HAL
open science

L'informatique au service de la mécanique des solides

Fabrice Morestin

To cite this version:

Fabrice Morestin. L'informatique au service de la mécanique des solides. Mécanique [physics.med-ph]. INSA de Lyon, 2010. tel-00462330

HAL Id: tel-00462330

https://theses.hal.science/tel-00462330v1

Submitted on 9 Mar 2010

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.

N° d'ordre : HDR 2010001 Année 2010

Habilitation à Diriger des Recherches

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON
UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON I

Fabrice MORESTIN

Maître de conférences 60ème section
Enseignant à l'INSA de Lyon, département GMC
Chercheur au Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures
UMR 5259

L'informatique au service de la mécanique des solides

Date de soutenance : 01022010

Composition du jury :

Jean Claude BOYER	Professeur LaMCoS, INSA de Lyon	Examinateur
Michel BRUNET	Professeur LaMCoS, INSA de Lyon	Examinateur
Laurence CHEZE	Professeur LBMC, Université Lyon 1	Rapporteur
Pierre JACQUOT	Professeur NAM, EPFL	Examinateur
Pierre VACHER	Professeur SYMME, Université de Savoie	Rapporteur
Sandrine THUILLIER	Professeur LIMATB, Université Bretagne Sud	Rapporteur

Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures
UMR 5259
INSA de Lyon
Université de Lyon

TABLE DES MATIERES

Table des matières 3
Avant propos 7
Curriculum vitae 8

Docteur ingénieur en mécanique 8
Etat civil 8
Adresse professionnelle 8
Diplômes 8
Cursus professionnel 8

Activités Pédagogiques 8
Formation initiale 8
Services actuels 9
Services antérieurs 9
Formation continue 9

Responsabilités, animations, gestion 10
Au sein de l'INSA (en cours) 10
Au sein du département d'enseignement GMC (en cours) 10
Au sein du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures 10
Encadrements associés - Thèses 10
Participations à des jurys de Thèses comme membre 10
Encadrements associés - MASTERS et Projets de Fin d'Etudes 11
En dehors de l'INSA (en cours) 11

Publications 11
Articles de périodique (26 publications – 2 par an depuis 1996) 11
Conférences (56 publications - 3 par an depuis 1991) 11
Contrats industriels et études industrielles (en cours) 12

Valorisation (en cours) 12
Au sein de l'INSA 12
En dehors de l'INSA 12
Présentation de mes activités d'enseignement 13

Formation initiale 13
Informatique 13
Mécanique des Solides 14

Formation continue 15

Missions pédagogiques 16
Suivi de stages 16
Conception, mise en place et rénovation de sujets de travaux pratiques 16
Création de salles de travaux dirigés informatisées 16
Présentation de mes activités de gestion 18

Au sein de l'INSA 18
Tâches de direction et/ou de responsabilité 18
Tâches représentatives 19
Autres tâches 19

Au sein du département d'enseignement GMC 19
Tâches de direction et/ou de responsabilité 19
Tâches représentatives 19
Autres tâches 19

Au sein du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures 20

En dehors de l'INSA 20

Présentation de mes actions de support 21
Au sein de l'INSA 21
En dehors de l'INSA 21
Présentation de mes activités de valorisation industrielle 22
Présentation de mes travaux de recherche 25
Introduction 25
Présentation chronologique 25
DEA et Thèse 28
Contexte 28
Présentation de mes sujets de DEA et de Thèse 28
Apports scientifiques et personnels 29
Activités associées à la biomécanique 30
Les débuts 30
La caractérisation mécanique de tissus biologiques 30
La modélisation par éléments finis de la face humaine 31
Participation associée à d'autres travaux dans le domaine de la biomécanique 32
Conclusion de mes activités associées à la biomécanique 32
Activités associées à la caractérisation de la plasticité des tôles 33
Courbes limites de formage : détermination et modélisation 33
Qu'est qu'une CLF ? 33
Les buts à atteindre 34
Ma démarche 34
Les buts atteints et les perspectives… 36
Modélisation de l'écrouissage des métaux 38
Les buts à atteindre 39
Ma démarche 39
Les buts atteints et les perspectives… 43
Conclusion sur mon activité de recherche liée à la plasticité des tôles 44
Activités de recherche associées à la caractérisation des tissus 45
Les débuts 45
Les perspectives 47
Activités associées à la mesure de déformations 48
Avant la corrélation d'images 48
La mesure de déplacements par corrélation d'images 49
Principes de base 49
L'interpolation des niveaux de gris 50
La minimisation 52
La propagation des solutions initiales 54
Le post traitement des déplacements 55
Les débuts d'*ICASOFT* 57
La corrélation sur surfaces gauches 57
Evolutions successives d'*ICASOFT* 57
Applications liées à *ICASOFT* dans le domaine de la mécanique des solides 60
Distribution nationale et internationale d'*ICASOFT* 61
Futures évolutions d'*ICASOFT* 63
Autres applications utilisant la corrélation d'images 63
Conclusion sur mon activité de recherche liées à la mesure de déformations 64
Activités d'encadrement recherche 2ème et 3ème cycles 66
Encadrements associés - Thèses 66
Que sont ils devenus ? 67
Encadrements MASTER / DEA 68
Plasticité 68
Mesure de déformations 68
Tissus 69

Encadrements projets de fin d'études 69
Biomécanique 69
Plasticité 69
Mesure de déformations 70
Tissus 71
Autres 71
Conclusions et perspectives 72
Bibliographie 74
Publications 77
Articles de périodique (26 publications - 2 / an depuis 1996) 77
Conférences (56 publications - 3 / an depuis 1991) 79
Ouvrages (5 publications) 83
Rapports de contrat (3 publications) 83
Brevets (2 publications) 84
ANNEXES 85
Coefficients d'interpolation spline cubique 85
Sélection de publications 87

à Marie Berak

AVANT PROPOS

Ce dossier est constitué en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches. Après la présentation de mon curriculum vitæ qui permettra au lecteur de manière factuelle et temporelle de retracer mon parcours professionnel, ce document se compose d'une synthèse de mon activité d'enseignant-chercheur elle-même divisée en quatre parties : activités d'enseignement, activités de gestion, activités de valorisation et activités de recherche.

Une petite explication s'impose concernant le titre de cette habilitation car c'est une clef importante pour comprendre le fil conducteur de mon parcours en tant qu'enseignant chercheur. « L'informatique au service de la mécanique des solides » peut paraître un titre un peu étrange pour l'habilitation à diriger des recherches d'un mécanicien mais il reflète fidèlement ma passion pour « l'informatique », néologisme inventé en 1962 par un journaliste nommé Philippe Dreyfus, qui est la contraction des mots « traitement de l'informa…tion auto…matique ». Ce mot d'origine typiquement française qui se traduirait plutôt par « computer science » en anglais a été adopté en 1967, (année de ma naissance !) par l'Académie Française pour désigner la « science du traitement de l'information ». Ce n'est que beaucoup plus tard que je découvris l'origine profonde de cette science qui vit le jour dans les années 40 au tournant de la guerre, dans les esprits de grands hommes comme Alan Turing créateur de la "machine universelle" (*General Problem Solver*), Claude Shannon fondateur de la théorie de la communication, Norbert Wiener un des pères de la Cybernétique, John Von Neumann dont les théories fonctionnelles se trouvent toujours dans nos ordinateurs actuels, pour ne citer que ceux qui m'ont le plus marqué.

L'ensemble de mes activités d'enseignement et de recherche au cours de ces 14 années sont sous tendues par ma passion pour l'informatique, et c'est sous cet angle de vue qu'est rédigé ce mémoire.

CURRICULUM VITAE

Docteur ingénieur en mécanique

Etat civil

MORESTIN Fabrice
Né le 14 mars 1967, marié.
Domicilié à Novet, 01480 Chaleins.

Adresse professionnelle

LaMCoS UMR CNRS 5259, bât. Jacquard
69621 Villeurbanne Cedex
Tél. : 33 (0)4 7243 6317
Email : Fabrice.Morestin@insa-lyon.fr

Diplômes

[1994] : Qualification Maître de Conférences.
[1993] : Doctorat de Mécanique.
[1990] : **D**iplôme d'**E**tudes **A**pprofondies de Mécanique.
[1990] : Diplôme d'ingénieur de l'**I**nstitut **N**ational des **S**ciences **A**ppliquées de **L**yon, option Génie Mécanique.
[1985] : Baccalauréat. Lycée Antoine de Saint Exupéry, Lyon 4.

Cursus professionnel

Depuis 1995, je suis Maître de Conférences au Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS UMR 5259), Département Génie Mécanique et Conception, INSA de Lyon. 4ème échelon Hors Classe depuis septembre 2009.

[1995-1994] : **A**ttaché **T**emporaire d'**E**nseignement et de **R**echerche au Département Génie Mécanique et Construction
[1994-1993] : Employé INSAVALOR sous contrats EDF / RENAULT
[1993-1991] : Doctorant sous contrat MRES
[1991-1990] : Militaire au 5ème Groupement d'Hélicoptères Légers.

Activités Pédagogiques

J'effectue environ 200 heures équivalent TD / an depuis 1998. Un tiers de mon service est fait dans le domaine de l'informatique et l'analyse numérique. Les deux tiers restants sont donnés dans le domaine de la mécanique des solides.

Toutes les heures sont données en équivalent TD (Travaux dirigés ou conférences)

Formation initiale

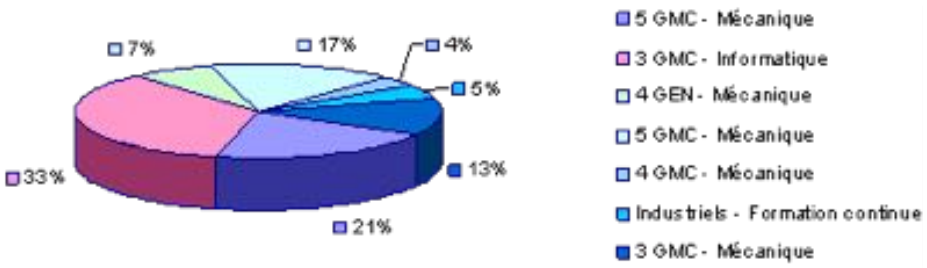


Figure 1 : Répartition de mes activités d'enseignement

Services actuels

Années	Intitulé et niveau	Nb. eq. heures TD /an
[2009-1996]	Encadrement de projets de fin d'études GMC.	45
[2009-1996]	Cours 3ème année ingénieur GMC : Initiation aux systèmes informatiques et au calcul scientifique.	75
[2009-1997]	Travaux pratiques, Mécanique des Solides, 5ème année ingénieur GMC	36
[2009-2003]	Travaux dirigés de Mécanique des Solides, 4ème année ingénieur GEN	16
[2009-2003]	Travaux pratiques, Mécanique des Solides, 4ème année ingénieur GMC	12
[2009-2003]	Travaux dirigés de Mécanique des Solides, 3ème année ingénieur GMC	28

Services antérieurs

[2003-1995]	Cours 5ème année ingénieur GMC : L'informatique au service de l'ingénieur mécanicien.	36
[2002-1997]	Travaux dirigés de Mécanique des Solides, 3ème année ingénieur GEN	14
[2001-1998]	Travaux dirigés de Mécanique des Solides, 4ème année ingénieur ITECH	28
[1998-1996]	Travaux pratiques assurés au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'I.N.S.A. de Lyon, 4ème année ingénieur GMC	128
[1998-1998]	Travaux dirigés de Mécanique des Solides, 3ème année ingénieur GMC	16
[1995-1992]	Encadrement de projets de fin d'études, GMC - Laboratoire Mécanique des Solides, GCU - Laboratoire Béton et Structures	50
[1995-1995]	Travaux pratiques assurés au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'I.N.S.A. de Lyon, 4ème année ingénieur GMC	64
[1994-1994]	Formation aux techniques de programmation sous Windows à l'I.U.T. de Mécanique de Villeurbanne. Mécanique de Villeurbanne.	12
[1992-1992]	Travaux pratiques assurés au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'I.N.S.A. de Lyon, 4ème année ingénieur GMC.	128

Formation continue

Années	Intitulé et niveau	Nb.heures
[2007-2006]	Cours formation continue MDRH : Utilisation d'Active Directory, des stratégies systèmes et VbScript à destination du personnel de l'INSA.	84
[2007-2003]	Cours CAST (stage 120) sur la mécanique des solides	56
[1999-1996]	Cours CAST (formation continue de l'INSA) sur les capteurs d'effort	20
[1994-1994]	Cours généraux de Mécanique des Solides assurés pour la formation d'un installateur de matériels pédagogiques au Maroc.	16

Responsabilités, animations, gestion

Au sein de l'INSA (en cours)

[2009-2009]

- Membre des ambassadeurs développement durable de l'INSA de Lyon.

[2009-2006]

- Responsable de la plateforme de travaux pratiques TP5G regroupant 5 départements de l'INSA de Lyon : GMC, GMPP, GEN, GMD, GCU. 2500 étudiants par an.

[2009-2006]

- Membre de deux jurys de recrutement d'assistant d'ingénieur BAP E. Informatique.

[2009-1995]

- Responsable du C.R.E.M.G.E.C. : Centre de ressources expérimentales en mécanique et génie civil, centrale d'achat commun entre les laboratoires suivants : LAMCOS, CETHIL, LGCIE, LVA, LMFA.

[2009-2005]

- Participation aux entretiens d'admission première année INSA de Lyon.

Au sein du département d'enseignement GMC (en cours)

[2009-2009]

- Membre du conseil du département GMC.

[2009-2007]

- Correspondant département pour le projet RPN500 (500 ressources pédagogiques numériques) piloté par le service de la documentation de l'INSA de Lyon.

[2009-2006]

- Mise en place d'une application web permettant la gestion des notes et des parcours des étudiants en GMC : MALICE. 400 étudiants concernés par an.

Au sein du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures

Encadrements associés - Thèses

Depuis 1994, j'ai co encadré quatre doctorants et j'ai apporté un soutien logistique important à deux doctorants en biomécanique.

Participations à des jurys de Thèses comme membre

[2005-2005]

- "Reconstruction 3D de l'intérieur d'une chaussure : évaluation du chaussant". Mr Terence COUDERT, ESIA Annecy. Mai 2005.

[2002-2002]

- "Modélisation du comportement du pneumatique au passage d'obstacles". Melle Virginie HARTH, INSA de Lyon. Décembre 2002.

[2001-2001]

- "De l'utilisation d'une loi monocristalline en vue de la caractérisation du comportement plastique du multi cristal d'aluminium". Mr Stéphane DUMOULIN, ESIA Annecy. Mai 2001.

Encadrements associés - MASTERS et Projets de Fin d'Etudes

Masters / DEA	17 (depuis 1993 ~ 1 /an)
Projets de fin d'études	34 (depuis 1992 ~ 2 /an)

Tableau 1 : Résumé des encadrements de masters / Projets de fin d'études

En dehors de l'INSA (en cours)

[2009-2008]

- J'assure la gestion informatique et la maintenance du site web de l'association ESAFORM (European Scientific Association For Material Forming) .

[2009-2006]

- Participant au cluster régional MACODEV.

Publications

Seuls les résumés et les figures sont présents dans cette partie. La liste complète des publications se trouve à la fin de ce document.

Articles de périodique	26
Ouvrages	5
Conférences	56
Rapports de contrat	3
Brevets	2

Tableau 2 : Résumé du nombre de publications

Articles de périodique (26 publications – 2 par an depuis 1996)

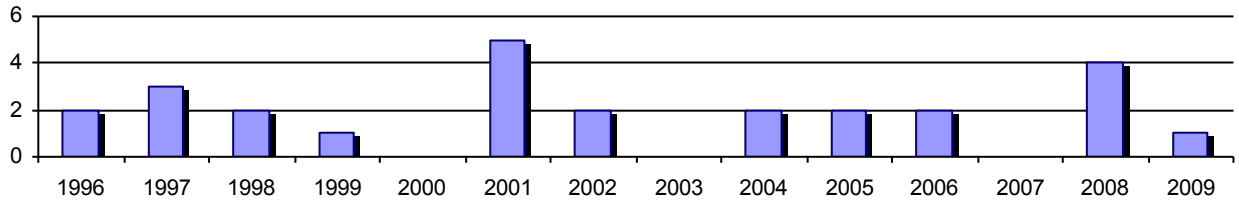


Figure 2 : Répartition au cours du temps de publications dans des périodiques

Conférences (56 publications - 3 par an depuis 1991)

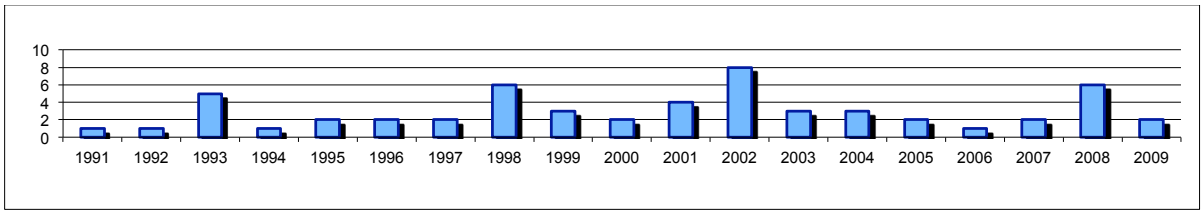


Figure 3 : Répartition au cours du temps de communications dans des conférences

Je suis également l'auteur de deux **brevets**, dont un à portée internationale.

Contrats industriels et études industrielles (en cours)

[2009-2008]

- Etude du retour élastique en pliage. CETIM. Durée 6 mois
- Caractérisation des étoffes hybrides. PAYEN SA. Durée 6 mois

Valorisation (en cours)

Au sein de l'INSA

[2004 - 2003]

- Création d'un logiciel pour la prise de photo d'identité rapide pour le service scolarité de l'INSA de Lyon (toujours utilisé en 2009).
- Mise en place de la structure de l'annuaire Active Directory pour l'authentification des personnels en collaboration avec Florence Quereyron du CRI.

En dehors de l'INSA

[2009 - 2008]

- Création et direction d'un service d'hébergement et de gestion de sites web sous tutelle de gestion financière d'INSAVALOR.

PRESENTATION DE MES ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Je suis actuellement Maître de Conférences au Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS UMR 5259), depuis 1995. Ce laboratoire, dirigé par le Professeur Alain Combescure, est le résultat de la fusion, en 2002, du Laboratoire de Mécanique des Solides (LMSo) auquel j'étais affecté et du Laboratoire de Mécanique des Contacts (LMC).

En tant qu'enseignant, je suis rattaché administrativement au Département d'option Génie Mécanique Conception, INSA de Lyon. De 1994 à 1995, j'ai été Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche au Département Génie Mécanique et Construction.

Formation initiale

La scolarité des élèves ingénieurs à l'INSA de Lyon se déroule sur cinq années. Les deux premières sont équivalentes à une école préparatoire et se déroulent dans un département nommé « premier cycle », les trois dernières se déroulent dans un des départements d'option. J'enseigne dans deux départements d'option principalement : GMC, Génie Mécanique Conception, niveau troisième et cinquième année, et GEN, Génie Energétique et Environnement niveau quatrième année. J'effectue environ 200 heures équivalent TD / an depuis 1998. J'enseigne dans les domaines de l'informatique, l'analyse numérique et de la mécanique des solides.

Informatique

L'informatique, couplée à l'analyse numérique a une place importante en GMC, tant par ses moyens : plus de 300 machines individuelles et plus de 10 serveurs pour environ 400 élèves, que par le volume horaire dédié à cette matière en troisième année : environ 64 heures de cours. Nous sommes six intervenants dans ce cours dont le responsable est le Professeur Nacer Hamzaoui.

Mon enseignement dans le domaine de l'informatique est atypique dans un département de mécaniciens mais essentiel pour que les étudiants ne soient pas repoussés par la programmation en particulier et par les techniques informatiques en général (acquisition de données, traitement du signal). Le cours comporte une partie initiation aux diverses techniques de programmation sous Windows :

- Programmation en Batch.
- Programmation en VbScript.
- Notions sur le « hardware », bus, réseau, processeur.
- Notions sur le codage de l'information permettant essentiellement de mettre l'accent sur les problèmes liés à la précision des résultats obtenus lors de calculs scientifiques.
- Notions sur les mémoires de masse et mémoires vives

La plus grande partie du temps est ensuite consacrée à la réalisation d'un projet de programmation, le plus souvent écrit en Visual Basic, qui est effectué par binôme ou trinôme. Les sujets sont différents chaque année depuis 1999, ils sont le plus souvent en relation avec les autres cours dispensés en GMC : Mécanique des solides, thermodynamique, gestion de production, automatisme. Par exemple, le sujet proposé pour l'année 2008/2009 concernait la réalisation d'un logiciel permettant de simuler le repliement et l'interaction réciproque de protéines dans une cellule vivante. Le programme à rendre devait être 2D, graphique et inclure des algorithmes de minimisation de l'énergie libre de la protéine. Le résultat final de l'énergie interne a été vérifié au moyen d'une application externe qui se présentait sous la forme d'un site web développé par mes soins en PHP. Ainsi, l'ensemble de la promotion pouvait connaître la performance des programmes de repliement de chacun. Les soutenances de ces projets sont publiques devant la promotion entière.

Il faut noter que les potentiels d'interaction utilisés dans ce projet, sont, en version très simplifiée, ceux programmés dans les simulations de propagation de fissures à l'échelle atomique comme cela est présenté dans la thèse de Pascal Aubertin, doctorant au LaMCoS en 2008 : « Couplage de modèles atomique et continu, propagation dynamique de fissures » [AU2008].

Afin de ne pas décourager les étudiants les plus faibles en informatique, les binômes ou les trinômes sont constitués par niveau, lui-même évalué par l'intermédiaire d'un questionnaire sous Moodle imposé en début de troisième année. Le sujet du projet est également divisé en trois niveaux de difficulté croissante. Ainsi, chaque binôme / trinôme est évalué sur la progression par rapport à son niveau de départ et non pas dans l'absolu.

Liste des sujets proposés depuis 2001 :

- 2001 - Réalisation d'un logiciel qui simule la croissance des végétaux : Formalisme de Lindenmayer
- 2002 - Réalisation d'un logiciel permettant de vérifier la loi des gaz parfaits.
- 2003 - Réalisation d'un logiciel permettant à un robot de trouver la sortie d'un labyrinthe.
- 2004 - Réalisation d'un logiciel permettant de dépouiller de manière automatique ou semi automatique des grilles sur pièces déformées.
- 2005 - Réalisation d'un logiciel simulant la vie en vase clos d'agents soumis à des lois d'attraction et de répulsion simples …
- 2006 - Réalisation d'un logiciel simulant l'écoulement dynamique du sable et sa mise en tas !
- 2007 - Réalisation d'un logiciel sous Excel permettant de déterminer la gestion optimale du temps. Application à la gestion de production des 9 premiers satellites du projet GALILEO.
- 2008 - Réalisation d'un logiciel sous Visual Basic permettant de simuler le repliement et l'interaction réciproque de protéines dans une cellule vivante

Mon investissement personnel dans ce cours est important en temps et en réflexion mais je suis largement récompensé par les témoignages des étudiants qui m'expliquent comment ils ont mis à profit leur apprentissage en programmation au cours de diverses situations comme leur stage industriel, les projets collectifs ou les travaux pratiques. Cette formation est un véritable atout pour la plupart d'entre eux au moment de leur embauche.

Mécanique des Solides

Nous sommes sept intervenants dans ce cours en GMC dont le responsable est le Professeur Jean-Claude Boyer et trois intervenants en GEN dont le responsable est le Professeur Daniel Nélias.

De manière régulière depuis 2003, j'assure les travaux dirigés pour un groupe de 24 étudiants en GEN, et deux groupes de 28 étudiants en GMC. Le programme de mécanique des milieux continus en GEN, quatrième année et en GMC, troisième année est identique, il concerne :

- Les vecteurs et tenseurs dans un espace euclidien.
- Les notions de vitesses, déplacements et déformations, en petites et grandes transformations.
- Les contraintes et les principes fondamentaux.
- Les lois de comportement : élasticité linéaire, hyper élasticité.
- La théorie des poutres et les calculs associés.
- Des applications à la conception.

Afin de faciliter la compréhension du cours et des travaux dirigés, j'ai conçu diverses applications informatiques, sous Excel essentiellement, qui permettent de visualiser plus simplement les notions de tenseur, de valeurs propres et de déformations. Il arrive également que le cours d'informatique soit couplé avec celui de mécanique des solides comme cela fût le cas au cours de l'année 2004.

Une partie de mon service en mécanique des solides est également constitué de travaux pratiques avec des étudiants de quatrième ou cinquième année GMC. Ces travaux pratiques se déroulent sur 12 heures par séances de 4 heures. Les étudiants sont par groupe de 8 à 10 personnes et traitent un sujet unique durant tout le TP. Depuis trois ans, le sujet du TP concerne la mesure de déplacements par interférométrie speckle sur une poutre en flexion. Les manipulations sont réalisées dans une salle spécialement aménagée et avec du matériel ayant été acheté lors d'une demande de financement sous forme d'un Bonus Qualité Formation en 2005 grâce aux conseils du professeur Pierre Jacquot de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Photo 1 : Dispositif expérimental : éléments qui composent l'interféromètre de Speckle
Tiré d'un compte rendu de TP – 4GMC2 – Année 2009

En 2009, le département GMC a financé l'achat d'un système ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) pour un coût total de 50 Keuros auprès de la société DANTEC DYNAMICS. Il est destiné à compléter le TP décrit précédemment. L'ESPI est une technique de mesure de champ de déplacement à la surface d'une pièce sollicitée thermiquement ou mécaniquement. La mesure s'effectue sans contact avec des résolutions inférieures à 200 nanomètres.

J'encadre également des travaux pratiques de troisième et quatrième année en GMC pour une douzaine d'étudiants qui sont, d'une part, issus d'une formation continue Fontanet (DUT+3 ans) et d'autre part issus de la filière ERASMUS MUNDUS. Ces travaux pratiques mettent en avant les thèmes suivants :

- Essai de traction sur matériaux métalliques.
- Essai de flexion simple sur plexiglas.
- Détermination de paramètres matériaux pour des composites fibres de verre / carbone.
- Etude de la déformation plastique d'une membrane d'aluminium sous pression.
- Etude des contraintes dans un disque sous compression par photoélasticimétrie.

Je suis sollicité régulièrement au cours de divers projets de fin d'études pour l'aide à l'utilisation du code de calcul éléments finis Abaqus car je le pratique pour des études industrielles.

Encore une fois, l'informatique est très présente dans cette matière. Je suis l'initiateur des distributions des sujets de travaux pratiques sur Moodle, de comptes rendus au format PDF sans aucune impression sur support papier. L'ensemble des travaux pratiques cités ont été rénovés et informatisés par mes soins. Ceci est détaillé dans le paragraphe suivant concernant mes missions pédagogiques.

Formation continue

Cette activité représente environ 10 heures équivalent TD / an depuis 1995. Je dispense des cours de mécanique des solides, niveau M1 par l'intermédiaire d'INSACAST, organisme qui a reçu une délégation de service publique en ce qui concerne la formation continue à l'INSA de Lyon. Je suis également intervenu pour la formation des personnels techniques bap E (services informatiques) auprès de la MDRH (Mission Développement des Ressources Humaines) de l'établissement. Ces cours concernent l'utilisation et la maintenance d'annuaires de type Active Directory ainsi que le déploiement de stratégies systèmes sur le domaine.

Missions pédagogiques

Suivi de stages

Les élèves ingénieurs du département GMC doivent suivre un stage industriel d'une durée de 6 mois. Chaque étudiant se voit affecté un tuteur dans l'entreprise et un tuteur parmi les enseignants chercheurs de l'INSA. A ce titre, je suis depuis 1999 le tuteur de stage d'environ 2 élèves ingénieurs par an. La plupart des sujets tutorés concernent les calculs de structures avec ou sans l'aide de codes éléments finis. Je suis en particulier les étudiants qui effectuent leur stage aux Etats Unis, dans la ville de New York au sein d'une entreprise de certification de grues : Howard I. Shapiro & associates, Consulting Engineers.

Conception, mise en place et rénovation de sujets de travaux pratiques

Le hall de travaux pratiques de mécanique des solides du département GMC est maintenant commun à cinq départements de l'INSA (TP5G) et voit passer plus de 2500 étudiants par an sur les différentes manipulations.

Depuis 1995, j'ai rénové l'ensemble des manipulations de travaux pratiques de troisième et quatrième année GMC. Avant cette date, aucune d'entre elles ne possédaient d'équipement d'acquisition de données ni de programme de pilotage et/ou de dépouillement des résultats. J'ai programmé l'ensemble des logiciels d'acquisition de données en provenance de pont d'extensomètrie, de caméras vidéo, de capteurs de déplacement et d'effort. Ces travaux pratiques sont toujours utilisés en 2009, en l'état, à peu de chose près. Certaines manipulations ont été rénovées deux ou trois fois depuis cette période. En tout, j'ai dû concevoir et mettre en place plus d'une vingtaine de logiciels sur la plateforme.

De 1998 à 2001, j'ai mis en place des sujets de travaux pratiques de longue durée (12 heures) dont les sujets étaient :

- Essai de pompage sur pneumatique pour déterminer sa raideur radiale. Sujet réalisé en soutien de la thèse de Virginie Harth [HA2002].
- Etude de l'essai de cisaillement d'Iosipecscu par corrélation d'images.
- Détermination des variations du coefficient de Lankford lors de la plastification des métaux par corrélation d'images.
- Caractérisation de matériaux hyper élastiques, détermination des coefficients de Money Rivlin d'une silicone.

En 2002, j'ai assisté un autre enseignant pour la mise en place d'un TP de mécanique des solides de 5ème année du Département GMC sur les mesures de déformation en fond d'entaille par corrélation d'images.

Création de salles de travaux dirigés informatisées

En 2001, j'ai conçu complètement, plans des meubles, aménagement de l'espace, configuration matérielle des ordinateurs, logiciel de prise de contrôle, la première salle de travaux dirigés informatisée. Cet aménagement a fait l'objet d'une demande de Bonus Qualité Formation appuyée par le Directeur du département de GMC, le Professeur Claude Boisson. Chaque binôme d'étudiants possède un poste. L'enseignant dispose également d'un ordinateur maître lui permettant de visualiser le travail de chaque binôme. J'ai renouvelé cette opération pour une autre salle de travaux dirigés en 2003, puis en 2004. Lorsque l'assistant d'ingénieur informaticien, un ASI, a pris ma succession en tant que responsable informatique du département GMC, il a continué cette implantation dans le département et nous avons aujourd'hui 7 salles de travaux dirigés informatisées du même type. La dernière permet d'accueillir 30 étudiants ayant chacun un poste informatique individuel afin de généraliser l'utilisation de tests de connaissance en ligne à l'aide de Moodle.

Les dernières versions des salles de travaux dirigés informatisées dans le département GMC ont connu une autre évolution majeure au cours des quatre dernières années. Les ordinateurs ne sont plus dans les salles de TD elles-mêmes, mais implantés dans des locaux techniques à l'intérieur de baies. Seuls

les claviers, souris, écrans sont exportés dans la salle. Cette astuce technique a permis d'améliorer considérablement la facilité de maintenance, la protection au vol, d'éviter la climatisation des salles de cours et surtout d'apporter le silence dans les salles de travaux dirigés !

Il est intéressant de noter que ce concept a été largement exporté dans d'autres départements de l'INSA de Lyon comme Bioscience, Génie énergétique et environnement par exemple.

PRESENTATION DE MES ACTIVITES DE GESTION

L'informatique tant sous sa forme de gestion que sous sa forme de programmation est fortement présente dans cette présentation de mes activités de gestion.

Au sein de l'INSA

Tâches de direction et/ou de responsabilité

Depuis 2006 jusqu'à ce jour, je suis le **responsable pédagogique** de la **plateforme de travaux pratiques TP5G** regroupant 5 départements : GMC, GMPP, GEN, GMD, GCU. Ce hall de travaux pratiques regroupe environ une trentaine de manipulations. 2500 étudiants par an le fréquentent tous les jours de la semaine. Différentes équipes pédagogiques issues des cinq départements se relayent pour l'encadrement des étudiants. Depuis seulement 2009, un demi-poste d'ingénieur d'études et un poste d'agent technique sont rattachés à cette plateforme.

