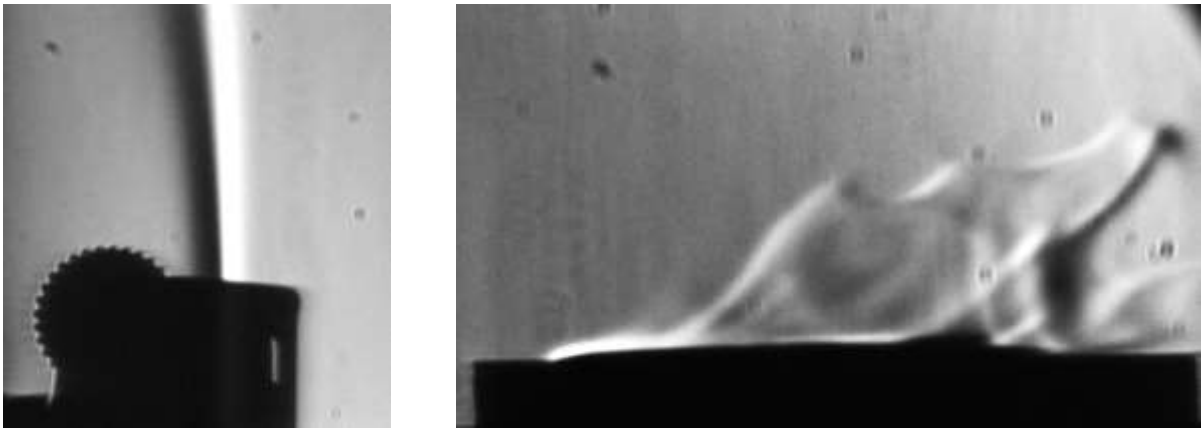


Figure 82: Strioscopie double traversée: éjection de gaz et évaporation d'acétone

CARACTÉRISATION DE REJET DE POLLUANT DANS L'EAU

Les techniques d'ombroscopie et de strioscopie sont souvent utilisées pour visualiser des rejets gazeux, des mélanges de gaz ou la propagation d'onde choc. Un des axes majeurs de l'ISR est la caractérisation et la lutte contre la pollution marine. Des logiciels tels que CLARA permettent de simuler la propagation d'une pollution marine [42]. Suite à une thèse commune avec le **Cedre** (*Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux*) à Brest, ces différentes techniques ont été appliquées avec succès afin de visualiser la remontée de produits chimiques liquides dans la colonne d'eau (Thèse Mélanie Fuhrer). Ce travail consiste notamment à développer et à qualifier les méthodes optiques adéquates pour une détermination rapide et à grande échelle de données de vitesses de progression et/ou de solubilisation de produits chimiques rejetés en milieu aquatique dans la colonne d'eau de mer (n_{mer}=1,34). De premiers essais en laboratoire, à petite échelle ont permis de révéler l'efficacité des méthodes optiques pour détecter et caractériser la remontée de polluants chimiques, peu ou pas solubles, d'indice de réfraction proche de l'eau (Figure 83). Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications [43][44][45].

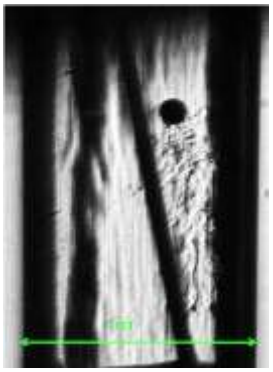
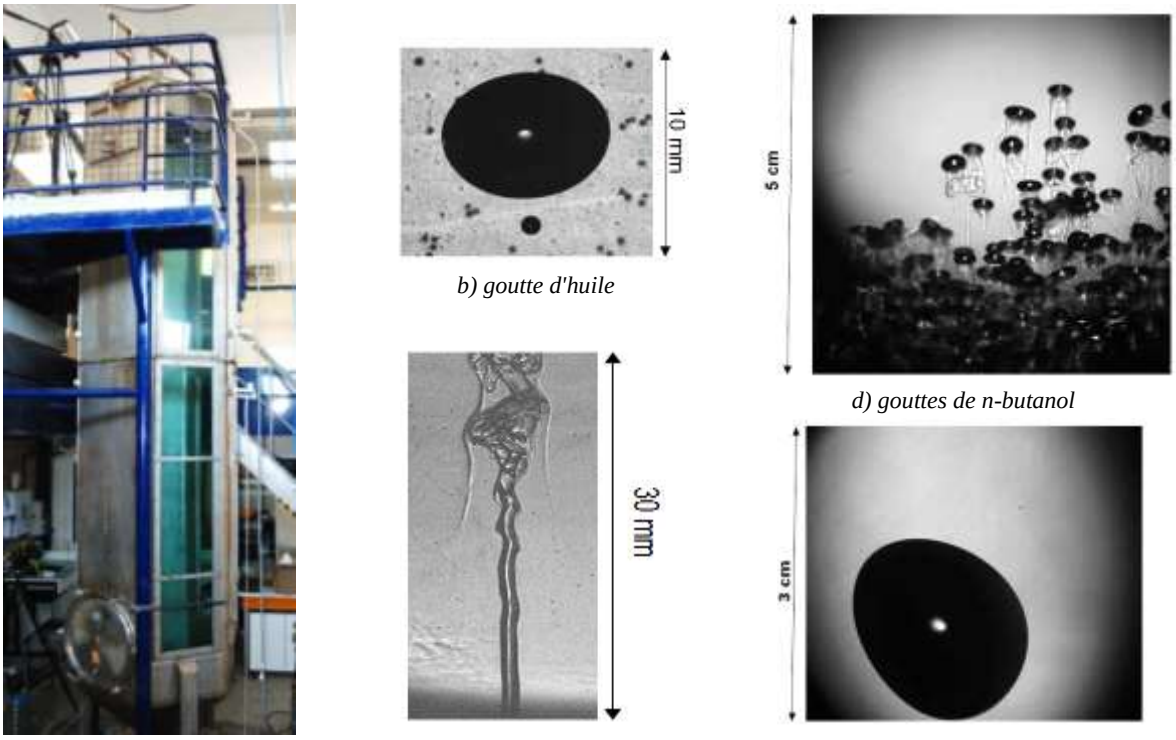


Figure 83: Mise en évidence d'une goutte de Methyl Ethyl Cetone (n_{MEK}=1,377) par strioscopie en Z

a) ombroscopie divergente (éclairage diffusant) *b) ombroscopie directe (éclairage collimaté)*

Figure 84: Mise en évidence de la dissolution d'une goutte de n-butanol (n_{but}=1,399) dans la colonne d'eau

On remarque bien l'avantage de l'ombroscopie directe quant à la sensibilité qui permet de visualiser également la traînée de dissolution d'une goutte de n-butanol (Figure 84). Plusieurs campagnes d'essai ont été réalisées au Cedre, dans une colonne d'eau, hexagonale, large de 0.8m et de 4m de haut, est munie de hublots en verre [46]. Elle permet de contenir de l'eau de mer ou de l'eau douce, à température et pression ambiantes. Plusieurs niveaux sont prévus pour simuler des largages de polluants via des injecteurs reliés à des pompes de dosage. L'intégration des moyens optiques d'éclairage et de capture (caméras rapides) a dû tenir compte du milieu fortement humide et salé (halle d'essai). Différents produits remontants ont été testés, du plus soluble (éthanol) au moins soluble (huile), et surtout d'indices de réfraction différents, plus ou moins proches de celui de l'eau de mer. La colonne et les résultats obtenus sont présentés à la figure 85.



a) colonne du Cedre *b) goutte d'huile* *c) plume d'éthanol* *d) gouttes de n-butanol* *e) gouttte de DEHP*

Figure 85: Colonne d'essai au Cedre et résultats obtenus

Ces résultats ont été obtenus en positionnant des caméras rapides (*Photron* et *PhotonFocus*) à différentes hauteurs de la colonne d'eau, en face de générateur de lumière parallèle (Vision&Control, TZB 51RVC et 95R, 5mlm à λ=630nm). Le champ couvert est un cercle compris entre 5cm et 9.5cm pour le plus large des générateurs de faisceau collimaté. Ces deux

systèmes ont également été placés l'un en bas de colonne et l'autre en haut de colonne pour mesurer les temps de parcours et reconnaitre les gouttes (émission en goutte à goutte). Des lâchers en grappe ont également été réalisés et mettent en exergue les effets d'aspirations des gouttes les plus hautes sur celles qui suivent. La traînée a été mise en évidence pour les gouttes solubles notamment. Suite à ces essais, ces conditions ont également été reproduites à petite échelle pour mieux étudier ces vortex par holographie en temps résolu (cf. infra).
Afin d'augmenter le champ d'étude, la PILS a été utilisée en haut et en base de la colonne lors de remontée de trains de gouttes et de panache (Figure 86). Contraint par la dimension des lieux, la taille maximale du champ observable est de 23cm x 20cm, ce qui permet d'atteindre un grandissement d'environ 200µm/pixel avec les caméras 1 et 2. Les premiers résultats de PILS mettent en évidence un faible contraste. En effet, la lumière issue de LEDs superluminescentes est fortement atténuée par les deux traversées de la colonne. Ceci se conjugue à la plus faible sensibilité des caméras PhotonFocus dédiées à cette application. Cette déficience de lumière nécessite d'employer un diamètre d'ouverture plus grand, au détriment de la profondeur de champ. Toutefois, on peut néanmoins utiliser des algorithmes de post-traitement qui permettent d'obtenir des signaux exploitables. La figure 87 présente les premiers résultats obtenus, dans des conditions similaires à ceux obtenus avec du n-butanol présentés à la figure 84 pour une goutte isolée. Si le contour est flou, il permet d'obtenir la position de la goutte précisément.

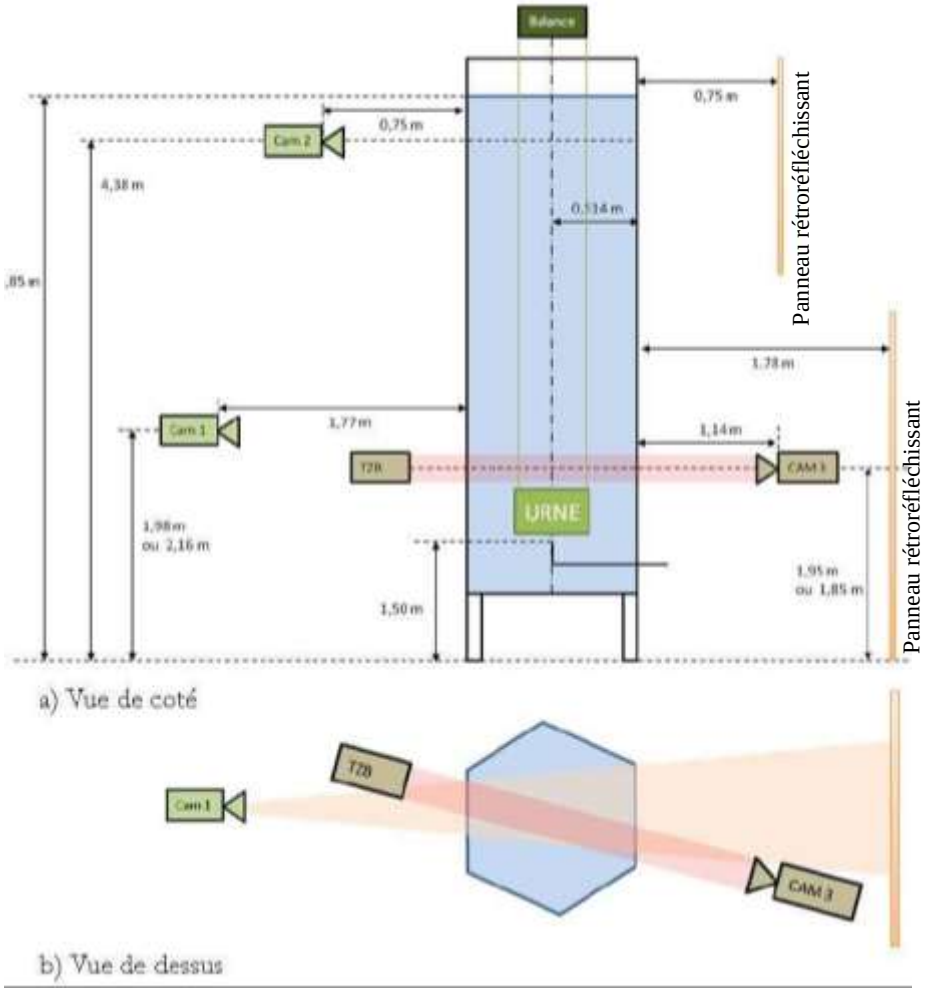
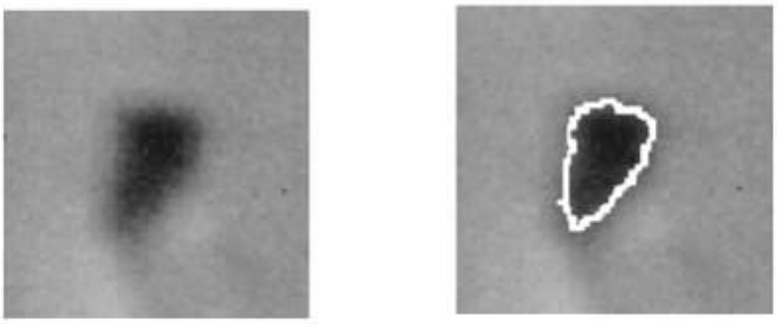


Figure 86: Schéma de PILS et ombroscopie pour la vidange gravitaire d'une urne de n-butanol



a) image brute *b) extraction du contour*

Figure 87: Résultat de PILS pour une goutte de n-butanol de 5mm

L'étude est toujours en cours, et ces paramètres seront améliorés, en changeant de type de caméra par exemple ou en augmentant le nombre de sources LED.

Dans le cadre de cette étude en pollution marine, l'apparition de tourbillons lors de la solubilisation du butanol a également été visualisée par holographie numérique en temps résolu. Ces manipulations ont été réalisées au laboratoire, en collaboration avec l'université du Maine (Prof P. Picart), en utilisant l'injection de gouttelettes dans une cuve, placée dans le bras d'un interféromètre de Mach-Zender (Figure 88), où la configuration des bras collimatés permet de calculer directement la phase de l'objet grâce à l'addition d'une porteuse de fréquence spatiale.

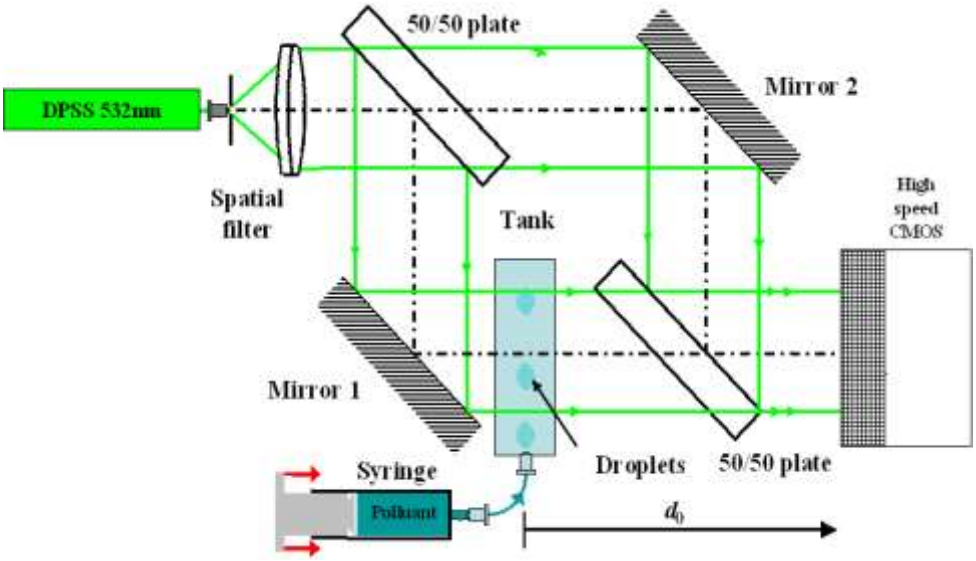
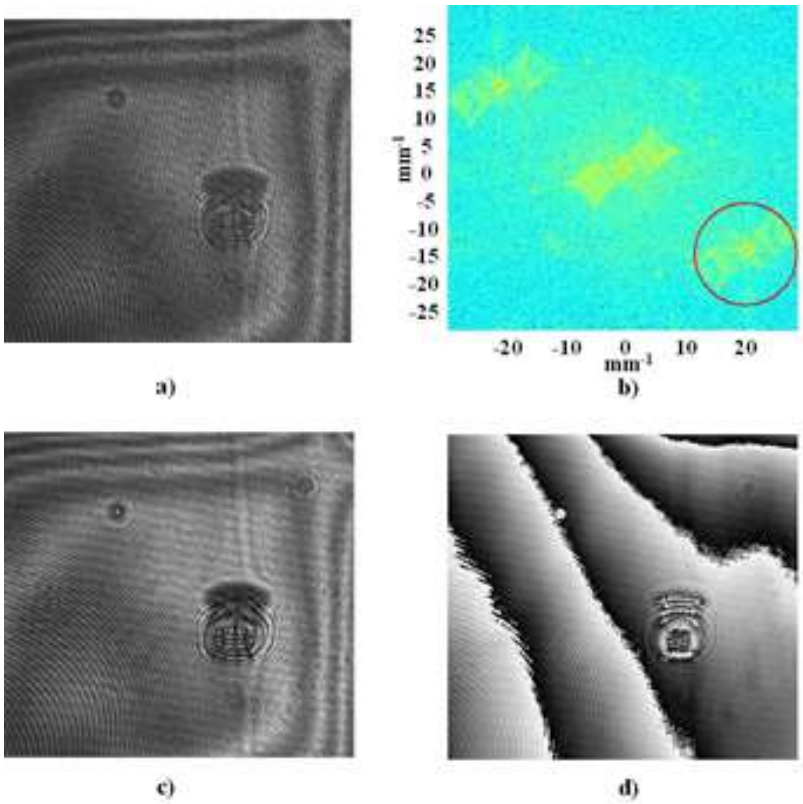


Figure 88: Schéma de principe de l'holographie numérique en temps résolu

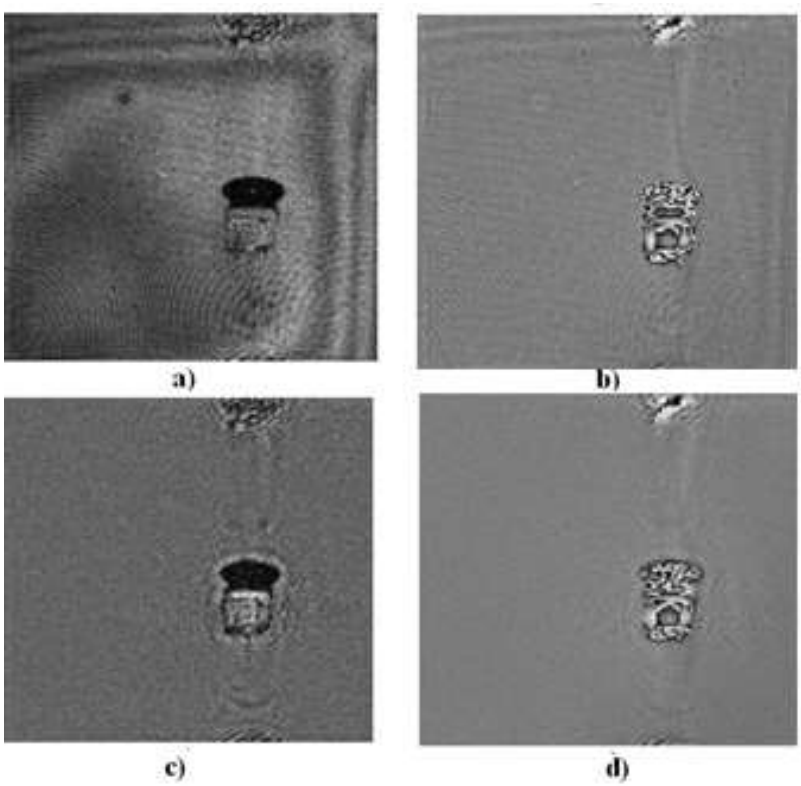
L'acquisition d'image a été réalisée directement sur le capteur de la caméra rapide (Photron SA3, 1000fr/s), en grandissement unitaire. Les premiers résultats sont très encourageants et permettent de bien visualiser le vortex et la diminution de taille de la goutte au gré de sa remontée.