Depuis 1995, je suis le **responsable du C.R.E.M.G.E.C.** : Centre de ressources expérimentales en mécanique et génie civil, qui est une centrale d'achat commune entre les laboratoires suivants : LaMCoS, CETHIL (Centre de thermique de Lyon), LGCIE (Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale), LVA (Laboratoire Vibrations Acoustique) et LMFA (Laboratoire Mécanique des Fluides et d'Acoustique) . Cette centrale d'achat a réalisé depuis 1995 les acquisitions suivantes :

- Une centrale de vision haute résolution (60 kEuros).
- Un lecteur graveur de CDROM, le premier modèle en service à l'INSA de Lyon (6 kEuros) !
- Une caméra rapide type RedLake (45 kEuros).
- Un appareil photo numérique haute résolution (3 kEuros).
- Une caméra thermique (75 kEuros)

L'ensemble de ce matériel a été acheté avec des fonds versés par les différents participants. Lorsque cela fut nécessaire, INSAVALOR a permis le financement initial remboursé ensuite par un principe de location dont j'assure la gestion avec l'aide d'Isabelle Comby, Guillaume Chareyre et Lionel Lafarge.

En 2004, Pierre Soupirot, à qui j'ai succédé en 1998 en tant que **responsable informatique du département GMC**, a proposé à la direction de l'INSA que j'assure l'intérim de sa fonction, pendant un an, comme **directeur du Centre des Ressources Informatique de l'INSA de Lyon**. Ce service d'appui aux missions comprenait en 2004, 45 personnels. A ce titre, durant une année j'ai réalisé les points suivants :

- Restructuration du service en équipes.
- Mise en place d'annuaires d'authentification centralisés.
- Mise en place d'un HelpDesk concernant les questions informatiques pour l'INSA de Lyon.
- Enclenchement de l'urbanisation du système d'information de l'INSA de Lyon
- Démonstration de l'intérêt d'une Direction des Systèmes d'Information auprès de la Direction.
- Aménagement d'une nouvelle salle serveurs (30 machines).
- Démarrage du projet vidéo surveillance de l'INSA de Lyon.
- Démarrage du projet de recyclage des déchets informatiques.

Cette tâche a été exaltante et très prenante, d'autant que j'ai continué à assurer mes fonctions d'enseignant chercheur durant cette période. Elle explique en grande partie ma baisse de production scientifique durant cette année et l'année qui a suivi. J'ai pu apprécier durant cette période ma capacité à manager une équipe importante pour des missions essentielles à une école comme : la comptabilité, la gestion informatique administrative des étudiants, la gestion informatique des personnels ainsi que tous les services afférant au système d'information.

Tâches représentatives

J'ai été membre du **conseil d'administration de l'INSA de Lyon** pendant quatre années de 2002 à 2006, en tant que représentant du collège B. Cette expérience m'a permis de mieux comprendre les contraintes des personnels administratifs de l'établissement et le rôle indispensable des services d'appui aux missions. J'ai été également confronté à la compréhension de la comptabilité publique lors des séances de vote du budget et j'ai participé à l'élection du directeur de l'institut pour la période de 2006 à 2012.

J'ai été membre de la **commission de spécialiste de la 60ème section CNU** au sein de l'INSA de Lyon pendant six années à partir de 2000.

Autres tâches

Depuis 2009, je suis l'**animateur** du groupe des ambassadeurs développement durable de l'INSA de Lyon. Ce groupe est composé d'une trentaine de personnels administratifs et enseignants chercheurs ainsi que d'une vingtaine d'étudiants. Il a pour mission de conseiller et de faire remonter les avis des personnels et des étudiants de l'INSA de Lyon auprès de la direction des relations internes en ce qui concerne les questions et/ou les problèmes liés au développement durable à l'INSA de Lyon.

De 2003 à 2004 j'ai participé à l'évaluation d'un progiciel de gestion de la formation en collaboration avec la direction de la formation de l'INSA.

Je suis régulièrement sollicité par la direction des systèmes d'information et la mission développement ressources humaines pour être membre de jurys de recrutement d'assistant d'ingénieur ou de technicien BAP E. Informatique.

Depuis 2005, je participe annuellement aux entretiens d'admission en première année aux cinq INSA.

En 2006, j'ai été membre de la commission « Mise en place du C2i » (Certificat Informatique et Internet) au premier cycle de l'INSA de Lyon.

Au sein du département d'enseignement GMC

Tâches de direction et/ou de responsabilité

De 1996 à 1999 j'ai été **administrateur du réseau informatique** du département GMC avant de remplacer Pierre Soupirot comme responsable informatique du département en 2000. Je gérais 350 comptes utilisateurs, 7 serveurs et une centaine de stations de travail.

Tâches représentatives

Depuis 2009, je suis élu au **conseil du département GMC** comme représentant du collège B.

Depuis 2007, je suis le correspondant du département GMC pour le projet RPN500 (500 ressources pédagogiques numériques) piloté par le service de la documentation de l'INSA de Lyon.

Autres tâches

Depuis 2006, J'ai mis en place une application web permettant la gestion des notes et des parcours des étudiants en GMC : MALICE. J'ai défini la structure et le principe de fonctionnement de l'application en relation avec la direction du département ainsi qu'avec le secrétariat des études. Cette application est toujours en fonction et permet la gestion des notes des 450 étudiants transitant en GMC annuellement.

Depuis 2005, j'ai été **le porteur** de deux Bonus Qualité Formation :

- "Initiation à la mesure des déformations et des déplacements par interférométrie de Speckle". Ce projet de travaux pratiques a été mis en place en collaboration avec le département Génie Mécanique et Développement représenté pour l'occasion par Claire Vayssière et Sylvie Descartes. Le financement reçu a été de 34 kEuros.
- "TP5G - Fusion des plateformes de Travaux Pratiques de mécanique des solides de GMC, GMD, GCU, GEN et GMPP". Cette demande a été formulée essentiellement pour montrer le manque cruel de personnel technique sur une plateforme accueillant plus de 2500 étudiants par

an. Suite à ce BQF, un ingénieur d'études a été recruté. Le financement reçu a été de 27 kEuros.

Au sein du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures

De 2006 à 2008, j'ai participé activement avec le professeur Philippe Boisse, Emmanuelle Vidal Sallé et Isabelle Comby à l'organisation de la 11ème conférence internationale ESAFORM à Lyon. J'étais **responsable de la création et de la gestion des sites web front office et backoffice** de la conférence ainsi que la conception du CDROM regroupant les actes. Cette conférence a été un grand succès avec 450 participants issus de 38 pays.

De 2002 à 2004, j'ai été **membre de la commission informatique** du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides.

De 1993 à 2002, j'ai été le **responsable informatique** du Laboratoire de Mécanique des Solides.

Enfin, de 1993 à 1999 j'ai été **membre du Conseil** du Laboratoire de Mécanique des Solides.

En dehors de l'INSA

Depuis 2008, j'assure la gestion informatique et la maintenance du site web de l'association ESAFORM (European Scientific Association For Material Forming) : http://esaform.insa-lyon.fr. Ce site web possède une base de données de plus de 1000 utilisateurs.

Depuis 2006, je participe activement au cluster régional MACODEV. En 2009, avec Le professeur Daniel Nélias et mon collègue Michel Coret, nous avons organisé un séminaire pour une cinquantaine de personnes, qui s'intitulait «Mesure de champs» à Valpré (Lyon) sous le patronage de la fédération CNRS FédéRAMS et du cluster recherche de la Région Rhône Alpes MACODEV.

De 2000 à 2001, j'ai été **membre du comité d'organisation** du colloque PHOTOMECANIQUE 2001 à Poitiers ainsi que de 1997 à 1998 pour l'organisation du colloque PHOTOMECANIQUE 98 à Marne la Vallée.

PRESENTATION DE MES ACTIONS DE SUPPORT

Au sein de l'INSA

En 1992, j'ai conçu une **bibliothèque de fonctions de pilotage** d'une machine de traction compression universelle, SCHENCK RSA250. A partir de cette bibliothèque, j'ai pu réaliser des logiciels d'acquisition et de pilotage qui ont servi à de nombreuses campagnes d'essais au laboratoire. La machine était livrée, de base, avec un seul logiciel standard pour la réalisation d'essais de traction industriels qui ne convenait absolument pas pour les besoins expérimentaux de ma thèse et les différentes manipulations effectuées sur os en biomécanique. Il est à noter, que cette machine de traction était la première machine pilotée par ordinateur du laboratoire. Aucun poste n'était en réseau, le laboratoire disposait d'environ 5 PC et un calculateur en temps partagé.

J'ai réalisé, en 1993, un **logiciel de visualisation** de résultats issus de calculs éléments finis 3D : VISUAL3D. Les bibliothèques standards de type openGL n'étaient pas encore largement diffusées, j'ai donc conçu l'ensemble de la bibliothèque des primitives 3D permettant de réaliser ce programme. Ce dernier est toujours utilisé par une partie de l'équipe en emboutissage en 2009 !

En 1995, j'ai mis en place pour le département GMC, le **premier site web intranet et internet**. J'ai également informatisé la prise de photo d'identité des promotions pour la composition automatique des trombinoscopes. Ce logiciel a été amélioré en 2003 afin d'être étendu à tout l'INSA. Sa particularité est d'intégrer des composants de traitement d'images permettant la détection automatique de la position des yeux du sujet, le recentrage et le recadrage automatique de la photo d'identité. Cette application est encore utilisée en 2009 par le service de la scolarité de l'INSA de Lyon.

En 1998, j'ai mis en place la **structure de l'annuaire Active Directory** pour l'authentification des personnels en collaboration avec Florence Quereyron du CRI. Cet annuaire a eu un effet structurant très fort d'un point de vue informatique sur l'INSA de Lyon qui comptait avant cela plus de 50 serveurs d'authentification disparates à l'intérieur des différentes entités comme les services administratifs, les départements d'options et les laboratoires de recherche. C'est à la même époque que j'ai commencé à développer le parc informatique à disposition des étudiants dans le département GMC. A mon arrivée dans le département, les étudiants disposaient de 12 stations de travail sous UNIX couplées à un Apollo DN1000. En 2009, les étudiants disposent de plus de 250 ordinateurs pour leurs travaux dirigés, travaux pratiques, projets de fin d'études.

En dehors de l'INSA

De 1995 à 1998, j'ai été un **membre actif du groupe de travail sur la mesure de déformations** par caméra issu de la Commission Française de l'Emboutissage.

En 2004, j'ai aidé à la **création de la société privée** : MECANIUM gérée par Patrice Clerc (un de mes anciens doctorants). MECANIUM a repris une grande partie de mes activités "services industriels" à partir de cette date. Cette société en 2009 est en plein essor, elle comprend deux techniciens et un ingénieur en plus de son gérant. Son principe de fonctionnement est très original puisqu'elle travaille dans les locaux et avec les moyens expérimentaux du laboratoire. Les prestations industrielles originales sont développées en collaboration avec les chercheurs du laboratoire, les prestations courantes sont assurées par MECANIUM seule.

De 1998 à 2007 j'ai développé et maintenu un service de prestation Internet complet pour une société de matériels informatiques. Cette activité est devenue autonome depuis 2008 avec la création d'un service d'hébergement et de gestion de sites web sous la tutelle de gestion financière d'INSAVALOR.

PRESENTATION DE MES ACTIVITES DE VALORISATION INDUSTRIELLE

Depuis mon arrivée au laboratoire, en 1992, j'ai toujours eu un contact étroit avec le monde industriel. Ce lien se matérialise sous la forme de contrats d'accompagnement pour des projets de fin d'études ou des masters, sous la forme de prestations de services : calculs éléments finis, essais expérimentaux, et sous la forme d'expertises. Je ne cite dans la liste chronologique suivante que les contrats dont je suis le responsable direct. Depuis la création de la société MECANIUM en 2004, mes prestations industrielles liées à la caractérisation des matériaux ou des structures se sont fortement réduites grâce au transfert de compétences effectué auprès de Patrice Clerc.

[2009-2008]

- Etude du retour élastique en pliage. CETIM. Durée 6 mois
- Caractérisation des étoffes hybrides. PAYEN SA. Durée 6 mois

[2008-2007]

- Conception d'un mannequin bio fidèle pour la société DBApparel (DIM SA), création d'un mannequin numérique. Durée 2 ans.
- Expertise concernant un procès en contre façon pour la société PROLASER. Durée : 3 jours.

[2008-2003]

- Assistance et conseil auprès de la société PSA concernant le calcul de champs de déplacements par corrélation d'images. Durée 5 ans.

[2007-2006]

- Expertise pour la société LYON SERTI. Etude réalisée suite à une demande de la CCI DE LYON. Durée :3 jours.
- Expertise et mesures thermographiques pour la société CCM. Etude réalisée suite à une demande de la CCI DE LYON. Durée :3 jours.
- Expertise concernant un défaut de fabrication de lames de store pour la société VERALAM. Etude réalisée suite à une demande de la CCI DE LYON. Durée : 3 jours.

[2006-2005]

- Rétrofitage d'une machine de flexion alternée pour la société RENAULT. Durée : 3 mois.
- Conception CAO d'un module de test pour la société SOLIOS via la société MECANIUM. Durée : 1 mois

[2003-2002]

- Etude éléments finis d'un bras de suspension aluminium pour la société De Saint JEAN. Durée 5 jours.
- Réalisation du maillage de la tuyère en sortie des moteurs Vulcain I et II pour la fusée Ariane. Prestation pour la société EC2MS. Durée : 1 mois.

[2002-2001]

- Etude du comportement thermo mécanique d'une série de poêles pour induction pour la société TEFAL. Durée 3 mois. Embauche de Patrice Clerc.
- Essais de traction sur sangles pour la société ROCHE. Durée :5 jours.

[2001-2000]

- Mesure de déplacements de radiateurs électriques sous sollicitation thermique pour la société ACOVA. Durée 15 jours.
- Calcul d'une noix de serrage aluminium pour la société LUDEC. Durée 1 mois.

[2000-1999]

- Etude de la déformation d'une coiffe de fer à repasser pour CALOR. Durée 15 jours.
- Calcul d'un capteur bi-composant pour la société DELTALAB. Durée : 1 semaine.

[1999-1998]

- Réalisation d'un capteur d'effort sur soutien gorge, de sa chaîne d'acquisition pour la société FLEXYFORM. Projet financé par la Région Rhône Alpes. Durée 6 mois.
- Etude de vis et crochets implantables sur la colonne vertébrale pour la société SRA. (Projet de fin d'études)
- Contrats commerciaux pour la diffusion du logiciel *ICASOFT* et d'une machine d'emboutissage pour la détermination des courbes limites de formage avec la société TECHLAB.
- Etude et réalisation d'un montage de confinement pour l'IFP (Institut Français du Pétrole). Durée : 1 an.

[1998-1997]

- Etude et réalisation d'une machine de flexion alternée pour RENAULT. Durée 2 ans.
- Contrat Européen en partenariat avec RENAULT sur les nouveaux matériaux en emboutissage (FOMM). Durée 3 ans.
- Contrat avec l'AEROSPATIALE pour la réalisation de courbes limites de formage et la détermination des variations de coefficients de Lankford.
- Calcul d'un treillis de convoyeur de carrière pour la société NORDBERG. Durée : 1 semaine.
- Comparaison de 2 solutions technologiques pour la fabrication d'échelle de piscine pour la société MV Industrie.
- Calcul d'une porte de four par méthode des éléments finis pour la société AMDES. Durée : 1 mois.
- Calcul d'une pièce de seringue par méthode des éléments finis pour la société SEDAT. Durée : 1 mois.
- Détermination de courbes limites de formage pour RENAULT. Durée : 3 mois.
- Détermination de courbes limites de formage pour l'AEROSPATIALE. Durée : 1 mois.

[1997-1996]

- Fourniture d'*ICASOFT* (logiciel de corrélation) et étude d'une faisabilité de mesure de déformation par stéréovision pour le CEA. Durée : 1 an.
- Fourniture d'un ensemble pour la détermination de courbes limites de formage à la société RENAULT.
- Mise au point et réalisation d'essais de fatigue sur pinces porte râpe pour la société HOWMEDICA Benoist Girard. Durée : 6 mois.
- Détermination d'une courbe limite de formage pour un acier XES pour RENAULT. Durée : 10 jours. Embauche d'un technicien et supervision des travaux.
- Essais de ligatures de grillage pour la société ELITE. Durée : 1 semaine.
- Essais de traction pour la société ADEL. Durée : 1 semaine.
- Essais de traction et compression en tout genre pour la société PLASTHOM. Durée : 2 semaines.

[1996-1995]

- Mise au point et réalisation d'essais de traction / compression sur biellettes afin d'en apprécier le dévissage par caméra numérique pour la société Gec Alsthom. Durée : 1 mois.
- Calculs à l'aide d'ABAQUS sur un bras de suspension en aluminium forgé pour la société Saint Jean Industrie. Durée : 1 semaine.
- Essais de traction et compression en tout genre pour la société PLASTHOM.
- Essais de traction sur joints élastomères pour la société COUVRANEUF.

[1995-1994]

- Etude pour la société HOWMEDICA Benoist Girard de la faisabilité d'emboutis pour râpes chirurgicales. Durée : 1 mois.
- Supervision de calculs éléments finis sur une membrane de compteur à eau pour la société SCHLUMBERGER. Durée : 1 mois.
- Essais de traction sur éprouvettes d'Aluminium pour RENAULT. Durée : 1 semaine.
- Calcul à l'aide d'ABAQUS de deux capteurs bi composantes pour la société TME. Durée : 1 semaine.
- Réalisation d'une maquette informatique pour la société DELTALAB : Graphe de liaisons cinématiques. Durée : 1 mois.
- Essais de traction et compression en tout genre pour la société Plasthom. Durée : 5 jours.
- Expérimentation sur U rachidien pour la société FIXANO. Durée : 5 jours.
- Essais de flexion et de traction sur broches implantables pour la société SRA. Durée : 5 jours.
- Essais de traction sur joints élastomères pour la société COUVRANEUF. Durée : 3 jours.
- Essais de traction sur maquette Flector pour la société SFIM Industrie. Durée : 3 jours.

[1994-1993]

- Contrat EDF / INSAVALOR - Laboratoire Béton et Structure : Mise au point d'une expérimentation mettant en œuvre des techniques d'imagerie avec caméra CCD pour la mesure de déformations sur éprouvettes en flexion alternée. Durée : 1 an.
- Contrat RENAULT / INSAVALOR - Laboratoire Mécanique des Solides : Maintenance et suivi industriel du logiciel PLIAGE sous l'environnement C.A.O. EUCLID IS. Durée : 3 ans.

[1993-1992]

- Réalisation d'un logiciel ASTARID pour la société HOWMEDICA Benoist Girard concernant la mise en forme de prothèses. Durée : 1 mois.
- Formation d'une personne en D.E.A. G.B.M. aux techniques de programmation et d'acquisition de données en vue de la réalisation d'essais biomécaniques pour le GROUPE LEPINE. Durée : 2 ans.
- Supervision d'essais mécaniques sur os de mouton pour le groupe R.W. Johnson Pharmaceutical Research Institute avec le soutien de l'A.R.P.T.A.L. Durée : 3 mois.
- Réalisation d'une maquette informatique pour la société DELTALAB dans le cadre d'un projet EUREKA soutenu par l'ANVAR dans le domaine du Multimédia. Durée : 1 an.

PRESENTATION DE MES TRAVAUX DE RECHERCHE

Introduction

J'effectue mes travaux de recherche en tant que Maître de Conférences au **Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS UMR 5259)**, à l'intérieur de l'équipe **Mécanique de Solides et Endommagement (MSE)**, au sein du groupe **Maîtrise de l'Elaboration des Pièces Mécaniques (MEPM)** défini comme suit : « De nombreux logiciels spécifiques sont développés. Ils sont utilisés pour la simulation mais aussi pour l'optimisation des processus de fabrication : forgeage, emboutissage, usinage et hydroformage. La prédiction des défauts à l'aide de la mécanique des endommagements en présence de grandes déformations est le thème scientifique majeur du groupe. L'analyse expérimentale et la caractérisation multiaxiale des matériaux font appel aux techniques d'analyse d'images par corrélation, particulièrement développées dans ce groupe. »

Trois grands thèmes de recherche se dégagent de mes activités :

- Plasticité, détermination de loi d'écrouissage, simulation numérique de l'emboutissage
- Imagerie appliquée à la mécanique, mesure de champs de déplacements
- Etudes des tissus

Mon premier axe de recherche développé en collaboration avec le Professeur Michel Brunet concerne le domaine de la plasticité : la **détermination de courbes limite de formage** (CLF) tant d'un point de vue expérimental que numérique. Un des buts essentiels à atteindre pour augmenter la banalisation de l'emploi de ces courbes était la réduction de leur temps d'obtention. Ces courbes sont de plus en plus utilisées dans le monde industriel du fait de l'accroissement de l'emploi de codes de calcul éléments finis pour la simulation de l'emboutissage. Cette réduction est passée par le développement d'une technique de **mesure des déformations par caméra numérique**, entièrement automatique, faisant appel aux techniques de corrélation directe. Ces travaux ont donné naissance à mon deuxième axe de recherche qui est devenu par la suite mon axe de recherche principal. Celui-ci est lié à la réalisation d'un **logiciel nommé *ICASOFT*** distribué par une société privée : MECANIUM. Ce logiciel est utilisé dans de nombreux laboratoires industriels et universitaires. Depuis l'année 2000, plus de 100 licences ont été distribuées dans le monde. Le suivi du logiciel de corrélation *ICASOFT* me permet de travailler en collaboration active avec de nombreux laboratoires à l'intérieur et à l'extérieur de l'INSA de Lyon. Les évolutions de ce logiciel sont réalisées à la demande pour les utilisateurs tels que RENAULT, L'OREAL ou encore PSA. Enfin mon troisième axe de recherche débute actuellement en collaboration avec le Professeur Philippe Boisse et concerne la **mise en forme de renforts tissés avant injection**.

Un quatrième thème laissé progressivement depuis 2002 entre les mains de mon collègue Michel Coret, concernait la **biomécanique**. Grâce à mes connaissances en pilotage et contrôle des machines d'essais du laboratoire de Mécanique des Solides j'ai participé activement aux travaux de l'équipe biomécanique du laboratoire en collaboration avec le professeur Claude Rumelhart. Des campagnes d'essais mécaniques sur os de brebis pour de grands groupes pharmaceutiques ont été réalisées dans le cadre de recherches sur l'ostéoporose. La technique de corrélation d'images numériques citée précédemment a également été utilisée dans le domaine de la biomécanique pour la mesure de déformation et la mise en évidence de certains modes de rupture de l'os spongieux humain.

Présentation chronologique

Mes différentes activités de recherche sont résumées ci-après de manière chronologique.

[2009-2006]

- Participation au projet "Tôles en alliage d'aluminium à haute formabilité pour l'allègement automobile" dans le pôle de compétitivité ViaMéca

[2009-2008]

- Conception d'un logiciel pour le CETIM permettant la prédiction du retour élastique des tôles après pliage en V.

- Mise au point de nouveaux essais de caractérisation de tissus bi élastiques dits étoffes hybrides pour la société PAYEN en partenariat avec SALOMON.

[2008-2007]

- Conception et mise au point d'un mannequin bio fidèle numérique sous Abaqus de buste de femme. DBApparel.
- Développement de la version 4.65 d'*ICASOFT* .
- Collaboration avec le laboratoire CREATIS pour l'adaptation de la corrélation aux images ultrasonores utilisées dans le milieu médical.

[2008-2006]

- Participation au projet ANR "Dynrupt" coordonné par Anthony Gravouil (MCF LaMCoS).
- Mise au point d'une nouvelle technique de mesure de topographie par stéréo corrélation sur tableaux peints sur bois par effacement préalable en collaboration avec Hubert Maigre (CR CNRS LaMCoS).
- Elaboration d'une nouvelle technique de mesure par corrélation sur tissus carbones éclairés sous lumière ultra violette.

[2007-2006]

- Conception et mise au point d'un mannequin bio fidèle de buste de femme. DBApparel.
- Conception et mise au point d'une technique permettant la détermination des efforts sur un soutien gorge au porté. DBApparel.
- Application de la stéréo corrélation d'images numériques au curling des bétons. Développement d'une technique de mesure originale permettant la détermination de topographie du béton encore liquide. Collaboration avec le LGCIE, équipe Jean Pera, Christian Ambroise.
- Adaptation de la corrélation d'images pour l'analyse de Bias test sur renforts tissés.

[2006-2005]

- Etude de marché et achat d'un logiciel de stéréo corrélation. Produit retenu VIC3D.
- Mise en place d'un site web pour la distribution et l'aide en ligne d'*ICASOFT* : http://icasoft.insa-lyon.fr

[2004-2002]

- Développement d'un outil pour la mesure optique des champs de déformation et le pilotage automatique d'essais de caractérisation. Bonus Qualité Transfert ANVAR.

[2005-2004]

- Développement de la version 4.54 d'*ICASOFT* permettant le calcul incrémental sur une séquence d'images.
- Mise en place d'un module de calcul des facteurs d'intensité des contraintes dans *ICASOFT*

[2004-2003]

- Développement de la version 4.50 d'*ICASOFT*.
- Détermination de champs de déplacement 3D sur images tomographiques.

[2004-2003]

- Détermination de courbes limites de formage. RENAULT.
- Caractérisation de l'écrouissage de tôles par l'intermédiaire d'essais de flexion alternée. RENAULT.

[2003-2002]

- Développement de la version 4.4 d'*ICASOFT*. Refonte totale de l'interface pour la mise en données.

[2002-2001]

- Mise au point d'un extensomètre double utilisant la corrélation d'images.
- Mise au point et installation d'une machine d'emboutissage à l'Université de METZ pour la réalisation de CLF.
- Etude du comportement mécanique expérimentalement et numériquement d'une boîte crânienne. INRETS.

[2001-2000]

- Mesure de déformations par stéréovision sur coques pour le CEA.

- Mesure de déformations par stéréovision sur crâne humain en cours de sollicitation pour l'INRETS.

[2000-1999]

- Conception et réalisation d'une nouvelle machine de flexion alternée pour la caractérisation des tôles de forte épaisseurs pour RENAULT : livraison Juillet 2002.

[1998-1997]

- Mise au point d'une machine de pliage/dépliage pour l'étude de lois d'écrouissage mixte.
- Adaptation du logiciel *ICASOFT* pour sa vente et sa distribution par une société privée.
- Transfert de technologie d'un ensemble matériel, logiciel et assistance pour la réalisation de courbes limites de formage à une société privée.
- Evolution de la version 3.1 d'*ICASOFT* : distribution du logiciel dans les Grandes Ecoles suivantes : ESIA Annecy, EPFL Lauzanne, ENSAM Paris, ENS Cachan. *ICASOFT* a également été exporté en Roumanie.
- Etudes par corrélation des déformations résiduelles d'une zone de métal en transition de phase soumise à un chargement thermique. Etude en partenariat avec l'URGC Structures.

[1997-1996]

- Finalisation d'un ensemble matériel, logiciel et assistance pour la réalisation de courbes limites de formage en vue de sa diffusion.
- Finalisation de la version 3.0 d'*ICASOFT* : distribution du logiciel dans les entreprises suivantes : CEA, EDF, Renault.

[1996-1995]

- Finalisation de la version 2.0 d'*ICASOFT*. Utilisation de la corrélation d'images numériques pour différents axes de recherche : plasticité : détermination des courbes limites de formage, biomécanique : étude de la fracture osseuse, géotechnique : mesure du champ de déplacement sur une maquette représentant un terrain meuble autour d'un tunnelier.

[1995-1994]

- Recherche bibliographique sur des algorithmes subpixels pour la détermination avec précision des déformations planes d'un corps quelconque.
- Développement d'un logiciel de corrélation *ICASOFT* 1.0 pour la mesure de déformation par caméra numérique haute résolution.
- Participation à l'action thématique "Vieillissement" de la Région Rhône-Alpes. Collaboration avec le Groupe Lépine sur la caractérisation de l'os chez le sujet âgé et la détermination de lois de comportement.

[1994-1993]

- Étude du comportement des tôles d'acier après pliage - dépliage, mise au point d'une méthode de calcul du retour élastique des tôles après emboutissage.

[1993-1992]

- Réalisation, mise au point et industrialisation d'un logiciel pour le calcul du retour élastique des tôles: *PLIAGE*.
- Étude théorique et expérimentale du comportement du module de Young des aciers après déformation plastique.
- Conception et mise au point d'une expérimentation sur l'emboutissage en collaboration avec RENAULT, VOLVO et SOLLAC.

[1992-1991]

- Développement et réalisation d'essais de traction, compression, flexion spécifiques sur aciers spéciaux à ressort, fils de tungstène, carbure de tungstène, élastomères, composites.
- Développement et réalisation d'essais de compression sur fémurs humains pour l'étude de prothèses de la hanche.

DEA et Thèse

Contexte

En 1990 l'industrie automobile commençait à devenir une grande consommatrice de mise en forme des tôles à haute limite d'élasticité par emboutissage pour les pièces d'aspect du véhicule comme la carrosserie et aussi pour celles de structure telles que les berceaux moteurs et les longerons. L'automatisation des chaînes d'emboutissage, l'amélioration très sensible de la qualité des tôles en ce qui concerne la dispersion de leur épaisseur et la constance de leurs constantes mécaniques (limite d'élasticité par exemple) ont permis de réduire considérablement les coûts de production. Dans un souci de qualité totale, les professionnels de l'emboutissage tentèrent de rationaliser un problème jusqu'alors tributaire du savoir faire des ouvriers qualifiés qui est malheureusement difficilement transmissible : la mise au point des outils de presse.

Parmi les difficultés prépondérantes de la mise au point se trouve la prévision du retour élastique de la pièce en fin d'emboutissage, hors outillage. Ce problème est toujours d'actualité en 2009, comme le prouvent les demandes récentes du CETIM concernant la détermination du retour élastique de tôle à haute limite d'élasticité pliées en V.

A l'époque, les codes de calcul à base de formulation éléments finis étaient très gourmands en temps de calcul sur des ordinateurs qui, malgré des coûts exorbitants, n'étaient pas encore assez rapides pour effectuer des simulations réalistes. RENAULT a donc souhaité consacrer un thème de recherche dédié à l'élaboration de logiciels analytiques 2D pour la prévision du retour élastique qui présenteraient des temps de calcul extrêmement courts. C'est dans l'optique de réaliser un de ces logiciels appelé "applications métier" que RENAULT a encouragé le développement de *PLIAGE*, une application qui permet d'effectuer des calculs de retour élastique de pièces ouvertes en deux dimensions.

C'est dans ce contexte que j'ai débuté mon diplôme d'études approfondies et ma thèse sous la direction du professeur Maurice Boivin.

Présentation de mes sujets de DEA et de Thèse

Le sujet de mon DEA concernait la programmation en fortran d'un préprocesseur nommé *FAB2FAB* [OU01 1990] permettant de faciliter la mise en données du logiciel analytique *PLIAGE* programmé en fortran et développé dans ses premières versions par Jean Claude Boyer et Maurice Boivin [BO1982]. Ce programme permettait la détermination des zones de mêmes histoires de déformation obtenues lors d'un emboutissage sous serre flan en 2D avec retenue. L'emboutissage du profil était simulé géométriquement par incrémentations successives de la course du poinçon. A chaque incrément, le trajet de la tôle entre matrice et poinçon était déterminé dans le but de cumuler les histoires de déformation. Ce sont ces histoires de déformation cumulées jusqu'à la course finale du poinçon qui servaient ensuite à alimenter le module de calcul mécanique de *PLIAGE.*

Le sujet de ma thèse « Contribution à l'étude du retour élastique des produits plats lors de la mise en forme » [OU01 1993] a été financée par RENAULT et a fait suite à mon DEA. Un des chapitres est consacré essentiellement au développement de la théorie mécanique du pliage sous traction. Un modèle d'écrouissage de type PRAGER et ses limitations sont exposés. Ce modèle a été utilisé dans les premières versions de *PLIAGE* et a servi de base à l'intégration du modèle d'écrouissage cinématique de type LEMAITRE et CHABOCHE [LE1985]. Après avoir montré comment sont déterminées les variables liées au retour élastique, les principes de la variation du module de Young ainsi que les résultats expérimentaux liés à cette étude sont décrits.

Il est à noter que l'étude de la variation du module de Young en fonction de la déformation plastique a été un travail original complétant des travaux plus anciens sur le sujet [LE1963]. La mise en place de la chaîne d'acquisition des modules de Young de manière automatique pendant plusieurs jours, le dépouillement automatisé des résultats ont été rendu possible par le développement de logiciels spécifiques couplés à la machine de traction SCHENCK RSA250. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans le numéro 162 du journal Nuclear Engineering and Design, [AP02 1996].

J'ai choisi de sélectionner cette publication pour accompagner ce mémoire car elle très originale et présente des phénomènes peu connus comme la restauration progressive du module de Young de certains matériaux métalliques après déformation plastique, ce qui exclut les phénomènes d'endommagement. Cette publication fait partie de mes publications qui sont les plus citées.

Le troisième chapitre de ma thèse décrit comment la théorie mécanique a été mise en œuvre informatiquement. La sous-routine purement mécanique est exposée en détail ainsi que les modifications nécessaires apportées à la théorie pour résoudre numériquement le problème. Dans ce même chapitre sont également décrits les autres emplois possibles du module mécanique ainsi que le principe d'optimisation du calcul. Il est à noter que *PLIAGE* a été inclus dans le logiciel industriel de C.A.O. EUCLID. C'est cet environnement et les principes généraux du prétraitement et du préprocesseur qui sont décrits dans le chapitre quatre consacré à la mise en situation industrielle du logiciel.

Les chapitres suivants mettent en parallèle les résultats numériques et les résultats expérimentaux obtenus avec un outil d'emboutissage spécifiquement développé au cours de ma thèse. Cet outil est toujours utilisé en 2009 [CA2009]. Le dernier chapitre est un récapitulatif de plusieurs cas industriels où *PLIAGE* a été employé pour résoudre des problèmes spécifiques. Il se termine par la présentation des résultats obtenus au congrès international NUMISHEET 93 à Tokyo [CF02 1993] qui ont montré la supériorité des codes de calcul semi analytiques en termes de conformité des résultats par rapport aux expériences et en termes de rapidité d'exécution.

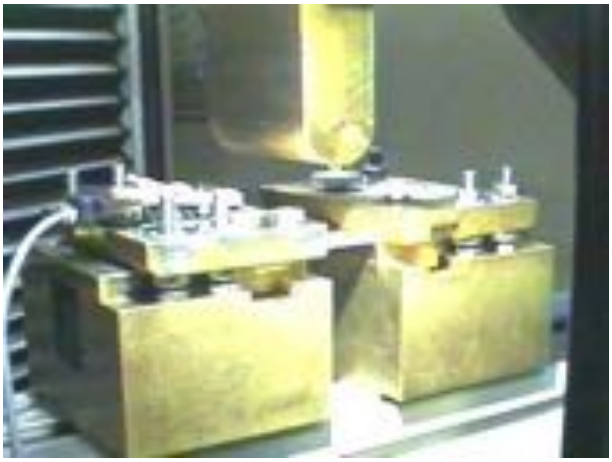


Photo 2 : Outil d'emboutissage instrumenté conçu et utilisé pendant ma thèse

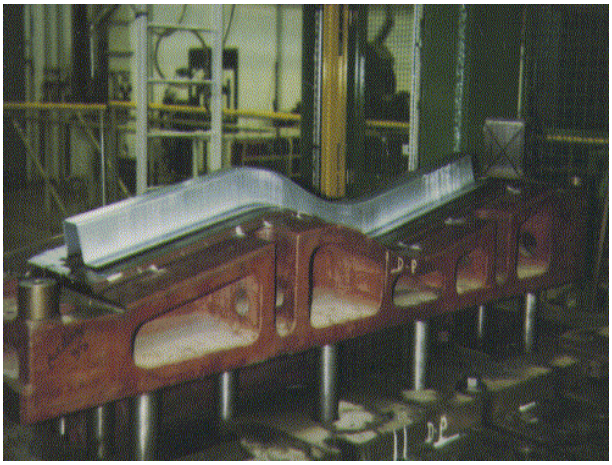


Photo 3 : Outil industriel pour l'emboutissage d'un longeron avant de Safrane

Apports scientifiques et personnels

Ces quatre années de DEA et de thèse m'ont permis d'enrichir mes connaissances en programmation et en pilotage de machine d'essais. J'ai mis au point des techniques d'imagerie avec le premier numériseur de l'INSA de Lyon permettant de déterminer automatiquement les rayons de courbure des tôles après emboutissage. Le logiciel *PLIAGE* comporte plus de trois milles lignes de code en fortran et son implémentation au sein d'un logiciel de CAO industriel comme EUCLID a demandé de longues journées de mise au point en relation avec les programmeurs de RENAULT. L'introduction d'un modèle d'écrouissage cinématique et la prise en compte de la variation du module de Young en fonction de la déformation plastique étaient des éléments précurseurs dans le domaine.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de trois articles publiés dans des revues [AP01 1996], [AP02 1996] et [AP03 1997] ainsi que des publications dans les actes de cinq conférences internationales [CF03 1997], [CF02 1995], [CF01 1993], [CF02 1993], [CF03 1993] et quatre conférences nationales : [CF04 1993], [CF05 1993], [CF01 1992] et [CF01 1991].

Activités associées à la biomécanique

Les débuts

Lorsque je suis arrivé au laboratoire de mécanique des solides dirigé par le professeur Maurice Boivin en 1990, je me suis rapidement intégré dans l'équipe biomécanique animée par le professeur Claude Rumelhart, responsable du DEA de biomécanique. J'ai rapidement côtoyé le milieu chirurgical orthopédique grâce au passage de nombreux chirurgiens en DEA et en thèse qui travaillaient au laboratoire.

En 1992, j'ai supervisé des essais mécaniques sur os de mouton pour le groupe R.W. Johnson Pharmaceutical Research Institute et j'ai réalisé des tests de compression sur fémurs humains pour l'étude de prothèses de la hanche. J'ai réalisé un logiciel programmé en Visual Basic nommé ASTARID pour la société HOWMEDICA Benoist Girard concernant la mise en forme de prothèses.

La caractérisation mécanique de tissus biologiques

Dans le début des années 1990, nous n'en étions pas encore au stade du développement des modèles de comportement des matériaux biologiques tels que les os, la peau, les tendons. Trouver les valeurs d'un module de Young, pour une première approche linéaire, et même trouver une valeur limite de résistance en contrainte dans la littérature n'étaient pas si courant. La demande du professeur Claude Rumelhart se positionnait clairement dans la mise au point d'essais mécaniques pour la détermination de ces différents paramètres, première étape essentielle avant le développement de modèles de comportement mécanique. L'utilisation des nouveaux moyens informatiques introduits au cours de ma thèse a été un tremplin important pour le déroulement des deux thèses présentées ci-après.

En ce qui me concerne, j'ai débuté mes travaux sur la caractérisation mécanique de tissus biologiques avec David Miton que j'ai assisté tout au long de sa thèse [MI1997]. Son travail portait sur la caractérisation mécanique et structurale de l'os spongieux, d'un modèle animal (brebis âgée) et de l'homme, dans le but d'en déterminer les paramètres à l'origine de la variabilité de la résistance mécanique et d'estimer cette résistance de façon non-invasive. Des essais biomécaniques ont été appliqués à l'os humain : compression, cisaillement et sollicitations simulant la marche. La mise au point des montages de micro flexion, le choix et l'achat de nouveaux capteurs d'effort adaptés ainsi que l'écriture de nouveaux programmes d'acquisition et de dépouillement ont fait partie de mon travail d'accompagnement. J'ai participé également activement à des tests pharmaceutiques pour la comparaison de traitement contre l'ostéoporose.

Ces études ont donné lieu à la rédaction d'une publication concernant la résistance comparée en compression d'allogreffes osseuses lyophilisées puis radiostérélisées et d'allogreffes osseuses fraîches [CF01 1994].

Ces travaux de caractérisation se sont prolongés jusque dans les années 2000 avec mon assistance à Karine Bruyère au cours de sa thèse [BR2000]. L'objectif de son travail était l'étude des propriétés mécaniques de l'os spongieux humain et l'évaluation de ses paramètres explicatifs : densité, architecture et propriétés du tissu trabéculaire. La caractérisation mécanique a été réalisée sur des échantillons d'os spongieux humain de tête fémorale et calcanéum, classiquement en compression et de façon originale en cisaillement et torsion. J'ai aidé à la mise au point de ces essais essentiellement par l'écriture de nouveaux programmes de pilotage de la machine de traction compression du laboratoire ainsi que par l'assistance à la conception des nouveaux montages. Les analyses architecturales 2D et 3D ont été réalisées à partir de coupes histologiques et d'images 3D obtenues par tomographie et imagerie par résonance magnétique à haute résolution. Mes connaissances récemment acquises (à l'époque) en traitement d'images m'ont permis d'aider Karine Bruyère pour la numérisation de ces coupes histologiques ainsi que pour la réalisation de dépouillements automatisés assurant la mesure des paramètres architecturaux, en particulier la dimension fractale et la connectivité. Nous avons également réalisé des passerelles logiciels qui permettaient de passer des coupes histologiques et des images tomographiques à des maillages éléments finis afin d'automatiser les mises en données sous Abaqus. Ceci a permis de déterminer les propriétés mécaniques des trabécules par méthode inverse en

comparant les résultats obtenus par simulation avec les essais macroscopiques des structures osseuses.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de deux publications. L'une concernant l'analyse structurale 2D de l'os spongieux de calcanéums humains [CF05 1998] et l'autre la prédiction de la résistance osseuse par l'utilisation d'un modèle éléments finis comparé aux résultats de tests expérimentaux [AP02 1999].

La modélisation par éléments finis de la face humaine

Après l'entrée de Karine Bruyère à l'INRETS en 2001 comme chargée de recherche, nous avons continué notre collaboration en encadrant conjointement la thèse de Barbara Autuori [AU2004]. L'objectif de cette thèse a été de développer un modèle en éléments finis de la structure osseuse de la face et du crâne pour la simulation de sa réponse au choc. Une première partie du travail a consisté à construire le maillage d'une structure osseuse cranio-faciale à partir de coupes scanner de tête. Le choix d'un maillage en éléments de type plaque, de densité suffisante pour représenter fidèlement la géométrie complexe de cette structure osseuse et d'épaisseur variable, a été fait. L'hypothèse d'un matériau osseux homogène et isotrope a été choisie pour l'ensemble de la structure cranio-faciale.

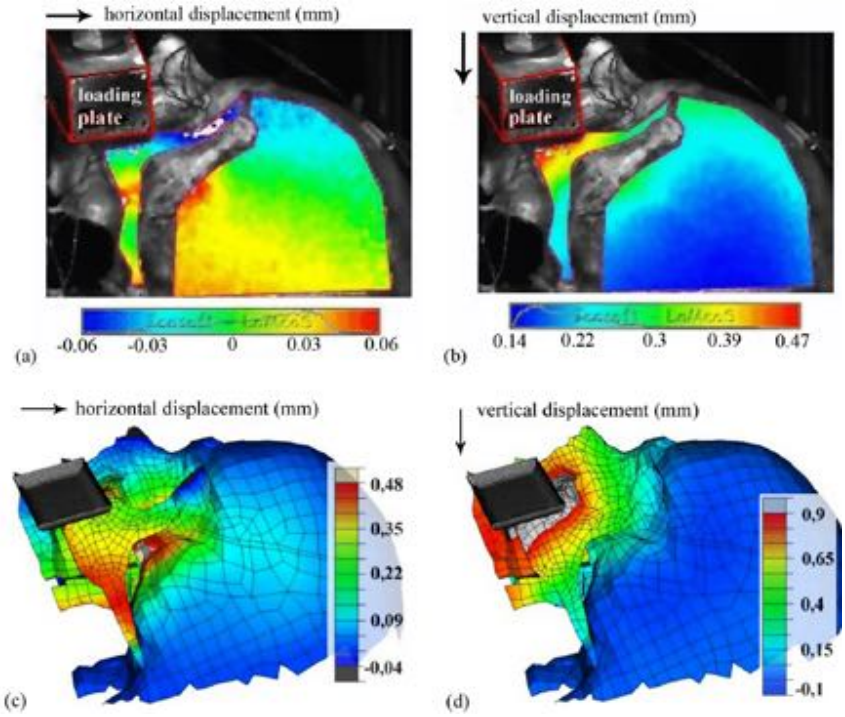


Figure 4 : Déplacements de la partie latérale d crâne 2D mesurés et calculés (a) distribution horizontale expérimentale (b) distribution verticale expérimentale (c) distribution horizontale calculée (d) distribution verticale calculée – extrait de [AP01 2006]

Des essais de flexion statique sur des échantillons d'os crânien, associés à leur simulation numérique et à une méthode d'identification, ont permis de définir les propriétés élasto-plastiques de ce matériau. Les résultats se situent correctement par rapport aux intervalles de valeurs de la littérature. La réponse du modèle cranio-facial a été validée sous sollicitations statiques. Pour cela des essais spécifiques de compression de la face ont été réalisés sur pièce anatomique. Les courbes globales effort/déplacement expérimentale et numérique ont été comparées pour « calibrer » les propriétés du matériau. La réponse du modèle a ensuite été validée par comparaison du champ de déplacement mesuré expérimentalement par une méthode de corrélation d'images et obtenu par simulation. Le modèle ainsi validé en statique a été évalué sous sollicitations dynamiques. Sa réponse au choc a été comparée aux résultats d'un impact sur la face réalisé spécifiquement. La réponse au choc globale du modèle était similaire à celle enregistrée expérimentalement. Ce modèle a aidé à définir des critères de blessures de la tête en cas de choc sur la face dans l'optique global d'amélioration de la sécurité des occupants d'un véhicule.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de deux articles publiés dans des revues [AP01 2002] et [AP01 2006] ainsi que des publications dans les actes de deux conférences internationales [CF08 2002], [CF02 2004] et une conférence nationale [CF03 2003].

J'ai choisi de sélectionner cette dernière publication [CF03 2003] pour illustrer le thème biomécanique de ce mémoire. Elle synthétise parfaitement les travaux de Barbara Autuori et présente également les premières utilisations en biomécanique de la méthode de corrélation d'images numériques présentée dans le thème mesure de déformations.

Participation associée à d'autres travaux dans le domaine de la biomécanique

En 2006 j'ai entamé une collaboration dans le cadre de la thèse d'Adrian Basarab avec Philippe Delachartre du laboratoire CREATIS de l'INSA de Lyon pour transposer la corrélation d'images numériques en lumière blanche aux images issues de sondes ultrasonores utilisées pour la réalisation d'échographie de tissus mous. Le but est la mesure de déformations sous sollicitation dynamique de la sonde par le praticien afin de distinguer les zones présentant une raideur localement anormalement élevée qui est le signe de la présence d'une tumeur cancéreuse.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de deux articles publiés dans des revues [AP02 2006] et [AP01 2008].

J'ai développé une version incrémentale d'*ICASOFT* permettant de mesurer de grandes déformations avec une variation importante de luminance et de chrominance du support moucheté. Cette version a été développée pour accompagner les travaux de thèse de Clémentine Jacquemoud [JA2007] en collaboration avec Michel Coret [J22007]. L'objectif de cette thèse était de déterminer les propriétés mécaniques des tissus biologiques mous fibreux sous chargement dynamique jusqu'à la rupture, puis d'intégrer leurs lois de comportement et leurs modèles d'endommagement dans des codes éléments finis. La démarche a consisté à faire des essais sur un montage de traction vertical adapté à un puits de chute dont la vitesse pouvait atteindre plusieurs mètres par seconde. Les mesures de champs de déformation ont été déterminées par *ICASOFT*, le logiciel de corrélation d'images numériques que je développe depuis 1996. Ces expérimentations ont été menées sur de la peau humaine fraîche, ce qui a occasionné de nombreuse difficultés pour la recherche d'un mouchetis pouvant tenir sur un support graisseux sollicité avec des vitesses importantes.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction d'une publication dans les actes d'une conférence internationale : [CF03 2004].

Conclusion de mes activités associées à la biomécanique

Mes activités en biomécanique se sont amoindries après le départ en retraite du professeur Claude Rumelhart pour être remplacées progressivement par ma thématique sur les tissus avec le professeur Philippe Boisse. Une autre raison importante de l'arrêt des essais biomécaniques au laboratoire fût le renforcement des normes sanitaires qui nous interdisaient, sans travaux lourds dans nos locaux, la pratique d'essais sur cadavres. Un tel lieu entièrement aux normes a vu le jour dans les locaux de l'INRETS et c'est vers cet organisme que nous nous tournons maintenant pour continuer l'activité expérimentale en biomécanique au LaMCoS. De manière plus anecdotique j'ai travaillé durant trois ans pour la société DBApparel (DIM SA) à la conception de mannequins réels et virtuels mécaniquement bio fidèles pour pouvoir tester le maintien des soutiens gorge. Malheureusement, cette étude a pris fin, faute de budget, en 2009 au moment où nous allions entamer un master avec cette société.

En conclusion, j'ai pu mettre au service de cette thématique mes compétences en imagerie par l'intermédiaire de programmation de librairies dynamiques écrites en C++, en écriture de programmes de pilotage, de dépouillement et en simulations à l'aide de codes éléments finis. La corrélation d'images a été également très présente dans cette thématique mais je développerai ce sujet de façon plus approfondie dans la partie « Activités associées à la mesure de déformations » de ce mémoire.

Activités associées à la caractérisation de la plasticité des tôles

Cette thématique de recherche se divise en deux catégories distinctes. La première fait suite à des travaux menés au laboratoire, bien avant mon arrivée, sur la détermination des courbes limites de formage [BO1974]. La seconde est liée essentiellement à la mise au point d'un essai de caractérisation, simple de réalisation, permettant de déterminer les caractéristiques d'un écrouissage cinématique et/ou isotrope de tôles utilisées en emboutissage. Je travaille sur cette thématique dans une équipe composée du professeur Michel Brunet, de Francis Sabourin et d'Hélène Walter-le-Berre.

Courbes limites de formage : détermination et modélisation

A mon arrivée au laboratoire en tant que maître de conférences en 1995, c'est le professeur Maurice Boivin qui m'a demandé de reprendre les travaux du professeur Robert Arrieux qui a travaillé au début des années 90 sur la mise au point d'un essai de type Nakazima (poinçon à fond sphérique) ainsi que sur la détermination des courbes limites de formage en contrainte [AR1990]. La détermination en contrainte s'est révélée intéressante car les courbes limites de formage dépendent fortement du trajet de déformation. Malheureusement, en pratique, il est très délicat d'obtenir ces courbes en contrainte car elles impliquent d'intégrer une loi de comportement, c'est pourquoi, toutes les CLF (courbes limites de formage) présentées ci après seront en déformation et non en contrainte. Afin d'apprécier le travail réalisé, il est important de noter qu'il fallait, à cette époque, environ trois mois de travail pour une personne afin réaliser ce type de courbes. Les emboutis était faits sur une presse semi industrielle conçue par Robert Arrieux au cours de sa thèse de docteur ingénieur [AR1981], des grilles étaient déposées à l'aide d'une résine photosensible insolée puis révélée, les mesures de déformation se faisaient au microscope de manière manuelle.

Qu'est qu'une CLF ?

Depuis les travaux de Keeler [KE1965] puis de Goodwin [GO1968], les CLF sont proposées pour caractériser l'aptitude des tôles minces à l'emboutissage. Ces courbes donnent la déformation maximale qu'un métal, soumis à diverses sollicitations, peut subir. C'est soit l'existence d'une rupture soit celle d'une striction localisée qui fait considérer une pièce emboutie comme bonne ou mauvaise. Ainsi, c'est soit la déformation à rupture soit celle à l'apparition de la striction localisée qui est prise comme valeur maximale admissible par le métal. Ces courbes sont tracées expérimentalement dans le repère des directions principales des déformations $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, ε_1 étant par convention la plus grande de ces deux déformations. Il suffi de faire varier la largeur des flans emboutis pour balayer le domaine $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ de la traction simple à l'expansion équibiaxée. La connaissance des CLF permet entre autres de donner des critères d'arrêt pour des calculs éléments finis.

Photo 4 : Ensemble de flans nécessaires pour l'obtention d'une CLF

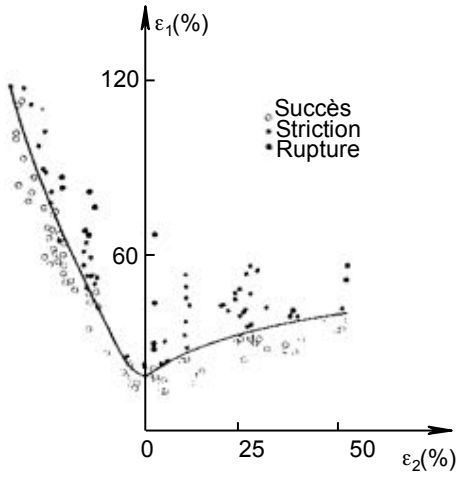


Figure 5 : CLF obtenue par la méthode de Hecker [HE1975]

Les buts à atteindre

L'objectif principal que m'a fixé le professeur Maurice Boivin était relativement simple : Pouvoir déterminer une CLF en moins d'un mois, de manière semi automatique en ce qui concernait la mesure de déformation et avec une meilleure précision que le dépouillement manuel.

Ma démarche

Le premier travail a consisté à changer de type d'essai et à emboutir les flans avec un poinçon à fond plat comme le décrit Marciniak [MA1967]. Ceci a permis l'utilisation d'une caméra numérique haute définition placée sous le flan, se déplaçant en même temps que le poinçon. La deuxième modification a été de remplacer les réseaux de cercles entrelacés par des réseaux de disques pleins disposés en base hexagonale, ce qui a autorisé le dépouillement de manière automatique en utilisant un logiciel de traitement d'images programmable : Visilog.

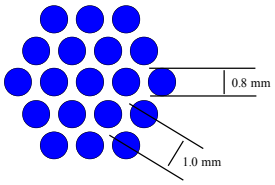


Figure 6 : Portion du réseau de disques disposés en base hexagonale

Ces travaux ont donné lieu à une présentation au cours du colloque Photomécanique 95 [CF01 1995].
La mise en place des motifs par résine photosensible, ainsi que l'emboutissage proprement dit restaient longs à réaliser. De plus, la précision sur la mesure des déformations obtenues par cette méthode était un peu moins bonne que celle réalisée manuellement au microscope. C'est dans ce contexte que nous avons démarré l'encadrement, avec le professeur Michel Brunet, de la thèse de Siham Mguil-Touchal [MG1997] dont le sujet principal était d'apporter une contribution à la fois à l'amélioration de la détermination expérimentale des CLF ainsi qu'à leur obtention théorique. Cette thèse est composée de deux parties :

- Détermination expérimentale des courbes limites de formage à striction en utilisant une technique de corrélation directe d'images numériques (généralités sur les techniques de mesure de déformations, mesure par corrélation d'images numériques de champ de déplacement et déformation, utilisation de la technique de corrélation directe d'images numériques pour la détermination expérimentale de CLF à striction)
- Proposition d'un critère de striction localisée analytique pour la détermination des courbes limites de formage (bibliographie sur les critères d'instabilité plastique pour l'obtention des Courbes Limites de Formage, modèle d'endommagement de Gurson-Tvergaard et surfaces de plasticité, proposition d'un critère de striction localisée analytique, validation du critère de striction localisée analytique proposé).

Dans cette partie de mon mémoire, je m'attacherai uniquement à décrire la partie concernant les CLF dans cette thèse, sachant qu'elle est aussi le point de départ de mes travaux sur la corrélation d'images numériques.
L'apport notable de ces travaux est la conception et la mise au point d'un module d'essais d'emboutissage pour emboutis Nakazima ou Marciniak adaptable sur une machine de traction/compression universelle. Cet outil a également la particularité de posséder un poinçon fixe et une matrice mobile, ce qui permet par un jeu de miroir de renvoyer en temps réel, l'image du flan embouti sur la caméra.

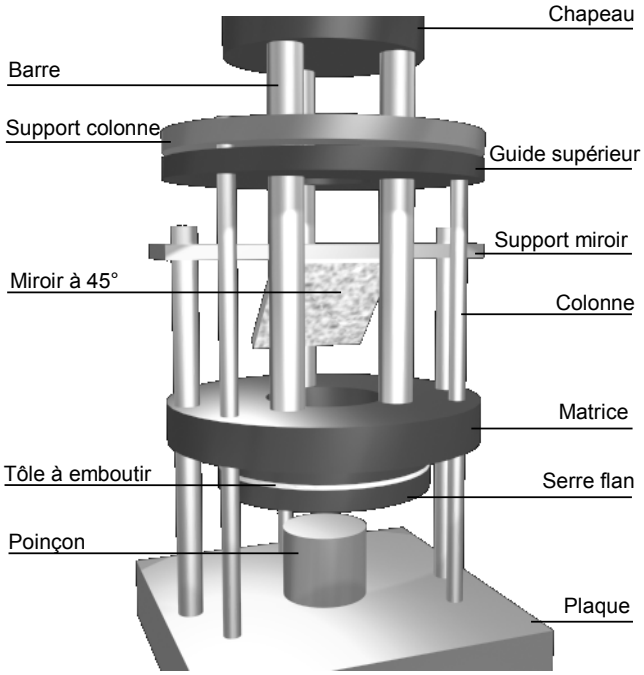


Figure 7 : Module d'emboutissage

La technique de mesure par corrélation d'images numériques a supprimé l'utilisation de résine photosensible qui représentait un coût en temps non négligeable pour la préparation des flans. La nouvelle méthode de mesure des déformations était approximativement dix fois plus précise que la méthode manuelle, pour des temps de dépouillement sensiblement plus réduits.

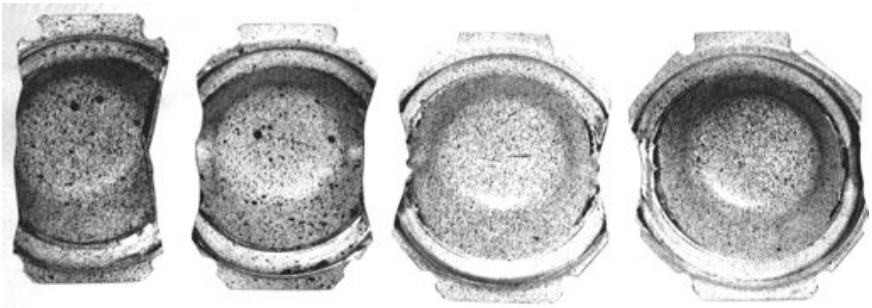


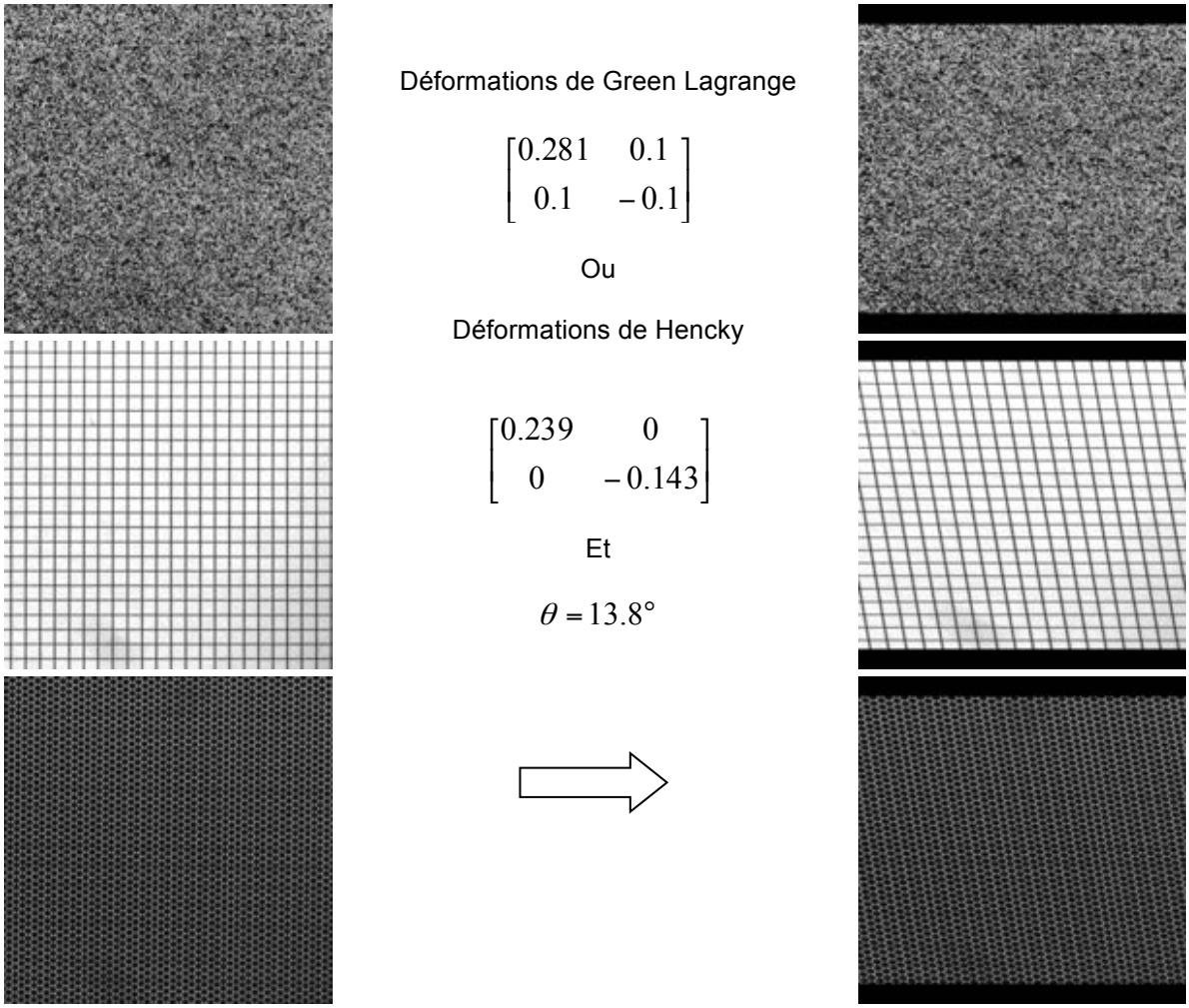
Photo 5 : Flans de différentes largeurs emboutis jusqu'à la striction avec un motif aléatoire

L'ensemble de ces améliorations a permis de ramener le temps d'obtention d'une CLF à trois jours homme seulement. Grâce à ce gain de temps considérable, nous avons pu mettre au point un critère de striction localisée analytique qui a pu être validé grâce à de nombreuses CLF expérimentales déterminées pour des matériaux aussi variés que le titane, l'aluminium ou les aciers à haute limite d'élasticité. Cette détermination numérique des CLF est très importante pour pouvoir, par exemple, obtenir des CLF à chaud, particulièrement difficiles à réaliser, en ne disposant que des courbes de traction et des coefficients de Lankford à la température souhaitée.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de trois articles publiés dans des revues [AP04 2001], [AP01 1999] et [AP01 1997] ainsi que des publications dans les actes de trois conférences internationales [CF01 1997], [CF02 1998] et [CF04 1998] et une conférence nationale [CF01 1998].

L'ensemble de cette thématique s'est poursuivie en redessinant un module d'essais d'emboutissage autorisant des épaisseurs de tôles plus importantes. Les CLF obtenues de façon analytique ont montré leur bien fondé en étant capables de prédire des CLF obtenues avec des trajets de déformation

indirects. La thèse de Patrice Clerc [CL2001] a permis d'étendre la mesure de déformation sur surfaces gauches telles que celles observées lors d'essais avec poinçon hémisphérique de type Nakazima. Nous avons également utilisé un logiciel de mesure de déformation sur surfaces gauches : ASAME. Enfin, pour des besoins internes, nous avons développé un logiciel permettant la création d'images de synthèse à partir d'un champ de déformation donné qui réalise les calculs inverses d'*ICASOFT* : Defshop. Ce dernier a été distribué gratuitement dans la communauté scientifique française afin de tester les performances des différents logiciels de mesure de champs.