La figure 89 présente l'obtention de l'interférogramme de départ et le calcul de l'hologramme. On perçoit des franges parasites qui sont en particulier générées par la fenêtre de blindage du capteur. La compensation de ces imperfections s'obtient en soustrayant une phase de référence, par exemple celle de la cuve sans goutte. Les premiers résultats obtenus pour le calcul de la phase pure sont présentés à la figure 90.



a) hologramme enregistré, b) spectre des frequences spatiales,
c) champ d'amplitude diffractée dans le plan capteur, d) champ de phase diffracté dans le plan capteur

Figure 89: Pré-traitement de l'hologramme



a) champ d'amplitude diffractée dans le plan de l'injecteur, b) champ de phase diffracté dans le plan de l'injecteur,
c) champ d'amplitude diffractée dans le plan capteur depuis l'hologramme de phase pure,
d) champ de phase diffracté dans le plan de l'injecteur depuis l'hologramme de phase pure

Figure 90: Obtention de l'hologramme de phase pure

Les résultats sont en cours de publication [47] et font l'objet d'un sujet de thèse en cotutelle avec l'Université du Maine pour l'année 2013-2104. En effet, toutes ces données permettront de nourrir des modèles de dispersion utilisés lors de l'échouage ou du naufrage de navires transportant des matières dangereuses. Un nouveau pilote est en cours de validation au laboratoire afin de pouvoir varier la pression (1-80bar) et la température (4-30°C) de la colonne d'eau, et d'appliquer ces contraintes réalistes à différents liquides ou gaz.

INTERACTION D'UNE ONDE DE SURPRESSION AVEC DES GOUTTES

Cette dernière application reflète la totalité de la contribution de l'optique aux sciences des risques, que ce soit la caractérisation des explosions, des incendies (naturels ou accidentels), de phénomènes impressionnants en moyenne et grande échelles (UVCE, BLEVE, Boil over). Dans ce cas concret, on ne se limite plus à l'imagerie globale d'un container perforé par un projectile, mais à l'interaction supplémentaire d'une onde de surpression qui peut provenir d'une explosion proche du container. Si on considère le côté droit du jet émanant du container (Figure 63), on aperçoit clairement l'atomisation des premières gouttes au contact de l'onde de souffle qui diffuse le flash lumineux de l'explosif. Toutefois, le manque de résolution spatiale ne permet pas actuellement d'effectuer de mesures sur ces images.

a) liquide avant explosion (T_0) *b) lumière de l'explosion (T_0+5,6ms)* *c) fragmentation due au choc (T_0+7ms)*

Figure 91: Interaction du liquide éjecté avec une onde de souffle suite à une explosion

Il faut donc d'abord procéder à des essais en laboratoire afin de déterminer quelle technique utilisé pour obtenir des informations pertinentes concernant la taille et la vitesse des gouttes lors de l'atomisation [48]. L'étude se focalise principalement sur l'influence des propriétés physiques (viscosité et tension de surface) sur le mode d'éclatement pour deux types de liquide: l'eau et l'acétone. Le nombre de Weber joue un rôle important quant à la description de l'atomisation:

$$We = \frac{\varrho_g u_g^2 D_0}{\sigma} \qquad \text{(eq 44)}$$

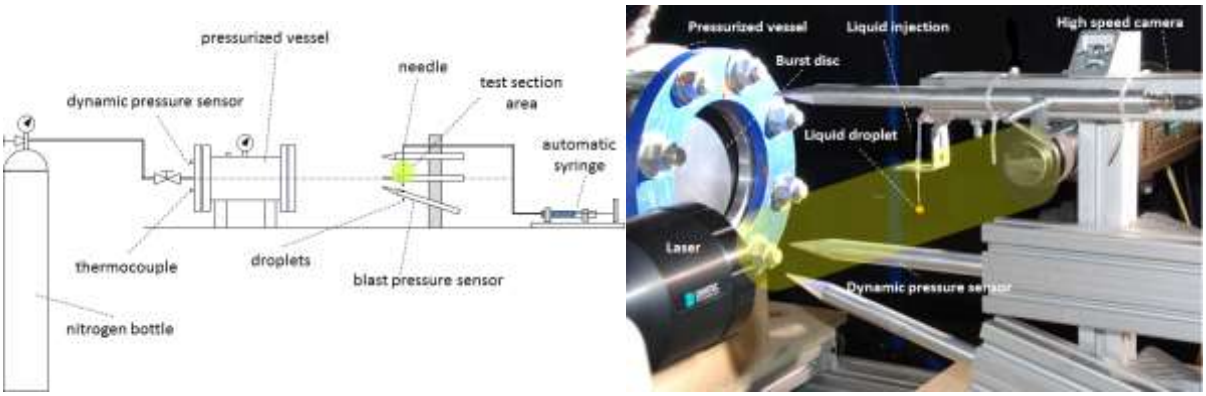
où ρ_g est la densité de l'air, σ la tension de surface du liquide, u_g la vitesse du souffle d'air et D_0 le diamètre initial des gouttes avant désintégration. La figure 92, proposée par Lee, présente trois régimes différents de la fragmentation de goutte en fonction du nombre de Weber.

a) bag breakup: 12<We<80 *b) stripping breakup: 80<We<350* *c) catastrophique breakup: We >350*

Figure 92: Représentations schématiques des mécanismes de fragmentation, d'après Lee [49]**.**

Pour observer ces phénomènes, l'ombroscopie couplée à une source laser pulsée associée à une caméra ultrarapide est utilisée. Il s'agit de l'installation de TRPIV décrite précédemment, où le faisceau laser de sortie impacte une lame de PMMA pour générer par fluorescence un éclairage incohérent collimaté par une lentille de Fresnel adjointe au système (*shadowscope, DantecDynamics*).

La configuration expérimentale en laboratoire nécessite de générer une onde de souffle qui va impacter un train de gouttes descendant. Une enceinte pressurisée à l'azote dont une des bouches de sortie est fermée par un disque de rupture constitue ce générateur d'onde de souffle. Le disque de rupture est calibré pour une rupture à 4bar. La température et la pression sont également mesurées. La distance entre le train de gouttes et le générateur peut être variée (Figure 93).



a) schéma de principe *b) ombroscopie en temps résolu*

Figure 93: Configuration expérimentale

Un des détecteurs utilise trois capteurs de pression afin de mesurer la vitesse de l'onde de souffle.

D'un point de vue de l'optique, deux montages ont été réalisés. Le premier, en ombroscopie rapide directe en éclairage continu, permet de mesurer la vitesse de l'onde de souffle par imagerie mais n'est pas décrit dans ce manuscrit. Le second en ombroscopie pulsée est présenté à la figure 93b. On aperçoit la lentille de Fresnel de sortie et la caméra rapide double trame. Cette caméra *PhantomV6* permet d'enregistrer nominalement à 1000dfr/s pour des images de 1280x800pixels, en buffer tournant de 5463 doubles frames (dfr). Comme le phénomène de fragmentation est très rapide, la cadence a été augmentée à 4228dfr/s en diminuant la résolution à 640x480pixels. À cette taille d'image, et avec un doubleur de focale placé sur un objectif de 105mm, le grandissement est de 18.5µm/pixel. La région observée d'intérêt vaut 12mmx9mm. La mise au point est effectuée précisément sur le train de goutte. Dans ce cas, on désire une image nette des particules pour pouvoir les mesurer et les localiser, et non pas amplifier leur influence sur l'indice de réfraction de l'air environnant. La profondeur de champ est ajustée pour couvrir l'entièreté des gouttes les plus larges (~1.5mm). Chaque cavité laser Nd-YLF émet à la longueur d'onde de 527nm des pulses de 10ns et de 15mJ. Le décalage entre les pulses de chaque cavité est réglé à 14µs. La durée du pulse contrôle la qualité de la netteté temporelle de l'image (comme un flash en photographie classique), tandis que le temps entre les pulses permet de figer le déplacement minimal enregistrable de l'objet étudié. La fréquence de répétition du double pulse est quant à elle intrinsèquement liée à la fréquence d'enregistrement des trames de la caméra. Elle détermine

le déplacement minimum de la particule entre deux double-images consécutives. Par contre, plus la fréquence d'enregistrement de la caméra est élevée, et plus la résolution spatiale de celle-ci chute, la limite basse étant donnée par la résolution attendue de l'image en pixels. On retrouve dès lors des compromis de la physique standard entre vitesse d'acquisition et échantillonnage spatial des données capturées.
Dans le cadre de cette étude, plusieurs points sont intéressants à étudier. D'une part l'influence du liquide utilisé, et la taille des gouttes, mais également le moment et l'endroit d'étude. En effet, les gouttes se déplacent très vite et peuvent sortir du champ avant leur atomisation complète. Quand l'atomisation en microgouttes s'opère on peut alors utiliser la corrélation d'image pour travailler en TRPIV (Vélocimétrie de particules par imagerie en temps résolu) et non plus faire du tracking de particules. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 94, où les dénominations anglophones des formes de fragmentation ont été conservées. Le temps s'écoule de (a) à (d) et de (e) à (h) et le souffle provient de la droite de l'image. Entre l'impact et la fragmentation complète, le nombre d'images significatives est de l'ordre de 4 à 6 paires d'images, soit environ 1ms.

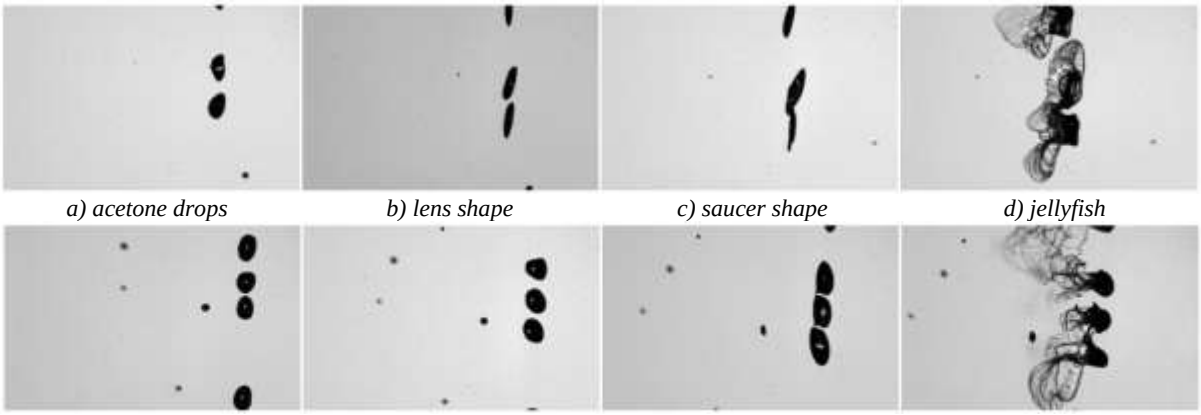


Figure 94: Comportements phénoménologiques temporels de l'interaction goutte-souffle pour l'acétone et l'eau.

La surpression qui impacte les gouttes d'acétone ou d'eau est comprise entre 14 et 20mbar, tandis que la vitesse de l'onde de souffle est d'environ 40m/s au niveau des gouttes.
Dans ces conditions, et pour des dimensions de goutte de diamètre de 1.5mm on retrouve en calculant le nombre de Weber:

- $We_{water} \sim 40$ => *bag breakup*
- $We_{acetone} \sim 124$ => *stripping*

Lorsqu'on applique les algorithmes de corrélation en TRPIV sur l'atomisation des gouttes (Figure 95), on retrouve une distribution de vitesses comprise entre 20 et 70m/s. L'onde de souffle en sortie de bouche de générateur a, quant à elle, été mesurée à environ 200m/s par ombroscopie directe en temps résolu. Ces différents résultats montrent l'adéquation des moyens d'essai et de caractérisation utilisés. La dernière phase du projet en cours réside en leur implémentation en grandeur nature sur les plateformes expérimentales du CEA Gramat.

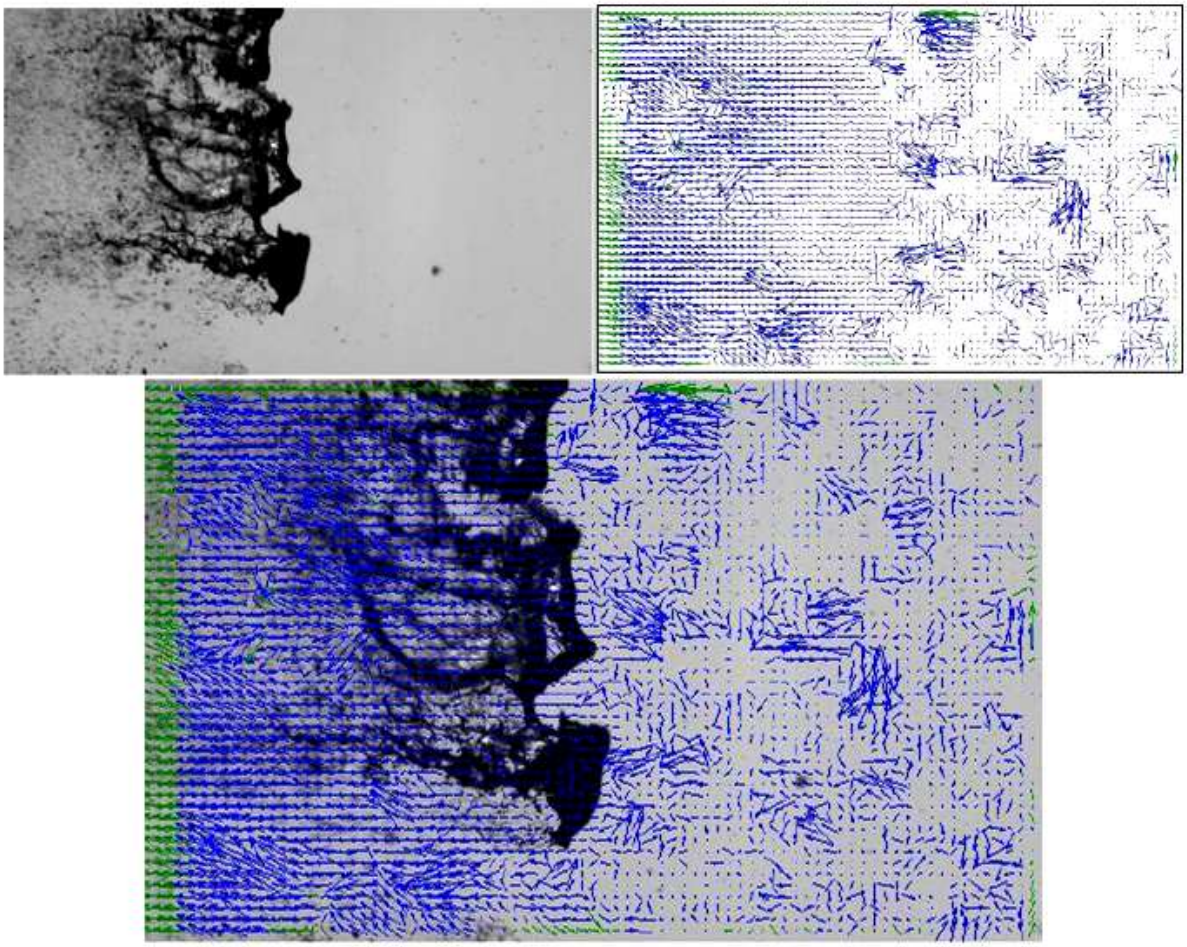
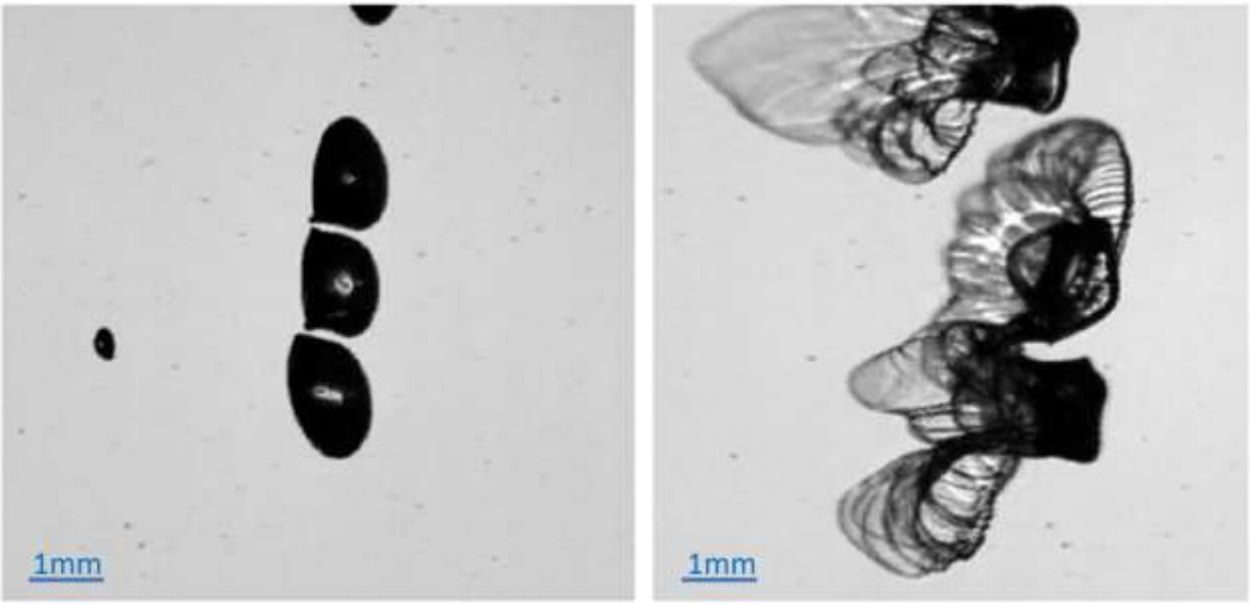


Figure 95: Détermination des vitesses par TRPIV entre deux pulses de chaque cavité.



a) eau en bag breakup *b) acétone en jellyfish*

Figure 96: Formes caractéristiques de fragmentation pour l'eau et l'acétone

La vue des petits est bien plus importante…
Que les visions des grands
P. Slangen

4 SYNTHÈSE

Ce manuscrit d'habilitation à diriger les recherches propose une contribution de l'optique à la mécanique et aux sciences des risques. Dans ce cadre, les principales techniques optiques relatives aux applications développées ont été présentées. Parmi celles-ci, on distingue les techniques photographiques et les techniques interférométriques, notamment par leur sensibilité.