Images initiales | Tenseurs de déformation imposés | Images déformées par DefShop

Figure 8 : Illustrations des capacités de DefShop

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de quatre articles publiés dans des revues [AP02 2005], [AP01 2004], [AP02 2002] et [AP03 2001] ainsi que des publications dans les actes de quatorze conférences internationales essentiellement présentées par le professeur Michel Brunet [CF01 2006], [CF01 2003], [CF02 2003], [CF01 2002], [CF02 2002], [CF03 2002], [CF04 2002], [CF05 2002], [CF06 2002], [CF03 2001], [CF04 2001], [CF02 2000] et [CF01 1999].

Les buts atteints et les perspectives…

Les buts fixés par le professeur Maurice Boivin ont été atteints, voir dépassés. Le module d'essais d'emboutissage a été diffusé dans l'industrie auprès de RENAULT et à l'université de METZ, accompagné de notre logiciel de mesure de déformation *ICASOFT*. La détermination de CLF à l'aide du module d'emboutissage est une des activités principales en 2009 de la société MECANIUM implantée au LaMCoS.

Aujourd'hui, la détermination des courbes limites de formage est devenu un atout majeur pour l'équipe mécanique des solides et endommagement dirigée par le professeur Michel Brunet. Les recherches que je mène actuellement permettent de prendre en considération des critères d'arrêt avant la striction avec l'adjonction d'une caméra thermique couplée aux deux caméras haute résolution utilisées pour la mesure de déformation par stéréo corrélation. C'est le sujet du master d'une étudiante que j'encadre dans le cadre du projet "Tôles en alliage d'aluminium à haute formabilité pour l'allègement automobile" inclus dans le pôle de compétitivité ViaMéca.

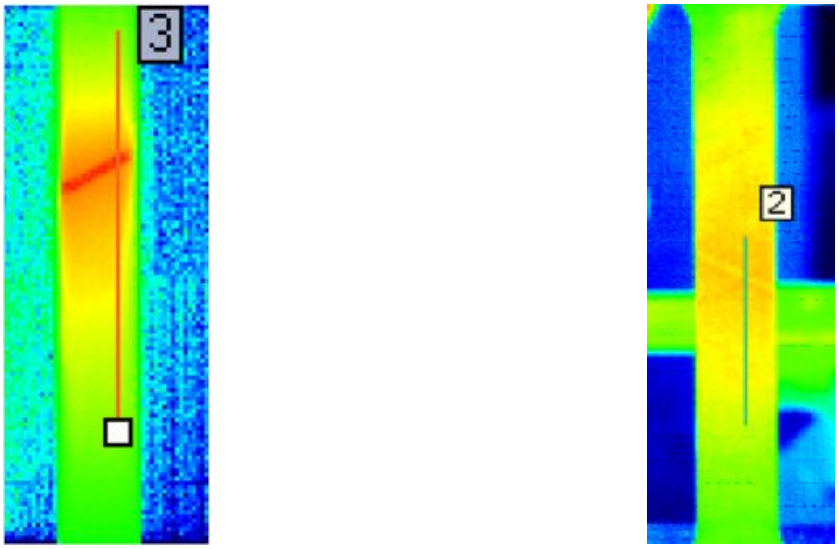


Figure 9 : Images thermographiques d'une éprouvette d'aluminium avant la rupture avec revêtement polymère à gauche, sans revêtement à droite. Les échelles de température sont identiques – Extrait du master de YanYu.

Nous avons également développé un module d'emboutissage qui reçoit un poinçon muni d'un inducteur permettant la détermination de CLF à chaud pour des températures s'échelonnant de 100°C à plus de 900°C.

Photo 6 : Module d'emboutissage livré à l'université de METZ

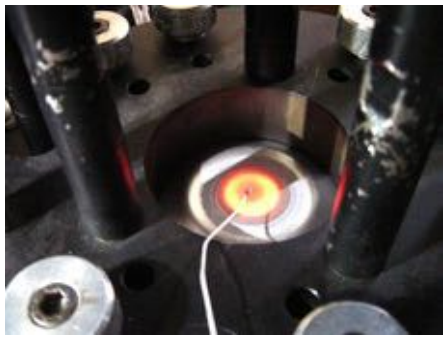


Photo 7 : Outil pour la détermination des CLF à chaud

Depuis 1992, j'ai bénéficié de l'assistance de trois étudiants en DEA/master et cinq étudiants en projets de fin d'études pour travailler sur cette thématique.

J'ai choisi de sélectionner la publication [CF02 1998] présentée à par Siham Mguil-Touchal à l'IDDRG en Belgique en 1998 pour illustrer nos travaux sur la détermination des courbes limites de formage.

Modélisation de l'écrouissage des métaux

Juste après ma thèse, le besoin de caractérisation du comportement plastique des métaux s'est fait sentir pour pouvoir prendre en compte des écrouissages plus sophistiqués que de simples écrouissages isotropes qui n'impliquent qu'une homothétie de la surface de charge. Nous avons montré avec Francis Sabourin que la prise en compte d'un écrouissage cinématique, c'est-à-dire dont le centre de la surface de charge se déplace au cours de la sollicitation non monotone (en cas de traction puis compression), permettait de mieux prédire les phénomènes de retour élastique des tôles embouties pour certains types de matériaux [CF07 2002]. L'idée initiale revient au professeur Maurice Boivin qui m'a engagé à mener des recherches sur un essai de caractérisation non monotone qui permettrait de déterminer les composantes cinématiques du comportement plastique des tôles. Ceci représentait une demande forte de RENAULT qui disposait déjà d'un tel essai en 1995 sous la forme d'une machine de cisaillement couplée à une acquisition par caméra tel que celui décrit par Ali Tourabi [TO1993]. Pour des raisons de simplicité apparente de mise en œuvre et parce que les tôles en emboutissage sont essentiellement sollicitées en flexion sous traction, notre choix s'est porté sur l'essai de flexion simple alternée tel qu'il était présenté par Marciniak et Duncan [MA1992].

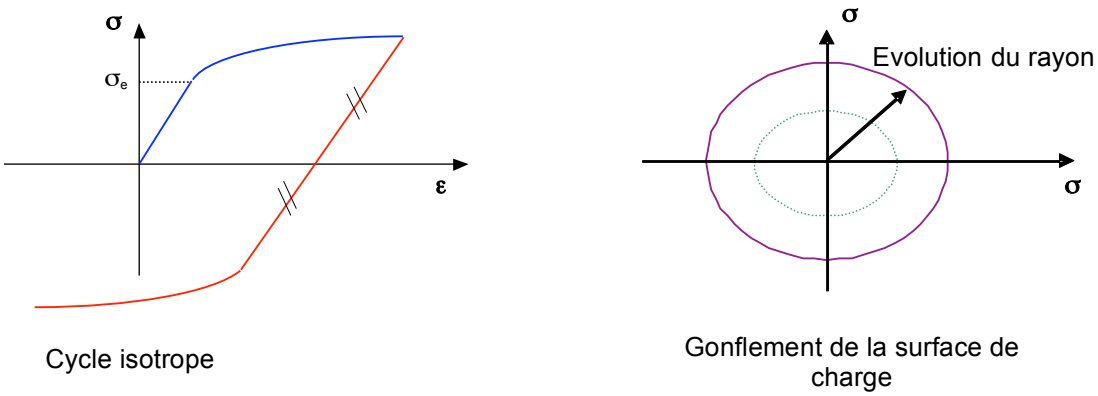


Figure 10 : Ecrouissage isotrope

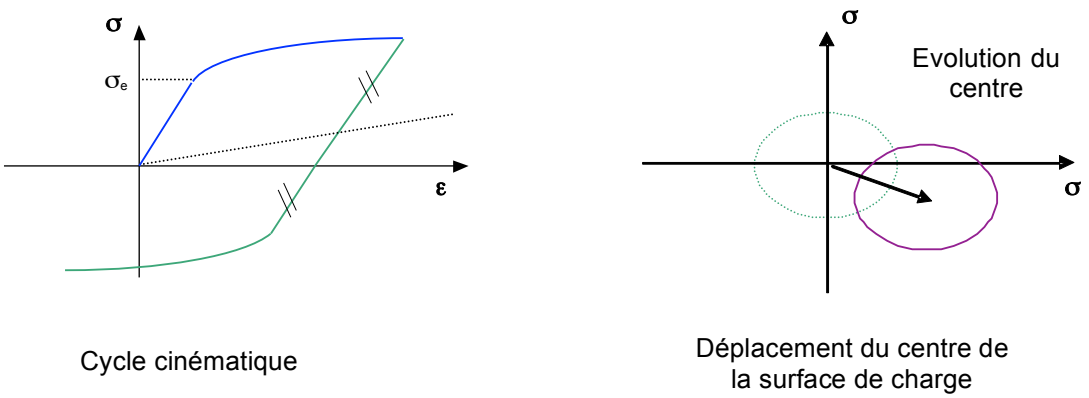


Figure 11 : Ecrouissage cinématique

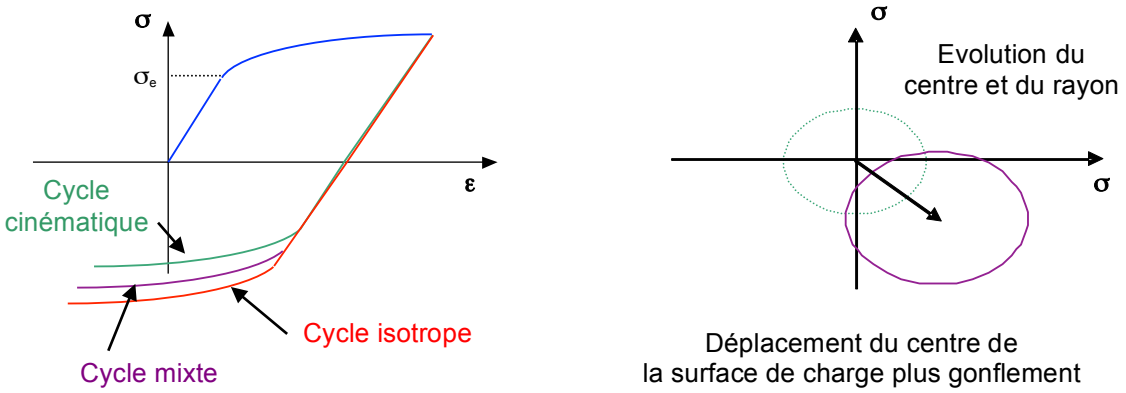


Figure 12 : Ecrouissage mixte

Les buts à atteindre

L'idée initiale que nous avons imaginée avec le professeur Maurice Boivin était de mettre en place un essai de flexion simple alterné qui permettrait de tracer des courbes moment de flexion en fonction de la courbure de la tôle. Ces courbes seraient ensuite comparées avec des simulations analytiques de l'essai qui utiliseraient le même formalisme que celui utilisé dans *PLIAGE*, le logiciel développé au cours de ma thèse. L'essai devait être simple à mettre en œuvre, l'identification par méthode inverse devait pouvoir être entièrement automatisée pour une utilisation en milieu industriel.

Ma démarche

Dans un premier temps, en 1997, nous avons mis en œuvre l'essai de flexion de Marciniak et Duncan [MA1992], ce qui a constitué le travail de Pierre Charvet au cours de son DEA (le prototype numéro 1). Sur la photo 8 on aperçoit la tôle au centre, la sollicitation s'effectue par l'intermédiaire des câbles verticaux eux même reliés à deux platines fixées sur les mors d'une machine de traction. L'alternance de la sollicitation (pliage puis dépliage) nécessite le démontage et l'inversion du montage. Le moment est directement déduit de la mesure de l'effort de traction, la courbure est mesurée à l'aide d'une caméra numérique et un logiciel de post traitement écrit pour l'occasion en Visual Basic. Une version de *PLIAGE* en fortran spécialement adaptée a été développée afin de produire les courbes moment/courbure à partir de quatre paramètres matériaux donnés par l'utilisateur. C'est ce dernier qui devait ajuster manuellement les paramètres matériaux pour la procédure d'identification afin d'ajuster au mieux les deux courbes.

Trois ans plus tard, en 2000, deux nouveaux DEA ont travaillé sur la mise au point d'un nouveau prototype de machine de flexion alternée (le prototype n°2) pouvant fonctionner sans machine de traction. Cette nouvelle machine, comme le montre la photo 9 est équipée d'un moteur électrique pas à pas, d'un réducteur et de deux joints d'Oldham qui permettent la transmission de couples purs. La procédure d'identification a elle aussi fortement évoluée cette année là car j'ai réécrit complètement le module mécanique qui était à l'origine en fortran, en Visual Basic for application afin de l'intégrer intégralement au solveur d'Excel. Ce choix a été important car ce minimiseur est un des rares disponibles de manière très courante dans l'industrie et en particulier chez RENAULT. Il intègre des algorithmes de simplex et de gradients conjugués très performants. La programmation directement sous Excel permet également l'utilisation de l'ensemble des bibliothèques de fonctions graphiques qui peuvent être utilisées pour tracer des graphes et des courbes.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de deux articles publiés dans des revues [AP01 2001], et [AP02 2001] ainsi que des publications dans les actes de deux conférences internationales [CF01 2000] et [CF01 2001].
Le second prototype a été transféré dans l'industrie au sein du laboratoire matériau de RENAULT. Il intégrait dans sa première version une caméra en face avant qui permettait de mesurer le rayon de courbure. Celle-ci a été rapidement supprimée car le rayon de courbure est directement lié à la cinématique de la machine sauf dans le cas où l'essai n'est plus valable, c'est-à-dire lorsque l'essai n'est plus un essai de flexion circulaire. Assez rapidement ce prototype s'est révélé sous dimensionné pour tester des tôles de fortes épaisseurs : plus de 1 à 3 mm.

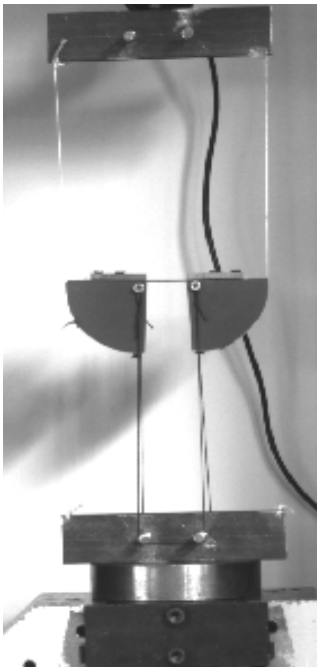


Photo 8 : Premier prototype de l'essai de flexion alternée, inspiré de Marciniak et Duncan [MA1992].

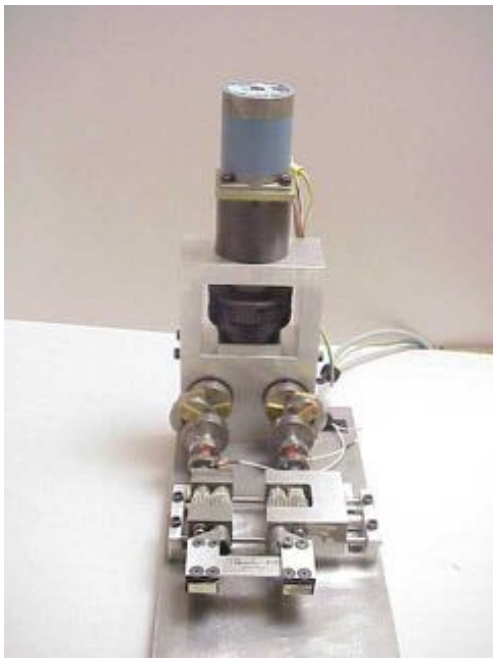


Photo 9 : Second prototype de l'essai de flexion alternée.

A partir de 1999, nous avons entrepris la création de deux machines jumelles, une pour le laboratoire de mécanique des solides, une pour RENAULT. Ce prototype numéro 3 est cinématiquement plus simple que le précédent car il ne possède qu'un seul joint d'Oldham mais est beaucoup plus robuste et permet de plier/déplier des tôles jusqu'à 3 mm d'épaisseur.

Figure 13 : Fichier CAO du troisième prototype de l'essai de flexion alternée.

Photo 10 : Joint d'Oldham

Le programme de détermination des paramètres d'écrouissage mixte (Voir figure 16) sous Excel a été entièrement revu pour répondre aux exigences de RENAULT.

Cet écrouissage mixte apparait explicitement dans l'équation de consistance (au cours de la plastification, un point sur la surface de charge reste sur la surface de charge):

$$q = f(\{\sigma - \alpha\}) = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^p) \tag{1}$$

L'équation de la surface de charge est notée f , $\{\alpha\}$ est un vecteur représentant les coordonnées du centre de la surface de charge considéré par hypothèse initialement nul. $\bar{\sigma}$ et $\bar{\varepsilon}^p$ sont respectivement la contrainte équivalente et la déformation plastique équivalente.

Le critère de Hill 48 sous sa forme la plus générale peut s'écrire :

$$q^2 = \{\sigma - \alpha\}^T [M] \{\sigma - \alpha\} \tag{2}$$

avec

$$[M] = \begin{bmatrix} g+h & -h & 0 & -g \\ -h & f+h & 0 & -f \\ 0 & 0 & 2n & 0 \\ -g & -f & 0 & f+g \end{bmatrix} \tag{3}$$

h, f, g, n, l et *m* sont les coefficients de Hill qui sont, dans notre cas, déterminés avec les trois coefficients de Lankford r_0, r_{45}, r_{90} déterminés eux-mêmes par trois essais de traction effectués pour trois valeurs de α distinctes : 0°, 45°, 90°. α est l'angle entre une direction de référence (souvent la direction de laminage de la tôle) et l'axe de traction de l'éprouvette. Ces coefficients sont définis de manière générale par :

$$r_\alpha = \frac{d\varepsilon^p_{\alpha+90}}{d\varepsilon^p_z} \tag{3}$$

En faisant l'hypothèse de conservation du volume lors de la déformation plastique, un essai de traction au cours duquel sont mesurées les déformations dans le plan de l'éprouvette par corrélation d'images suffit à la détermination de ces coefficients. Ces derniers permettent la définition complète de la surface de charge initiale à travers leur relation avec les coefficients de Hill :

$$r_\alpha = \frac{h + (2n - f - g - 4h) \cdot c^2 \cdot s^2}{f \cdot s^2 + g \cdot c^2} \quad \text{avec } c = \cos\alpha, s = \sin\alpha \tag{4}$$

ce qui, après inversion du système avec l'hypothèse des contraintes planes et définition d'une direction de référence ($\alpha = 0°$) permet d'écrire :

$$f = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, \; g = \frac{1}{1+r_0}, \; h = \frac{r_0}{1+r_0}, \; n = \frac{(r_{90}+r_0)\cdot(2r_{45}+1)}{2r_{90}\cdot(1+r_0)} \tag{5}$$

Le modèle d'écrouissage cinématique utilisé est de type Chaboche-Ziegler limité à deux paramètres C et γ. Il permet de déterminer l'évolution des coordonnées du centre de la surface de charge en fonction de l'incrément de déformation plastique équivalente et de l'état de contrainte précédent :

$$\{d\alpha\} = C \cdot \frac{d\bar{\varepsilon}^p}{\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^p)} \cdot \{\sigma - \alpha\} - \gamma \cdot \{\alpha\} \cdot d\bar{\varepsilon}^p \tag{6}$$

avec

$$d\bar{\varepsilon}^{p^2} = \left\{d\varepsilon^p\right\}^T \left[M\right]^{-T} \left\{d\varepsilon^p\right\} \tag{7}$$

La composante isotrope de l'écrouissage est donnée par deux autres paramètres : Q_∞ et b, elle permet de déterminer l'incrément de contrainte équivalente au cours en fonction de la déformation plastique équivalente :

$$d\bar{\sigma} = Q_\infty \cdot b \cdot e^{-b \cdot \bar{\varepsilon}^p} \cdot d\bar{\varepsilon}^p \tag{8}$$

Sous sa forme intégrée, (8) peut s'écrire conventionnellement :

$$\bar{\sigma} = \sigma_e + Q_\infty \left(1 - e^{-b\bar{\varepsilon}^p}\right) \tag{9}$$

En ajoutant la limite d'élasticité σ_e, cela représente cinq paramètres à déterminer grâce à l'essai de flexion et l'identification inverse par minimisation.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction d'un article publié dans une revue [AP02 2004] ainsi que des publications dans les actes de deux conférences internationales [CF01 2005] et [CF01 2004].

Le prototype numéro 3 a été livré chez RENAULT en 2002. La cinématique de cette machine est basée sur un unique joint d'Oldham, monté verticalement. Un des mors est fixe et soutenu par le capteur de couple, l'autre est mobile à +/- 170°, sa position est codée par un capteur de rotation. C'est ce dernier qui permet de mesurer la courbure de la tôle à tout instant. En 2006, cette machine de flexion ainsi que celle du laboratoire ont été modifiées afin de prendre en compte les nouvelles normes de sécurité et électriques.

Photo 11 : Troisième prototype de l'essai de flexion alternée.

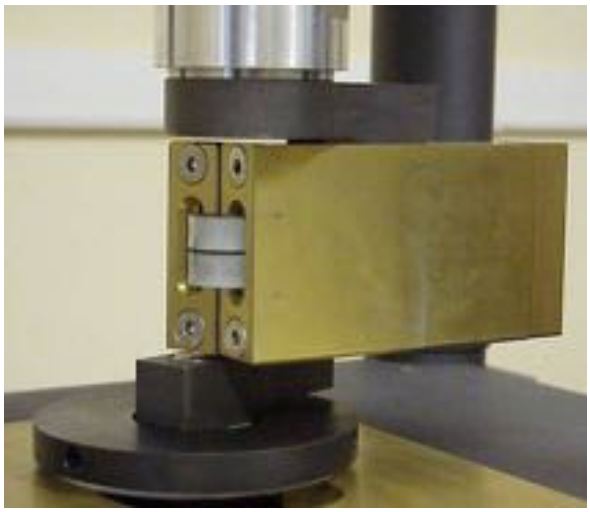


Photo 12 : Détail des mors plus tôle en cours de flexion

Les mors ont fait l'objet d'une étude approfondie pour leur conception à cause du faible encombrement imposé et des sollicitations importantes qu'ils subissent.

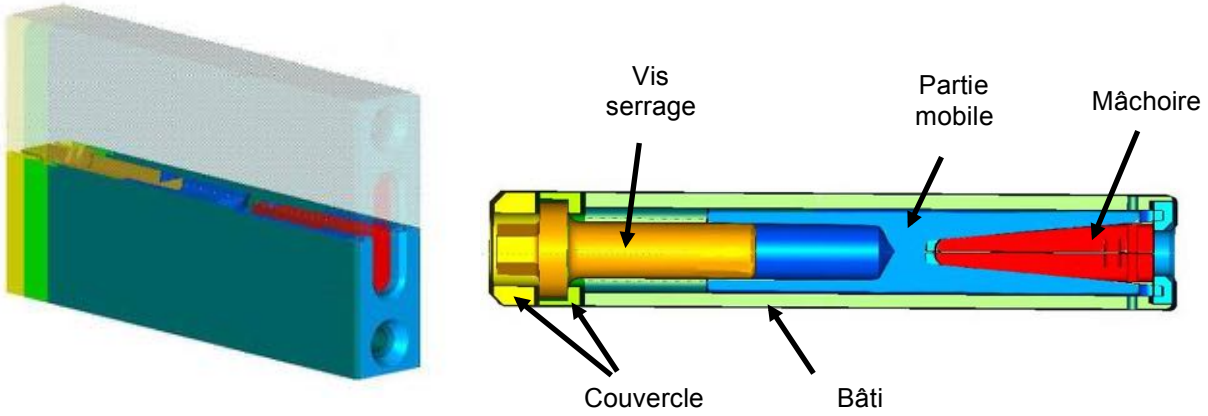


Figure 14 Détails des mors du prototype numéro 3

Les buts atteints et les perspectives…

Ce projet débuté il y a environ dix ans est toujours d'actualité. Les deux machines de flexion alternée de conception complètement originale sont utilisées régulièrement pour la caractérisation de l'écrouissage mixte des tôles en emboutissage. Le transfert industriel est pleinement rempli car MECANIUM propose aujourd'hui dans son catalogue de prestations la fourniture des coefficients caractérisant les tôles, ces mêmes coefficients pouvant être directement utilisés sous Abaqus par exemple. J'ai conduit ce projet à long terme en collaboration avec sept étudiants en DEA/master et six étudiants en projets de fin d'études.

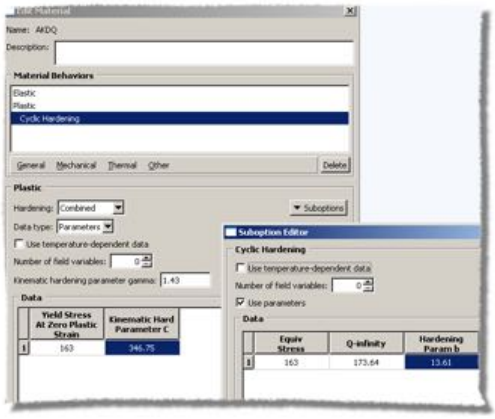


Figure 15 : Mise en données sous Abaqus

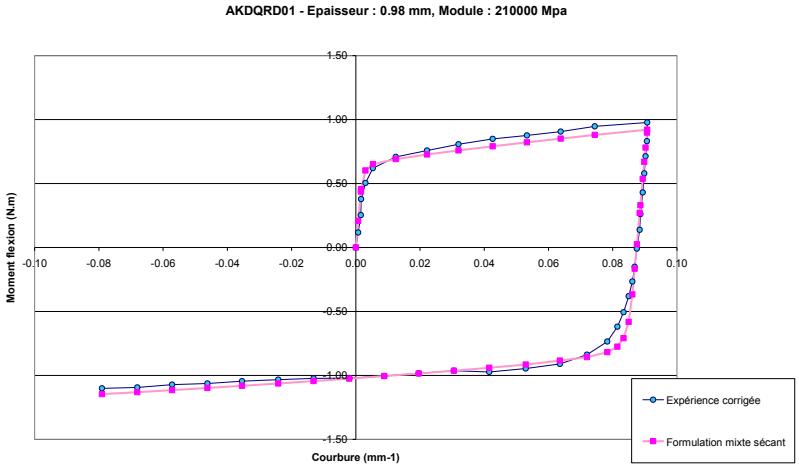


Figure 16 : Courbe typique obtenue en flexion alternée

Ce projet a constitué également un des éléments clefs d'une thèse encadrée par Francis Sabourin et le professeur Michel Brunet sur la formulation d'un nouvel élément fini destiné à l'amélioration de la prédiction du retour élastique des tôles après emboutissage [CA2009]. Un master en collaboration avec RENAULT va débuter en septembre 2009 afin de concevoir un joint d'Oldham mieux adapté à sa position verticale et afin de réécrire le programme de minimisation sous Matlab qui est l'outil logiciel le mieux maîtrisé aujourd'hui chez RENAULT. Une collaboration avec l'Université de Bretagne-Sud en la personne du professeur Sandrine Thuillier du laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux (LG2M) a débuté en 2008 avec le groupe MEPM du LaMCoS pour comparer les identifications des paramètres d'écrouissage mixte obtenus à partir d'un essai de flexion alternée et ceux obtenus à partir d'un essai de cisaillement sur différents matériaux [CA2008], [TH2009].

J'ai choisi de sélectionner la publication [CF01 2005] présentée par Pierre Simon à l'IDDRG en France en 2005 pour illustrer nos travaux sur la flexion alternée et l'identification des paramètres d'un écrouissage mixte.

Conclusion sur mon activité de recherche liée à la plasticité des tôles

L'informatique a encore une fois été au cœur de mes apports sur cette thématique : par la programmation des sous routines permettant le calcul des états de contraintes et la détermination des paramètres d'écrouissage par minimisation et par l'écriture des programmes de pilotage des trois prototypes présentés ci-dessus. C'est sans aucun doute une de mes thématiques de recherche qui a engendré le plus de publications scientifiques en ce qui me concerne, essentiellement grâce a une collaboration étroite avec tous les membres de mon groupe. J'ai contribué de façon significative à la levée de verrous expérimentaux importants en concevant des machines d'essais originales qui ont permis de simplifier et de fiabiliser les essais de caractérisation des tôles minces. L'abaissement sensible des temps d'obtention des résultats d'essais a permis de valider soit des méthodes d'identification inverse soit des modèles numériques dans le cas de la prédiction des courbes limites de formage. La durée importante de ces travaux et leur transfert dans le milieu industriel montrent clairement mes capacités à travailler sur des projets de recherche de longue haleine, depuis le stade de la définition du projet, son développement, la conception d'outils adaptés aussi bien sur les plans expérimentaux, théoriques et informatiques jusqu'à la valorisation auprès d'industriels.

Activités de recherche associées à la caractérisation des tissus

Cette thématique concerne mes travaux de recherche les plus récents, elle a débuté avec l'arrivée du professeur Philippe Boisse au LaMCoS en 2005. Nous avons encadré ensemble depuis cette période, la thèse d'Emmanuel de Luycker [DE2009] ainsi que deux étudiants en master sur des sujets d'appui à la thèse précitée et un projet de fin d'études sur la caractérisation mécanique d'étoffes hybrides pour la société PAYEN. Je travaille sur cette thématique dans une équipe composée du professeur Philippe Boisse, d'Emmanuelle Vidal-Sallé, de Tarek Mabrouki et de Nahiene Hamila.

Les débuts

Nous avons travaillé sur les tissés interlock pour la société SNECMA. Ces tissus 3D ont été développés pour limiter le délaminage rencontré habituellement dans les composites multicouches ce qui a longtemps limité l'usage des composites dans le domaine de l'aéronautique. Notre action de recherche intervient essentiellement pour la phase préformage à sec avant injection du procédé R.T.M., voir figure 17.

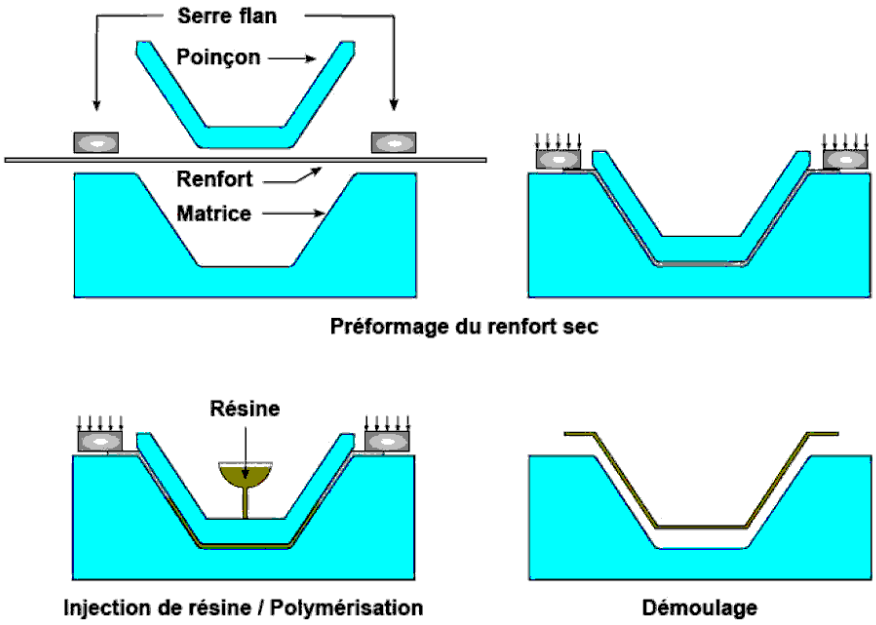


Figure 17 : Procédé R.T.M. [BA2008]

De manière plus détaillée, deux parties ont été prises en compte dans la thèse d'Emmanuel de Luycker :

- La simulation du formage des renforts 3D avec l'introduction d'un élément fini Lagrangien, semi discret permettant de simuler la mise en forme de préformes interlocks. Deux modèles ont été considérés pour prendre en compte l'intégralité du comportement :
  - la tension dans les mèches est modélisée de manière discrète
  - les autres contributions le sont par un modèle continu.
- L'autre volet de ce travail est consacré à la caractérisation expérimentale de ces matériaux en traction, compression et cisaillement.

C'est dans cette dernière partie que je suis principalement intervenu en développant des fonctions de post traitement spécifiques aux tissus dans le logiciel de corrélation *ICASOFT*. Des essais de type « bias test » et « picture frame » ont permis d'identifier les paramètres du modèle développé dans la partie numérique de la thèse.

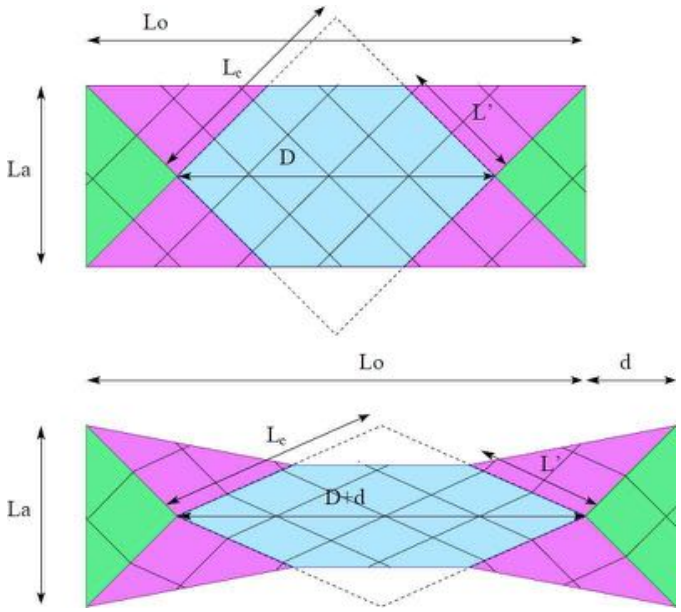


Figure 18 : Bias Test – Paramétrage de l'éprouvette initiale puis sous traction [DE2009]

Nous avons également développé des mouchetis spéciaux à base de poudres fluorescentes qui ont permis la mesure de déformations sur des tissés carbones qui présentaient un trop fort pouvoir réfléchissant pour être éclairés en lumière blanche.

Photo 13 : Aube de soufflante, SNECMA.

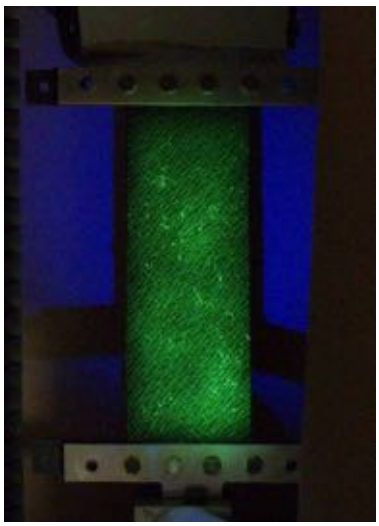


Photo 14 : Eprouvette de traction sous lumière ultra violette.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de trois articles publiés dans des revues [AP02 2008], [AP03 2008] et [AP04 2008] ainsi que des publications dans les actes de quatre conférences internationales [CF03 2008], [CF05 2008], [CF02 2009] et [CF06 2008] et une conférence nationale : [CF04 2008].

J'ai choisi de sélectionner la publication [CF06 2008] présentée par Emmanuel de Luycker à la conférence ESAFORM 2008 pour illustrer nos travaux sur mise en forme des renforts tissés 3D.

Les perspectives

Cette thématique de recherche très récente pour moi offre de très nombreuses perspectives tant sur le plan expérimental que sur le plan de la modélisation. Les logiciels éléments finis développés actuellement en collaboration avec le professeur Philippe Boisse et mon collègue Nahiene Hamila sont parfaits pour démontrer la pertinence des nouveaux éléments développés. Afin de rationaliser le travail de développement, nous avons sollicité le service informatique du laboratoire afin de disposer d'un outil de développement collaboratif permettant le suivi des versions au travers d'un dépôt de sources centralisées sur un serveur accessible via SVN. Cet outil va permettre, dans un futur proche, d'accroître notre base de connaissances, d'encadrer et de coordonner entre eux encore plus d'étudiants sur ce type de sujet. La demande de caractérisation des étoffes, pas obligatoirement liées aux matériaux composites, est également en forte croissance et nous allons appliquer rapidement les techniques de caractérisation déjà éprouvées avec les renforts tissés [CF02 2009]. La mise au point de nouveaux essais de caractérisation est actuellement en plein essor pour les tissus. Mes connaissances dans le domaine de la mesure de déformation par méthodes optiques et mes travaux antérieurs de conception de machines d'essai permettront au LaMCoS de rester à la pointe dans ce domaine.

Activités associées à la mesure de déformations

La mesure de champs de déplacements et le calcul des déformations associées est la thématique principale de mon parcours de chercheur. C'est la thématique que je vais développer le plus largement dans ce mémoire. Paradoxalement, bien que ce travail soit beaucoup plus individuel que ceux effectués au cours des précédents thèmes de recherche présentés, c'est celui qui m'a amené à avoir le plus de collaborations au niveau national et international. C'est au cours de cette thématique que j'ai pu exprimer tout mon attachement à la programmation, au codage de l'information et au traitement du signal. A partir des années 2000, quatre de mes collègues de l'équipe MSE du LaMCoS travaillent partiellement sur la mesure de champs : Michel Coret, Anthony Gravouil, Hubert Maigre et Julien Rethoré.

Avant la corrélation d'images

J'ai réalisé les premières mesures de déplacement par caméra numérique lors de mon contrat avec EDF-SEPTEN en 1994, sur une demande du professeur Jean François Julien du Laboratoire Bétons et Structures de l'INSA de Lyon. Nous avons montré qu'il était possible de prédire la ruine d'une structure soumise à des sollicitations cycliques en flexion par l'analyse d'une partie du champ de déformations de cette structure. Cette analyse du champ de déformations a été faite sans contact, elle utilise une technique d'imagerie associée à une grille solidaire de la structure à étudier. Les grilles étaient déposées en Allemagne à l'Université de Braunschweig avec une densité de 5 traits par millimètre. Le champ couvert par la caméra 1024x1024 pixels était de 4 mm². Grâce à l'utilisation d'un algorithme spécialement développé par mes soins pour les grilles carrées et grâce à un logiciel de post traitement graphique, nous avons montré qu'il était possible de prédire expérimentalement la ruine de la structure étudiée environ 200 à 300 cycles avant les 1400 cycles qui conduisent à la formation de fissures. Les images suivantes sont des extraits des résultats obtenus au cours de cette étude.

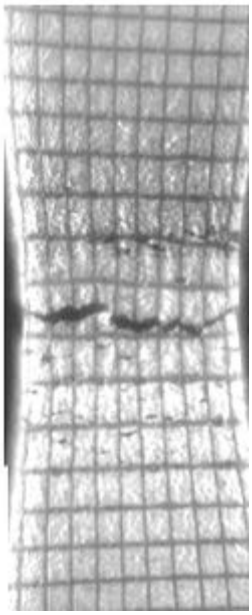


Photo 15 : Image initiale de l'éprouvette fissurée avant rupture

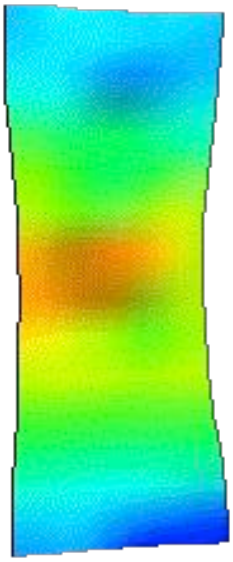


Figure 19 : Champ de déformations suivant l'axe longitudinal

Figure 20 : Champ de déformations suivant l'axe transversal

C'est à l'occasion de cette étude que je me suis rendu à l'Université de Braunschweig pour rencontrer le professeur Reinhold Ritter qui venait de finaliser avec son équipe un logiciel de corrélation d'images numériques nommé ARAMIS. J'ai immédiatement saisi le potentiel très important de ce genre de techniques pour les applications en mécanique des solides. L'équipe du professeur Ritter était alors en cours de création d'une structure privée qui deviendra plus tard la société GOM, ce qui explique la confidentialité des thèses soutenues sur le sujet en Allemagne que je n'ai donc pas pu me procurer. J'ai décidé de repartir de l'idée originale de la corrélation d'images numériques à partir des publications du professeur Mickael Sutton [SU1983], [SU1986] pour programmer un logiciel de corrélation propre au

laboratoire de mécanique des solides : *ICASOFT* (qui s'est appelé *SIFASOFT* au début de son existence).

La mesure de déplacements par corrélation d'images

Principes de base

Partant de deux images en niveau de gris d'un objet qui présente un aspect moucheté en lumière blanche avant et après transformation finie, un logiciel de corrélation va s'intéresser à des zones appelés « pattern » ou « subset » issues de l'image avant transformation qu'il va tenter de retrouver par minimisation d'un coefficient de corrélation incluant un champ de déplacements présupposé dans l'image après transformation. L'ensemble des « patterns » ou « subsets » constitue une zone d'intérêt sélectionnée au préalable par l'utilisateur du logiciel. La plupart du temps, la détermination du champ de déplacement se fait en post traitement des images qui peuvent être prises par différentes sortes d'appareils comme des numériseurs, des caméras vidéo analogiques, des caméras rapides et des caméras numériques. En final, un logiciel de corrélation restitue un champ de déplacements sur toute la zone étudiée lorsque la corrélation a été possible. Les champs de déformations sont issus d'un post traitement des champs de déplacements.

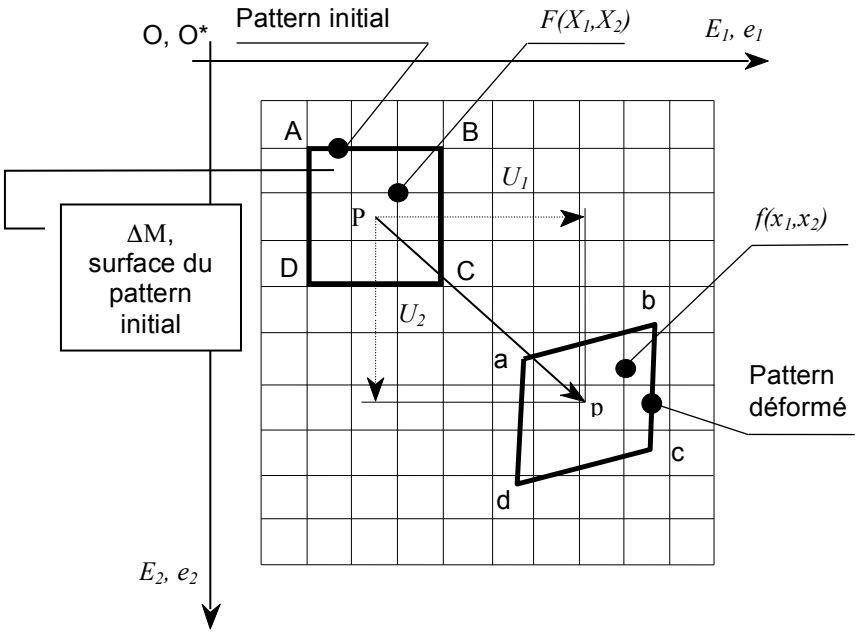


Figure 21 : Notations pour la corrélation

Par convention typographique, état initial = majuscules, état déformé = minuscules
Sur la figure l'image initiale et l'image finale sont représentées dans les mêmes repères

Selon les notations utilisées sur la figure 21, pour un pattern initial centré en P dont le niveau de gris est noté $F(X_1,X_2)$, u_i sont les composantes d'un vecteur déplacement donné qui peut, par exemple, se mettre sous la forme suivante :

$$u_i(X_1,X_2) = d_1^i \cdot X_1 + d_2^i \cdot X_2 + d_3^i \cdot X_1 \cdot X_2 + d_0^i \text{ pour } i=1,2 \qquad (10)$$

avec

$$x_i = X_i + u_i \text{ pour } i=1,2. \qquad (11)$$

Le but est de retrouver le point P qui s'est déplacé en p en déterminant par minimisation les paramètres d_l^i, pour $l= 0$ à 3 et pour $i=1,2$.

Différents coefficient de corrélation peuvent être utilisés pour construire la fonctionnelle qui devra être minimisée. Voici ceux utilisables dans *ICASOFT* :

- SSD : Sum of Squared Differences , ou somme des différences quadratiques entre termes correspondants des deux patterns.

$$\Gamma(d_l^i) = ssd = \int_{\Delta M} \left(F(X_i) - f(x_i)\right)^2 \cdot dX_1 \cdot dX_2 \qquad \text{pour } i=1,2 \text{ et } l=0 \text{ à } 3 \qquad (12)$$

- NCC : Normalized Cross Correlation, le critère utilisé par défaut dans *ICASOFT*, mais aussi le plus long à calculer. C'est la somme des produits entre les termes correspondants des patterns, normalisée par le produit des moyennes quadratiques calculées pour chacun des patterns.

$$\Gamma(d_l^i) = ncc = 1 - \frac{\int_{\Delta M} F(X_i) \cdot f(x_i) \cdot dX_1 \cdot dX_2}{\sqrt{\int_{\Delta M} F(X_i)^2 \cdot dX_1 \cdot dX_2 \cdot \int_{\Delta M} f(x_i)^2 \cdot dX_1 \cdot dX_2}} \qquad \text{pour } i=1,2 \text{ et } l=0 \text{ à } 3 \qquad (13)$$

Les inconnues d_l^i sont implicitement contenues dans la fonction $f(x_i)$ car :

$$f(x_i) = f(X_i + u_i) = f(X_i + d_1^i \cdot X_1 + d_2^i \cdot X_2 + d_3^i \cdot X_1 \cdot X_2 + d_0^i) \qquad \text{pour } i=1,2 \qquad (14)$$

L'interpolation des niveaux de gris

Le fait que p dont le niveau de gris est noté $f(x_1,x_2)$ ne se trouve pas obligatoirement sur un pixel de l'image déformée va imposer l'utilisation d'une interpolation des niveaux de gris de l'image de l'objet étudié après transformation. Deux types d'interpolation sont disponibles dans *ICASOFT* : bi linéaire et spline cubique. Cette dernière ayant fait l'objet d'une optimisation originale non publiée, nous la présentons dans les lignes suivantes.

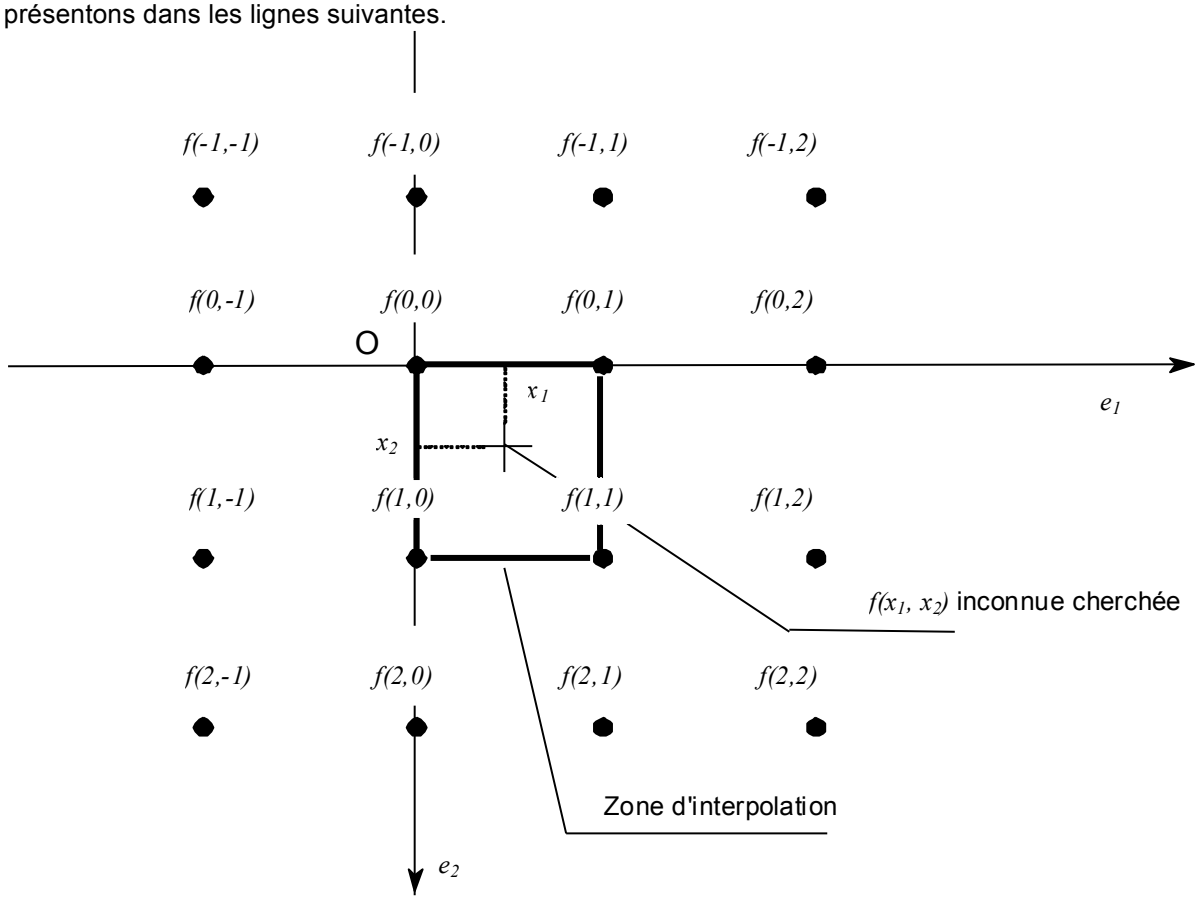


Figure 22 : Notations pour l'interpolation spline cubique dans l'image finale

L'origine est prise arbitrairement sur le pixel haut gauche de la zone qui entoure le point où sera interpolé le niveau de gris.

Le résultat obtenu après développement permet de calculer le niveau de gris interpolé :

$$\begin{aligned} f(x_1,x_2) = {} & N_0(x_1)\cdot\left[N_0(x_2)\cdot f(-1,-1)+N_1(x_2)\cdot f(-1,0)+N_2(x_2)\cdot f(-1,1)+N_3(x_2)\cdot f(-1,2)\right] \\ & + N_1(x_1)\cdot\left[N_0(x_2)\cdot f(0,-1)+N_1(x_2)\cdot f(0,0)+N_2(x_2)\cdot f(0,1)+N_3(x_2)\cdot f(0,2)\right] \\ & + N_2(x_1)\cdot\left[N_0(x_2)\cdot f(1,-1)+N_1(x_2)\cdot f(1,0)+N_2(x_2)\cdot f(1,1)+N_3(x_2)\cdot f(1,2)\right] \\ & + N_3(x_1)\cdot\left[N_0(x_2)\cdot f(2,-1)+N_1(x_2)\cdot f(2,0)+N_2(x_2)\cdot f(2,1)+N_3(x_2)\cdot f(2,2)\right] \end{aligned} \tag{15}$$

avec

$$\begin{cases} N_0(\theta) = -\frac{1}{3}\cdot\theta^3+\frac{4}{5}\cdot\theta^2-\frac{7}{15}\cdot\theta \\ N_1(\theta) = \theta^3-\frac{9}{5}\cdot\theta^2-\frac{1}{5}\cdot\theta+1 \\ N_2(\theta) = -\theta^3+\frac{6}{5}\cdot\theta^2+\frac{4}{5}\cdot\theta \\ N_3(\theta) = \frac{1}{3}\cdot\theta^3-\frac{1}{5}\cdot\theta^2-\frac{2}{15}\cdot\theta \end{cases} \quad \text{pour } \theta = x_1 \text{ ou } \theta = x_2 \tag{16}$$

Minimiser $\Gamma(d_l^i)$ avec une interpolation spline cubique pour chaque pixel du pattern déformé est très consommateur en temps de calcul. Trois possibilités permettent de diminuer notablement les temps de calcul.

1 L'algorithme du gradient conjugué développé dans les paragraphes suivants utilise les dérivées d'ordre un et deux de la fonction $\Gamma(d_l^i)$. Il est possible de dériver littéralement cette fonction ce qui permettra la division du temps de calcul par 2 environ.
2 Une deuxième solution consiste à réduire le nombre d'opérations effectuées par factorisation, ce qui permettra division du temps de calcul par 1,5 environ.
3 Enfin, la solution la plus efficace en terme de diminution du temps de calcul consiste à pré calculer l'ensemble des 15 coefficients du polynôme construit avec la solution précédente pour chaque pixel de l'image finale et les conserver en mémoire. Le temps de calcul est alors divisé environ par un facteur 10 au détriment d'une place en mémoire beaucoup plus importante.

Pour une raison de simplification d'écriture, nous utiliserons la correspondance suivante pour les niveaux de gris des 16 pixels adjacents :

$$\begin{aligned} & a = f(-1,-1),\ b = f(-1,0),\ c = f(-1,1),\ d = f(-1,2),\ e = f(0,-1),\ z = f(0,0), \\ & g = f(0,1),\ h = f(0,2),\ i = f(1,-1),\ j = f(1,0),\ k = f(1,1),\ l = f(1,2), \\ & m = f(2,-1),\ n = f(2,0),\ o = f(2,1),\ p = f(2,2) \end{aligned} \tag{17}$$

Le niveau de gris interpolé est alors donné par :

$$\begin{aligned} & f(x_1,x_2) = x_1x_2\cdot(C(0,x_1,x_2)+x_2\cdot(C(1,x_1,x_2)+C(2,x_1,x_2)\cdot x_2) \\ & + x_1x_2\cdot(C(5,x_1,x_2)+C(6,x_1,x_2)\cdot x_2+C(9,x_1,x_2)\cdot x_2 \\ & + C(10,x_1,x_2)\cdot x_1x_2)+x_1\cdot(C(8,x_1,x_2)\cdot x_1+C(4,x_1,x_2))) \\ & + x_1\cdot(C(3,x_1,x_2)+x_1\cdot(C(7,x_1,x_2)+C(11,x_1,x_2)\cdot x_1)) \\ & + x_2\cdot(C(12,x_1,x_2)+x_2\cdot(C(13,x_1,x_2)+C(14,x_1,x_2)\cdot x_2))+z \end{aligned} \tag{18}$$

avec

$$C(0, x_1, x_2) = \frac{14}{225} m + \frac{4}{225} p - \frac{8}{75} o + \frac{2}{75} n + \frac{49}{225} a + \frac{14}{225} d$$
$$+ \frac{7}{75} b - \frac{28}{75} c + \frac{1}{25} z - \frac{4}{25} g + \frac{2}{75} h - \frac{4}{25} j - \frac{8}{75} l + \frac{16}{25} k + \frac{7}{75} e - \frac{28}{75} i \quad (19)$$

$$C(1, x_1, x_2) = \frac{6}{25} n + \frac{2}{75} p - \frac{4}{25} o - \frac{28}{75} a + \frac{7}{75} d + \frac{21}{25} b - \frac{14}{25} c$$
$$+ \frac{1}{25} h + \frac{9}{25} z - \frac{6}{25} g + \frac{24}{25} k - \frac{36}{25} j - \frac{4}{25} l - \frac{8}{75} m - \frac{4}{25} e + \frac{16}{25} i \quad (20)$$

…

Les 13 autres coefficients sont donnés en annexe de ce document. L'implémentation de l'ensemble de ces détails techniques a permis de gagner un facteur 30 en terme de vitesse entre les premières et les dernières versions d'*ICASOFT*. Il est à noter que dans le cas de la version incrémentale, les niveaux de gris des pixels de l'image initiale doivent également être interpolés ce qui augmente les temps de calcul de manière significative.

Figure 23 : Principe du calcul séquentiel

Figure 24 : Principe du calcul incrémental

La minimisation

Après avoir défini une fonctionnelle à minimiser, il faut utiliser un algorithme de minimisation qui va trouver : $(d^i_{l\min})$ tels que $\Gamma(d^i_l)$ soit minimum. C'est une technique de gradient conjugué qui est utilisé dans *ICASOFT*. Pour des raisons de performances algorithmiques, les inconnues d^i_1, d^i_2, d^i_3 pour $i=1,2$ sont déterminés par la connaissance des déplacements des 8 variables d^i_0 des 4 patterns centrés en A, B, C et D. Voir figure 21. Ce passage est détaillé dans la thèse de Siham Mguil-Touchal [MG1997] p.39-41. Cela permet entre autre de garder constant les termes d^i_1, d^i_2, d^i_3 durant le processus de minimisation ce qui améliore la stabilité du schéma et ce qui diminue les temps de calcul. La fonction à minimiser devient dans ce cas une fonction à deux variables d^1_0, d^2_0. Afin de simplifier l'écriture, l'indice 0 sera supprimé dans les explications qui suivent. Soit d^1_{ini}, d^2_{ini} un vecteur solution initiale. Pour le premier pattern, celui-ci peut être donné par l'utilisateur, les patterns calculés ensuite auront comme vecteur solution initiale le vecteur qui a minimisé la fonction d'un pattern voisin déjà calculé. Nous noterons $d^1_{\min}, d^2_{\min}$ le vecteur qui minimise la fonction $\Gamma(d^i)$.

En effectuant un développement limité de Taylor, nous obtenons :

$$\Gamma(d^i_{ini} + \partial d^i) = \Gamma(d^i_{ini}) + \partial d^i \cdot \frac{\partial \Gamma(d^i_{ini})}{\partial d^i} + \frac{\partial d^{i2}}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Gamma(d^i_{ini})}{\partial d^{i2}} + \frac{\partial d^{i3}}{3!} \cdot \frac{\partial^3 \Gamma(d^i_{ini})}{\partial d^{i3}} + \Delta\left(d^i_{ini}{}^4\right) \quad (21)$$

Si d^i_{ini} était un minimum alors en supprimant les termes supérieurs à l'ordre 2, la dérivée serait nulle donc

$$\Gamma(d^i_{ini} + \partial d^i) \cong \Gamma(d^i_{ini}) + \frac{\partial d^{i2}}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Gamma(d^i_{ini})}{\partial d^{i2}} \quad (22)$$
$$\Gamma(d^i_{ini} + \partial d^i) \cong A + B \cdot \partial d^{i2}$$

Γ peut être assimilée à une fonction quadratique en ∂d^i pourvu que B soit définie positive.

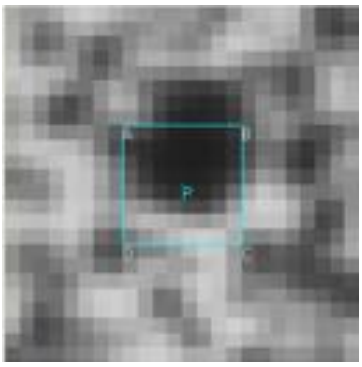


Figure 25 : Pattern dans l'image initiale

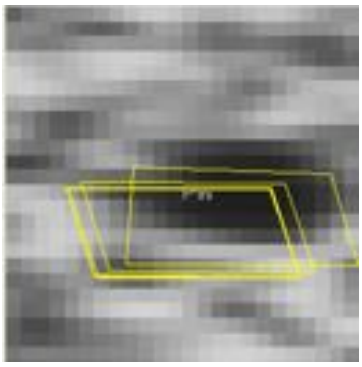


Figure 26 : Itérations successives pour trouver le pattern correspondant dans l'image finale

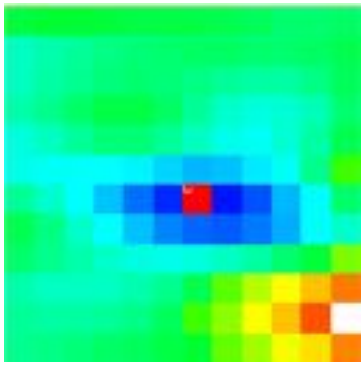


Figure 27 : Représentation de la valeur de la fonction à minimiser

en posant $\partial d^i = d^i - d^i_{ini}$ (21) peut s'écrire :

$$\Gamma\left(d^i\right) = \Gamma\left(d^i_{ini}\right) + \left(d^i - d^i_{ini}\right) \cdot \frac{\partial \Gamma\left(d^i_{ini}\right)}{\partial d^i} + \frac{\left(d^i - d^i_{ini}\right)^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Gamma\left(d^i_{ini}\right)}{\partial {d^i}^2} + \Delta\left({d^i_{ini}}^3\right) \tag{23}$$

En posant $\{g\}$ gradient de Γ, $[H]$ Hessien de Γ et en négligeant les termes d'ordre 3, on a :

$$\Gamma\left(d^i\right) = \Gamma\left(d^i_{ini}\right) + \{g\}^T \left(d^i - d^i_{ini}\right) + \frac{1}{2} \cdot {}^T\left(d^i - d^i_{ini}\right) \cdot [H] \cdot \left(d^i - d^i_{ini}\right) \tag{24}$$

La dérivée de Γ s'écrit donc :

$$\frac{\partial \Gamma\left(d^i\right)}{\partial d^i} = \{g\} + [H] \cdot \left(d^i - d^i_{ini}\right) \tag{25}$$

avec

$$\{g\} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \Gamma\left(d^i\right)}{\partial d^1} \\ \dfrac{\partial \Gamma\left(d^i\right)}{\partial d^2} \end{bmatrix} \text{ et } [H] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 \Gamma\left(d^i\right)}{\partial {d^1}^2} & \dfrac{\partial^2 \Gamma\left(d^i\right)}{\partial d^1 \partial d^2} \\ \dfrac{\partial^2 \Gamma\left(d^i\right)}{\partial d^1 \partial d^2} & \dfrac{\partial^2 \Gamma\left(d^i\right)}{\partial {d^2}^2} \end{bmatrix} \tag{26}$$

(25) est nulle pour $d^i = d^i_{\min}$ ce qui conduit à

$$\{g\} + [H] \cdot \left(d^i_{\min} - d^i_{ini}\right) = 0 \tag{27}$$

et par la suite

$$d^i_{\min} = d^i_{ini} - [H]^{-1} \cdot \{g\} \tag{28}$$

Ce résultat conduit au calcul du pas permettant de tendre vers un minimum par la méthode de Newton-Raphson [JA1972]. Il faut remarquer que d^i_{ini} n'est pas obligatoirement très proche de $d^i_{\min}$ et que, de surcroît, Γ n'est pas obligatoirement une fonction quadratique. Voir figure 27. Pour ces raisons, afin de faire fonctionner le processus, il est nécessaire d'itérer. Dans le cas d'I*CASOFT*, l'algorithme de Newton-Raphson n'est utilisé que dans un espace monodimensionnel suivant la plus grande pente :

$$\partial d^i = \lambda \cdot \{p\} \tag{29}$$

avec $\{p\} = \{g\}$ pour la première itération. Ce qui revient à minimiser Γ en fonction de λ uniquement :

$$d^i_{\min} = d^i_{ini} - \frac{\frac{d\Gamma}{d\lambda}}{\frac{d^2\Gamma}{d\lambda^2}} \tag{30}$$

La méthode du gradient conjugué (Fletcher-Reeves [LU1989]) est ensuite utilisée pour effectuer la recherche du minimum dans une direction conjuguée par rapport au Hessien, mais sans avoir à le calculer, ce qui peut se traduire, en notant ic l'itération courante, par :

$$\{p_{ic+1}\} = -\{g_{ic+1}\} + \frac{\{g_{ic+1}\}^T \cdot \{g_{ic+1}\}}{\{g_{ic}\}^T \cdot \{g_{ic}\}} \cdot \{p_{ic}\} \tag{31}$$

Dans le cas d'I*CASOFT,* d^i_{ini} est recherché initialement par un balayage grossier dans une fenêtre d'une taille double de celle d'un pattern.

La propagation des solutions initiales

La propagation des solutions initiales aux patterns voisins est un point crucial de la robustesse des logiciels de corrélation d'images 2D, contrairement aux logiciels 2,5D (surfaces gauches) qui peuvent s'appuyer sur la géométrie épipolaire pour trouver les correspondances. Thèse de Patrice Clerc, chapitre 2 : [CL2001].