Depuis une petite dizaine d'années, avec la forte croissance des moyens de calculs embarqués et l'explosion des capteurs CMOS, les moyens d'acquisition rapide d'images occupent à présent une place incontournable dans le monde de la recherche. Des cadences proches de l'ordre du million d'images par seconde, à des résolutions exploitables, peuvent à présent être atteintes.

Dans le cadre de ce manuscrit, une place importante est consacrée à la visualisation numérique ultra rapide car elle permet aux chercheurs et industriels de visualiser des phénomènes jusqu'alors inatteignables. Tout comme les récents progrès en photographie ou en interférométrie provenaient de l'emploi de capteurs numériques en lieu et place des capteurs argentiques, la combinaison de l'imagerie rapide avec ces moyens de révéler "l'invisible spatial" autorise à présent d'ajouter une analyse temporelle fine de ces phénomènes.

Les moyens d'éclairage ont également apporté des solutions nouvelles comme les réseaux de LED superluminescentes, qui tendent, pour certaines applications à remplacer les sources thermiques ou les lasers. En effet, elles génèrent des flux importants, de spectre connu (à large ou faible bande spectrale), et peuvent être pulsée à des cadences rapides (10^5Hz), pour des consommations électriques faibles et des durées de vie élevées.

Enfin, pour étudier des phénomènes de taille imposante ou dont le milieu de résidence n'autorise pas l'interférométrie, l'ombroscopie et la strioscopie ont été décrites dans des cas de figures tels que la pollution marine, qui est également un des sujets porteurs à l'Institut des Sciences des Risques.

Les techniques interférométriques sont bien appropriées pour des mesures de déplacement optiques de l'ordre de la longueur d'onde d'étude entre deux états successifs. L'interférométrie speckle et l'interférométrie holographique ont été comparées dans un cas d'étude statique afin d'assurer une bonne reproduction de la sollicitation mécanique de l'objet, mais avec une configuration optique permettant le calcul de la phase via un seul enregistrement. Ceci permet l'utilisation de ces deux techniques pour des mesures dynamiques, voire même en temps résolu.

La corrélation d'images peut être appliquée soit à des solides portant un motif caractéristique, soit à un ensemble de particules présentes dans un fluide qui composent ce motif (PIV). Son extension à la strioscopie sur l'arrière-plan permet également de travailler sur de très grandes surfaces et de révéler des variations de densité de fluide. De nouveau, on retrouve la possibilité de travailler de manière spatialement ou temporellement résolue.

Lorsqu'on s'intéresse à des phénomènes tels que le mélange ou la variation des propriétés physico-chimiques de fluides, l'ombroscopie et la strioscopie permettent de montrer et de mesurer qualitativement les variations d'indice de réfraction ou de densité du fluide.

D'autres techniques optiques que celles décrites dans ce manuscrit sont utilisées et commentées dans la littérature. Le tableau 8, tiré de [50] et remanié, reprend les différentes techniques et leurs principes ainsi que la quantité mesurable.
Il faut remarquer que certaines des techniques reprises dans ce tableau ne se restreignent pas à des mesures sur des petits volumes mais peuvent également s'appliquer à grande échelle si elles sont par exemple couplées à un balayage bi- / tri-dimensionnel. Ceci est particulièrement valable pour l'imagerie satellitaire multi-bandes ou la reconnaissance aérienne, couplée à du traitement d'images utilisant également les métadonnées de vol (localisation GPS, date et heure, …) comme moyens d'identification d'objet pertinents (ombres, …). C'est aussi le cas pour la détermination de reliefs terrestres au sol avec des appareils du type FARO 3D que l'Institut des Sciences des Risques utilise pour obtenir des informations cruciales dans le domaine des risques naturels (pente des bassins versants, modèle numérique de terrain, …).

Principe de mesure	Quantité Mesurée	Technique de mesure
Imagerie Directe	Vitesse, Taille, Forme Indice de Réfraction	PIV/PTV, Ombroscopie, PILS Séparation du point de gloire
Intensité, Rapport d'Intensité	Taille, Température, Espèces	Extinction/Absorption, Profondeur de Modulation, Rapport Mie/LIF, LIF 2-bandes/3-bandes, Speckle
Interférometrie	Vitesse, Taille, Indice de réfraction, Température	Laser Doppler, Phase Doppler (PDA), ILIDS/IPI, Diffraction Rainbow, Réfractométrie, Speckle, Holographie
Décalage Temporel	Vitesse, Taille, Forme	Temps de vol, Déplacement de pulse, Technique à décalage de temps
Retard de pulse	Taille, Température	Méthodes à Laser Femtoseconde
Diffusion Raman	Température, Concentration d'espèces	Spectroscopie Raman, Holographie Raman

ILIDS: Interferometric laser imaging for droplet size // IPI: interferometric particle imaging // LIF: Laser-induced fluorescence
PIV: particle image velocimetry // PTV: particle tracking velocimetry // PDA: Particle Dynamics Analysis
PILS: Pure In Line Shadowgraphy

Tableau 8 : Principe de mesure, quantité mesurée et technique de mesure de méthodes optiques

L'ensemble de cette démarche montre la forte contribution des méthodes optiques à la mécanique (du solide ou des fluides) ainsi qu'aux sciences des risques (dynamique des fluides, détoniques …) et permet de dégager des axes de recherches futurs. L'amélioration de la strioscopie, pour la rendre quantitative, et le couplage de la PIV à des images de strioscopie sont des axes à explorer par des prochaines thèses. L'application à des phénomènes de grande envergure, en champ complet, tels que le BLEVE ou l'UVCE[5] est également en cours d'étude.

[5]BLEVE: Boiling Liquid ExpandingVapour Explosion, UVCE: Unconfined Vapour Cloud Explosion

Un des challenges scientifiques a relevé constamment lors de nos travaux est la prise en compte des perturbations extérieures et des distances de sécurité, qui conditionnent les résolutions temporelles et spatiales que l'on peut directement obtenir. Ceci nécessite une veille technologique constante qui permet de sélectionner les matériels les plus appropriés. D'autre part, certaines de ces techniques peuvent également être détournées de leur voie classique…

Très récemment, nous avons également participé à l'étude par imagerie rapide de l'effet pyroélectrique pour le microprélèvement de solutions liquides [51]. Les résultats très encourageants permettent de mettre en évidence la formation de microgouttes à des échelles spatiales avoisinant le micromètre et à des cadences de l'ordre de 200kfr/s. Cette collaboration avec INO-CNR Istituto Nazionale di Ottica, Unit of Napoli, est en plein essor. Ce domaine d'études rejoint d'ailleurs celui de la dissolution de gouttes ou de bulles de fluide dans un fluide d'accueil, et devrait permettre le développement de thèses en commun en holographie numérique rapide.

D’un point de vue académique, la maîtrise de ces techniques a permis de renforcer les collaborations locales (Université de Montpellier UM1), nationales (ENSIM Le Mans) et internationales (EPFL, Suisse) (Université de Queens, Canada). Cette expertise est valorisée à l’international en tant que membre de comité scientifiques de grandes manifestations internationales, par des participations à des relectures d’actes de congrès ou de publications dans des revues scientifiques de rang A, à des jurys de thèses (opponent à Luleå University of Technology, Suède), et à la co-écriture d’ouvrages scientifiques nationaux et internationaux.

5 PROJET DE RECHERCHE

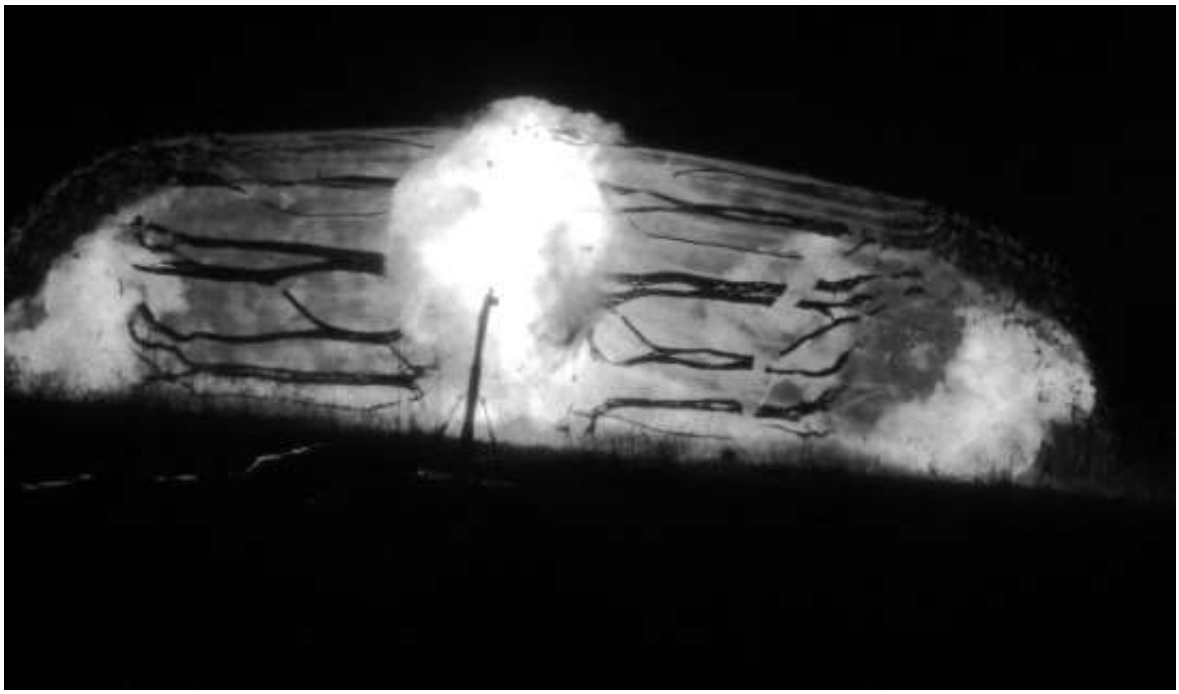
Celui qui, détenant le savoir,
Ne le transmet pas
À celui qui ne sait rien,
Ne mérite pas de savoir,
Ce que celui qui ne sait rien, ignore
Popeck

Les différentes techniques optiques qui permettent de mesurer des champs de déplacement ont été présentées. Ces champs de déplacements peuvent être directement lié à un solide, portant un marquage ou éclairé par un faisceau cohérent, générateur de speckle. De la même manière pour les fluides, l'ensemencement du fluide par des particules génère ce marquage. Si on considère ces particules comme des entités à part entière, il est également possible de détecter leur mouvement et d'établir des cartes de déplacement pour ces particules (gouttes, front d'éjection). Enfin, pour d'autres cas, la mise en évidence des effets d'une perturbation sur l'indice de réfraction peut être analysée par des méthodes sensibles au changement d'indice (et au changement de densité). Dans le cadre du projet de recherche, il est nécessaire de continuer d'appliquer et développer les techniques mises en place précédemment à la caractérisation des risques industriels. Avec l'expérience acquise en imagerie rapide, le laboratoire est également en mesure d'appréhender les phénomènes accidentels rapides : explosion, destruction de stockages aériens et pollution marine. Enfin divers cas typiques en risques industriels méritent d'être investigués par des méthodes optiques, existantes ou à venir. Le but final de ces travaux est de mieux caractériser les phénomènes étudiés afin que les conséquences de ceux-ci soient mieux abordées par les organismes de réponse en cas de crise.

Différents cas d'application ont déjà été investigués, mais nous ne sommes qu'au début et il reste encore du chemin que des doctorants actuels et futurs pourront parcourir. L'environnement généré au laboratoire est propice à tous ces développements et les moyens technologiques sont à présent au point. La connaissance de certains mécanismes comme le lien entre les informations de phases, l'indice de réfraction et la solubilisation liquide est une piste intéressante pour les applications en holographie numérique.

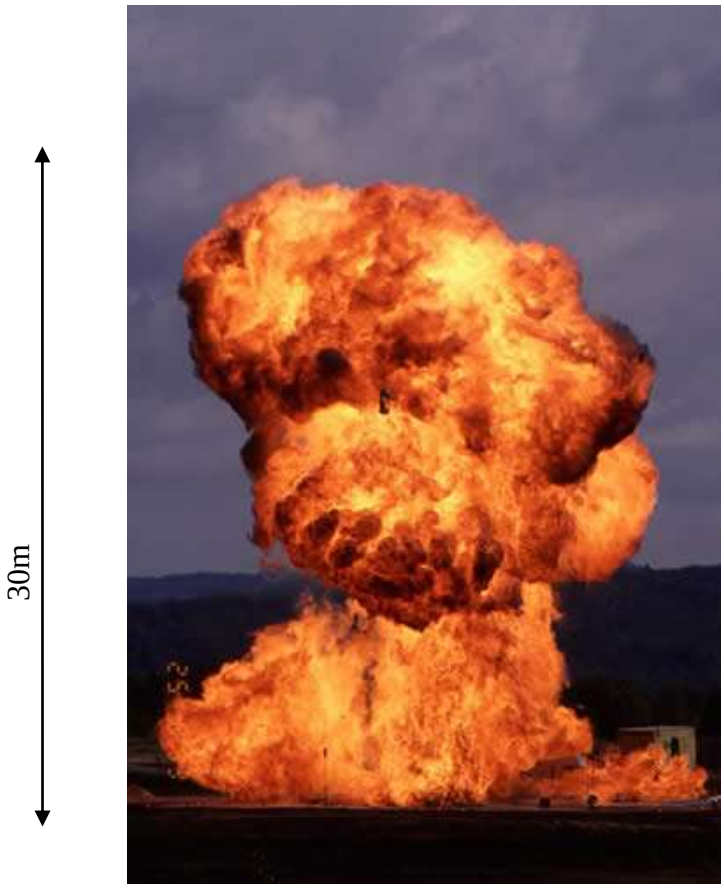
La caractérisation des effets à grande échelle et l'étude de la génération et de la propagation d'ondes de choc lors de BLEVE ou d'UVCE fait partie des développements requis. Dans ce type d'effet, deux sujets principaux doivent être abordés: l'explosion, et la propagation du front de flamme à des vitesses supersoniques qui est au cœur du champ observé, d'une part. D'autre part, la propagation de l'onde de choc, qui n'est détectable que part ses effets sur la densité de l'air, mérite de mieux maitriser des techniques telles que la strioscopie orienté sur l'arrière-plan (Background Oriented Schlieren: BOS) par exemple. Comme son nom l'indique, celle-ci repose sur des algorithmes de corrélation d'images effectués sur un arrière-plan qui est déformé par le phénomène d'intérêt situé à l'avant plan [39]. On perçoit très clairement que pour ce genre de phénomènes alliant explosion (avec boule de feu) et grand champ d'action, les types de caméra rapide disponibles doivent être doublés, l'un pour des temps de pose très courts sur le front de flamme, et l'autre pour enregistrer les modifications de niveaux de l'arrière-plan. En champ libre, avec les distances de sécurité requises pour ce type de métrologie, les optiques utilisées peuvent varier du grand angle ou téléobjectif, mais doivent toutes être des optiques rapides, munies de larges ouvertures. Enfin d'autres méthodes, comme la fluorescence induite par laser permettant de remonter à la concentration des produits devront être investiguées.

D'autres phénomènes comme le Boil Over[6] doivent également être étudiés à grande échelle. L'étude de la nucléation à l'interface eau-carburant est également de la plus haute importance.
C'est dans ce cadre de recherche que je souhaite continuer d'exercer mon métier d'enseignant-chercheur, qui inclut la direction de thèses, la gestion de contrats industriels et le travail en équipe de recherche, avec des chercheurs de culture et de qualité différentes.
Dans un avenir proche, à 5 ans, le développement d'une plateforme expérimentale de recherche en optique appliquée est envisagé. Cette plateforme a pour objectif une recherche partenariale avec les industrielles et doit s'ancrer sur les thématiques existante à l'EMA afin de fournir des solutions d'imagerie spatio-temporelle. Le développement de travaux de recherche en micro holographie numérique rapide appliquée à l'atomisation de gouttelettes par onde de souffle est envisagé via l'appui de doctorants. Par ailleurs, les collaborations actuellement en cours seront pérennisées ceci afin de renforcer le rayonnement national et international (collaborations avec le Canada pour le BLEVE, le Japon pour le Boil Over et l'Italie pour le microprélèvement). Les enseignements associés aux différents départements seront poursuivis (formation initiale en optique appliquée, métrologie, travaux pratiques en département Risques,…).
L'expérience développée au cours de ces 18 ans d'enseignant-chercheur m'a également permis de répondre à des situations variées, de la mécanique du solide à la dynamique des fluides et ce, à des échelles spatiales courant du nanomètre à la dizaine de mètres, et à des cadences de mesures de l'essai statique à la dynamique en temps résolu.

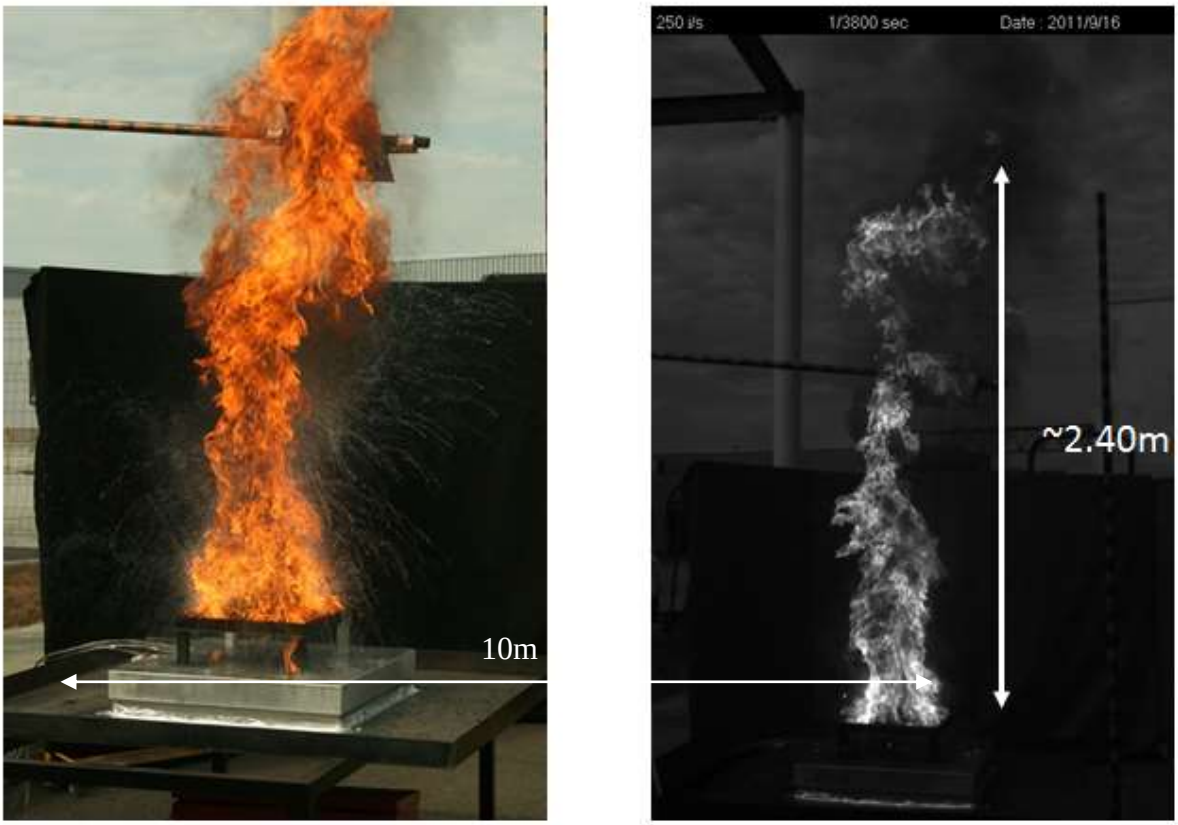


UVCE (10m^3 mélange propane-oxygène), distance de sécurité 150m (image LGEI-ISR)

[6]BoilOver: Les feux de bacs d'hydrocarbure, qui contiennent une faible quantité d'eau en leur fond, peuvent entrainer des conséquences désastreuses lorsque cette pellicule d'eau se réchauffe violemment au contact des zones chaudes, puis entre en ébullition en entrainant avec elle du carburant qui s'enflamme violemment sur des dizaines ou des centaines de mètres.



BLEVE avec boule de feu sur citerne de gaz : distance de sécurité 200m (image M. BIRK, QueensU, Canada)



BoilOver en feu de nappe (40cm x 40cm) : distance de sécurité 10m (image LGEI-ISR)

6 POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

Développement et application des techniques optiques et d'acquisition et/ou de traitement d'images.
Recherche et Développements en visualisation de phénomènes ultrarapides par techniques en lumières cohérente et incohérente.
Validation des techniques optiques utilisées.

COLLABORATIONS

COLLABORATIONS INTERNES

- ✓ Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel LGEI, Équipes AIR, Équipe EAU,
- ✓ Centre des Matériaux (CMMA),
- ✓ Plateforme Mécatronique
- ✓ Créateurs de l'incubateur technologique (Innov'up)

Exemples: caractérisation de spray d'huiles essentielles, visualisation et comptage de bactéries, détermination de champ de déplacements 3D pour la mécanique expérimentale, mesure des amplitudes de vibration de fibre polymère, mesure de trajectoire de système de protection individuelle antimine.

COLLABORATIONS EXTERNES

- ✓ **CEA Cadarache:**
  - Rapporteur, membre de jurys de thèse
  - Expérimentation sur la mesure de l'érosion-redéposition sur le limiteur pompé toroïdal (LPT) du TOKAMAK par interférométrie de speckle à deux longueurs d'onde.
- ✓ **Faculté Odontologie (Prof F. Cuisinier), Université de Montpellier 1:**
  - Étude de l'adhésion entre dent naturelle et prothèse céramique par interférométrie speckle (2006-201X).
  - Visualisation rapide de la tenue dent-couronne en compression mécanique jusqu'à rupture (2007-201X).
- ✓ **Université Libre de Bruxelles : Aero-Thermo-Mechanics Department**,
  - Caractérisation d'un spray de lubrification industrielle, (2010-201X)

ENCADREMENT PÉDAGOGIQUE

- ✓ Encadrement de stagiaire :
  - F. Michel, stage doctorat, Université de Liège, avril 2005.
  - V. Rosso, stage doctorat, Université de Liège, septembre 2006.
  - P. Delord-Derancourt, stage Licence 3, Université de Nîmes, mars 2012.

- ✓ Accompagnement de thèse, sans encadrement direct
  - F. Laraba-Abes: Identification de comportements macrohomogènes en grande déformation des matériaux élastomères, 1998.
  - B. Watrisse: Mesure de déformations en champ non homogène sur des nuances d'acier, 1998.
  - J.-S. Wienin: Identification de lois de comportement en grandes déformations, 2001.
  - M. Giton: Comportement à la déchirure de matériaux élastomères, 2004.
  - S. Forestier: Étude de l'évaporation d'un liquide répandu au sol suite à la rupture d'un stockage industriel, 2011.
  - D. Laboureur: Étude des phénomènes aggravants suite à l'endommagement de réservoirs de produits inflammables ou non, 2012.
  - M. Fuhrer: Transport maritime de produits chimiques liquides et flottants : étude expérimentale du rejet accidentel sous-marin suite à un naufrage, 2012.

- ✓ Encadrement de thèse :
  - *J. Begorre, 1995-1998, ULg, Belgique, non soutenue (abandon candidat pour emploi étranger).*
  - B. Gautier (2002-2005), Études et Réalisation d'un interféromètre de Speckle à mesure de formes intégrée, ENSM Paris, Sciences et Génie des Matériaux, 2005.
  - *X. Chen 2005-2006*, ENSM Paris, *non soutenue (candidate éliminée après bilan 1ère année).*
  - N. Lecysyn (2005-2008), Étude et modélisation des effets d'un impact balistique sur un réservoir, Université Aix-Marseille I, Ecole doctorale des Sciences de l'Environnement, Formation Doctorale « Biosciences de l'Environnement », 2008.
  - A. Lassauce (2008-2011), Visualisation, granulométrie et évaporation de gouttes et de sprays – Étude dans une atmosphère close et pressurisée, Ecole des Mines de St Etienne, Sciences et Génie de l'Environnement, 2011.
  - *B. Kabar (2009-2012), Ecole des Mines de St Etienne, soutenance en septembre 2013, UJM.*

- ✓ Encadrement de post-doctorat :
  - O. Gennari, INO-CNR Istituto Nazionale di Ottica, Unit of Napoli, 80078 Pozzuoli (NA), Italy*2013, séjour du 25-29 avril 2013.*

RÉSEAU DES CONTACTS

Membre du Pôle Optique et Photonique Sud (POPSud), du Club "Contrôles et Mesures Optiques pour L'industrie", de la Société Française d'Optique, de l'European Optics Society, et de l'OSA (Optical Society of America, USA).

RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE

ORGANISATION DE MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES

1. SPECKLE06: "Speckles, from Grains to Flowers", 13-15 Sept 2006, Nîmes, France

Organisation complète et gestions scientifique et logistique d'un congrès international sur le speckle (C. Cerruti, EMA, pour coordination avec industriels et logistique):

- Génération d'un comité scientifique international de lecture,
- Validation des 190 résumés reçus de 40 pays différents,
- Coordination des résultats des reviewers,
- Sélection des conférences et du programme scientifique et des conférenciers invités,
- Conception du programme scientifique,
- Collecte et relecture des manuscrits,
- Édition dans une revue scientifique internationale (Proceedings of SPIE, Society of Photooptical Industrial Engineers, USA),
- Président du Comité Scientifique et chairman de session.

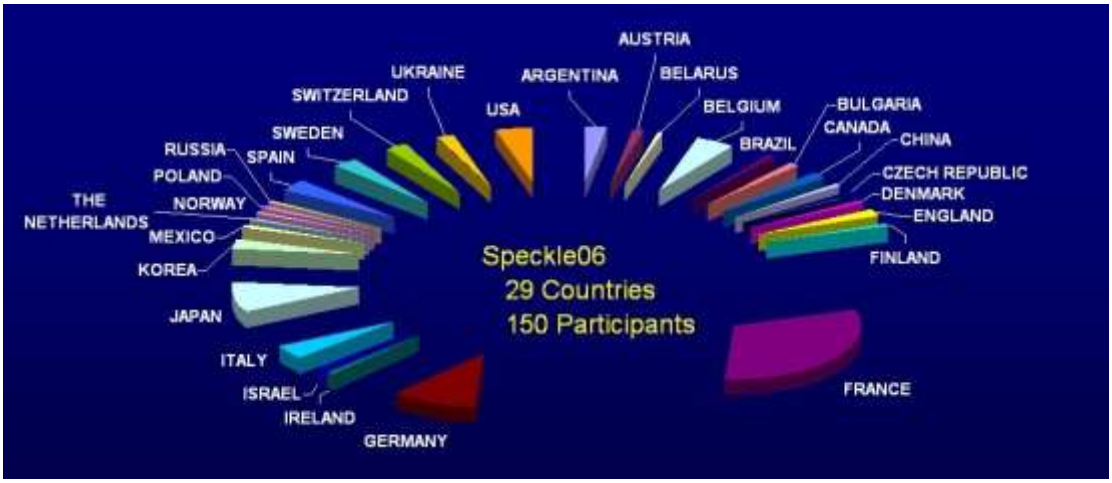


Figure 97

Plus de 150 participants (20% France), de 40 pays, ont échangé sur leurs travaux pendant ces trois jours de conférence sur les propriétés et les applications de la lumière laser.

Quatre conférenciers invités (***J. Goodman, M. Takeda, W. Osten, M. Kujawinska***) de renommée internationale les ont éclairés sur des sujets de pointe lors des conférences invitées, 62 présentations orales et plus de 50 posters ont été présentés.

Cinq stands d'exposants industriels ou académiques ont également attiré les visiteurs (Alliance Vision, Coherent France, Photon Lines, PopSud, Roberts & Co Publishers).

2. Workshop TIEMS, 22 et 23 juin 2011, Nîmes, France

Afin de proposer une plus grande ouverture internationale à la plate forme de l'Institut des Sciences des Risques (ISR), un workshop international a été organisé. Le programme et l'appel à communication sont toujours consultables sur le site http://www.tiems.org/. Ce congrès constitue la pièce maîtresse du dispositif de diffusion de connaissance de l'ISR. Il a été organisé en partenariat étroit avec The International Emergency Management Society (TIEMS), société savante, regroupant 8000 experts internationaux et qui organise une demi

douzaine de conférences de ce type par an (en 2010 : Moscou, Santiago du Chili, Amsterdam, Split, Pékin,…). Environ quatre vingt conférenciers étaient présents.

ACTIVITÉS CONTRACTUELLES:

italique : toujours en cours

- **SIPOREX :** Application sur site de production de la corrélation d'images en lumière blanche pour la mise en évidence des contraintes résiduelles dans des dalles "plancher" (P. Ienny, P. Slangen), 1995.
- **SOLLAC :** Équipement d'une machine d'emboutissage Erichsen d'un système photomécanique laser pour la détermination des Courbes Limites de Formage: étude et développement du software et du hardware (P. Ienny, P. Slangen), 1996.
- **PROCONCEPT :** Étude en compression de cages pour implants intervertébraux, (P. Ienny, P. Slangen), 1997.
- **AÉROSPATIALE :** Analyse modale attachée aux structures planes - Étude de faisabilité : visualisation de modes propres par interférométrie speckle (P. Slangen), 1999.
- **RENAULT :** Boulogne Billancourt : Identification de lois de comportement de tôles destinées à l'emboutissage, (P. Ienny, P. Slangen), 1997-2000.
- **RENAULT :** Boulogne Billancourt : Critère de délaminage pour les tôles sandwich, (P. Ienny, P. Slangen), 1998.
- **EADS :** Application de la stéréocorrélation à l'analyse de déformations surfaciques de structures 3D : étude de faisabilité, 2001. Réalisation d'un interféromètre speckle 3-D pour l'analyse de déformations surfaciques : étude de faisabilité, 2001-2002.
- **LAFARGE :** Mesure de rugosité de surface de dalles en béton par projection de franges, 2002.
- **ST GOBAIN** : Application de la PSDSPI pour la détection de défauts dans le domaine verrier, 2003.
- ***METEHOR (CEA-CEG)*** *: Analyse par imagerie de jets liquides fragmentés, pluriannuel (2005- ...)*
- **KEMSTREAM** : Visualisation de jet de spray d'injecteur pour CVD, 2006-2007
- **IREX** : Mesure de rugosité de rebétonnage, 2007.
- **RENAULT** : Instrumentation d'une machine de traction large, 2007.
- **COMURHEX** : Visualisation et mesure de bulles d'ozonisation, 2008.
- **TOTAL** : Étude de la rupture brutale de réservoirs, 2008-2009.
- **EFDA** : Mesure de l'érosion-redéposition dans ITER, 2010- 2011.
- **IRSN** : Étude de la rupture d'une RTGV, 2010- 2011.
- **LICORNE (CEDRE)** : Evaluation des conséquences, caractérisation et modélisation de la dispersion de produits industriels en mer., 2009-2012.
- ***CITEPH PETROLE (ALYOTECH TECHNOLOGIES - CEDRE - DORIS - ECOLE CENTRALE MARSEILLE - OCEANIDE - GDF-Suez)*** *:BLOWOUT: Modélisation de fuites sous-marines de gaz naturel et de GNL.*
- ***BUBBLE (CEA):*** *Étude des conséquences de la perte de confinement dans des réservoirs.*
- ***FUI METHANE (OSEO INNOVATION - GDF SUEZ - CEDRE - ALYOTECH TECHNOLOGIES - NYMPHEA ENVIRONNEMENT),*** *Modélisation CFD, expérimentation sur une fuite de pétrole, de gaz naturel ou de GNL en mer.*
- ***NUAGE (CEA) :*** *Etude et modélisation des transferts atmosphériques.*

7 RÉFÉRENCES

[1] GOODMAN J.W., Introduction to Fourier Optics (Second Edition), McGraw-Hill Editions, New York, 1996.

[2] SLANGEN P., KARRAY M., PICART P., “Some figures of merit for comparison between digital Fresnel holography and speckle interferometry”, Speckle Metrology, EOM11-EOM01-158, Proc. SPIE vol.8082, Munich, May2011.

[3] Mesure de Champs et identifications en Mécanique des Solides : « Chap.5 : Éléments d’interférométrie speckle (SLANGEN P., JACQUOT P., BORZA D.)», Michel Grediac/Francois Hild (eds), Hermès Science Publications, Lavoisier, ISBN 978-2-7462-3112-2, 2011.

[4] Optical Methods for Solid Mechanics A Full-Field Approach: Chap.6 : Speckle Interferometry (SLANGEN P., GASTINGER K., SOMERS P.A.M.M., PICART P.)”, Rastogi, Pramod/Hack, Erwin (eds.) 1. Edition - ISBN 978-3-527-41111-5 - Wiley-VCH, Berlin June 2012

[5] SLANGEN P., JACQUOT P., BORZA D., Speckle Interferometry, in « Full-Field Measurement and Identification in Solid Mechanics», Michel Grediac/Francois Hild (eds), Engineering & Materials Science/Mechanical Engineering/Solid Mechanics, ISBN: 978-1-84821-294-7 Wiley-ISTE Nov. 2012

[6] BORZA D. N., Vibration Measurement by Speckle Interferometry between High Spatial and High Temporal Resolution, Holography, Research and Technologies, Prof. Joseph Rosen (Ed.), ISBN: 978-953-307-227-2, InTech, (2011). Available from: http://www.intechopen.com/books/holography-research-andtechnologies/vibration-measurement-by-speckle-interferometry-between-high-spatial-and-high-temporalresolution

[7] SLANGEN P., APRIN L., HEYMES F., EQUIS S., JACQUOT P., “Liquids blending: an investigation using dynamic speckle interferometry“, Proc. SPIE vol.7387, Florianopolis, Brazil 2010.

[8] De VEUSTER C., SLANGEN P., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y. "Disk growing" algorithm for phase-unwrapping: Application to speckle interferograms", Appl. Opt. Vol.34, n°2, pp 240-247, Jan. 1996

[9] Gautier2005- B. GAUTIER (2002-2005), Études et Réalisation d'un interféromètre de Speckle à mesure de formes intégrée, ENSM Paris, Sciences et Génie des Matériaux, décembre 2005.

[10] De VEUSTER C., SLANGEN P., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y., “Influence of the geometry of illumination and viewing beams on displacement errors in interferometric metrology“, Opt. Com., vol.143, pp 95-101, 1997.

[11] SLANGEN P., GAUTIER B. “Phase Shifting Digital Speckle Pattern Interferometry: Off-the-shelf set-up description and application to stainless steel membrane displacement measurements”, "Speckle Metrology 2003", Proc. SPIE, vol.4933, pp 76-81, Trondheim, Norway, June 2003.

[12] SLANGEN P., GAUTIER B., “Nematic Liquid Crystals Light Valve Calibration and Application to Phase Shifting Speckle Interferometry”, SPECKLE 2006, Proc. SPIE, vol. 6341, pp U73-U78, 2006.

[13] POPINEAU S., GAUTIER B., SLANGEN P., SHANAHAN M.E.R.S., “A 3D effect in the wedge adhesion test: Application of speckle interferometry Source”, J. Of Adhesion,vol. 80 Issue 12, pp 1173-1194, Dec 2004.

[14] SLANGEN P., CORN S., FAGES M., CUISINIER F. J.G., “Prosthodontic crown mechanical integrity study using Speckle Interferometry“, FRINGE09, pp 734-737, Springer Verlag, Osten Kujawinska Eds, Stuttgart, Germany 2009

[15] SLANGEN P., CORN S., FAGES M., RAYNAL J., CUISINIER F.J.G., “Prosthetic clone and natural human tooth comparison by Speckle Interferometry“, Speckle2010, Proc. SPIE vol.7387, Florianopolis, Brazil 2010.

[16] FAGES M., CLOITRE T., SLANGEN P., CORN S., CUISINIER F., “Speckle Interferometry of Natural And Ceramic Crown Under Loading“, IADR, Barcelona, July 2010.

[17] FAGES M., SLANGEN P., RAYNAL J., CORN S., TURZO K., MARGERIT J., CUISINIER F.G.J. “Comparative mechanical behavior of dentin enamel and dentin ceramic junctions assessed bySpeckle interferometry (SI)”, Dental Materials, Vol. 28, Issue 10, , Pages e229–e238, http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2012.05.006. October 2012.

[18] KIM M., HAYASAKI Y., PICART P., ROSEN J., "Digital holography and 3D imaging: introduction to feature issue," Appl. Opt. 52, DH1-DH1 2013.

[19] KARRAY M., SLANGEN P., PICART P., “Analysis of performances between speckle interferometry and digital holographic interferometry”, vol. 52, Number 9, Exp Mech 52:1275-1286 *DOI 10.1007/s11340-012-9604-6*, 2012.

[20] PICART P., TANKAM P., MOUNIER D., PENG Z., LI J.C, "Spatial bandwidth extended reconstruction for digital color Fresnel holograms", Optics Express 17(11), 9145-9156 (2009).

[21] LI J.C., TANKAM P., PENG Z., PICART P., "Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification", Optics Letters, 34(5), 572-574 (2009).

[22] HINSCH D., ZEHNDER K., JOOST H., GÛLKER G., "Monitoring detaching murals in the Convent of Müstair (Switzerland) by optical metrology, J. Cult. Heritage, 10, 94-105, 2009.

[23] SUTTON M.A., ORTEU J.-J., SCHREIER H. W., Book - Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer ISBN 978-0-387-78746-6, 2009.

[24] BALDI A., BERTOLINO F.," Systematic errors due to polynomial interpolation in Digital Image Correlation. Analysis of some interpolating kernels and experimental validation.", Speckle 2012: V International Conference on Speckle Metrology, Proc. of SPIE Vol. 8413, 841308 doi: 10.1117/12.978642, 2012.

[25] WIENIN J.S., IENNY P., SLANGEN P., CHAMAND C., MOINIER L. , "Mesure de champs de vitesses de déformation par corrélation d'images: Application à l'obtention de courbes limites de formage", Proc. Photomecanique 2001, Poitiers, France, 2001.

[26] SLANGEN P., WIENIN J.S., MACQUAIRE B. , IENNY P., "Phase Shifting Digital Speckle Pattern Interferometry (PSDSPI) and Digital Image Correlation (DIC) displacement measurements for the validation of a plane compression test", Proc Int. Workshop on Video-Controlled Materials Testing and In-situ Microstructural Characterisation, Ecole des Mines de Nancy - INPL (Nancy, France) 1999.

[27] SLANGEN P., IENNY P., GAUDERAUX S. , "Optical measurement of multidimensional kinematic field: behavior of sandwich plate composites", Proc. MAT 2001, Nuremberg, Allemagne, 2001.