Le déplacement d'un pattern initial est calculé. Ses 8 plus proches voisins sont empilés dans une liste K FIFO (first in first out) à choix multiples. Deux cas se présentent alors :

1. Le calcul des déplacements est correct, le vecteur solution final de ce pattern sert de vecteur solution initial pour ses 8 plus proches voisins dans l'algorithme de minimisation.
2. Le calcul des déplacements est incorrect (non convergence de l'algorithme de minimisation), ce pattern est éliminé de la liste et est marqué comme mauvais afin de ne pas servir de vecteur solution initial.

Le choix du pattern suivant s'effectue par tirage dans la liste K suivant un roulement des 8 directions possibles :

1. Balayage des directions 1 à 4
2. Balayage des directions 8 à 1
3. Balayage des directions 4 à 1
4. Balayage des directions 1 à 4

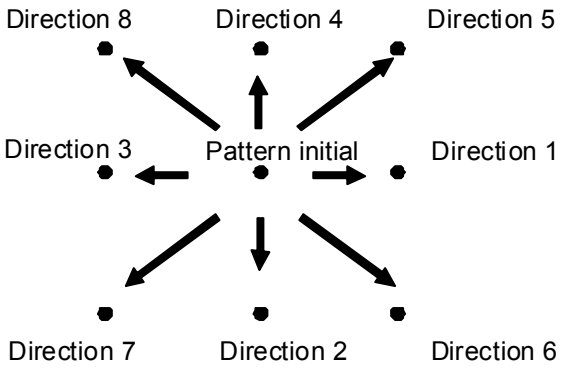


Figure 28 : Les 8 directions de propagation

Cet algorithme très simple a montré sa robustesse, même dans des cas de propagations gênées par le choix d'une zone de travail découpée, soit par des pertes de motifs aléatoires sur l'image finale qui se traduisent par des divergences dans l'algorithme de minimisation.

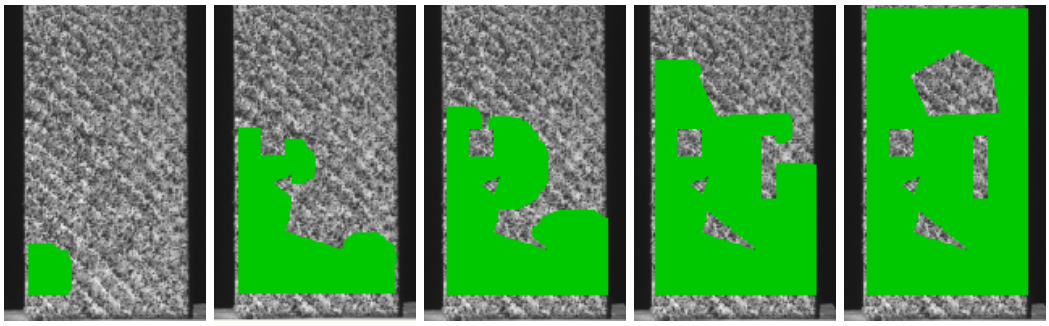


Figure 29 : Exemple de propagation gênée

Le post traitement des déplacements

En plus du traitement par élimination des résultats aberrants, mode sablier, distorsions non physiques qui sont traités en amont, de part les hypothèses d'un champ de déplacement identique pour chaque pattern, il est nécessaire de reconstruire un maillage avec une connectivité correcte. Le résultat brut pour quatre patterns adjacents partageant le même nœud peut par exemple ressembler au cas présenté sur la figure 30. Chaque point de la grille est donc au maximum la moyenne de quatre positions distinctes. Le post traitement des résultats donnés par le corrélateur se fait donc sur un maillage de type éléments finis à quatre nœuds avec une matrice de nœuds et une matrice de connectivité.

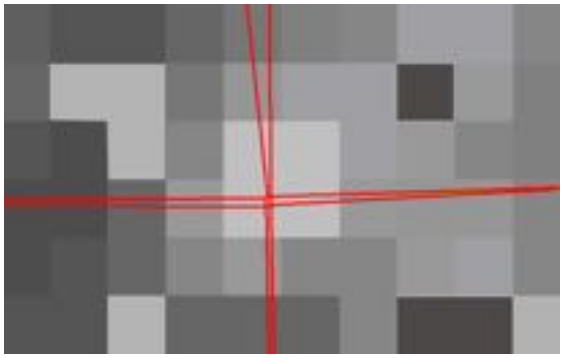


Figure 30 : Quatre patterns adjacents disjoints

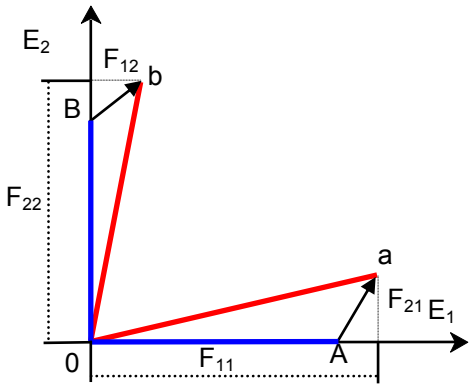


Figure 31 : Gradient de la transformation

Le formalisme utilisé pour le calcul des déformations est obligatoirement exprimé dans le cadre des grandes transformations : grands déplacements, grandes rotations, grandes déformations. Le point P de la figure 21 verra ses coordonnées transformées telles que :

$$\begin{cases} x_1 = F_{11} \cdot X_1 + F_{12} \cdot X_2 \\ x_2 = F_{21} \cdot X_1 + F_{22} \cdot X_2 \end{cases} \tag{32}$$

En considérant alternativement chaque sommet du pattern comme l'origine du repère (figure 31), deux points sont nécessaires et suffisants pour calculer $F_{11}, F_{12}, F_{21}, F_{22}$ qui sont les composantes du gradient de la transformation. A partir des composantes de $\overline{\overline{F}}$, le tenseur de Cauchy Green droit $\overline{\overline{C}}$, le tenseur des déformations de Green Lagrange $\overline{\overline{E}}$ sont calculés :

$$\overline{\overline{C}} = \overline{\overline{F}}^T \overline{\overline{F}} \text{ et } \overline{\overline{E}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\overline{\overline{F}}^T \overline{\overline{F}} - \overline{\overline{I}} \right) \tag{33}$$

Les valeurs propres et les directions propres du tenseur de Cauchy Green droit sont calculées afin de pouvoir déterminer les composantes du tenseur de Hencky dans leur repère principal :

$$C_I, C_{II} = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(C_{11} + C_{22} \right) \pm \sqrt{\left(C_{11} - C_{22} \right)^2 + 4 \cdot C_{12}^2} \right] \text{ et } \overline{\overline{H}} = \frac{1}{2} \ln(\overline{\overline{C}}) \quad (34)$$

En plus de ces composantes, il peut être utile de visualiser l'angle entre le premier axe principal de déformation et l'axe E_1 de l'image ainsi que la rotation locale. Pour le dépouillement particulier des essais sur tissus de type « bias test », nous avons introduit un nouveau champ de variable : l'angle de cisaillement défini comme :

$$\gamma = 2 \cdot atn\left(\sqrt{\frac{C_I}{C_{II}}} \right) \quad (35)$$

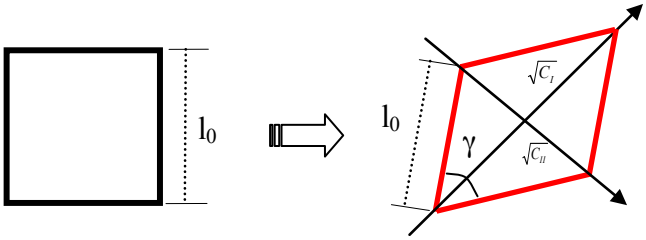


Figure 32 : Les 8 directions de propagation

Cette valeur n'est calculable que si les mailles du tissu respectent une cinématique de déformation en cisaillement pur c'est-à-dire si les mèches ne glissent pas au niveau des intersections mais qu'elles pivotent entre elles uniquement [DE2009].

Les débuts d'*ICASOFT*

Les premières maquettes d'*ICASOFT* ont été réalisées en 1994, les premiers résultats très prometteurs de la technique de corrélation d'images ont été présentés en marge du congrès Photomécanique 95. Pour mémoire, seules deux présentations exposaient ce genre de techniques lors ce congrès dédié aux méthodes de mesures optiques des déplacements en 1995. La naissance proprement dite du logiciel de corrélation a débuté avec la thèse de Siham Mguil-Touchal [MG1997]. L'écriture du programme en fortran puis en C++ intégrait déjà les grands principes énoncés dans la section précédente. Dès 1997 nous avons entamé une collaboration étroite avec le professeur Pierre Vacher, chercheur au Laboratoire de Mécanique Appliquée d'Annecy à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy (ESIA). Des échanges d'algorithmes entre les deux codes ainsi que l'organisation de benchmarks ont pu faire progresser rapidement nos logiciels respectifs [AP01 1999], [VA2003].

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de deux articles publiés dans des revues [AP02 1997] et [AP01 1999] ainsi que des publications dans les actes d'une conférence internationale [CF02 1997] et trois conférences nationales : [CF01 1996], [CF02 1996] et [CF01 1998].

La corrélation sur surfaces gauches

A la suite de la thèse de Siham Mguil-Touchal, *ICASOFT* ne pouvant fonctionner que pour des champs de déplacements plans en 2D, nous avons encadré avec le professeur Michel Brunet la thèse de Patrice Clerc qui a débuté en 1998. Une méthode de mesure de champs de déplacements et de déformations 2,5D (la notion de 3D étant réservée aux images issues de tomographes) par stéréovision basée sur la corrélation en niveaux de gris a été proposée. L'originalité de ce travail était que toutes les étapes de la chaîne de mesure (appariement, calibrage et reconstructions 3D) étaient basées sur la corrélation d'images numériques. Une méthode de calibrage du système stéréoscopique s'effectuait à partir d'une mire recouverte d'un motif aléatoire dont l'équation de la surface était connue.

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction de publications dans les actes de deux conférences internationales [CF02 1999] et [CF03 1999] et une conférence nationale : [CF02 2001].

Un des résultats important de cette thèse a été de montrer que les techniques de calibration sur mires aléatoires n'apportaient pas suffisamment de contraintes pour la détermination des paramètres extrinsèques du système stéréoscopique. Ceci se vérifie aujourd'hui avec les différents logiciels de stéréo corrélation commerciaux qui n'utilisent pas de mire aléatoire pour leur calibration. En 2006, j'ai effectué une étude de marché comparative pour choisir un système de stéréo corrélation : Nous avons retenu le logiciel de la société Correlated Solutions : VIC3D qui est actuellement largement utilisé au LaMCoS.

Evolutions successives d'*ICASOFT*

ICASOFT est composé de deux logiciels indépendants : le premier sert de pré et post traitement pour la mise en données et l'exploitation des résultats fournis par le second, le corrélateur. Chaque partie évolue de façon asynchrone suivant les corrections de bug et/ou demande d'amélioration de la part des utilisateurs. Actuellement, le source est composé d'un peu plus de 31.000 lignes de codes.

[1995-1994]

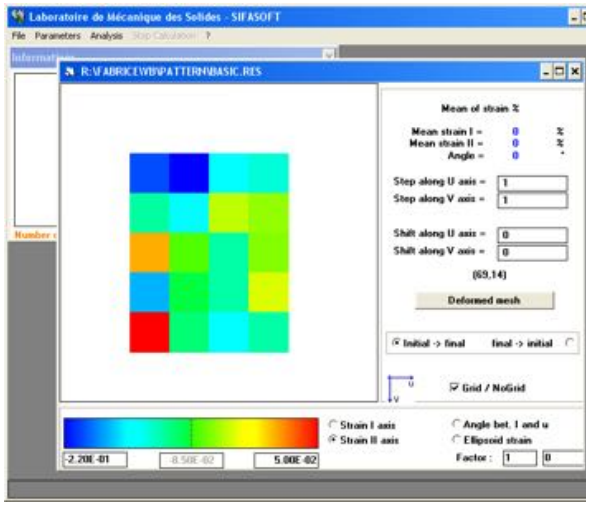
- Développement de la version 1.0 écrite en Visual Basic pour le pré post traitement, en fortran pour le corrélateur.

[1996-1995]

- Finalisation de la version 2.0. Le corrélateur est réécrit en Visual Basic et devient graphique. Un outil complet pour l'assistance à la détermination des points d'une CLF est inclus dans le post traitement.
- Prise en compte d'une interpolation spline-cubique pour l'interpolation des niveaux de gris des images.

[1997-1996]

- Finalisation de la version 3.0. d'*ICASOFT* qui est installée et personnalisée dans les entreprises suivantes : CEA, EDF, RENAULT.



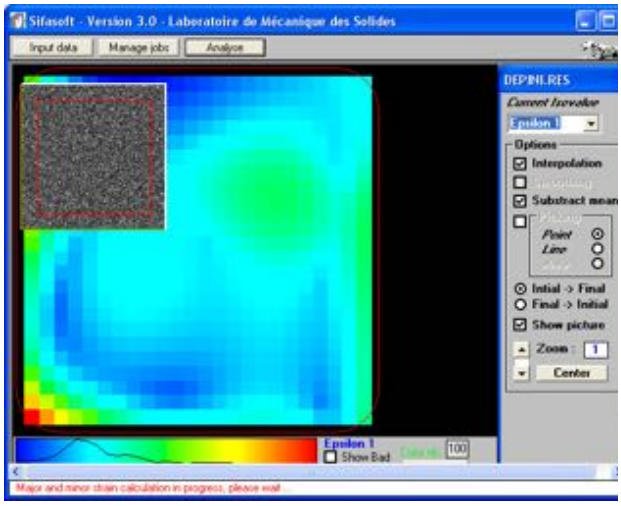


Figure 33 : ICASOFT version 2.x

Figure 34 : ICASOFT version 3.x

[1998-1997]

- Adaptation du logiciel *ICASOFT* pour sa vente et sa distribution par une société privée : TECHLAB.
- Evolution de la version 3.1 d'*ICASOFT*

[2003-2002]

- Développement de la version 4.4. *ICASOFT*. L'interface pour la mise en données est complètement revue et intègre des nouveautés comme la possibilité d'inclure des jauges de déformation.
- Installation de plusieurs licences chez PSA.
- Amélioration de l'extension permettant la détermination des points d'une CLF

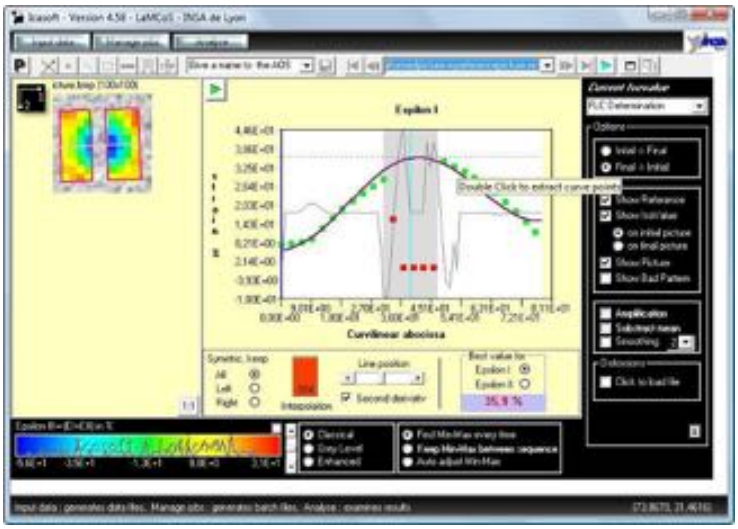


Figure 35 :Copie d'écran d'ICASOFT, détermination des points d'une CLF par la méthode de Bragard [BR1972]

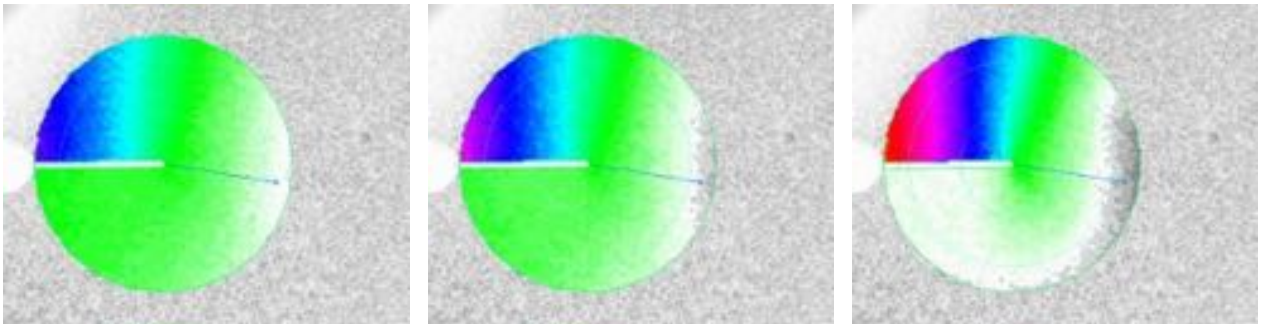
[2004-2003]

- Développement de la version 4.45 d'*ICASOFT* qui intègre à partir de cette version la gestion dynamique de la mémoire.
- La pré calcul de tous les coefficients intervenant dans l'interpolation spline-cubique des niveaux de gris permet de diminuer les temps de calcul par un facteur 10 !

[2005-2004]

- Développement de la version 4.54 d'*ICASOFT* permettant le calcul incrémental sur une séquence d'images. *ICASOFT* est à partir de cette version clairement orienté vers le dépouillement de séquences d'images issues de caméras rapides par exemple.
- Dans le pré et le post traitement, mise en place d'un module de calcul des facteurs d'intensité des contraintes dans *ICASOFT* en collaboration avec mes collègues Julien Réthoré et Anthony Gravouil [AP01 2005].

Les iso valeurs représentent la composante verticale du champ de déplacement.
Ces derniers sont de l'ordre de quelques centièmes de millimètre.
La flèche représente la direction future de propagation de la fissure.



Effort : 14000 N | Effort : 18000 N | Effort : 20000 N

Figure 36 : Module de calcul des facteurs d'intensité des contraintes

[2006-2005]

- Mise en place d'un site web pour la distribution et l'aide en ligne d'*ICASOFT* : http://icasoft.insa-lyon.fr, 1252 visiteurs en 2008, 1380 visiteurs pour le premier semestre 2009.

[2007-2006]

- Ajout dans la partie post traitement de l'angle de cisaillement rencontré dans les « Bias test » sur tissus.

[2009-2007]

- Développement de la version 4.65 d'*ICASOFT,* Version actuelle du logiciel.

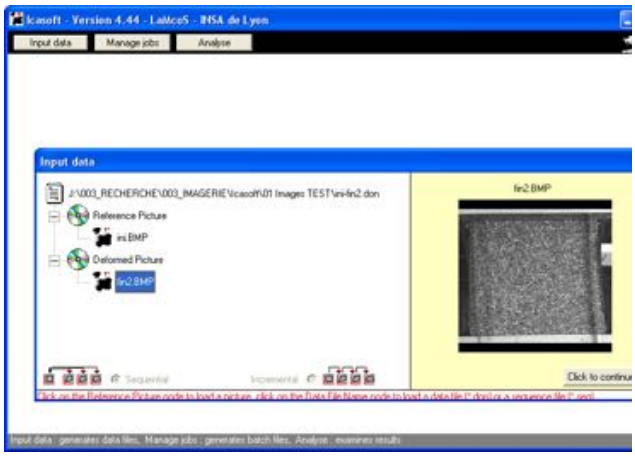


Figure 37 : ICASOFT version 4.x

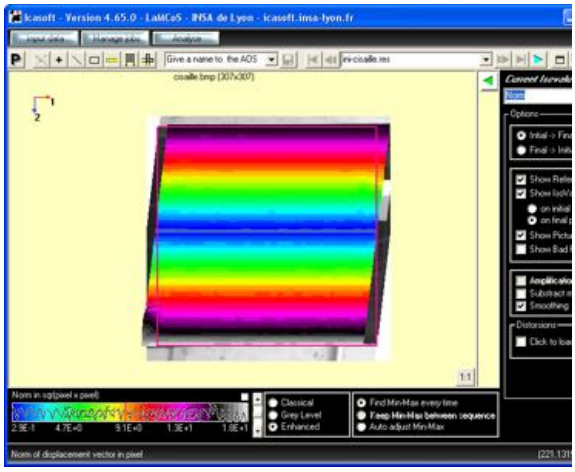


Figure 38 : ICASOFT version 4.65

Applications liées à *ICASOFT* dans le domaine de la mécanique des solides

Depuis 1995, les applications d'*ICASOFT* ont été très variées et très nombreuses. Ce logiciel est actuellement toujours utilisé au LaMCoS au cours de thèses ou de master. *ICASOFT* a été développé en collaboration avec quatre DEA/master et huit projets de fin d'études directement liés au logiciel lui-même. Il est à noter qu'*ICASOFT* est également utilisé en enseignement dans le cadre de plusieurs sujets de travaux pratiques. Au sein du LaMCoS et précédemment au sein du laboratoire de mécanique des solides, *ICASOFT*, en plus des applications précitées dans ce mémoire, a été utilisé pour les applications suivantes :

- Tous les essais de traction à froid et à chaud servant à la caractérisation des tôles.
- Suivi du déplacement d'un hexapode en cours de déploiement [AP01 2009]. Thèse de Gwenaëlle Aridon [AR2007].
- Estimation des facteurs d'intensité des contraintes en pointe de fissure [AP01 2005], [CF02 2005].
- Détection de fissures dans le cadre du projet ANR "Dynrupt" coordonné par mon collègue Anthony Gravouil et de la thèse de David Grégoire [GR2008] : [CF01 2007].
- Mesure des déplacements et des déformations sur peau humaine en cours de traction grande vitesse, [CF03 2004]. Thèse de Clémentine Jacquemoud [JA2007].
- Mesures de déformations provoquées par un cycle thermique haute température, [CF03 1998].
- Mesure de déformation sur bois, [CF02 2007]. Thèse de Pierre Simon [SI2009].

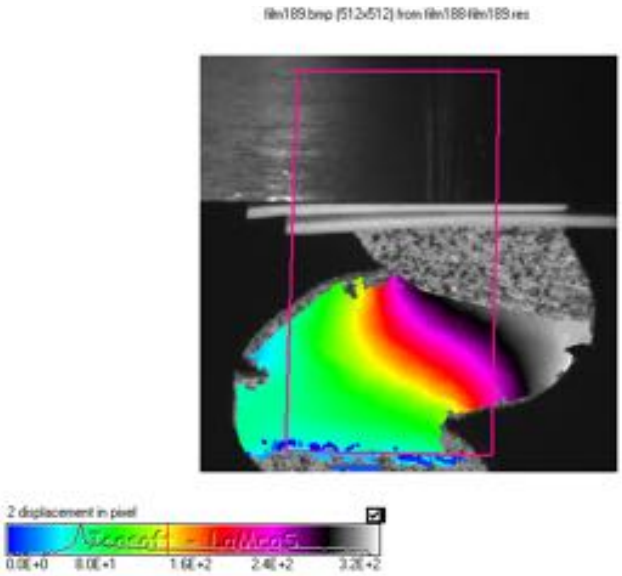


Figure 39 : Déplacement vertical sur un bois de cèdre en compression, version incrémentale d'ICASOFT, plus de 300 pixels de déplacement.

- Mesure du champ de déplacement sur une maquette représentant un terrain meuble autour d'un tunnelier [CF06 1998].
    - Cette utilisation d'*ICASOFT* dans l'équipe de géotechnique du LGCIE (Laboratoire génie civile de l'INSA de Lyon) a servi de moyens de mesure sur des maquettes composées de rouleaux de Schneebeli au cours de plusieurs thèses, la dernière étant celle d'Orianne Jenck [JE2005].
- Etude de la fracture osseuse sur os spongieux

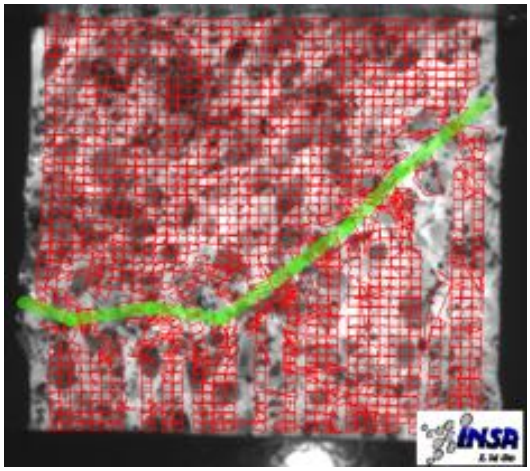


Figure 40 : Fracture osseuse sur os spongieux.

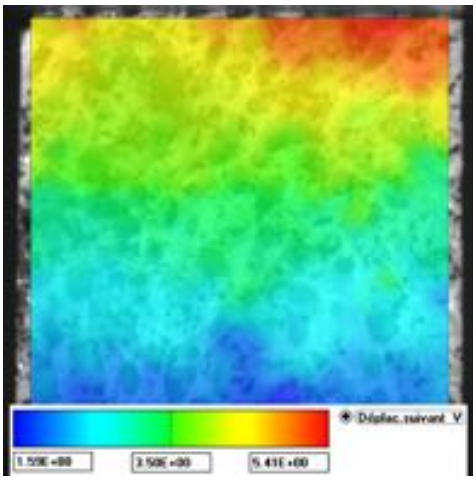


Figure 41 : Iso déplacements verticaux sur os spongieux en cours de compression.

NB : Certaines références données ci-après ont pu déjà être citées précédemment dans ce mémoire, *ICASOFT* étant souvent utilisé comme un des outils essentiels pour le dépouillement des champs de déplacements au cours de différents travaux de thèse.

L'ensemble de ces travaux a donné lieu à la rédaction de cinq articles publiés dans des revues [AP01 2009], [AP02 2008], [AP03 2008], [AP01 2005] et [AP05 2001] ainsi que des publications dans les actes de huit conférences internationales [CF01 2009], [CF03 2008] , [CF01 2007], [CF02 2007], [CF02 2005], [CF03 2004], [CF03 1998] et [CF06 1998].

Distribution nationale et internationale d'*ICASOFT*

Afin de diffuser le plus largement possible notre logiciel de corrélation, nous avons décidé de l'offrir gratuitement aux universitaires qui nous en feraient la demande après signature d'une licence d'utilisation. Les principaux licenciés sont :

- URGC – Géotechnique (LGCIE), INSA-LYON, France.
- Laboratoire CREATIS, INSA LYON, France.
- Laboratoire MATEIS UMR CNRS 5510, INSA LYON, France.
- Laboratoire GEM UMR CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, France.
- L'Ecole Centrale de Nantes, Division EuroCrash, France.
- LCPC - Centre de Nantes – MSC, France.
- INRETS, Lyon, France.
- Laboratoire de Biomécanique, UMR CNRS 8005, ENSAM, France.
- ENSAM CER d'Angers, France.
- ESTACA, France.
- LAMEFIP ENSAM de Bordeaux, France.
- IUT-SGM de Carquefou, France.
- University of Bacau, Roumanie.
- University of Iasi, Roumanie.
- Laboratoire de Génie Mécanique Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie.
- LPEM, Laboratoire des procèdes énergétique et métrologie, Faculté des Sciences et Technique Gueliz, Maroc.
- Department of civil eng. School of eng., Shiraz university, Iran.
- EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, IS-Beton, Suisse.
- Laboratoire de la technologie des matériaux CANMET, Ressources naturelles Canada, Canada.
- Department of Metals and Materials Engineering, Montréal, Canada.
- Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Canada.

- McMaster University, Hamilton, Canada.
- Centre for Advanced Materials Technology, Department of Materials Engineering, Monash University, Australie.
- School of Engineering and Technology, Deakin University, Australie.
- LPMM - UMR CNRS 7554, ISGMP, Université de Metz, France.
- Université catholique de Louvain (UCL), Unité d'ingénierie des Matériaux et des Procédés (IMAP), Belgique.
- Department of Mechanical Engineering, North-western University, USA.
- Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Portugal.

Je traite également régulièrement une dizaine d'études de cas par an pour des chercheurs qui m'envoient des photos afin d'obtenir des champs de déplacements. A titre d'exemple voici une demande venant d'Inde proposée par le chercheur Santosh G Shah, Structures Lab., Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science-Bangalore : Le but était de déterminer les facteurs d'intensité des contraintes en pointe de fissure pour une poutre en béton soumise à une sollicitation en flexion trois points.

Photo 16 : Poutre en béton pré fissurée soumise à flexion 3 points

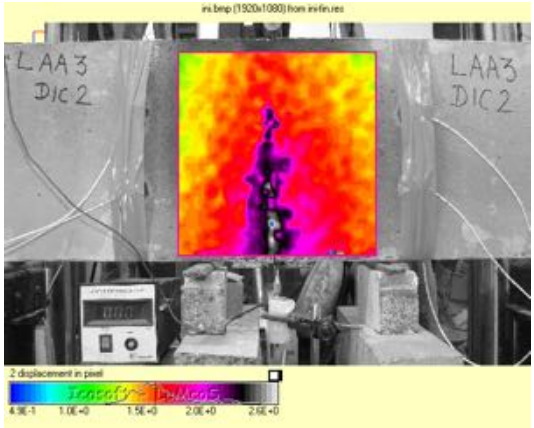


Figure 42 : Composante verticale du champ de déplacement déterminée avec ICASOFT

Voici un autre exemple des possibilités d'*ICASOFT* sur un matériau granulaire. Ce test a été proposé par Jacques Desrues du laboratoire 3S-R à Grenoble.

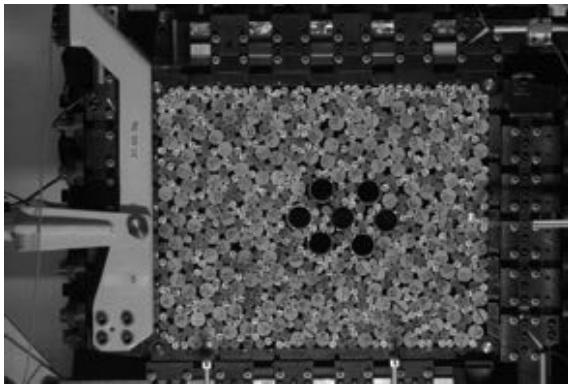


Photo 17 : Matériau granulaire sollicité en bi cisaillement

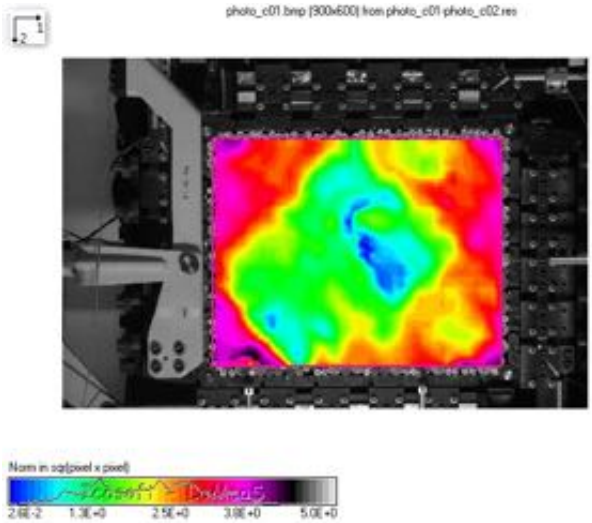


Figure 43 : Iso valeurs de la norme du déplacement déterminés avec ICASOFT

L'ensemble de ces collaborations représente un peu plus d'une centaine de licences d'*ICASOFT* utilisées dans le monde.

En plus des licences universitaires, *ICASOFT* est vendu aux industriels ou aux chercheurs désirant revendre les résultats obtenus pour des prestations auprès d'industriels. Parmi les utilisateurs les plus connus d'*ICASOFT*, je citerai :

- RENAULT
- PSA
- L'OREAL
- CEA / Le Ripault
- ÆDINCA
- ALCAN (ex PECHINEY)
- SOLVAY

Depuis 2008, *ICASOFT* est distribué sous contrat par la société MECANIUM.

Futures évolutions d'*ICASOFT*

ICASOFT a un taux d'évolution de plus en plus faible et se stabilise au cours du temps. Néanmoins, il va évoluer prochainement pour pouvoir traiter des images en niveaux de gris dont les pixels sont codés sur 12 et/ou 16 bits. Ce qui permettra, avec les nouvelles caméras CCD, de distinguer des zones aléatoires sur l'objet étudié sans avoir à le moucheter au préalable.

Autres applications utilisant la corrélation d'images

L'achat d'un logiciel de stéréo corrélation en 2006 a ouvert la voie pour d'autres applications utilisant la corrélation d'images. Ceci a permis, par exemple, des collaborations avec Djebar Baroudi et Gérard Debicki du LGCIE, INSA de Lyon concernant la mesure de la déformée de différents revêtements d'étanchéité sur paroi béton [CF02 2008]. Toujours en collaboration avec le LGCIE, INSA de Lyon, j'ai travaillé en 2006 et 2007 avec Jean Pera et Christian Ambroise, au cours de la thèse de Tina Guillot, à la mise au point d'un protocole expérimental permettant la détermination de topographie de bétons encore liquides afin d'étudier plus finement le phénomène de curling. Un article commun sur ce sujet est en cours de publication. Dans ces expérimentations, le motif aléatoire est vidéo projeté sur la surface encore liquide du béton. C'est en s'inspirant de cette technique, que nous avons développé avec mon collègue Hubert Maigre une nouvelle technique de mesure de topographie par stéréo corrélation sur tableaux peints sur bois par effacement préalable [CF01 2008].

Photo 18 : « Couronnement d'épines ». (Haut. : 143cm, larg. : 178cm. 3 planches Peintre Anonyme , 1563) Église St Didier / Avignon

Photo 19 : Tableau effacé virtuellement !

Photo 20 : Tableau effacé et moucheté par vidéo projection

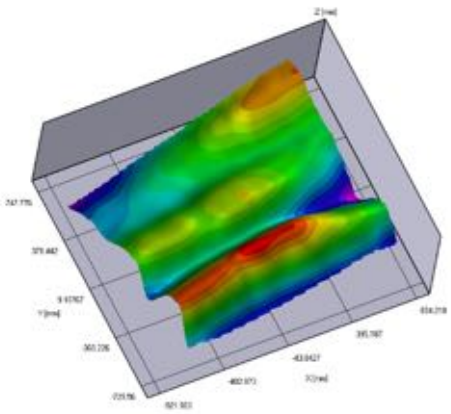


Figure 44 : Résultats 3D (Z par rapport un plan moyen amplifié) – précision de l'ordre de 5/100 mm en Z. On distingue clairement les 3 panneaux de bois.

Nous avons également utilisé la stéréo corrélation lors de la conception de mannequins pour la société DBApparel. Sur la figure 34, l'analyse des déformations du soutien gorge a permis la détermination des efforts au cours de la mise en place du sous vêtement.

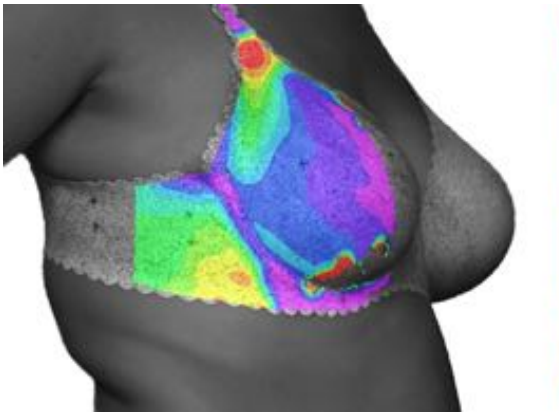


Figure 45 : Déformation de Hencky majeure,
résultats issus de VIC3D – Echelle retirée pour cause de confidentialité.

Conclusion sur mon activité de recherche liées à la mesure de déformations

La mesure de déformations sans contact est mon principal thème de recherche. Ce dernier est fortement lié à la programmation d'un logiciel, *ICASOFT* qui possède à mes yeux une qualité assez simpliste mais très gratifiante : il est très utilisé ! La corrélation 3D est promise à un bel avenir avec la multiplication des micros tomographes à rayon X. C'est un thème de recherche qui fait l'objet des attentions de mon collègue Julien Réthoré qui travaille également sur la mise en place de champs de déplacements discontinus à l'intérieur des équations de la corrélation. La corrélation 2D a été élégamment décrite et mise en équations par François Hild, Stéphane Roux et Julien Réthoré dans leurs publications [HI2006], [RE2007] mais aucune nouveauté majeure, à mon sens, n'est intervenue depuis 10 ans.

Pour ma part, je n'envisage pas de continuer à travailler sur les techniques de corrélation d'images qui me semblent matures dans leur état actuel sans la remanier profondément. Ce qu'il manque maintenant à cette technique, c'est de la robustesse et de l'adaptabilité. Je ne pense pas qu'on puisse obtenir cela sans refondre totalement notre vision de la mesure. Je souhaiterai orienter mes recherches sur un domaine encore mal exploré qui est l'introduction des champs de probabilité dans la mesure des champs de déplacements. Pour illustrer mon propos, je vais fournir un exemple très simple à l'aide des photos suivantes.

Photo 21 : La Joconde – Léonard de Vinci – couleurs supposées

Photo 22 idem – niveaux de gris 8 bits

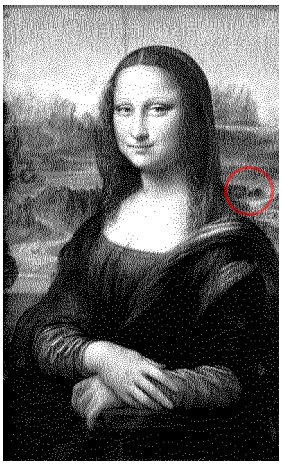


Photo 23 : idem – noir et blanc diffusion d'erreur

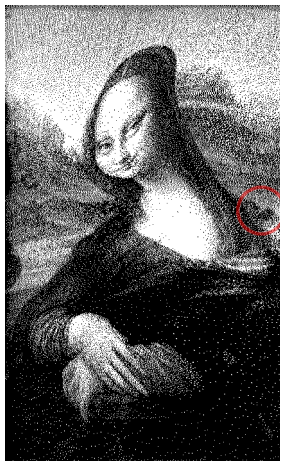


Photo 24 : idem – noir et blanc diffusion d'erreur et déformation

La première photo est en couleur (Photo 21), un détail du tableau est entouré par un cercle rouge. La photo suivante en partant de la gauche est une image en niveaux de gris (Photo 22). La suivante est une photo binaire (Photo 23), enfin, la dernière est binaire mais déformée artificiellement (Photo 24). A ma connaissance, actuellement, aucun logiciel de corrélation du commerce ou d'un laboratoire de recherche le plus en avance sur le domaine ne pourra retrouver le détail entouré par le cercle rouge (qui n'est représenté que pour les besoins de la démonstration). Et pourtant, un enfant de six ans à qui l'on montre le détail de la photo en couleur saura, en quelques fractions de seconde, retrouver ce même détail dans les trois autres photos. Je trouve cela merveilleux et un peu rageant à la fois ! ☺. Des esprits chagrins pourraient répliquer que les capacités de calcul du cerveau humain sont encore largement supérieures à celles d'un ordinateur de 2009, 10^{13} à 10^{19} instructions par seconde pour un cerveau contre 10^{10} instructions par seconde pour l'ordinateur [DE2003]. Mais faire tourner un calcul de corrélation 1000 fois plus vite ne changera rien au problème conceptuel du départ : comment retrouver une information comprise dans une image en couleur dans une image binaire, de surcroit déformée.

La solution viendra peut-être d'une approche probabiliste de l'analyse d'images comme le décrit Patrick Perez dans son habilitation à diriger des recherches [PE2003]. En effet, les images utilisées pour le traitement du signal en vision artificielle ne sont que des réalisations d'un champ de probabilités (au sens de Markov) au travers d'un capteur CCD. Il serait donc sans doute plus judicieux de travailler directement sur ce champ de probabilités. Un pixel noir ou blanc, dans le cas des deux images de droite, n'est que la réalisation de la probabilité qu'un certain nombre de photons atteigne le puits correspondant à un pixel sur le capteur CCD.

Mon objectif concernant cette thématique de recherche pour l'avenir est donc très simple : Pouvoir déterminer le champ de déplacements entre la Joconde de gauche et celle de droite ! Ceci aura l'avantage d'apporter un peu de robustesse aux logiciels de corrélation actuels qui sont très vite inopérants en cas d'effacement d'un morceau des motifs aléatoires ou d'occultations partielles de l'objet dont on mesure les déplacements par exemple.

J'ai choisi de sélectionner la publication [CF02 1997] présentée par Siham Mguil-Touchal lors d'une conférence à Rhodes en 1997 pour illustrer les bases sur lesquelles s'est construit *ICASOFT*.

Activités d'encadrement recherche 2ème et 3ème cycles

Encadrements associés - Thèses

Depuis 1994, j'ai co encadré quatre doctorants et j'ai apporté un soutien logistique important à deux doctorants en biomécanique. Voici le détail chronologique :

[2008-2005]

- Co encadrement (50%) d'une thèse (Emmanuel de Luycker) avec le Professeur Philippe Boisse sur la mise en forme de renforts tissés avant injection. « Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks ».

[2004-2001]

- Co encadrement (40%) d'une thèse (Barbara Autuori) avec le Professeur Michel Brunet, le Directeur de Recherche Jean Pierre Verriest de l'INRETS et la Chargée de Recherche Karine Bruyère-Garnier sur la mesure en trois dimensions des déformations par corrélation d'images numériques. « Modélisation par éléments finis de la face humaine en vue de la simulation du comportement au choc »

[2001-1997]

- Co encadrement (50%) d'une thèse (Patrice Clerc) avec le Professeur Michel Brunet sur la mesure en trois dimensions des déformations par corrélation d'images numériques. « Mesure de champs de déplacements et de déformations par stéréovision et corrélation d'images numériques »

[1997-1994]

- Co encadrement (50%) d'une thèse (Siham Touchal) avec le Professeur Michel Brunet sur la mesure automatisée par traitement d'images des déformations de surface. « Une technique de corrélation directe d'images numériques: application a la détermination de courbes limites de formage et proposition d'un critère de striction »

[2000-1997]

- Soutien logistique à une thèse (Karine Bruyère) de biomécanique encadrée par le professeur Claude Rumelhart. « Caractérisation et modélisation mécanique de l'os spongieux humain en relation avec ses propriétés structurales et architecturales ».

[1994-1997]

- Soutien logistique à une thèse (David Mitton) sur la caractérisation mécanique du tissu osseux chez le sujet âgé encadrée par le professeur Claude Rumelhart. « Caractérisation mécanique et structurale de l'os spongieux. Modèle animal et application a l'étude du vieillissement osseux humain »

Que sont ils devenus ?

David Mitton est Directeur de Recherche CNRS au Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs (LBMC, UMR_T 9406), à l'INRETS.

Karine Bruyère-Garnier est Chargée de Recherche CNRS au Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs (LBMC, UMR_T 9406), à l'INRETS.

Siham Mguil (Touchal) est Maître de Conférences à l'Institut de Mécanique des fluides et des Solides, Université de Strasbourg – UDS UFR Physique et Ingénierie

Patrice Clerc est fondateur et gérant de la société MECANIUM.
http://www.mecanium.fr

Barbara Autuori est ingénieur calcul chez Segula Technologies, intervenante pour :
- Renault Trucks
- Plasticomnium

Emmanuel de Luycker est Post-Doctorant aux Etats-Unis, UCSD San Diego dans l'équipe du Professeur BENSON.

Encadrements MASTER / DEA

J'ai encadré 17 masters (DEA) depuis 1992. La fluctuation de ces encadrements au cours du temps s'explique par l'équivalence entre les sujets de projets de fin d'études et les sujets de master dans le département GMC. Les étudiants de cinquième année, en GMC, peuvent effectuer leur master pendant leur scolarité normale. Les masters sont présentés selon mes thèmes de recherche et leur date de réalisation.

Plasticité

[2009-2008]

- Encadrement d'un master recherche : Formabilité des aluminiums à haute résistance pour l'automobile. ALCAN, dans le cadre du pôle de compétitivité Viaméca.

[2008-2007]

- Encadrement d'un master : Détermination de Courbes Limites de Formages à striction locale par stéréo corrélation d'images. Dans le cadre du projet ANR FORMEF (Mise en forme, retour élastique et formabilité des aciers à très haute résistance).

[2003-2002]

- Encadrement de deux D.E.A. sur la caractérisation de l'écrouissage des tôles utilisées en emboutissage : RENAULT.

[1997-1996]

- Encadrement d'un D.E.A. sur la comparaison numérique et expérimentale entre un écrouissage cinématique et un écrouissage isotrope. Re programmation du logiciel PLIAGE, et automatisation de l'essai de flexion alternée par mesure du rayon avec caméra vidéo.

[1996-1995]

- Encadrement d'un D.E.A. sur la comparaison numérique et expérimentale entre un écrouissage cinématique et un écrouissage isotrope. Calculs éléments finis sur Abaqus©, mise au point d'un essai de flexion alternée.
- Encadrement d'un D.E.A. sur l'étude d'un longeron à ailes repliées pour la société RVI

[1995-1994]

- Encadrement d'un D.E.A. sur l'étude du phénomène de rebond en emboutissage. Application à la détermination du retour élastique.

[1994-1993]

- Encadrement d'un D.E.A. sur l'amélioration du logiciel PLIAGE en introduisant une anisotropie initiale dans le modèle mécanique utilisé.
- Encadrement d'un D.E.A. sur la réalisation d'un logiciel pour calculer le retour élastique de profilés après tendage et pliage.

[1993-1992]

- Encadrement d'un D.E.A. sur la détermination de coefficients d'écrouissage d'une loi de comportement élasto-plastique.

Mesure de déformations

[1997-1996]

- Encadrement d'un D.E.A. sur la mesure de déformations par stéréovision appliquée à la corrélation d'images numériques

[1995-1994]

- Encadrement d'un D.E.A. sur la conception et l'utilisation d'un montage adaptable sur machine de traction universelle pour la détermination des courbes limites de formage par analyse d'images.

[1994-1993]

- Encadrement d'un D.E.A. et d'un projet de fin d'études sur les traitements et les dépouillements automatisés de grilles de déformation pour la détermination des courbes limites de formage en contrainte.

[1993-1992]

- Encadrement d'un D.E.A. et d'un projet de fin d'études sur les traitements et les dépouillements automatisés de grilles de déformation par caméra numérique haute définition.

Tissus

[2008-2007]

- Encadrement d'un master : Etude expérimentale des renforts des composites tissés par « Bias test » et corrélation d'images.

[2007-2006]

- Encadrement d'un master : Utilisation de méthodes optiques pour l'étude du « Bias test » sur des renforts composites.

Encadrements projets de fin d'études

J'ai encadré 34 projets de fin d'études depuis 1992. Chaque projet est généralement financé à hauteur de 3 à 8 kEuros. La durée d'accompagnement de l'étudiant est de quatre mois. Les projets de fin d'études sont présentés selon mes thèmes de recherche et leur date de réalisation.

Biomécanique

[2008-2007]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Conception et mise au point d'un mannequin bio fidèle de buste de femme (suite). DBApparel.

[2007-2006]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Conception et mise au point d'un mannequin bio fidèle de buste de femme. DBApparel. Projet récompensé par le premier prix du 15ème challenge ITECH et le premier prix UCMTF (Union des Constructeurs de Machines Textiles de France) 2007.
- Encadrement d'un projet cursus double diplôme Karlsruhe : Conception et mise au point d'un mannequin bio fidèle numérique de buste de femme. DBApparel

[2002-2001]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Etude du comportement mécanique et modélisation par éléments finis d'échantillons de calotte crânienne : INRETS
- Encadrement d'un projet de fin d'études : Caractérisation plastiques des tôles pour emboutissage (suite): RENAULT.

[1999-1998]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Etude d'implants pour la colonne vertébrale : SRA

Plasticité

[2009-2008]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Le retour élastique en pliage. CETIM.

[2006-2005]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Analyse expérimentale et numérique du retour élastique des tôles après emboutissage.

[2004-2003]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Caractérisation de l'écrouissage des tôles utilisées en emboutissage (suite) : RENAULT.

[2003-2002]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Détermination des courbes limites de formage des tôles avec mesure des déformations par corrélation d'images numériques : RENAULT.

[2002-2001]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Caractérisation plastiques des tôles pour emboutissage (suite): RENAULT.

[2001-2000]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Caractérisation plastiques des tôles pour emboutissage (suite): RENAULT.

[2000-1999]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Caractérisation plastiques des tôles pour emboutissage (suite): RENAULT.

[1999-1998]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Caractérisation plastiques des tôles pour emboutissage : RENAULT.
- Encadrement d'un projet de fin d'études sur la mise au point d'un essai de flexion alternée et son industrialisation chez RENAULT.
- Encadrement d'un projet de fin d'études sur l'automatisation d'un essai de flexion alternée pour la détermination des coefficients d'un écrouissage mixte.

[1998-1997]

- Encadrement d'un projet de fin d'études sur la détermination de courbes limites de formage dans le cadre d'un contrat Européen en partenariat avec RENAULT.

[1992-1991]

- Encadrement d'un projet de fin d'études sur l'optimisation d'un code de calcul pour la prévision du retour élastique.

Mesure de déformations

[2008-2007]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Amélioration d'un logiciel d'effacement pour mesure de déformations par stéréo-corrélation d'images.

[2006-2005]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Création d'un logiciel de calcul de champ de déformation tridimensionnel par corrélation d'images 3D (suite)

[2004-2003]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Création d'un logiciel de calcul de champ de déformation tridimensionnel par corrélation d'images 3D

[2004-2003]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Détermination des courbes limites de formage des tôles avec mesure des déformations par corrélation d'images numériques (suite) : RENAULT.

[2002-2001]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Mise au point d'un extensomètre double utilisant une caméra numérique et une technique de corrélation d'images.

[2001-2000]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Mesure de déformation et de déplacement 3D par corrélation d'images numériques. CEA, INRETS.

[2000-1999]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Mesure de déformations par corrélation d'images numériques, application à la détermination des courbes limites de formage : RENAULT, SNECMA, SOLLAC.

[1999-1998]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Mesure de déformation 3D par corrélation d'images

[1996-1995]

- Encadrement d'un projet de fin d'études sur les traitements et les dépouillements automatisés de motifs aléatoires pour la détermination des courbes limites de formage.

Tissus

[2009-2008]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Caractérisation des étoffes hybrides. PAYEN SA.

Autres

[2008-2007]

- Encadrement d'un projet de fin d'études à l'étranger (USA) : Développement d'un logiciel d'étude et d'analyse de grues mobiles. HOWARD SHAPIRO.

[2007-2006]

- Encadrement d'un projet de fin d'études Erasmus Mundus : Study of parallel implementation of Computational Codes.
- Encadrement d'un projet de fin d'études : Simulation de la fermeture d'une vanne papillon à l'aide d'Abaqus. TECOFI.
- Encadrement d'un projet de fin d'études : Aubes SNECMA.

[2005-2004]

- Encadrement d'un projet de fin d'études : Corrélation des efforts d'assemblage de dampers par la méthode des éléments finis : METALDYNE.
- Encadrement d'un projet de fin d'études : Simulation de douilles de calage : SNECMA.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La particularité de mon parcours dans l'enseignement supérieur est un équilibre entre les trois missions qui me passionnent dans ce métier : la recherche, l'enseignement et la gestion.

J'exerce mon métier d'enseignant chercheur depuis 14 ans à l'INSA de Lyon, mon enseignement se répartit pour 1/3 dans le domaine de la programmation informatique, niveau apprentissage, pour des élèves ingénieurs mécaniciens et 2/3 dans le domaine de la mécanique des solides dans deux départements d'option de l'INSA de Lyon : Génie mécanique conception, Génie énergétique et environnement. J'effectue en moyenne 200 heures équivalentes travaux dirigés par an depuis 1998. En plus des missions pédagogiques classiques comme l'encadrement des stages industriels, j'ai eu l'occasion de m'investir fortement dans la rénovation de plateforme de travaux pratiques ainsi que dans la création de nouvelles salles de travaux dirigées entièrement informatisées.

En ce qui concerne mes missions de gestion, la direction d'un service d'appui aux missions de l'INSA de Lyon par intérim pendant un an représente une de mes expériences professionnelles les plus enrichissantes. Dernièrement, j'ai également participé de manière active à l'organisation de la 11ème conférence internationale ESAFORM à Lyon qui a regroupé 450 participants venant de plus de 38 pays différents. Depuis 1997, j'ai encadré avec les professeurs Claude Rumelhart, Michel Brunet, Jean Claude Boyer et Philippe Boisse 6 thèses, 17 masters et 34 projets de fin d'études en interaction étroite avec mes collègues Michel Coret, Anthony Gravouil, Emmanuelle Vidal Sallé, Tarek Mabrouki, Hubert Maigre et Francis Sabourin.

La recherche et la valorisation sont également présentes dans mon parcours de manière équilibrée. J'ai conduit mes recherches avec notamment comme objectif, leur applicabilité à des problèmes concrets. Cela m'a amené naturellement à développer et à entretenir des contacts étroits avec le monde industriel. La diffusion d'un logiciel de mesures de champs de déplacements par corrélation d'images tel qu'*ICASOFT* ne se traduit pas directement en terme de publications dans mon curriculum vitae mais m'a apporté de nombreuses collaborations avec des laboratoires étrangers et nationaux. De façon quantitative, en termes de productions scientifiques, je suis coauteur de 26 articles de périodiques, 56 articles présentés lors de conférences et 2 brevets. Mon travail de recherche a porté essentiellement sur la mise au point d'expérimentations et de modèles numériques associés à un important volume de programmation écrits dans différents langages.

Durant ma carrière d'enseignant chercheur en tant que Maître de conférences j'ai pu démontrer mes capacités à encadrer et mener à bien des projets de recherche sur de longs termes qui ont souvent débouché sur des transferts industriels. Je pense avoir montré mes aptitudes au travail collaboratif au sein d'un groupe, d'une équipe, d'un service administratif et d'une école d'ingénieurs.

Mon souhait, à long terme c'est à dire dans les cinq ans avenirs, est maintenant de me tourner vers une recherche plus fondamentale orientée vers la théorie de l'information mais, bien sûr, toujours dans le but de servir la mécanique ! Les mesures de champs de déplacements seront toujours le cœur de mes thèmes de recherche avec une approche plus **stochastique** que déterministe. Cela permettra, sans doute, de rendre plus robustes les méthodes de corrélation d'images numériques actuelles dans le cas d'absences partielles d'informations au cours de la mesure. A titre d'exemple, ces cas sont nombreux dans le domaine de l'emboutissage lorsque les motifs sont partiellement effacés par des frottements tôle/outil ou dans le domaine des essais de caractérisations sur des renforts tissés présentant des mécanismes de recouvrement inter mèches qui masquent les motifs servant de support à la corrélation.

A plus court terme, les questions et les problèmes restant à traiter sont respectivement pour :

- La corrélation d'images : le **couplage** des champs de déformation avec les champs de température issus d'une caméra thermique est de plus en plus souhaitable. Les champs de probabilités associés aux deux champs sont certainement couplés par les différences d'émissivité du matériau par exemple. Ce couplage va permettre de déterminer de nouveaux critères de striction dans le cas de la caractérisation des métaux ou l'annonce de ruine imminente dans le cas d'études de structures. La corrélation d'images présente des limitations

en termes de précision sur la mesure des déformations de l'ordre de 10^{-5} ce qui ne permet pas la mesure de constantes élastiques telle que le coefficient de Poisson sur les matériaux métalliques. L'apport des techniques **d'interférométrie speckle** au LaMCoS vont certainement combler cette lacune et permettre la caractérisation élastique des matériaux hétérogènes en tout point de leur surface.

- La stéréo corrélation multi caméras : Outre les techniques de marquage de plus en plus sophistiquées comme celle avec effacement décrite dans ce mémoire, la stéréo corrélation avec **plus de deux caméras** présente encore des besoins importants de mise au point concernant la calibration. C'est par exemple le cas lors de mesure de déformations sur éprouvettes de traction planes, avec deux caméras filmant une face, les deux autres filmant l'autre face. La mise en correspondance d'un même repère pour les deux systèmes stéréoscopiques n'est pas faite en standard par les logiciels de stéréo corrélation actuels. Nous travaillons actuellement avec mon collègue Michel Coret à la mise au point d'un telle technique en utilisant une mire translucide et des changements de repère appropriés.

- La caractérisation des métaux : Je suis en train de montrer, avec les professeurs Michel Brunet et Sandrine Thuillier, par le croisement de résultats issus d'essais de cisaillement et de flexion alternée que **l'unicité des paramètres matériaux** pour l'identification d'un écrouissage mixte n'existe pas. Il est important de comprendre si cela correspond à un modèle théorique trop pauvre ou si les différents essais ne mettent pas en œuvre les mêmes mécanismes d'écrouissage. Cette ambigüité pourra être levée en comparant les paramètres d'écrouissage mixte issus des différents types d'essais pour un plus grand nombre de matériaux, ce que nous envisageons avec le laboratoire LIMATB et le partenaire industriel RENAULT. Le laboratoire ne dispose pas encore d'un essai de type « **bulge test** » permettant la caractérisation de la formabilité des tôles lors de la mise en forme par hydroformage par exemple. Cet essai fait actuellement l'objet d'une étude à la conception en partenariat avec la société MECANIUM et devrait être opérationnel dans le courant de l'année 2010. Enfin, les **courbes limites de formage à chaud** vont certainement faire l'objet d'une demande accrue de la part des industriels à cause de l'augmentation significative des process de formage à chaud du fait de l'emploi de tôles avec des limites d'élasticité de plus en plus élevées. Nous pourrons répondre à cette demande à l'aide du nouveau module d'emboutissage équipé de poinçons chauffants.

- Les renforts tissés : Les besoins de **nouveaux moyens d'essais** comme le test de Peirce (flexion libre) et/ou les emboutissages sous serre flan pour ce type de tissus se font de plus en plus sentir au fur et à mesure que les modèles numériques progressent. Des **essais à chaud** à plus de 300°C sont également en cours de développement au laboratoire. Les moyens de mesure des déformations associés sont encore à mettre au point, ce qui présage de nouveaux développements pour la mesure de déplacements sans contact, ce que je compte réaliser en collaboration avec mes collègues Tarek Mabrouki et Emmanuelle Vidal Sallé.

Pour conclure, l'habilitation à diriger des recherches est un diplôme universitaire qui sanctionne la reconnaissance du haut niveau scientifique du candidat, du caractère original de sa démarche dans un domaine de la science, de son aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large et de sa capacité à encadrer de jeunes doctorants. Je pense répondre à la plupart de ces différents critères, pour cette raison je propose ma candidature au diplôme d'habilitation à diriger des recherches.

BIBLIOGRAPHIE

[AR2007] ARIDON G., Dynamique du déploiement autonome d'un hexapode à rubans pour applications spatiales, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.

[AR1990] ARRIEUX, R. Détermination théorique et expérimentale des courbes limites de formage en contraintes. Thèse de docteur d'état es-sciences : INSA de Lyon, 1990. 235 pages.

[AR1981] ARRIEUX R. Contribution à la détermination des courbes limites de formage du titane et de l'aluminium, Proposition d'un critère intrinsèque. Thèse de Docteur Ingénieur, UCBL1 et Insa de Lyon, 1981, 138 p.

[AU2004] AUTUORI B. Modélisation par éléments finis de la face humaine en vue de la simulation du comportement au choc, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.

[AU2008] AUBERTIN P. Couplage de modèles atomique et continu, propagation dynamique de fissures, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.

[BA2008] BADEL P. Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.

[BO1974] BOIVIN M., BAHUAUD J. et RUMELHART C. Extensométrie en grande déformation. Lyon: INSA, 1974, 16 p, Rapports extraits de "Qualité, Revue Pratique de Contrôle Industriel". N° 66-67.

[BO1982] BOYER J.C. et BOIVIN M. Calcul du retour élastique et des contraintes résiduelles lors du pliage des tôles à haute limite d'élasticité. Mécanique Matériaux Electricité, Janvier 1982, n°385, p. 2-6.

[BR1972] BRAGARD A., BARET J. C., BONNARENS H. A simplified method to determine the FLD onset of localized necking. Liège, Rapport Centre de Recherche de la métallurgie, 1972, Vol. 35, p. 33

[BR2000] BRUYERE K. Caractérisation et modélisation mécanique de l'os spongieux humain en relation avec ses propriétés structurales et architecturales, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000.

[CA2009] CARBONNIERE J. Intégration d'une méthode de calcul d'outils d'emboutissage "faux" par prévision numérique du retour élastique des pièces embouties, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.

[CA2008] CARBONNIERE J., THUILLIER S., SABOURIN F., BRUNET M., MANACH P.Y., Comparison of the work hardening of metallic sheets in bending-unbending and simple shear, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 51, Issue 2, February 2009, Pages 122-130, ISSN 0020-7403, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.12.006.

[CL2001] CLERC P. Mesure de champs de déplacements et de déformations par stéréovision et corrélation d'images, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001.

[DE2009] DE LUYCKER E. Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.

[DE2003] DELAHAYE J.P., Les chiffres de la complexité informatique, POUR LA SCIENCE - n°314 décembre 2003, p. 162-167.

[JA1972] JAMES F., Function minimization, CERN, Geneva, Proceedings of the 1972 CERN Computing and Data Processing School, Petisau, Austria,10-24 September, 1972

[JA2007] JACQUEMOUD C. Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement de tissus biologiques mous sous chargement dynamique, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.

[J22007] JACQUEMOUD C., BRUYERE-GARNIER K. and CORET M. Methodology to determine failure characteristics of planar soft tissues using a dynamic tensile test. JOURNAL OF BIOMECHANICS,40(2) :468–475, 2007.

[JE2005] JENCK O., Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. Modélisation physique et numérique, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.

[GO1968] GOODWIN G. M. Application of the strain analysis to sheet metal forming problems in press shop. La métallurgia Italiana, 1968; N° 8, p. 767-772

[GR2008] GREGOIRE D., Initiation, propagation, arrêt et redémarrage de fissures sous impact, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.

[HE1975] HECKER S. S. Simple techniques for determining forming limit curves. Sheet Met. Ind, 1975, Vol. 52, p. 671-676

[HI2006] HILD, F., ROUX, S. Digital image correlation : from displacement measurement to identification of elastic properties - a review. Strain. Vol 42. Pages 69-80. 2006

[KE1965] KEELER S. P. Determination of forming limits in automotive stampings. Sheet Met. Ind.,1965, Vol. 42, p. 683-691

[LE1963] LEMS W. The change of Young's modulus after deformation at low temperature and its recovery. Ph. D Dissertation. Delft. 1963.

[LE1985] LEMAITRE J. et CHABOCHE J.L. Mécanique des matériaux solides. Editions DUNOD. Paris. 1985. 527 p.

[LU1989] LUENBERGER D.G., Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989, p. 253

[MA1967] MARCINIAK Z., KUCZYNSKI, K. Limit strains in the process of stretch-forming sheet metal. Int. J. Mech. Sci., 1967, Vol. 9, p. 609-620

[MA1992] MARCINIAK Z., DUNCAN J. The Mechanics of Sheet Metal Forming. Editions Edward Arnold, 1992. 160p.

[MG1997] MGUIL – TOUCHAL S. Une technique de corrélation directe d'images numériques : application a la détermination de courbes limites de formage et proposition d'un critère de striction, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997.

[MI1997] MITTON D. Caractérisation mécanique et structurale de l'os spongieux. Modèle animal et application a l'étude du vieillissement osseux humain, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997.

[PE2003] PEREZ P. Modèles et algorithmes pour l'analyse probabiliste des images, Habilitation à diriger des recherches: Université de Rennes 1, 2003.

[RE2007] RETHORE, J., ROUX, S., HILD, F. From pictures to extended finite elements : extended digital image correlation (X-DIC). Comptes-Rendus Mecanique. Vol 335. Num 3. Pages 131-137. 2007

[SI2009] SIMON P. Approche multi-échelle du comportement mécanique du bois dans le plan transverse, Thèse: INSA de LYON - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.