[28] FORESTIER S., HEYMES F., SLANGEN P., MUNIER L., LAPÉBIE E., DUSSERRE G., "Evaporation under cavity flow: Laser speckle correlation of the wind velocity above the liquid surface", Proc. SPIE vol.8413, Vigo, Spain, 2012.

[29] HOLST G.C., LOMHEIM T.S., CMOS/CCD Sensors and Camera Systems, SPIE Press; 2nd edition, 15 may 2011.

[30] LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., SLANGEN P., MUNIER L., LAPEBIE E., LE GALLIC C., DUSSERRE G., "Preliminary Study of Ballistic Impact on an Industrial Tank: Projectile Velocity Decay", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 21, issue 6, pp 627-634, 2008.

[31] LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., APRIN L., SLANGEN P., MUNIER L., LE GALLIC C., DUSSERRE G., "Ballistic impact on an industrial tank: Study and modeling of consequences", Journal of Hazardous Materials, Vol. 172, Issues 2-3, pp 587-594, 30 December 2009.

[32] LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., APRIN L., SLANGEN P., MUNIER L., LAPEBIE E., LE GALLIC C., DUSSERRE G., "Experimental study of hydraulic ram effect on a liquid storage: analysis of overpressure and cavitation induced by a high-speed projectile", Journal of Hazardous Materials, Vol.178, pp.635-643, 4 Feb 2010.

[33] LECYSYN N., HEYMES F., DANDRIEUX A., SLANGEN P., DUSSERRE G., MUNIER L., LAPEBIE E., LE GALLIC C., "Experimental Investigation of a Catastrophic Tank Failure with a High Speed Video Recorder Image Processing and Hydrodynamic Characterization of the Liquid Jet", 4th International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Edimburg, Grande Bretagne, Paper 212 – Topic 4, 22-24 may 2007.

[34] PETITPAS F., MASSONI J., SAUREL R., LAPEBIE M., MUNIER L., "Diffuse interface model for high speed cavitating underwater systems", Int. J. of Multiphase Flow 35, 747–759, 2009. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.03.011

[35] Handbook Springer of Experimental Fluid Mechanics, chap. 6, TROPEA C., YARIN A.L., FOSS J.F. (Eds.), Springer 2007.

[36] Flow Visualization 2nd edition, MERZKIRCH W., Academic Press, 1987.

[37] Schlieren and Shadowgraph Techniques "Visualizing Phenomena in transparent media", SETTLES G.S., Springer, 2001.

[38] MAUGER C., MÉÈS L., MICHARD M., AZOUZI A., VALETTE S., "Shadowgraph, Schlieren and interferometry in a 2D cavitating channel flow", Exp. Fluids 53, 1895—1913, 2012. doi:10.1007/s00348-012-1404-3.

[39] HARGATHER M. J., SETTLES G.S., "A comparison of three quantitative schlieren techniques", Optics and Lasers in Engineering 50, 8–17, 2012. doi:10.1016/j.optlaseng.2011.05.012.

[40] DESSE J.M., DERON R., "Optical Diagnostics of Flows, Shadow, Schlieren and Color Interferometry", Issue 1, AL01-09, http://www.aerospacelab-journal.org/ December 2009.

[41] SETTLES G., "Important developments in schlieren and shadowgraph visualization during the last decade", ISFV14 - 14th International Symposium on Flow Visualization June 21-24, EXCO Daegu, Korea, 2010.

[42] APRIN L., BONY-DANDRIEUX A., DUSSERRE G., CABIOC'H F., GOURIOU V., LEGRAND S., LE FLOCH S., LAZURE P., POUS S., MARCHAND M., JAMES A., DANIEL P. (2006), CLARA: An integrated project to analyze and determine the consequences of a chemical spill on west French coast, ESREL 2006, Safety and Reliability for Managing Risk, Estoril, Portugal, p.2225-2231, 18-22 September 2006.

[43] LE FLOCH S., FUHRER M., MERLIN F., SLANGEN P., APRIN L., LAFLAMME A., "Fate of a Xylene Slick at Sea and Influence of Meteorological Conditions", 33rd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, 8-10 June, Halifax, Nova Scotia, Canada 2009.

[44] SLANGEN P., APRIN L., FUHRER M., LE FLOCH S., DUSSERRE G., "Methyl Ethyl Ketone spills in water : Visualization of the releases by optical schlieren technique", 33rd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, 8-10 June, Halifax, Nova Scotia, Canada 2010.

[45] FUHRER M., APRIN L., LE FLOCH S., SLANGEN P., DUSSERRE G., "Behavior of chemicals in the seawater column by shadowscopy", Proc. SPIE vol.8413, Vigo, Spain, 2012.

[46] Le FLOCH S., BENBOUZID H., OLIER R.., "Operational device and procedure to test the initial dissolution rate of chemicals after ship accidents: the Cedre Experimental Column", The Open Environmental Pollution & Toxicology Journal 1, 1-10, 2009.

[47] PICART P., APRIN L., HEYMES F., SLANGEN P., "Visualization of Pollutant Droplets Solubilization in Seawater by Phase-Only Digital Holography", Digital Holography & 3-D Imaging (DH) – OSA Meeting, Hawaï, April 2013

[48] SLANGEN P., HEYMES F., APRIN L., MUNIER L., LAPÉBIE E., DUSSERRE G., "Blast wave interaction with droplets: Time resolved measurements by laser shadowscopy", Proc. SPIE vol.8413, Vigo, Spain, 2012.

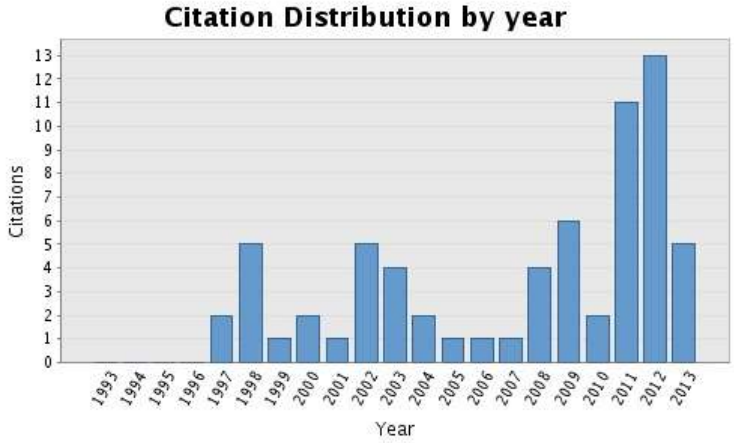
[49] LEE C.H., REITZ R. D., "An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream", Int. J. of Multiphase Flow, Volume 26, Issue 2, 229-244, February 2000.

[50] TROPEA C., "Optical particle characterization in flows", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.43, pp 399-426, 2011.

[51] FERRARO P., COPPOLA S., GRILLI S., PATURZO M., VESPINI V., "Dispensing nano–pico droplets and liquid patterning by pyroelectrodynamic shooting", Nature Nanotechnology, 5, 429–435, 2010.

8 CURRICULUM VITAE: TRAVAUX ET PUBLICATIONS

Source Thomson Reuters, RESEARCHER**ID**



Total Articles in Publication List:	**24**
Articles With Citation Data:	**23**
Sum of the Times Cited:	**66**
Average Citations per Article:	**2.87**
h-index:	**6**
Last Updated:	**04/09/2013 07:39 GMT**

CURRICULUM VITÆ

SLANGEN Pierre **(Robert, Luc)** **Nationalité:** Belge
306, Landers 30140 BAGARD. **Etat civil:** Marié
né à Hermalle s/Argenteau (Belgique) le 20 juillet 1965.

Doctorat d'état en Sciences, Belgique, 1995

Profession: *Chargé de recherches*
Ecole des Mines d'Alès, LGEI ISR
6,Avenue de Clavières, 30100 Alès Cedex, France.
Email: **Pierre.Slangen@mines-ales.fr** *Bur.:* 04.66.78.56.28

Éducation scolaire:

Secondaire

Humanités section "technique scientifique" (IPES Herstal 1, Belgique).

Universitaire

Diplômes obtenus à la Faculté des Sciences, Université de l'État belge, Liège, ULg, Belgique.

	Année	*Grade* (satisfaction, distinction, plus grande distinction)
Licence en sciences physiques (bac.+4)	***1983-87***	***D***

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de licencié en sciences physiques, *(tendance expérimentale)*:
"Etude de la production de masse d'hologrammes par emboutissage".

Agrégation de l'enseignement secondaire supérieur	***1986-87***	***S***
Maîtrise en optoélectronique ("D.E.A")	***1987-88***	***PGD***

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître en optoélectronique, *(tendance expérimentale)*:
"Réalisation d'hologrammes emboutis".

Docteur d'Etat, en Sciences Physiques,	***03/07/95***	***PGD***

Thèse effectuée au Service de Physique Générale, Université de Liège (B).
Thèse de doctorat (tendance expérimentale): Thèse principale
"Application de la granularité laser à la métrologie des microdéplacements".
Thèse de doctorat (tendance expérimentale):Thèse annexe
"Il est possible d'enregistrer un hologramme rainbow sur un support photopolymère".

Expériences : période étudiant

- Participation au Colloque HOLO3, "*Applications de l'Holographie*", Saint-Louis (France) Novembre 1988.
- Boursier *COMETT*, stage effectué à HOLO 3 (Saint-Louis, France), et au CETIM CERMAT (Mulhouse, France) du 16/05/1989 au 30/11/1989.
  "Analyse modale d'un cylindre: comparaison entre les résultats donnés par l'interférométrie holographique, par la mécanique et par la méthode des éléments finis".
- Participation au Colloque HOLO3, "*L'hologramme, composant optique*", Beaune (France), Novembre 1989.
- Stage d'apprentissage de *réalisation de gélatines bichromatées* à la R.W.T.H., Service du Pr. C.G.STOJANOFF, (Aachen, Allemagne), du 26/03/90 au 30/03/90.
- Lauréat des Bourses de Voyage de la Communauté Française de Belgique (1990).

- Boursier *ERASMUS*, stage effectué à l'Ecole des Mines d'Alès (Alès, France) du 15/04/1992 au 15/07/1992.
  « Mesure de déplacements submillimétriques par photographie speckle ».

Service militaire

- 3/09/90 au 31/08/91, Professeur de *Physique*, 1ère Ecole des Sous-Officiers (Dinant, Belgique).

Connaissances particulières

Programmation :

Langages C, LabVIEW.
Logiciels PC et Mac Intosh divers (Office, CorelSuite, DreamWeaver ...).
Traitement d'images *IMAQ VISION, ...*
Langages HTML : Webmaster site EMA (CMGD, ILOA)

Diplôme complémentaire :

Organisation de l'Assurance de la Qualité (20h), ULg, 1993-94 GD

Langues :

Français : langue maternelle, **Test de Français International 480/495 le 13/04/2012**.
Anglais : bonne pratique : écrit, lu et parlé.
Néerlandais : connaissances scolaires : écrit, lu et parlé
Allemand : notions rudimentaires : lu, parlé
Italien : notions rudimentaires : lu, parlé
Espagnol : en cours d'apprentissage
Wallon : lu, parlé, (écrit)

Divers :

Sports pratiqués : Volley-ball, ski alpin, badminton, tennis,...
Hobbies : musique, photographie...
Brevet de secouriste de la Croix-Rouge de Belgique (1993). Secouriste du Travail (2012)
Ambassadeur du « Pays de Liège »

Gestion de groupes

- Coordinateur de la semaine des étudiants européens "Horizon 93" organisée par le "Cercle Europe" de SUPELEC (Gif/Yvette, France) (19/03/89 au 24/03/89).
- Coordinateur pour *HOLOLAB (Service de Physique Générale, ULg Belgique)* d'un programme d'enseignement COMETT en "*Analyse et Contrôle des Surfaces et Matériaux Minces*", en collaboration avec l'A.U.E.F.Champagne-Ardennes (France) (1992).
- Membre des comités scientifique, administratif et exécutif de l'ASBL Science et Culture (Institut de Physique, B5, Sart-Tilman, B-4000 Liège).
- Coordinateur d'un programme d'enseignement avancé SOCRATES I.P. en Photomécanique, partenariat EMA - D.E.A. Optoélectronique Ulg Belgique.
- Responsable de proximité des échanges d'étudiants EMA - D.E.A. Optoélectronique, DESS Sciences et techniques spatiales (Ulg Belgique).
- Membre du bureau de l'Amicale du Personnel EMA (1998-…)
- Initiateur, Réalisateur et Coordinateur du congrès international SPECKLE06 « Speckles, from grains to flowers », Nîmes, 13-15 Septembre 2006.
- ***Responsable de l'Axe de Recherche Exploratoire ILOA (Instrumentation Laser et Optique Appliquée), 2007-2009.***
- Coordinateur adjoint du Workshop International TIEMS, Nîmes, 22-23 juin 2011.
- ***Responsable Sécurité Laser niveau 3 (2012-2015)***

Domaine scientifique principal :

☐ Physique

Rattachement scientifique :

Section du CNU : 30

Points forts des activités de recherche et résultats marquants :

Thématiques abordées
Instrumentation, Laser et Optique appliquée. Applications de méthodes optiques (acquisition et traitement d'images) pour la détection et/ou la mesure de différents phénomènes physico-chimiques. Eclairage laser, Lumière structurée, Interférométries holographique et en lumière diffuse (speckle), Vélocimétrie par imagerie ultrapide, strioscopie, Interface Homme-Machine en développement LabVIEW.

Par des développements innovants, l'application de ces thématiques à des domaines tels que le contrôle non destructif et la métrologie de champs de déplacements 3D (solides et fluides) est permise. Les techniques optiques de mesures plein champ, et plus particulièrement en lumière diffuse (speckle) conviennent particulièrement à ce type d'application grâce à leur grande sensibilité et à leur excellente résolution spatiale. L'instrumentation d'essais mécaniques sur la base de techniques telles que la corrélation d'images et l'interférométrie en lumière diffuse (3D) conduit aux champs cinématiques qui sont à la base de l'identification du comportement des matériaux étudiés par un essai mécanique approprié.
Ce travail concerne notamment la qualification de ces méthodes d'un point de vue métrologique et l'évaluation de la dégradation de l'information liée aux incertitudes de mesures: on peut noter le bruit de speckle inhérent à la source cohérente, les distorsions intrinsèques aux caméras et objectifs associés, et la transformation des mesures d'un repère optique (vecteurs sensibilité) vers le repère lié à l'objet.

Le succès international de la conférence Speckle06 (13-15 sept 2006,180 participants, 20% francophones), organisée par nos soins en 2006, prouve l'intérêt porté à ses techniques dans le monde scientifique et a montré leur émergence dans le monde industriel. En effet, l'instrumentation optique est de plus en plus utilisée car sa principale caractéristique est d'être sans contact avec la scène mesurée et de la capturer dans son intégralité en une seule fois. Dernièrement, le laboratoire a mis en évidence le joint émail-dentine dans les dents humaines en collaboration avec la Faculté d'Odontologie de l'Université de Montpellier.

L'acquisition d'images à très haute fréquence et le traitement de ces séquences (corrélation d'images, tracking, morphologie mathématique) permettent également la visualisation et l'étude de phénomènes ultra brefs (rupture brusque, destruction rapide, jet de particules, explosions), en collaboration avec des partenaires externes (CEA Gramat (France), Institut Von Karmann (Belgique)).

La thématique de recherche actuelle s'articule principalement sur la calibration et l'utilisation métrologique de l'acquisition d'images à grande vitesse et son application en interférométrie et en strioscopie.

Enfin, un chapitre d'ouvrage pédagogique (Traité MIM) a été finalisé sur l'interférométrie speckle en collaboration avec l'INSA Rouen et l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) et un cours en ligne sur les capteurs d'images pour l'Université Numérique Ingénierie et Technologie.

J'ai collaboré à l'écriture d'un chapitre d'ouvrage international "Optical Methods for Solid Mechanics" avec des experts internationaux et avons finalisé la traduction du chapitre du Traité MIM en anglais qui est publié par Wiley dans « Full-Field Measurements And Identification In Solid Mechanics ».

Production scientifique :

PUBLICATIONS (norme AERES)

1 ACL/93/01 SLANGEN P., Martinez C., Weber G., Lion Y.,
"Measurement of chromium content in dichromated gelatin by x-ray-fluorescence", **Applied Optics**, Volume: 32 Issue: 30, pp 6132-6136, 1993

2 ACL/93/02 SLANGEN P.,
"ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry): une technique rapide pour la détection et la visualisation des modes propres de vibration", **Eur. J. Mech. Eng. M**, Vol.38, n°2, pp 67-72, 1993.

3 ACL/94/01 SLANGEN P., BERWART L., De VEUSTER C., GOLINVAL J.-C., LION Y.
"Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI): A fast procedure to detect and measure vibration mode shapes", **Proc. SPIE**, Vol.2358, pp. 102-110, 1994.

4 ACL/94/02 SLANGEN P., CARRE C., RENOTTE Y.
"Applications of self-processing polymer materials: Double step image holography", **Journal Processing of Advanced Materials**, **4**, pp 81-84, 1994.

5 ACL/94/03 SLANGEN P., BERWART L., De VEUSTER C., GOLINVAL J.-C., LION Y.
"Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI): A fast procedure to detect and measure vibration mode shapes", First International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, **AIVELA**, Ancona (Italy), 3-5 October 1994.

6 ACL/95/01 SLANGEN P., De VEUSTER C., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y.
"Computer-aided interferometric measurements of drift and phase shifter calibration for DSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry)", **Opt.Eng.**, Vol.34, n°12, pp 3526-3530, Dec 1995.

7 ACL/95/02 SLANGEN P., LION Y., GOLINVAL J.-C., GERADIN M.
"Modal analysis of plate structures using Digital Speckle Pattern Interferometry", **Proc. IMAC XIII**, Nashville, Tennessee, Feb.1995

8 ACL/96/01 De VEUSTER C., SLANGEN P., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y.
"Disk growing" algorithm for phase-unwrapping: Application to speckle interferograms", **Appl. Opt.** Vol.34, n°2, pp 240-247, Jan. 1996.

9 ACL/96/02 SLANGEN P., IENNY P., NEMOZ-GAILLARD M.
"Speckle Pattern correlation for local approach of damage evaluation", **Proc. SPIE**, Vol.2782, pp. 424-435, 1996.

10 ACL/96/03 SLANGEN P., BERWART L., De VEUSTER C., GOLINVAL J.-C., LION Y.
"Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI): A fast procedure to detect and measure vibration mode shapes", **Opt. & Lasers in Eng.** (Special issue), Vol.25 4/5, pp 311-321, May 1996.

11 ACL/96/04 De VEUSTER C., SLANGEN P., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y.
"In-line phase shifter calibration and drift measurement and compensation for DSPI", **Proc. SPIE-EOS**, Vol. 2951, 1996.

12 ACL/97/01 De VEUSTER C., SLANGEN P., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y.,
"Influence of the geometry of illumination and viewing beams on displacement errors in interferometric metrology"**, Opt. Com.**, vol.143, pp 95-101, 1997.

13 ACL/97/02 De VEUSTER C., SLANGEN P., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y.
"DSPI: a method to measure FRF's", **Proc. S.E.M.**, Tokyo, Japan, 09/97.

14 ACL/97/03 BEGORRE J., SLANGEN P., De VEUSTER C., RENOTTE Y.
"Out of plane relative displacements measurement with phase-shifting DSPI: Application to notched specimen three points bending", ODIMAP'97, **EOS Topical Meeting Digests Series**, Vol. 14, July 08-10, 1997.

15 ACL/98/01 LAFLAQUIERE P., LAFON D., ETTERRADOSSI O., SLANGEN P.
"Characterization of color texture CIEL*a*b* calibration of CCD device", **Proc. Europto 98**, Neuchatel (CH), 1998

16 ACL/03/1 SLANGEN P., GAUTIER B.
"Phase Shifting Digital Speckle Pattern Interferometry : Off-the-shelf set-up description and application to stainless steel membrane displacement measurements", "Speckle Metrology 2003", **Proc. SPIE**, vol.4933, pp 76-81, Trondheim, Norway, June 2003.

17 ACL/04/1 POPINEAU S., GAUTIER B., SLANGEN P., SHANAHAN M.E.R.S.
"A 3D effect in the wedge adhesion test: Application of speckle interferometry Source", **J. Of Adhesion**,vol. 80 Issue 12, pp 1173-1194, Dec 2004.

18 ACL/06/1 SLANGEN P., GAUTIER B.
"Nematic Liquid Crystals Light Valve Calibration and Application to Phase Shifting Speckle Interferometry", SPECKLE 2006, **Proc. SPIE**, vol. 6341, pp U73-U78, 2006.

19 ACL/07/1 SLANGEN P., GAUTIER B.
"Nematic Liquid Crystals Light Valve: Application to Phase Shifting Speckle Interferometry", SPIE European Symposium on Optical Metrology, **Proc. SPIE**, vol. 6616, pp U6162-U6162, Part: 1-2, 2007.

20 ACL/08/1 SLANGEN P.
"Phase Shifting Speckle Interferometry with Nematic Liquid Crystals Light Valve", 8th International Conference on Correlation Optics, Chernivtsi -Ukraine, **Proc. SPIE**, vol. 7008, pp W80-W80, 2008.

21 ACL/08/2 LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., SLANGEN P., MUNIER L., LAPEBIE E., LE GALLIC C., DUSSERRE G.
"Preliminary Study of Ballistic Impact on an Industrial Tank: Projectile Velocity Decay", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Vol. 21, issue 6, pp 627-634, 2008.

22 ACL/09/1 LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., APRIN L., SLANGEN P., MUNIER L., LE GALLIC C., DUSSERRE G.
"Ballistic impact on an industrial tank: Study and modeling of consequences", **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 172, Issues 2-3, pp 587-594, 30 December 2009

23 ACL/10/1 SLANGEN P., APRIN L., HEYMES F., EQUIS S., JACQUOT P.
"Liquids blending: an investigation using dynamic speckle interferometry", **Proc. SPIE** vol.7387, Florianopolis, Brazil 2010.

24 ACL/10/2 SLANGEN P., CORN S., FAGES M., RAYNAL J., CUISINIER F.J.G.
"Prosthetic clone and natural human tooth comparison by Speckle Interferometry", Speckle2010, **Proc. SPIE** vol.7387, Florianopolis, Brazil 2010.

25 ACL/10/3 LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., APRIN L., SLANGEN P., MUNIER L., LAPEBIE E. and. LE GALLIC C., DUSSERRE G.
"Experimental study of hydraulic ram effect on a liquid storage: analysis of overpressure and cavitation induced by a high-speed projectile", **Journal of Hazardous Material**, Vol.178, pp.635-643, 4 Feb 2010.

26 ACL/11/1 SLANGEN P., KARRAY M., PICART P., "Some figures of merit for comparison between digital Fresnel holography and speckle interferometry", Speckle Metrology, EOM11-EOM01-158, **Proc. SPIE** vol.8082, Munich, May2011.

27 ACL/12/1 KARRAY M., SLANGEN P., PICART P., "Comparison between Digital Fresnel Holography and Digital Image-Plane Holography: The Role of the Imaging Aperture", vol. 52, Number 9, **Exp Mech** (2012) 52:1275-1286 ***DOI 10.1007/s11340-012-9604-6***

28 ACL/12/2 FAGES M., SLANGEN P., RAYNAL J., CORN S., TURZO K., MARGERIT J., CUISINIER F.G.J.,"Comparative mechanical behavior of dentin enamel and dentin ceramic junctions assessed by Speckle interferometry (SI)", **Dental Materials**, Vol. 28, Issue 10, October 2012, Pages e229–e238, http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2012.05.006.

29 ACL12/3 FUHRER M., APRIN L., LE FLOCH S., SLANGEN P., DUSSERRE G., "Behavior of chemicals in the seawater column by shadowscopy", **Proc. SPIE** vol.8413, *Vigo, Spain, 2012.*

30 ACL12/4 SLANGEN P., HEYMES F., APRIN L., MUNIER L., LAPÉBIE E., DUSSERRE G., "Blast wave interaction with droplets: Time resolved measurements by laser shadowscopy", **Proc. SPIE** vol.8413, *Vigo, Spain, 2012.*

31 ACL12/5 FORESTIER S., HEYMES F., SLANGEN P., MUNIER L., LAPÉBIE E., DUSSERRE G., “Evaporation under cavity flow: Laser speckle correlation of the wind velocity above the liquid surface”, **Proc. SPIE** vol.8413, *Vigo, Spain, 2012.*

32 ACL/12/6 PICART P., KARRAY M., SLANGEN P., “Quality assessment between digital Fresnel holography and digital image-plane holography”, **Proc. SPIE** vol.8413, *Vigo, Spain, 2012.*

En cours

ACL12/7 FAGES M., CORN S., RAYNAL J., SLANGEN P, Ienny P., RIOU P., CUISINIER F.G.J. “CAD/CAM: a “tailor made” methodology for assessing mechanical behavior of full ceramic peripheral crowns”, *submitted to Dental Materials*

ACL12/8 DIAKOMITRIS C., ISKANDER Y.R., HENDRICK P., SLANGEN P.,“New approach of gas-liquid CFD simulations for the study of minimum quantity cooling (MQC) with airblast plain-jet injectors”, *submitted to Manufacturing Science and Engineering. (Research Paper), MANU-12-1083. Under correction*

ACL12/9 HEYMES F., APRIN L., AYRAL P.A., SLANGEN P., DUSSERRE G., “Impact of wildfires on LPG tanks”, Loss Prevention 2013, Italy, accepted

ACL12/10 TENA-CHOLLET F., TIXIER J., DANDRIEUX A., SLANGEN P., DUSSERRE G., « Training decision-makers – existing training strategies for crisis management and specifications of an improved environment », Journal of Computers & Educational, 2012. (submitted)

---

1 ACLN/04/1 SLANGEN P., ETERADOSSI O., LAFON D., MAURY P., PERE E. “Introduction de nouvelles techniques optiques pour la caractérisation des propriétés psychosensorielles des matériaux“, **REE**, Revue de l'Electricité et de l'Electronique n°9, 2004

2 ACLN/05/1 GAUTIER B., SLANGEN P. “Interféromètre de speckle à 3 directions d'éclairement : calibration et application“, **REE**, Revue de l'Electricité et de l'Electronique, n°9, 2005

3 ACLN/05/2 POPINEAU S., GAUTIER B., SLANGEN P., SHANAHAN M.E.R. “Speckle Interferometry and Adhesion : a New Look at the Wedge Test“, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, IoM - London, pp. 71-74, 2005

---

1 ACTI/95/1 SLANGEN P., DE VEUSTER C., RENOTTE Y., BERWART L., LION Y. “Modal Analysis of Plate Structures using Digital Speckle Pattern Interferometry“, Colloque **HOLO3** "Etude du comportement dynamique des structures par voie optique", Montpellier, Nov. 1995.

2 ACTI/99/1 SLANGEN P., WIENIN J.S., MACQUAIRE B. , IENNY P., “Phase Shifting Digital Speckle Pattern Interferometry (PSDSPI) and Digital Image Correlation (DIC) displacement measurements for the validation of a plane compression test“, **Proc Int. Workshop on Video-Controlled Materials Testing and In-situ Microstructural Characterisation**, Ecole des Mines de Nancy - INPL (Nancy, France) 1999

3 ACTI/99/2 SLANGEN P., “Speckles : laser speckle, white light speckle, painted speckle, flyspeck, …?“, **Proc. Int. Workshop on Video-Controlled Materials Testing and In-situ Microstructural Characterisation**, Ecole des Mines de Nancy - INPL (Nancy, France) 1999

4 ACTI/00/1 SLANGEN P., “Metallic membrane surface displacement using PSDSPI“, **Proc. Int. Conf. "Interferomerty in speckle light"**, Springer Ed., Lausanne Switzerland 2000

5 ACTI/01/1 WIENIN J.S., IENNY P., SLANGEN P., CHAMAND C., MOINIER L. “Mesure de champs de vitesses de déformation par corrélation d'images: Application à l'obtention de courbes limites de formage“, **Proc. Photomecanique 2001**, Poitiers, France, 2001

6 ACTI/01/2 SLANGEN P., IENNY P., GAUDERAUX S.
"Optical measurement of multidimensional kinematic field : behavior of sandwich plate composites", **Proc. MAT 2001**, Nuremberg, Allemagne, 2001

7 ACTI/04/1 GAUTIER B., SLANGEN P.
"Etude du déroulage de phase : Influence du bruit et de la distribution de franges", **Proc Photomecanique04**, Orteu Ed, Albi, 2004

8 ACTI/04/2 SLANGEN P., CORN S., GAUTIER B., IENNY P.
"Phase Shifting Speckle Interferometry And Digital Image Correlation : Comparison of their application to mechanical measurements", **Proc ICEM XII**, Bari, Papalettere Ed. 2004

9 ACTI/05/1 BUYSSCHAERT F., HENDRICK P., AERNOUTS J.F., EVARISTE R., ABADIE A., ROCHE S., SLANGEN P., LIEVIN B.
"Design, Development and Assessment of a Ducted RUAV", **31st European Rotorcraft Forum**, 13-15 septembre 2005, Firenze (Italie)

10 ACTI/05/2 POPINEAU S., GAUTIER B., SLANGEN P., SHANAHAN M.E.R.
"Speckle Interferometry and Adhesion : A New Look at the Wedge Test", **Ninth International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives**, 7-9 september 2005 St. Catherine's College University of Oxford UK.

11 ACTI/06/1 DANDRIEUX A., HEYMES F., TIXIER J., LECYSYN N., TENA-CHOLLET F., SPINELLI R., SLANGEN P., DUSSERRE G.
"An Integrated Methodology Research to Determine Consequences of a Vessel Destruction", Safety and Reliability for Managing Risk, **ESREL**, Estoril, Portugal 2006

12 ACTI/07/1 LECYSYN N., HEYMES F., DANDRIEUX A., SLANGEN P., DUSSERRE G., MUNIER L., LAPEBIE E., LE GALLIC C.
"Experimental Investigation of a Catastrophic Tank Failure with a High Speed Video Recorder Image Processing and Hydrodynamic Characterization of the Liquid Jet", **4th International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries**, Edimburg, Grande Bretagne, Paper 212 – Topic 4, 22-24 mai 2007

13 ACTI/07/2 LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., SLANGEN P., MUNIER L., LAPEBIE E., LE GALLIC C., DUSSERRE G.
"Liquid Discharge – The Consequence of a Catastrophic Tank Failure due to a High Energy Projectile Impact", 11ème Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (**SFGP**) - St Etienne - du 9 au 11 octobre 2007, Papier 532 – Thème : Sûreté des procédés, Actes électroniques, 2007

14 ACTI/07/3 LECYSYN N., DANDRIEUX A., HEYMES F., DUSSERRE G., SLANGEN P., MUNIER L., LAPEBIE E., LE GALLIC C.
"Etude expérimentale de la fracture brutale d'un bidon réservoir par acquisition rapide d'images : enregistrement, traitement et caractérisation du jet de fluide", 8ème Colloque International Francophone Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie, **CMOI**, Arcachon, France, Session 4 : Mécanique des fluides et acoustique, 2007

15 ACTI/09/1 LASSAUCE A., SLANGEN P., APRIN L.,. DUSSERRE G, MUNIER L., LAPEBIE E., LE-GALLIC C.
"Contribution à l'étude de la vaporisation de liquide en milieu fermé par un dispositif de diagnostic optique", 13ème Congrès de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, **Fluvisu**, Reims, 2009

16 ACTI/09/2 SLANGEN P., CORN S., FAGES M., CUISINIER F.J.G.
"Etude du comportement mécanique d'une dent naturelle et de son clone prothétique par interférométrie speckle", Colloque International Francophone Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie, **CMOI**, Reims, 2009

17 ACTI/10/1 LE FLOCH S., FUHRER M., MERLIN F., SLANGEN P., APRIN L., LAFLAMME A.
"Fate of a Xylene Slick at Sea and Influence of Meteorological Conditions", 33rd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, 8-10 June, Halifax, Nova Scotia, Canada

18 ACTI/10/2 SLANGEN P. , APRIN L., FUHRER M., LE FLOCH S., DUSSERRE G.
"Methyl Ethyl Ketone spills in water : Visualisation of the releases by optical schlieren technique", 33rd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, 8-10 June, Halifax, Nova Scotia, Canada 2010.

19 ACTI/10/3 SLANGEN P.,
"Interférométrie speckle, un outil pour la biomécanique", " G.I.R.S.O. 54th, April 22-24, La Grande Motte, France, 23-24 avril 2010.

20 ACTI/10/3 FAGES M., SLANGEN P., RAYNAL J., MARGERIT J., CORN S., CUISINIER FGJ
"Jonction amélo-dentinaire et jonction dento-prothétique: étude de l'accommodation de contraintes par interférométrie Speckle" G.I.R.S.O. 54th, April 22-24, La Grande Motte France, 2010

21 ACTI/10/4 FAGES M., CLOITRE T., SLANGEN P., CORN S., CUISINIER F.
"Speckle Interferometry of Natural And Ceramic Crown Under Loading", ***IADR***, *Barcelona, July 2010, poster.*

22 ACTI/11/1 PICART P., KARRAY M., SLANGEN P.,
"Figures de mérite pour la comparaison entre holographie numérique et interférométrie de speckle", CMOI, Lille 2011.

23 ACTI/11/2 FUHRER M., SLANGEN P., APRIN L., DUSSERRE G., "Analysis of Chemical releases behavior in water column using high speed imaging", TIEMS, Nîmes, June 2011

24 ACTI/11/3 FUHRER M., SLANGEN P., APRIN L., DUSSERRE G., Le FLOCH S., "A new approach to analyze chemical releases behavior in water column: high speed imaging", International Oil Spill Conference – IOSC, Portland, Oregon, USA, May 2011

25 ACTI/11/4 HEYMES F., APRIN L., SLANGEN P., LABOUREUR D., RAMBAUD P., OSMONT A., LAPÉBIE E., DUSSERRE G., "Inflammability of LPG accidental releases", TIEMS, Nîmes, June 2011

26 ACTI/11/5 SLANGEN P., "About Optics in Risks Sciences", TIEMS, Nîmes, June 2011.

27 ACTI/11/6 FAGES M., CORN S., RAYNAL J., SLANGEN P., IENNY P., RIOU P., MARGERIT J., "C.F.A.O : Mise au point d'un protocole d'évaluation des contraintes pour les coiffes périphériques tout céramique", Bull Group Int Rech Sci Stomatol Odontol. 50: 83, 2011.

28 ACTI/11/7 FAGES M., CORN S., RAYNAL J., SLANGEN P., IENNY P., RIOU P., MARGERIT J., and CUISINIER F.J.G.
"CADCAM: a method for assessing mechanical behavior of ceramic crowns", 45th IADR, Budapest, Sept2011.

29 ACTI/13/1 PICART P., KARRAY M., SLANGEN P., "Some Considerations about the Role of the Diaphragm in Digital Image-Plane Holography", *Digital Holography & 3-D Imaging (DH) – OSA*

30 ACTI/13/2 PICART P., APRIN L., HEYMES F., SLANGEN P., "Vizualization of Pollutant Droplets Solubilization in Seawater by Phase-Only Digital Holography", *Digital Holography & 3-D Imaging (DH) – OSA*

---

1 ACTN/93/1 LION Y., RENOTTE Y.,SLANGEN P., H.THIRY
"Interférométrie holographique et ESPI", Mallette pédagogique **A.C.S.M.M.**, AUEF Châlons sur Marne, 1993

2 ACTN/93/1 SLANGEN P.
"ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry): une technique rapide pour la détection et la visualisation des modes propres de vibration", **OPTO 93**, ESI Publications, Paris, pp.448-452, 1993

3 ACTN/94/1 SLANGEN P., BERWART L., RENOTTE Y., LION Y.
"Application du décalage de phase à la DSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry)", **OPTO 94**, ESI Publications, Paris, 1994

4 ACTN/03/1 SLANGEN P., ETERADOSSI O., LAFON D., MAURY P., PERE E.
"Introduction de nouvelles techniques optiques pour la caractérisation des propriétés psycho -sensorielles des matériaux", Contrôles et Mesures Optiques pour L'industrie **CMOI**, Belfort 2003

5 ACTN/05/1 GAUTIER B., SLANGEN P.
"Calibrage d'un retardateur à cristaux liquides nématiques pour l'interférométrie speckle", Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie **CMOI**, Marseille 2005

6 ACTN/05/1 MICHEL F., ROSSO V., GAUTIER B., MOREAU V., TILKENS B., LION Y., RENOTTE Y., SLANGEN P.
"Dérivée première du champ des déplacements hors plan : comparaison entre interférométrie de speckle et shearographie", Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie **CMOI**, Marseille 2005

7 ACTN/08/1 DEVILLERS P., AMMOUCHE A., ADAMAH M., SLANGEN P., PERIN E.
"Etude des reprises de bétonnage de bétons autoplaçants", **26èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil : Du laboratoire à l'ouvrage**, 8 p, Nancy 2008

8 ACTN/10/1 FAGES M, SLANGEN P., RAYNAL J., DURAND J.C., CORN S., CUISINIER F.J.G., MARGERIT J.
"Mise en évidence du comportement mécanique de la jonction amélo-dentinaire et du joint de collage dento-prothétique par interférométrie Speckle "
34ème cession du Collège National des Enseignants en Prothèses Odontologiques, **CNEPO**, Reims 2010 (1er prix poster, catégorie Recherche)

---

1 COM/92/1 SLANGEN P.
"ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry): principe et applications", **IAL SPACE** (CSL, Centre Spatial de Liège), 12/03/92.

2 COM/93/1 SLANGEN P.
"Electronic Speckle Pattern Interferometry", **Belgian Physical Society**, General Scientific Meeting, Leuven (Belgium), 27-28/05/1993.

3 COM/06/1 GAUTIER B., CARO-BRETELLE A.S., IENNY P., SLANGEN P.
"Discrepences between Experiments and Modelling : 3D-ESPI Deformation Measurements on Compact Tension Test", **Photomechanics 06**, Clermont-Ferrand 2006

4 COM/06/2 POPINEAU S., GAUTIER B., SLANGEN P., SHANAHAN M.E.R.
"3D Effects in the Wedge Test Seen by Speckle Interferometry : A New Adhesion Tool" Communication, **Swiss Bonding International Symposium**, - Rapperswil (Suisse) 2006

5 COM/09/1 SLANGEN P., CORN S., FAGES M., RAYNAL J., MARGERIT J., CUISINIER F.J.G.
"Validation de l'intégrité mécanique d'une couronne prothétique par Interférométrie Speckle (PSDSPI) ", CODEME-Ingénierie et Santé, St Etienne, France, Octobre 2009

6 COM/11/1 SLANGEN P., RAYNAL J., "Les empreintes optiques: La physique qui permet la clinique", 3rd Symposium International CFAO-CadCam, Cap d'Agde France, June 11-14 2011

7 COM12/1 SLANGEN P., "Optique appliquée en Odontologie", rencontres Tic et Santé: capteurs et traitement de données, Nîmes, 25/04/12.