[SU1986] SUTTON M. A., MINGQI CHENG, PETERS W. H., CHAO Y. S., McNEILL S. R. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. Image and Vision Computing, août 1986, Vol. 4, N° 3, p. 143-150

[SU1983] SUTTON M. A., WOLTERS W. J., PETERS W. H., RANSON W. F., McNEILL S. R. Determination of displacements using an improved digital correlation method. Image and Vision Computing, août 1983, Vol. 1, N° 3, p. 133-139

[TO1993] TOURABI A., WACK B., GUELIN P., FAVIER D., PEGON P., NOWACKI W.K., Remarks on an experimental plane shear test and on an anisotropic elastic-plastic theory, SMIRT 93, Stuttgart, August 15-20, 1993, (Elsevier Sci. Pub1.,1993)

[TH2009] THUILLIER S. Caractérisation et prédiction du comportement mécanique des tôles métalliques et des élastomères, Habilitation à diriger des recherches: Université de Bretagne Sud, 2009.

[VA2003] VACHER P. Apport des techniques de corrélation d'images en mécanique : Analyse de déformations et numérisations 3D, Habilitation à diriger des recherches: Université de Savoie, 2003.

PUBLICATIONS

Articles de périodique (26 publications - 2 / an depuis 1996)

[2009-2008] (1)

[AP01 2009] - ARIDON G, REMOND D., MORESTIN F., BLANCHARD L., DUFOUR R. Self-deployment of a tape-spring hexapode: experimental numerical investigation. JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN, 2009 N°131, p. 8p.

[2008-2007] (4)

[AP01 2008] - BASARAB A., LIEBGOTT H., MORESTIN F., LYSHCHIK A., HIGASHI T., ASATO R., DELACHARTRE P. A method for vector displacement estimation with ultrasound imaging and its application for thyroid nodular disease. MEDICAL IMAGE ANALYSIS, 2008 Vol.12. p. 259 - 274.

[AP02 2008] - CAO J., AKKERMAN R., BOISSE P., CHEN J., CHENG H.S., DE GRAAF E.F., GORCZYCA J.-L., HARRISON P., HIVET G., LAUNAY J., LEE W., LIU L., LOMOV S.V., LONG A.C., DE LUYCKER E., MORESTIN F., PADVOISKIS J., PENG X.Q., SHERWOOD J., STOILOVA T.Z., TAO X.M., VERPOEST I., WILLEMS A., WIGGERS W., YU TX, ZHU B. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results. COMPOSITES PART A-APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING, 2008 Vol.39. Tome6, p. 1037 - 1053.

[AP03 2008] - LOMOV S.V., BOISSE P., DE LUYCKER E., MORESTIN F., VANCLOOSTER K., VANDEPITTE D., VERPOEST I., WILLEMS A. Full-field strain measurements in textile deformability studies. COMPOSITES PART A-APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING, 2008 N°8, Vol.39. p. 1232 - 1244.

[AP04 2008] - DE LUYCKER E., MORESTIN F., BOISSE P., MARSAL D. Simulation of 3D interlock composite preforming, Compos Struct (2008), doi:10.1016/j.compstruct.2008.06.005.

[2006-2005] (2)

[AP01 2006] - AUTUORI B., BRUYERE-GARNIER K., MORESTIN F., BRUNET M., VERRIEST J.P. Finite element modeling of the head skeleton with a new local quantitative assessment approach. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, 2006 N°5, Vol.53.

[AP02 2006] - DELACHARTRE P., LIEBGOTT H., LACOUTURE F., MORESTIN F., LYSHCHIK A., HIGASHI T., ASATO R. Modélisation bilinéaire et estimation du déplacement pour l'imagerie de l'élasticité appliquée au cancer de la thyroïde. Traitement du Signal, 2006 Vol.23. p. 235 - 245.

[2005-2004] (2)

[AP01 2005] - RETHORE J., GRAVOUIL A., MORESTIN F., COMBESCURE A. Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral. INTERNATIONAL JOURNAL OF FRACTURE, 2005 Vol.132. p. 65 - 79.

[AP02 2005] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. Failure analysis of anisotropic sheet-metals using a non-local plastic damage model. Journal of Materials Processing Technology, 2005 N°1/2, Vol.170. p. 457 - 470.

[2004-2003] (2)

[AP01 2004] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. Damage identification for anisotropic sheet-metals using a non-local damage model. International Journal of damage mechanics, 2004 Vol.13. p. 35 – 57

[AP02 2004] - SABOURIN F., MORESTIN F., BRUNET M. Sheet forming with a specific inverse approach for a further springback analysis. Numiform 2004, 2004 Vol.712. p. 832 - 837.

[2002-2001] (2)

[AP01 2002] - AUTUORI B., BRUYERE-GARNIER K., MORESTIN F., BRUNET M., VERIEST J.P. Assessment of a finite element model of the human facial bone structure. Archive of physiology and Biochemistry, 2002 Vol.110. p. 36 – 41

[AP02 2002] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. Failure prediction in anisotropic sheet-metals under forming operations using damage theory. International Journal of Forming Processes, 2002 N° 2-4, Vol.5. p. 225 - 235.

[2001-2000] (5)

[AP01 2001] - BRUNET M., MORESTIN F., SABOURIN F., GODEREAUX S. Identification of non-linear Kinematic Hardening with Bend reverse Bend experiments in Anisotropic Sheet-metal. International Journal of Forming Processes, 2001 N° 3-4, Vol.4. p. 395 - 411.

[AP02 2001] - BRUNET M., MORESTIN F., GODEREAUX S. Non-linear kinematic hardening identification for anisotropic sheet metals with bending-unbending tests. Journal of Engineering Materials and Technology , 2001, Vol.123, p.378- 383 .

[AP03 2001] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER H. Numerical analysis of failure in sheet metal forming with experimental validation. Revue Européenne des éléments finis, 2001, Vol.10, p.275- 293 .

[AP04 2001] - BRUNET M., MORESTIN F. Experimental and analytical necking studies of anisotropic sheet metals . Journal of Materials Processing Technology, 2001, Vol.112, p.214- 216 .

[AP05 2001] - MORESTIN F. Déformation de métaux : les mesures se précisent. Essais Industriels, ASTE 2001 N°18, p. 26 - 30.

[1999-1998] (1)

[AP01 1999] - VACHER P., DUMOULIN S. , MORESTIN F. , TOUCHAL S. Bidimensional strain measurement using digital images. Proc Instn Mech Engrs, 1999, Vol. 213, Part C, p. 811-817

[1998-1997] (2)

[AP01 1999] - BRUNET M., MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F. Analytical and experimental studies of necking in sheet metal forming processes. Journal of Material Processing Technology, Vol. 80-81 1998, p.40-46.

[AP02 1999] **-** BRUYERE K., MORESTIN F., BRUNET M., MITTON D., RUMELHART C. Cancellous bone strenght prediction using 2D spring lattice model. J. of biomechanics, 1998, Vol.31, n°suppl.1, p.61-61.

[1997-1996] (3)

[AP01 1997] - BRUNET M., MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F. Numerical and experimental analysis of necking in 3D sheet forming processes using damage variable. Advanced Methods in Material Processing Defects : M. Predeleanu and P. Gilormini. Elsevier Science B.V. ISBN 0-444-82271-2, p. 205-214

[AP02 1997] - TOUCHAL S., MORESTIN F. , BRUNET M. Mise au point d'une nouvelle méthode de mesure de champs de déformations par corrélation directe d'images numériques. European Journal of Mechanical Engineering, 1997, Vol.42, p.197- 204 .

[AP03 1997] - MORESTIN F. et al. Springback and 'rebound' phenomenom analysis with the software PLIAGE. Advanced Methods in Material Processing Defects : M. Predeleanu and P. Gilormini. Elsevier Science B.V. ISBN 0-444-82271-2, p. 341-348.

[1996-1995] (2)

[AP01 1996] - MORESTIN F. et al. Elastoplastic formulation using a kinematic work hardening model for springback analysis in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 56 - 1996 - pp. 619-630

[AP02 1996] - MORESTIN F. and BOIVIN M. About the necessity of taking into account the variation of the Young's modulus with plastic strain in an elastoplastic software. Nuclear Engineering and Design 162. (1996), pp. 107-116.

Conférences (56 publications - 3 / an depuis 1991)

[2009-2008] (2)

[CF01 2009] - RETHORE J., GREGOIRE D., MAIGRE H., MORESTIN F. A space-time correlation algorithm for digital high-speed camera images. Photomechanics 2008. Loughborough (Royaume-uni Angleterre), 2008-07-07-2008-07-09

[CF02 2009] – DRIDI S., MABROUKI T., MORESTIN F., DOGUI A., BOISSE P., Experimental analysis of Bias Extension and Picture Frame tests for woven fabric by Digital Image Correlation, International Conference of Applied Research in Textile, CIRAT-3, Sousse, Tunisia, 2008.

[2008-2007] (6)

[CF01 2008] - MAIGRE H., MORESTIN F. Image correlation applied to wood painting , Photomecanics, 2008.

[CF02 2008] - BAROUDI D., DEBICKI G., MORESTIN F. Apports de la stéréoscopie à l'étude des revêtements d'étanchéité sur paroi béton , Actes du Colloque CMOI 2008.

[CF03 2008] - LEE W., PADVOISKIS J., CAO J., DE LUYCKER E., BOISSE P., MORESTIN F., CHEN J., SHERWOOD J. Bias-extension of woven composite fabrics. 11TH ESAFORM CONFERENCE ON MATERIAL FORMING. Internationnal Journal of Material Forming Springer Paris Paris Villeurbanne (France), 2008-04-23-2008-04-25

[CF04 2008] - DE LUYCKER E., MORESTIN F., BOISSE P. Full-field strain measurements in composite preforming. Journée Scientifique et Technique Européenne AMAC : Apport des techniques de mesure de champ et des méthodes d'identification en mécanique des matériaux composites. Metz (France), 8200-02-07-2008-02-07

[CF05 2008] - DE LUYCKER E., MORESTIN F., BOISSE P., MARSAL D. Numerical analyses of 3D Interlock Composite Preforming. 2e Séminaire Annuel Macodev 2008. Sevrier (France), 2008-03-20-2008-03-20

[CF06 2008] - DE LUYCKER E., MORESTIN F., BOISSE P., MARSAL D. Numerical Analysis of 3D Interlock Composite Preforming. ESAFORM 2008 in International Journal of Material Forming. P. Boisse, E. Vidal-Sallé et F. Morestin Springer France Villeurbanne (France), 2008-04-23-2008-04-25

[2007-2006] (2)

[CF01 2007] - GREGOIRE D., MAIGRE H., MORESTIN F., COMBESCURE A. Estimation précise des facteurs d'intensité des contraintes par corrélation d'images numériques pour la recherche de critères de rupture fragile en dynamique. 4ème Séminaire LaMCoS. Valpré Lyon (France), 2007-01-11-2007-01-11

[CF02 2007] - SIMON P., EYHERAMENDY D., JULLIEN J.F., VIDAL-SALLE E., MORESTIN F. Study of the transverse structure of wood at different scales and consequences on the fracture modes. 3rd International Symposium on Wood Machining Properties of Wood and Wood Composites. P.Navi and A. Guidoum Presses Polytechniques et Universitaires Romandes Lausanne (Suisse), 2007-05-21-2007-05-23 p. 239 - 242.

[2006-2005] (1)

[CF01 2006] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. Non-local plastic-damage model for ductile rupture of sheet-metals. 9th European Mechanics of Materials Conference EUROMECH - MECAMAT Local approach to fracture . Moret sur Loing (France), 2006-05-09-2006-05-12 Vol.1. p. 155 - 160.

[2005-2004] (2)

[CF01 2005] - SIMON P., SABOURIN F., MORESTIN F., PHAN L. Direct identification of a combined hardening with a cyclic bending test. IDDRG 2005. Besançon (France), 2005-06-20-2005-06-22

[CF02 2005] - RETHORE J., GRAVOUIL A., MORESTIN F., COMBESCURE A. Stress intensity factors measurement and elastic plastic fracture investigation using digital image correlation. EUROMECH MECAMAT CONFERENCE. Cachan (France), 2005-09-13-2005-09-15

[2004-2003] (3)

[CF01 2004] - SABOURIN F., MORESTIN F., BRUNET M. 'Sheet forming with a specific inverse approach for a further springback analysis. NUMIFORM 2004. AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS Columbus Ohio 2004-06-13-2004-06-17 Vol.712. p. 832 - 837.

[CF02 2004] - AUTUORI B, BRUYERE GARNIER K., MORESTIN F., BRUNET M., VERRIEST J.P. Assessment of a 3D anatomical finite element model of the human maxillofacial complex using anatomical theory, 6th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Madrid, Spain, February 2004.

[CF03 2004] - JACQUEMOUD C., CLERC P., AUTUORI B., BRUYÈRE K., CORET M., MORESTIN F. Measurements of displacement and strain fields by numerical image correlation: applications to biological material testing, Workshop on Biomechanical Experiment, APSN, Graz, Austria, September 21, 2004.

[2003-2002] (3)

[CF01 2003] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. A non-local damage parameters identification for anisotropic sheet-metals. 6th Int. ESAFORM Conference on Material Forming. Salerno (Italie), 2003-04-28-2003-04-30 Vol.CDRom. p. 707 - 710.

[CF02 2003] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. Damage parameters identification for anisotropic sheet-metals. 9th International Conf. On the Mechanical behaviour of Materials. Genève (Suisse), 2003-05-25-2003-05-29

[CF03 2003] - AUTUORI B, BRUYERE GARNIER K., MORESTIN F., BRUNET M., VERRIEST J.P. Static experimental testing on facial bone and finite element modelling, In proceedings of the International Crash Worthiness and Design Symposium, Lille, France, December 2003.

[2002-2001] (8)

[CF01 2002] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. A unified failure criterion in sheet metal forming processes using damage theory. Numisheet 2002. JEJU ISLAND (Corée), 2002-10-21-2002-10-25 Vol.1. p. 561 - 566.

[CF02 2002] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. An unified approach for failure prediction in anisotropic sheet-metal firming in plasticity, damage and fracture at macro, miew and now scale. Plasticity 2002. Edited by AS Khan, O. Lopez, Pannies, Neat-Press Aruba 2002-01-03-2002-01-08 p. 379 - 382.

[CF03 2002] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. An unified failure prediction in anisotropic sheet-metals using damage theory. Proceeding of the 6th Mechanics of Material Conference (EMMGC) EUROMECH. Université de Liège (France), 2002-09-09-2002-09-12 p. 97 - 104.

[CF04 2002] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. Anisotropic ductile fracture in sheet-metal forming processes using damage theory. Proceeding of the 5th Internationnal ESAFORM Conference in material forming. Cracovie (Pologne), 2002-04-14-2002-04-17 p. 135 - 140.

[CF05 2002] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER-LE BERRE H. Damage identification for anisotropic sheet metal using a non local damage model. ASME International Congress. NEW ORLEANS (Etats unis d'amérique), 2002-11-17-2002-11-22 Vol.Pap 33.1

[CF06 2002] - BRUNET M. , MORESTIN F. , WALTER-LE BERRE H. A unified approach for failure prediction in anisotropic sheet-metal firming in plasticity, damage and fracture at macro, miew and now

scale . Plasticity 2002, Aruba, 03/01/2002- 08/01/2002, Edited by AS Khan, O. Lopez, Pannies, Neat-Press, 2002, p.379- 382.

[CF07 2002] - SABOURIN F., MORESTIN F., BRUNET M. Effect on non-linear kinematic hardening on spring-back analysis. Numisheet2002. Jejun Island (Corée), 2002-10-21-2002-10-25 p. 79 - 84.

[CF08 2002] - AUTUORI B., BRUYERE GARNIER K., MORESTIN F., BRUNET M., VERRIEST J-P. Assessment of a finite element model of the human facial bone structure. Archives of Physiology and Biochemistry, Vol. 10 Suppl., p.36, XXVIIème Congrès de la Société de Biomécanique, Valenciennes, 12-13 Septembre 2002.

[2001-2000] (4)

[CF01 2001] - BRUNET M., MORESTIN F., GODEREAUX S. Identification of non-linear kinematic hardening with bend/reverse bend experiments in anisotropic sheet-metals. 4th ESAFORM Conference on Material Forming, Liège, 23/04/2001- 25/04/2001, 2001, p.407- 410 .

[CF02 2001] - CLERC P. , MORESTIN F., BRUNET M. Mesure 3D de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images numériques. Photo Mécanique 2001, Poitiers, 24/04/2001-26/04/2001, GAMAC, 2001, p.33- 40.

[CF03 2001] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER H. Damage modelling in sheet-metals forming processes with experimental validations. 4th ESAFORM Conference on Material Forming, Liège, 23/04/2001- 25/04/2001, 2001, p.209- 212.

[CF04 2001] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER H. A unified failure approach for sheet-metals formability analysis. First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Boston, 12/06/2001- 15/06/2001, 2001, p.82- 84 .

[2000-1999] (2)

[CF01 2000] - BRUNET M., MORESTIN F., GODEREAUX S. Non-linear kinematic hardening identification for anisotropic sheet metals with bending-unbending tests. ASME, Manufactoring Engineering Division, Orlando, 01/11/2000- 05/11/2000, 2000, Vol.11, p.599- 604.

[CF02 2000] - BRUNET M., MORESTIN F., WALTER H. Numerical analysis of failure in sheet metal forming with experimental validation. EUROMECH 417 on Numerical Damage Modeling, Universitée de Troyes, 02/10/2000- 06/10/2000, 2000.

[1999-1998] (3)

[CF01 1999] - BRUNET M., MORESTIN F., CLERC P. Theoretical and experimental necking analysis of anisotropic sheet metal. Proceedings of Placity'99, Akhtar S. Khan Ed. Neat Press. Cancun, Mexico, january 5-13, 199. p.309-312.

[CF02 1999] - CLERC P., MORESTIN F. , BRUNET M. Mesure de champs de déformation 2D et 3D par corrélation d'images numériques. . Nouveaux moyens optiques pour l'industrie II, Mittelwihr, 17/11/1999-19/11/1999, 1999, p.245- 251.

[CF03 1999] - CLERC P., MORESTIN F., BRUNET M. Measurement of deformation fields using numerical images correlation. . AMPT'99 IMC16, Dublin, 1999, Vol.3, p.1889- 1897.

[1998-1997] (6)

[CF01 1998] - MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F., BRUNET M. Mesure des déformations par corrélation directe d'images numériques. Colloque Photomécanique 98 - Marne la Vallée, 14-16 avril 1998, p.361-368.

[CF02 1998] - MGUIL-TOUCHAL S., CLERC P., MORESTIN F., BRUNET M. Experimental determination of forming limit diagrams using a method of digital picture. IDDRG 98, proceeding of the 20th Biennal Congress, june 17-19, 1998, Genval Brussel, Belgium, p. 291-299.

[CF03 1998] - DELAME K., CAVALLO N. , MORESTIN F. , WAECKEL F. , JULLIEN JF. Mesures de déformations provoquées par un cycle thermique haute température, Méthode de corrélation d'images numériques. Photo Mécanique 1998, Marne La Vallée, 14/04/1998- 16/04/1998, 1998, p.249- 253 .

[CF04 1998] - BRUNET M., MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F. Comparison between experimental and theoretical forming limit diagrams for aluminium sheets : NUMIFORM'98 Simulation of Material Processing : Theory Methods and Applications, Huétink and Baaijens Eds. June 21-25 1998, University of Twente, Netherland, Balkena Ed., p.739-744.

[CF05 1998] - BRUYERE-GARNIER K., MITTON D. , ROUX J.P. , MORESTIN F. , RUMELHART C. Analyse structurale 2D de l'os spongieux de calcanéums humains et relations avec les propriétés mécaniques. Archives of Physiology and Biochemistry, 1998, Vol.106, n°suppl. B, p.202- 202 .

[CF06 1998] **-** AL ABRAM I., MATHIEU Ph., KASTNER R., MORESTIN F. Mesures de déplacements par imagerie numérique sur un modèle réduit simulant le creusement de tunnel. Photo Mécanique 1998, Marne La Vallée, 14/04/1998- 16/04/1998, Marne La Vallée: GAMAC, 1998, p.65- 72 .

[1997-1996] (2)

[CF01 1997] - MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F., BRUNET M. Use of damage model and method by correlation of digital pictures for the necking detection, SMiRT 14, Lyon, France, august 17-22, 1997. p. 129-136, Volume L04.

[CF02 1997] - MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F., BRUNET M. Various experimental applications of digital image correlation method, CMEM 97, Rhodes, 21/05-23/05/1997, p. 45-58.

[1996-1995] (2)

[CF01 1996] - MGUIL-TOUCHAL S., MORESTIN F. et BRUNET M. Mesure de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images numériques. Actes du Colloque National Mécamat'96, Mécanisme et Mécanique des grandes déformations, pp. 179-182, 29 janvier - 1er février 1996 (Aussois).

[CF02 1996] - MGUIL-TOUCHAL S. et F. MORESTIN F. Mesure de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images numériques. Carrefour de la Fondation - Région Rhône-Alpes - 16 février 1996 – CHARBONNIERES

[1995-1994] (2)

[CF01 1995] - MORESTIN F., BOIVIN M. and BOGAERT P. Mesure par imagerie appliquée à la détermination des courbes limites de formage des tôles. Colloque Photomécanique 95 - ENSET Cachan, 14-16 mars 1995

[CF02 1995] - MORESTIN F. et al. Springback analysis in orthotropic sheet metal forming with an elastoplastic formulation using a kinematic hardening model. Numiform'95 - Cornell University - Ithaca (New-York) - June 18-21, 1995

[1994-1993] (1)

[CF01 1994] - MITTON D., RUMELHART C., MORESTIN F. Résistance comparée en compression d'allogreffes osseuses lyophilisées puis radiostérélisées et d'allogreffes osseuses fraîches. Colloque Biomatériaux : Les Substituts Osseux en Orthopédie. Clermont-Ferrand (France), 1994.

[1993-1992] (5)

[CF01 1993] - MORESTIN F. et al. Elasto plastic formulation using a kinematic work hardening model for springback analysis in sheet metal forming. International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies. Dublin (Ireland), 1993, tome 3. p.1763-1774.

[CF02 1993] - MORESTIN F., BRUNET M. 2D Simulations, B-Sim6. Proceedings of the second international conference NUMISHEET93. Tokyo (Japon), 1993. p 623-659.

[CF03 1993] - MORESTIN F., BOIVIN M. Variation of the Young's modulus with plastic strain, applying to elastoplastic software. 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Stuttgart (Allemagne), 1993, Volume L. p. 141-146.

[CF04 1993] - MORESTIN F., BOIVIN M. Calcul du retour élastique des tôles après mise en forme, problème bidimensionnel. Symposium Européen ARIANE5, structures et technologies. Arcachon (France) :1993.

[CF05 1993] - MORESTIN F. Validation expérimentale du logiciel de calcul du retour élastique en emboutissage : PLIAGE. 11éme Congrès de la Mécanique. Villeneuve d'Ascq, 1993, tome 4. p. 369-372.

[1992-1991] (1)

[CF01 1992] - MORESTIN F. et al. Simulation numérique et étude expérimentale du retour élastique. Congrès international de la S.I.A. Paris, Ecole Polytechnique, 1992. 4 p.

[1991-1990] (1)

[CF01 1991] - MORESTIN F. et al. Développement d'un logiciel de calcul du retour élastique en pliage avec serre flan. 10éme Congrès de la Mécanique. Paris, 1991, tome 1. p. 237-240.

Ouvrages (5 publications)

[2008-2006] (1)

[OU01 2008] - BOISSE P., VIDAL-SALLE E., MORESTIN F. 11th ESAFORM Conference. Lyon, SPRINGER, 2008, CDROM.

[2001-2000] (1)

[OU01 2001] - BERTHAUD Y. , COTTRON M. , DUPRE J.C. , MORESTIN F. , ORTEU JJ. , VALLE V. Photo Mécanique 2001 Etude du Comportement des Matériaux et des Structures . Poitiers, GAMAC, 2001,ISBN 2-9516368-0-6

[1998-1997] (1)

[OU01 1998] - BERTHAUD Y., COTTRON M., MORESTIN F., MOUCHERONT P., TARONI M. Photomécanique 98, Etude du comportement des matériaux et des structures , Marne la Vallée, ISBN 2-7208-4010-6, 368 p.

[1993-1990] (1)

[OU01 1993] - MORESTIN F. Contribution à l'étude du retour élastique des produits plats lors de la mise en forme. Mémoire de Thèse de Mécanique. INSA de Lyon : 1993, n°1993196, 180 p.

[1990-1989] (1)

[OU01 1990] - MORESTIN F. Préprocesseur informatique de détermination des zones de même histoire de déformation pour le logiciel de calcul du retour élastique PLIAGE . Mémoire de D.E.A. de Mécanique. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire de Mécanique des Solides, 1990. 76 p.

Rapports de contrat (3 publications)

[1994-1993]

[RC 1994] - MORESTIN F., DUHAU R. Etude d'un procédé de mesure des déformations progressives par la méthode de la grille. Rapport final de contrat EDF/SEPTEN - Laboratoire Béton et Structures. Lyon, 1994, 78 p.

[1992-1991]

[RC 1992] - MORESTIN F. Compte rendu d'expérimentation sur le retour élastique des tôles après emboutissage. Rapport intermédiaire de contrat RENAULT-INSA. Lyon: 1992, 36 p.

[1989-1988]

[RC 1989] - MORESTIN F. Retour élastique d'une tôle après pliage - dépliage. Lyon : INSA, Laboratoire de Mécanique des Solides, Billancourt : Service méthodes emboutissage de la Régie RENAULT, 1989. 169 p. Rapport de stage.

Brevets (2 publications)

[2009-2008]

[BR 2009] - MORESTIN F. Sangle réglable en longueur et en raideur. N°de dépôt : PCT/FR 2009/051103.

[1998-1996]

[BR 1998] - MORESTIN F. Procédé de détection et son dispositif de mise ne œuvre destiné à détecter le vol d'appareils et plus particulièrement le vol d'appareils informatiques .

ANNEXES

Coefficients d'interpolation spline cubique

$$C(0, x_1, x_2) = \frac{14}{225} m + \frac{4}{225} p - \frac{8}{75} 8 o + \frac{2}{75} n + \frac{49}{225} a + \frac{14}{225} d + \frac{7}{75} b - \frac{28}{75} c + \frac{1}{25} z - \frac{4}{25} g + \frac{2}{75} h - \frac{4}{25} j - \frac{8}{75} l + \frac{16}{25} k + \frac{7}{75} e - \frac{28}{75} i \quad \text{(A0)}$$

$$C(1, x_1, x_2) = \frac{6}{25} n + \frac{2}{75} p - \frac{4}{25} o - \frac{28}{75} a + \frac{7}{75} d + \frac{21}{25} b - \frac{14}{25} c + \frac{1}{25} h + \frac{9}{25} z - \frac{6}{25} g + \frac{24}{25} k - \frac{36}{25} j - \frac{4}{25} l - \frac{8}{75} m - \frac{4}{25} e + \frac{16}{25} i \quad \text{(A1)}$$

$$C(2, x_1, x_2) = -\frac{2}{15} n + \frac{2}{15} o - \frac{2}{45} p + \frac{7}{45} a - \frac{7}{15} b + \frac{7}{15} c - \frac{7}{45} d - \frac{1}{5} z + \frac{1}{5} g - \frac{1}{15} h - \frac{4}{5} k + \frac{4}{5} j + \frac{4}{15} l + \frac{2}{45} m + \frac{1}{15} e - \frac{4}{15} i \quad \text{(A2)}$$

$$C(3, x_1, x_2) = -\frac{2}{15} n - \frac{1}{5} z + \frac{4}{5} j - \frac{7}{15} b \quad \text{(A3)}$$

$$C(4, x_1, x_2) = -\frac{4}{25} l + \frac{24}{25} k + \frac{7}{75} m + \frac{2}{75} p - \frac{4}{25} o + \frac{1}{25} n - \frac{28}{75} a - \frac{8}{75} d - \frac{4}{25} b + \frac{16}{25} c + \frac{9}{25} z - \frac{36}{25} g + \frac{6}{25} h - \frac{6}{25} j + \frac{21}{25} e - \frac{14}{25} i \quad \text{(A4)}$$

$$C(5, x_1, x_2) = -\frac{6}{25} l - \frac{4}{25} m + \frac{9}{25} n + \frac{1}{25} p - \frac{6}{25} o + \frac{16}{25} a - \frac{4}{25} d - \frac{36}{25} b + \frac{24}{25} c + \frac{9}{25} h + \frac{81}{25} z - \frac{54}{25} g + \frac{36}{25} k - \frac{54}{25} j - \frac{36}{25} e + \frac{24}{25} i \quad \text{(A5)}$$

$$C(6, x_1, x_2) = \frac{6}{5} j + \frac{2}{5} l - \frac{1}{15} p + \frac{1}{15} m - \frac{1}{5} n + \frac{1}{5} o - \frac{4}{15} a + \frac{4}{5} b - \frac{4}{5} c + \frac{4}{15} d - \frac{9}{5} z + \frac{9}{5} g - \frac{3}{5} h - \frac{6}{5} k + \frac{3}{5} e - \frac{2}{5} i \quad \text{(A6)}$$

$$C(7, x_1, x_2) = -\frac{1}{5} n - \frac{9}{5} z + \frac{6}{5} j + \frac{4}{5} b \quad \text{(A7)}$$

$$C(8, x_1, x_2) = -\frac{7}{45} m - \frac{2}{45} p + \frac{4}{15} o - \frac{1}{15} n + \frac{7}{45} a + \frac{2}{45} d + \frac{1}{15} b - \frac{4}{15} c - \frac{1}{5} z + \frac{4}{5} g - \frac{2}{15} h + \frac{1}{5} j + \frac{2}{15} l - \frac{4}{5} k - \frac{7}{15} e + \frac{7}{15} i \quad \text{(A8)}$$

$$C(9, x_1, x_2) = \frac{4}{15} m - \frac{3}{5} n - \frac{1}{15} p + \frac{2}{5} o - \frac{4}{15} a + \frac{1}{15} d + \frac{3}{5} b - \frac{2}{5} c - \frac{1}{5} h - \frac{9}{5} z + \frac{6}{5} g - \frac{6}{5} k + \frac{9}{5} j + \frac{1}{5} l + \frac{4}{5} e - \frac{4}{5} i \quad \text{(A9)}$$

$$C(10, x_1, x_2) = \frac{1}{9} p - \frac{1}{9} m + \frac{1}{3} n - \frac{1}{3} o + \frac{1}{9} a - \frac{1}{3} b + \frac{1}{3} c - \frac{1}{9} d + z - g + \frac{1}{3} h + k - j - \frac{1}{3} l - \frac{1}{3} e + \frac{1}{3} i \quad \text{(A10)}$$

$$C(11, x_1, x_2) = \frac{1}{3} n - j + z - \frac{1}{3} b \quad \text{(A11)}$$

$$C(12, x_1, x_2) = -\frac{7}{15}\ e - \frac{1}{5}\ z + \frac{4}{5}\ g - \frac{2}{15} h \tag{A12}$$

$$C(13, x_1, x_2) = \frac{4}{5}\ e - \frac{1}{5}\ h - \frac{9}{5}\ z + \frac{6}{5}\ g \tag{A13}$$

$$C(14, x_1, x_2) = -\frac{1}{3} e + z + \frac{1}{3}\ h - g \tag{A14}$$

avec

a = f(-1,-1), b = f(-1,0), c = f(-1,1), d = f(-1,2), e = f(0,-1), z = f(0,0),
g = f(0,1), h = f(0,2), i = f(1,-1), j = f(1,0), k = f(1,1), l = f(1,2),
m = f(2,-1), n = f(2,0), o = f(2,1), p = f(2,2)

Sélection de publications

[AP02 1996] MORESTIN F. , BOIVIN M. About the necessity of taking into account the variation of the Young's modulus with plastic strain in an elastoplastic software. Nuclear Engineering and Design 162. (1996), pp. 107-116.

[CF03 2003] - AUTUORI B, BRUYERE GARNIER K., MORESTIN F., BRUNET M., VERRIEST J.P. Static experimental testing on facial bone and finite element modelling, In proceedings of the International Crash Worthiness and Design Symposium, Lille, France, December 2003.