---

1 DO/06/1 SLANGEN P., CERRUTI C. Editors
SPECKLE 2006 "Speckles, from grains to flowers", 13-15 septembre 2006 – Nîmes, Book Series : Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, **SPIE vol. 6341**, 2006.

---

1 OS/09/1 SLANGEN P., CORN S., FAGES M., CUISINIER F. J.G.
"Prosthodontic crown mechanical integrity study using Speckle Interferometry", **FRINGE09**, pp 734-737, Springer Verlag, Osten Kujawinska Eds, Stuttgart, Germany 2009

2 OS/11/1 SLANGEN P., JACQUOT P., BORZA D.
« Mesure de Champs et identifications en Mécanique des Solides : Chap.5 : Éléments d'interférométrie speckle », Hermès Science Publications, Lavoisier, ISBN 978-2-7462-3112-2, 2011.

3 OS/12/2 LEFLOCH S., FUHRER M., SLANGEN. P., APRIN L.
Air Quality - Monitoring and Modeling; Chap. Environmental Parameter Effects on the Fate of a Chemical Slick, ISBN 978-953-51-0161-1, Sunil Kumar and Rakesh Kumar eds, InTech, February 2012

4 OS/12/1 SLANGEN P., GASTINGER K., SOMERS P.A.M.M., PICART P.
Speckle Interferometry, in "Optical Methods for Solid Mechanics A Full-Field Approach", Rastogi, Pramod/Hack, Erwin (eds.) 1. Edition - June 2012 ISBN 978-3-527-41111-5 - Wiley-VCH, Berlin

5 OS/12/2 SLANGEN P., JACQUOT P., BORZA D.
Speckle Interferometry, in « Full-Field Measurement and Identification in Solid Mechanics», Michel Grediac/Francois Hild (eds), Engineering & Materials Science/Mechanical Engineering/Solid Mechanics, Nov. 2012 ISBN: 978-1-84821-294-7 Wiley-ISTE

6 OS/13/1 SLANGEN P., APRIN L., HEYMES F., PICART P.
"Experimental Analysis Of n-Butanol Solubilization In Seawater By Pure-Phase Digital Holography", FRINGE13, Springer Verlag, Osten Kujawinska Eds, Stuttgart, Germany 2013

RAPPORTS DE RECHERCHE

1 RR/06/1 BONY-DANDRIEUX A., HEYMES F., LECYSYN N., SPINELLI R., SLANGEN P., DUSSERRE G.
Poste 2 : Etude de la dispersion atmosphérique d'un polluant lors de la destruction d'un stockage Rapport final, Septembre 2006 Convention ARMINES-DGA N° 40827, 87pp

2 RR/08/1 SLANGEN P., BONY-DANDRIEUX A., LECYSYN N., TENA-CHOLLET F., DUSSERRE G.
Poste 1. Tâches 1 et 2 : Base de données et code de traitement d'image appliqué à METEHOR, Rapport Octobre 2008, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00, 22pp.

3 RR/08/2 LECYSYN N., BONY-DANDRIEUX A., TENA-CHOLLET F., SLANGEN P., DUSSERRE G.
Poste 1. Tâches 1 et 2 : METEHOR Analyse vidéo des jets liquides, Rapport intermédiaire, Juillet 2008, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00, 28pp.

4 RR/08/3 SLANGEN P., Etude de faisabilité de visualisation de bulles d'ozonation en vue de déterminer leurs tailles et leurs vitesses, Juillet 2008, Convention ARMINES-COMURHEX EQ_IS03_009_RT08_066, 32pp

5 RR/08/4 BONY-DANDRIEUX A., LECYSYN N., TENA-CHOLLET F., SLANGEN P., DUSSERRE G.
Poste 1. Tâches 1 et 2 : METEHOR Analyse vidéo des jets liquides, Rapport intermédiaire, Avril 2008, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00, 39pp.

6 RR/09/1 SLANGEN P., BONY-DANDRIEUX A., DUSSERRE G.
Poste 1. Tâche 2 : METEHOR, Rapport Mars 2009, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00, 36pp + Annexes.

7 RR/10/1 SLANGEN P., BONY-DANDRIEUX A., DUSSERRE G.
Poste 1. Tâche 2 : METEHOR, Rapport Final 2010, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00

8 RR/11/1 SLANGEN P., APRIN L., DUSSERRE G.
Poste 4. Tâche 1A : METEHOR, Rapport Février 2011, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00

9 RR/11/2 SLANGEN P., APRIN L., DUSSERRE G.
Poste 4. Tâche 1A : METEHOR, Rapport Final 2011, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00

10 RR/12/1 APRIN L.,SLANGEN P., LE FLOCH S.
Underwater natural gas and LNG leak: « Modélisation des fuites sous-marines de gaz naturel et de GNL », Rapport 19, Mars 2012, CITEPH contract n°45-71 2011

11 RR/12/2 SLANGEN P., APRIN L., HEYMES F., DUSSERRE G.
Poste 4. Tâche 1A : METEHOR, Rapport Avril 2012 Poste 5 Tâche 13, Convention ARMINES-DGA N° 2007 25 007 000 51 00 00

12 RR/12/3 APRIN L.,SLANGEN P., LE FLOCH S.
Underwater natural gas and LNG leak: « Modélisation des fuites sous-marines de gaz naturel et de GNL », Rapport 20- 21, Juin 2012, CITEPH contract n°45-71 2011

13 RR/13/1 APRIN L.,SLANGEN P., LE FLOCH S.
Underwater natural gas and LNG leak: « Modélisation des fuites sous-marines de gaz naturel et de GNL », Rapport 22- 23, Avril 2013, CITEPH contract n°45-71 2011

CONFERENCES INVITEES

1 INV/08/1 SLANGEN P.
"Interférométrie en lumière diffuse", Journée Optique Photonique, BTS Lattes Champollion, Montpellier, France, Oct.2008.

2 INV/08/2 SLANGEN P.
"Phase Shifting Speckle Interferometry with Nematic Liquid Crystals Light Valve", 8th International Conference on Correlation Optics, Chernivtsi, Ukraine 2008.

3 INV/09/1 SLANGEN P.
"Chaîne de traitement numérique: Les capteurs", Centre National du Microfilm et de la Numérisation, Direction Générale des Archives de France, Espeyran, France, Sept.2009.

4 INV/11/1 SLANGEN P.
"Some figures of merit for comparison between digital Fresnel holography and speckle interferometry", Speckle Metrology, EOM11-EOM01-158, SPIE, Munich, May2011.

5 INV/11/2 SLANGEN P.
"Acquisition numérique : Elements d'images", Centre National du Microfilm et de la Numérisation, Direction Générale des Archives de France, Espeyran, France, Juin 2011.

CHAIRMAN

CHAIR03/1 Speckle Metrology, Trondheim, Norway, 2003, Session Digital Holography
CHAIR06/1 Speckle06, Nîmes, France, 2006, Conference Chair
CHAIR07/1 Optical Metrology, Munich, 2007, Session non destructive Testing
CHAIR09/1 G.I.R.S.O. 54th, La Grande Motte, 2009
CHAIR10/1 Speckle2010, Florianopolis, Brazil, 2010, Session Biomedical research and speckle noise reduction
CHAIR11/1 Optical Metrology, Munich, 2011, Session Digital Holography
CHAIR12/1 Speckle2012, Vigo, 2012, Session Applications in Life Sciences

---

COURS EN LIGNE

CEL/1	Cours UNIT (Université Numérique en Ingénierie et Technologie), OPI (Optique pour l'Ingénieur) « M7G4 Principes de base des capteurs d'images », http://optique-ingenieur.org/. http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C06/co/OPI_fr_M05_C06_web.html
CEL/2	Cours d'optique appliquée : FI-L2, EMA
CEL/3	Cours d'électromagnétisme : FI-L2, EMA
CEL/4	Cours de capteurs d'images et optique appliquée : FI-L3, EMA
CEL/5	Cours de capteurs et Instrumentation : FI-M2, EMA

ÉMISSIONS DE TÉLÉVISION

ET/1/12	« On n'est pas que des Cobayes », Acteur et Consultant Scientifique, Émission 29, 04/05/12, 2P2L productions, France5, Mai 2012.
ET/2/12	« Soir3, Iroise, 24/05/2012 », Interview sur site de recherche, CEDRE, Brest, France3, Mai 2012.

---

3) Points forts des activités relevant des missions autres que la recherche :

Activités d'enseignement

Université de Liège, ULg, Belgique

- *Moniteur d'études du 01/02/88 au 31/03/91 :*
  Travaux Pratiques et Travaux Dirigés en 1ère candidature ingénieurs.
- *Assistant volontaire du 1/05/88 au 30/04/90*
  Conception et réalisation de nombreux types d'hologrammes
- *Boursier de recherche du 01/09/91 au 31/08/95 (doctorat d'état) :*
  Travaux Pratiques et Travaux Dirigés en 1ère candidature ingénieurs et encadrement de travaux de fin d'études (Ingénieurs, Master en optoélectronique, et physiciens).
- *Enseignant du 01/09/91 au 31/08/95,*
  " Holographie et Interférométrie", 10h, Maîtrise en Optoélectronique – partim. Cours d'Optique.

Ecole des Mines d'Albi, France - chargé de cours

- Cours d'optique appliquée (6h) (2000-2002)

Ecole des Mines d'Alès, France – permanent

✓ ***Cours, Travaux dirigés, Travaux pratiques :***

- **Electromagnétisme**, 1ère année (Licence 2) (Formation Initiale, FI)
  cours magistral et travaux dirigés (20h + 20h) (1995 - 2003)
- **Optique appliquée**, 4ème année (Master 2) Option "Conception et système de production"
  cours et travaux pratiques (20h) (1996 - 2006).
- **Introduction à l'optique**, 1ère année (Licence 2) FI
  cours libre (20h) (1997- 1999).
- **Optique appliquée**, 1ère année (Licence 2) (FI et SP)
  cours magistral (20h) (2000 - 2005)
- **Electromagnétisme et Optique**, 1ère année (Licence 2) FI
  cours magistral (30h) (2005- 2011)
- **Capteurs et instrumentation optique**, 4ème année (Master 2) Option Mécatronique
  cours (6h) (2007- …)
- **TP Optique Appliquée**, 2ème année (Licence 3) FI
  cours au choix (16h, x2), (2010- 2012)

- **Optique appliquée,** 2ème année (Licence 3) FI
  cours au choix (40h), (2012-…)

✓ ***Suivi de missions en entrepreneuriat et de travaux de fin d'études (type projet Master)***

✓ ***Accompagnement de projets d'élèves, type projet pluriannuel***
- **EagleEye** : instrument d'arbitrage de compétitions de boomerang par stéréovision, 2000-2002
- **Drone ONERA-DGA**, 2004-2006 (40000euros), 2008-2009 (20000euros)

✓ ***Projet humanitaire : Prothémée : Optimisation d'une prothèse de course pour amputé tibial, en*** partenariat avec Dominique André (athlète handisport Jeux Olympiques Athènes 2004) et la société Re-Flexion (Alès), (2003-2004).

✓ ***Encadrement de stagiaire :***
- F. Michel, stage doctorat, Université de Liège, avril 2005.
- V. Rosso, stage doctorat, Université de Liège, septembre 2006.
- P. Delord-Derancourt, stage Licence 3, Université de Nîmes, mars 2012.

✓ ***Accompagnement de thèse, sans encadrement direct***
- F. Laraba-Abes: Identification de comportements macrohomogènes en grande déformation des matériaux élastomères, 1998.
- B. Watrisse: Mesure de déformations en champ non homogène sur des nuances d'acier, 1998.
- J.-S. Wienin: Identification de lois de comportement en grandes déformations, 2001.
- M. Giton: Comportement à la déchirure de matériaux élastomères, 2004.
- S. Forestier: Étude de l'évaporation d'un liquide répandu au sol suite à la rupture d'un stockage industriel, 2011.
- D. Laboureur: Étude des phénomènes aggravants suite à l'endommagement de réservoirs de produits inflammables ou non, 2012.
- M. Fuhrer: Transport maritime de produits chimiques liquides et flottants : étude expérimentale du rejet accidentel sous-marin suite à un naufrage, 2012

✓ ***Encadrement de thèse :***
- *J. Begorre, 1995-1998,ULg, Belgique, non soutenue (abandon candidat pour emploi étranger).*
- B. Gautier (2002-2005), Études et Réalisation d'un interféromètre de Speckle à mesure de formes intégrée, ENSM Paris, Sciences et Génie des Matériaux, 2005.
- *X. Chen 2005-2006*, ENSM Paris, *non soutenue (candidate éliminée après bilan 1ère année).*
- N. Lecysyn (2005-2008), Étude et modélisation des effets d'un impact balistique sur un réservoir, Université Aix-Marseille I, Ecole doctorale des Sciences de l'Environnement, Formation Doctorale « Biosciences de l'Environnement », 2008.
- A. Lassauce (2008-2010), Visualisation, granulométrie et évaporation de gouttes et de sprays – Étude dans une atmosphère close et pressurisée, Ecole des Mines de St Etienne, Sciences et Génie de l'Environnement, 2010.
- *B. Kabar (2009-2012), Ecole des Mines de St Etienne, soutenance en septembre 2013, UJM.*

✓ ***Encadrement de post-doctorat :***
- O. Gennari, INO-CNR Istituto Nazionale di Ottica, Unit of Napoli, 80078 Pozzuoli (NA), Italy*2013, séjour du 25-29 avril 2013.*

Sociétés savantes

- Membre Participant au GDR2519, *Intervention dans le GDR2519 portant sur la « caractérisation des méthodes de mesure/performances métrologiques et l'identification » :* GT sur la « métrologie » des méthodes optiques
- Adhérent:
    - Société Française d'Optique
    - European Optical Society
    - POPSud (Pôle Optique et Photonique Sud)
    - SPIE (International Society for Optics and Photonics, USA)
    - OSA (Optical Society of America)
- Membre du Comité de pilotage "Contrôles et Mesures Optique dans l'Industrie" (CMOI)

Comités scientifiques de manifestations externes

- Interferometry XIII, Aug 2006, California, USA
- Optical Metrology, June 2007, 2009, 2011, 2013, SPIE, Munchen, Germany
- 9th International Symposium on Laser Metrology (LM2008), July 2008, Singapore
- Interferometry XIV, Aug 2008, Arizona, USA
- 5e Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Le Mans, Janvier 2010, France
- Interferometry XV: Applications, San Diego, CA, 1-5 August 2010 USA
- Speckle2010, Speckle fields forever, Florianopolis, 13-15 September 2010 Brazil
- Interferometry XVI: Applications (OP315**),** *Part of the SPIE International Symposium on* SPIE Optical Engineering + Applications, San Diego, USA, 12-16 August 2012
- Speckle2012, Vigo, 10-12 September 2012, Spain

Participation à des comités de lecture (Reviewing):

- Revue internationale :
    - Journal of Strains
    - Optics Communications
    - Journal of Optics and Laser Techniques
    - Experimental Mechanics
    - Optical Engineering

- Revue nationale : "Instrumentation, Mesure et Métrologie"

- Conférences internationales :
    - Interferometry XIII, Aug. 2006, California, USA
    - Optical Metrology, 2007, 2009, 2011, 2013, SPIE, Munchen, Germany
    - 9th International Symposium on Laser Metrology (LM2008), July 2008, Singapore
    - Interferometry XIV, Aug. 2008, Arizona, USA
    - Interferometry XV: Applications, San Diego, CA USA, 1-5 August 2010
    - Speckle2010, Speckle fields forever, Florianopolis, Brazil, 13-15 September 2010
    - Speckle2012, Vigo, Spain, September 2012.

Expertises:

- UNIT, projet 24-03, 2008
- DGA pour projet de REI (Recherche Exploratoire et Innovation), n° 06C0068, 2006
- SNSF (Swiss National Science Foundation), n°2000021-129489, 2010

Rapporteur, Opponent et Membre de Jury de Thèses externes:

- *Rapporteur de Thèse* : Université d'Aix Marseille 1 (2005)

- *Opponent* : Université Technologique Luleå, Sweden (2011)

- Jury de thèse : Université Aix Marseille 1 (3)
  Université du Mans (1)
  Université de Toulouse (1)
  Université Libre de Bruxelles (1)

Détails : Jury :

G. Roupillard	Aix Marseille 1	04/03/2005
F. Martinache	Aix Marseille 1	04/07/2005
P. Doré	Aix Marseille 1	30/11/2006
J. Leval	Université du Maine	20/12/2006
A. Delmas	Université de Toulouse ULB	14/12/2012

Rapporteur :

G. Roupillard	Aix Marseille 1	04/03/2005

Opponent :

H. Lycksam	Luleå Tech University Sweden	27/10/2011

Activités contractuelles:

italique : toujours en cours

- **SIPOREX :** Application sur site de production de la corrélation d'images en lumière blanche pour la mise en évidence des contraintes résiduelles dans des dalles "plancher" (P. Ienny, P. Slangen), 1995.
- **SOLLAC :** Équipement d'une machine d'emboutissage Erichsen d'un système photomécanique laser pour la détermination des Courbes Limites de Formage: étude et développement du software et du hardware (P. Ienny, P. Slangen), 1996.
- **PROCONCEPT :** Étude en compression de cages pour implants intervertébraux, (P. Ienny, P. Slangen), 1997.
- **AÉROSPATIALE :** Analyse modale attachée aux structures planes - Étude de faisabilité : visualisation de modes propres par interférométrie speckle (P. Slangen), 1999.
- **RENAULT :** Boulogne Billancourt : Identification de lois de comportement de tôles destinées à l'emboutissage, (P. Ienny, P. Slangen), 1997-2000.
- **RENAULT :** Boulogne Billancourt : Critère de délaminage pour les tôles sandwich, (P. Ienny, P. Slangen), 1998.
- **EADS :** Application de la stéréocorrélation à l'analyse de déformations surfaciques de structures 3D : étude de faisabilité, 2001. Réalisation d'un interféromètre speckle 3-D pour l'analyse de déformations surfaciques : étude de faisabilité, 2001-2002.
- **LAFARGE :** Mesure de rugosité de surface de dalles en béton par projection de franges, 2002.
- **ST GOBAIN** : Application de la PSDSPI pour la détection de défauts dans le domaine verrier, 2003.
- ***METEHOR (CEA-CEG)*** *: Analyse par imagerie de jets liquides fragmentés, pluriannuel (2005-…)*
- **KEMSTREAM** : Visualisation de jet de spray d'injecteur pour CVD, 2006-2007
- **IREX** : Mesure de rugosité de rebétonnage, 2007.
- **RENAULT** : Instrumentation d'une machine de traction large, 2007.
- **COMURHEX** : Visualisation et mesure de bulles d'ozonisation, 2008.
- **TOTAL** : Étude de la rupture brutale de réservoirs, 2008-2009.
- **EFDA** : Mesure de l'érosion-redéposition dans ITER, 2010- 2011.
- **IRSN** : Étude de la rupture d'une RTGV, 2010- 2011.

- **LICORNE (CEDRE)** : Evaluation des conséquences, caractérisation et modélisation de la dispersion de produits industriels en mer., 2009-2012.
- ***CITEPH PETROLE (ALYOTECH TECHNOLOGIES - CEDRE - DORIS - ECOLE CENTRALE MARSEILLE - OCEANIDE - GDF-Suez)*** *:BLOWOUT: Modélisation de fuites sous-marines de gaz naturel et de GNL.*
- ***BUBBLE (CEA):*** *Étude des conséquences de la perte de confinement dans des réservoirs.*
- ***FUI METHANE (OSEO INNOVATION - GDF SUEZ - CEDRE - ALYOTECH TECHNOLOGIES - NYMPHEA ENVIRONNEMENT),*** *Modélisation CFD, expérimentation sur une fuite de pétrole, de gaz naturel ou de GNL en mer.*
- ***NUAGE (CEA) :*** *Etude et modélisation des transferts atmosphériques.*

ANNEXE

PROJECTION DE FRANGES

ANNEXE : PROJECTION DE FRANGES

La projection de franges ou de lumière structurée permet par exemple de mesurer la forme d'un objet [4, chap.7]. Au laboratoire, elle est utilisée pour déterminer la forme de l'objet dont on mesure ensuite le déplacement par interférométrie speckle. Ce déplacement est ensuite projeté sur la forme de l'objet en tenant compte de celle-ci, ce qui peut éviter des erreurs élevées en cas d'objet fortement courbé, ou incliné par rapport aux faisceaux d'éclairage et d'observation de l'interféromètre. Les grands principes et quelques applications sont décrits, et plus particulièrement une contribution en enseignement en L3.

- **Bases théoriques**

La projection des franges s'obtient soit par un montage interférométrique qui génère des franges sinusoïdales, soit par vidéoprojection d'une image enregistrée. La première permet d'obtenir des franges très serrées et la seconde convient bien pour des champs plus larges.
Lorsque l'objet se déforme ou se déplace, les franges changent de forme et leur pas varie (Figure 98).

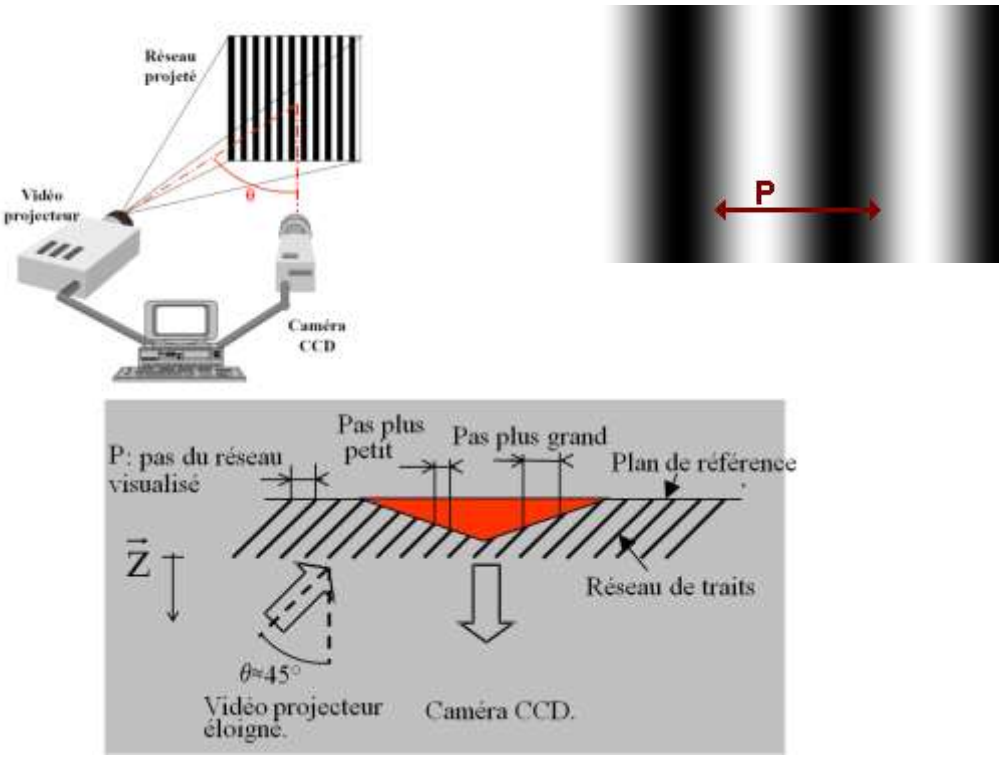


Figure 98 : Principe de la projection de franges pour un objet triangulaire

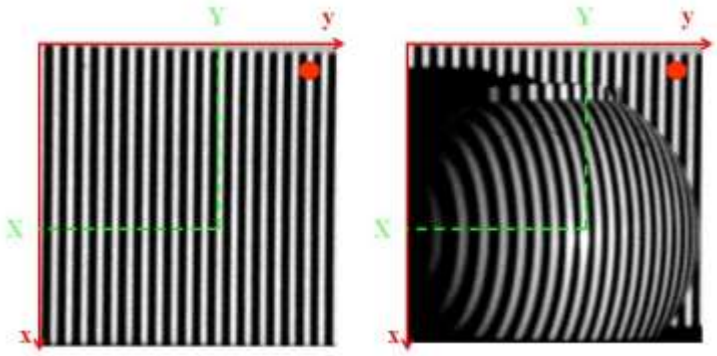


Figure 99 : Principe de la projection de franges, mesure du point (X, Y)

Dans un premier temps, la phase peut simplement être déduite du nombre de franges qui défile entre un état et l'état suivant, avec une référence fixe (point rouge, Figure 99).
Le déplacement des franges projetées sur la forme de l'objet est parfois calculé par décalage de phase par le même algorithme utilisé dans le speckle (Figure 100).

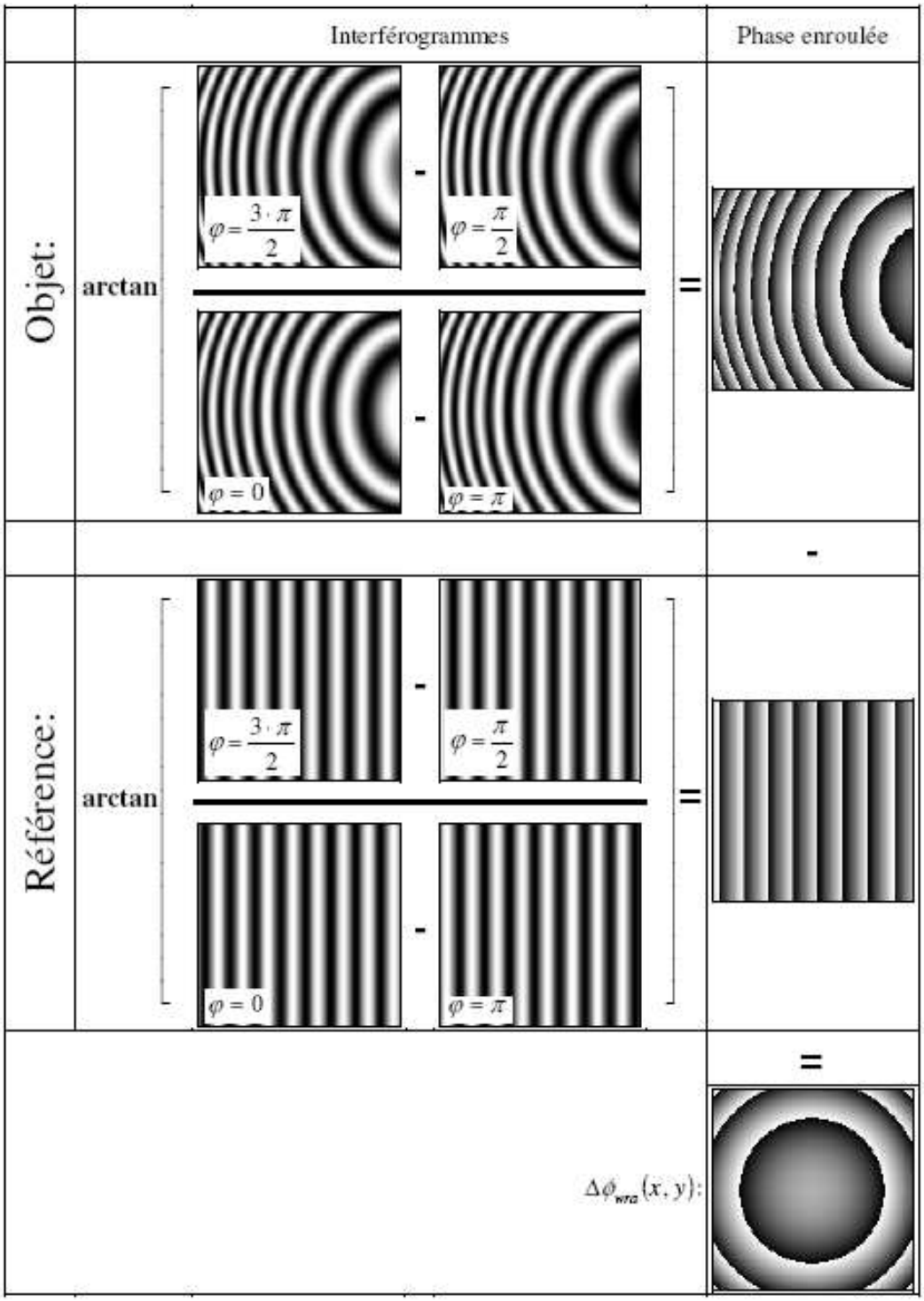


Figure 100: Calcul de différence de phase en projection de frange par décalage de phase

Le calcul de phase peut être obtenu par transformée de Fourier dans certains cas (Figure 101, « Interférogramme » est conservé par abus de langage). Après filtrage autour de la porteuse, et une transformée de Fourier inverse on retrouve la phase codée en niveaux de gris.

Toutefois, ce type de calcul par FFT, dont l'incertitude de mesure de la phase est plus élevée, s'applique principalement pour des opérations plus robustes qui ne permettent pas d'utiliser le décalage de phase, et plus particulièrement en acquisition rapide d'images.

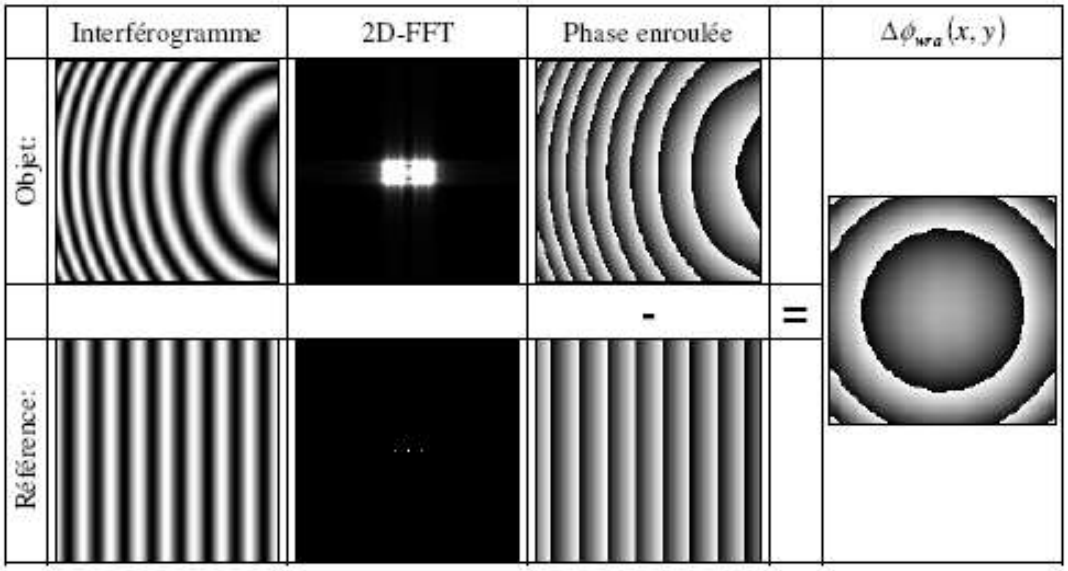


Figure 101: Calcul de phase par 2D-FFT d'une distribution de phase modulée par une porteuse

On retrouve de nouveau un profil de phase enroulée qu'il faudra dérouler. Une autre méthode qui évite cette opération de déroulage consiste à utiliser des projections de franges binaires de différents pas, qui se subdivisent l'un l'autre. Cette technique permet de coder la phase directement en code de Gray. Elle requiert toutefois de nombreuses images pour déterminer un état, ce qui peut être un fort handicap dans le cas d'événements rapides.

La forme de la surface ou sa variation, Δh, est ensuite déduite de la géométrie du système (angle θ entre le projecteur de franges (de pas P) et la caméra). On a:

$$\Delta h = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \tan(\theta)} \cdot \phi(x,y) \quad . \qquad \text{(eq 45)}$$

En décalage de phase, certains artefacts peuvent survenir lors de la reconstruction du relief de surface, en fonction du nombre de décalages et du pas des franges (Figure 102).

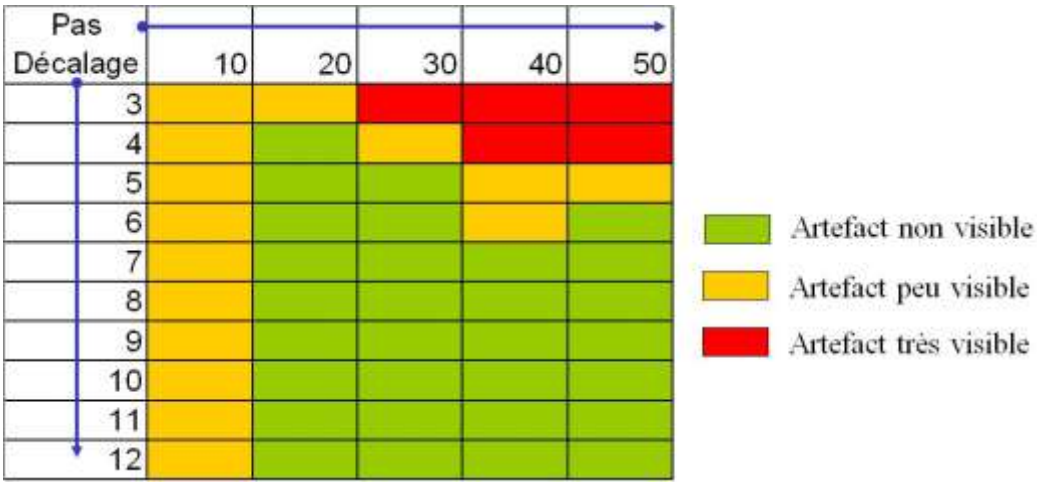
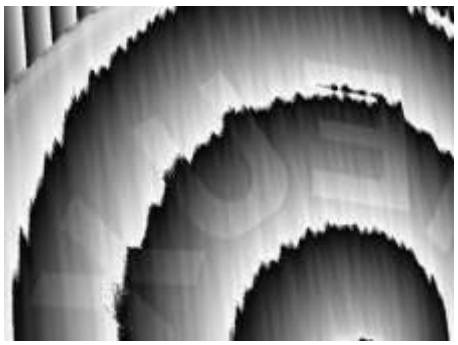


Figure 102: Apparition d'artefacts visuels à la reconstruction

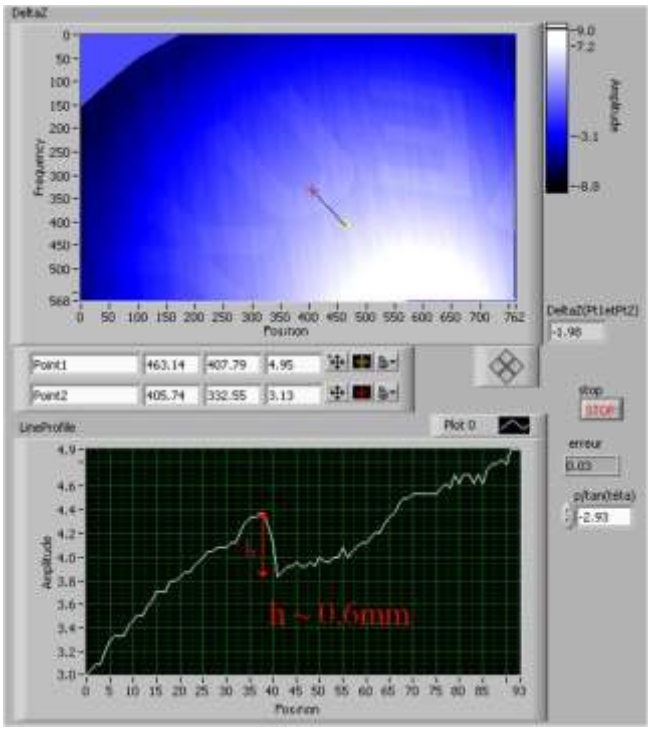
- **Applications**

La projection de franges a été appliquée avec succès tant pour des cas statiques (Figure 103) que pour des cas dynamiques (Figure 104).

a) Objet à mesurer



b) Phase enroulée



c) Phase déroulée et Interface utilisateur

Figure 103: Mesure de forme d'un pion à béton

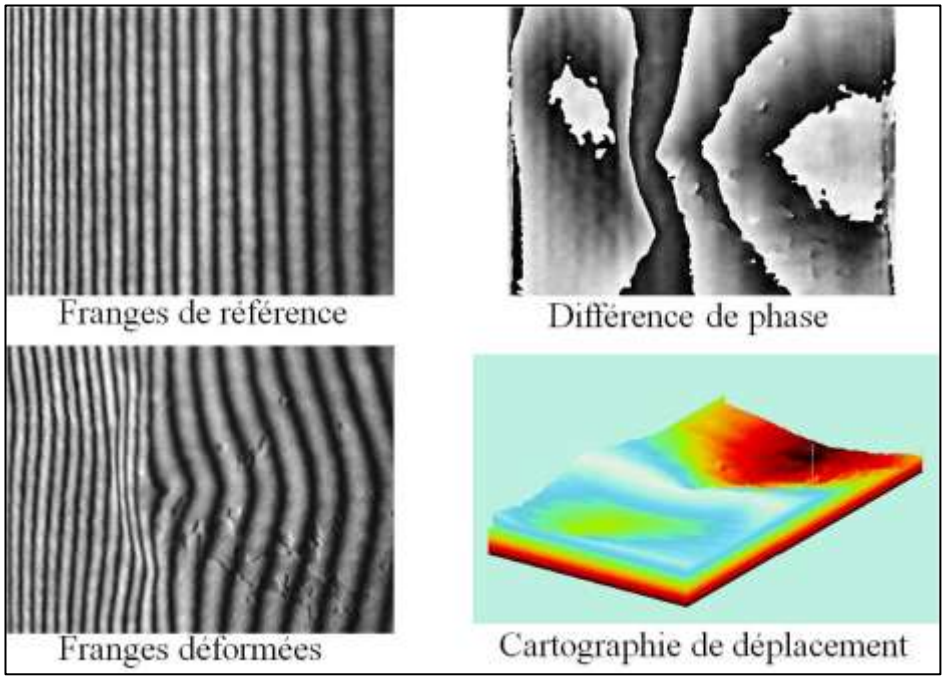


Figure 104: Compression d'un cylindre

N.B. ***:*** *Des interfaces utilisateurs des logiciels d'acquisition et de traitement des images ont également été développés, ainsi que des travaux pratiques de laboratoire pour les étudiants de L3 de l'EMA, qui ont réalisé les applications présentées.*