



**Institut Jean le Rond d'Alembert**

**Université Pierre et Marie Curie**

**UMR CNRS 7190**

***Rapport Scientifique***

***2004-2007***



## *Table des matières*

### *CHAPITRE 1 Présentation iii*

### *CHAPITRE 2 Fluides Complexes et Instabilités Hydrodynamiques 3*

<b>A - Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>B - Biomécanique fluide.....</b>	<b>5</b>
<b>C - Gouttes, Bulles et changement de phase. ....</b>	<b>7</b>
• <i>Méthodes numériques</i> 7	
• <i>Étude numérique de l'atomisation des jets liquides</i> 8	
• <i>Impacts de gouttes</i> 9	
<b>D - Instabilités et tourbillons .....</b>	<b>11</b>
• <i>Instabilités de Tourbillon</i> 11	
• <i>Instabilités gravitationnelles</i> 12	
• <i>Instabilités : autres cas</i> 13	
<b>E - Mélanges diphasiques, milieux granulaires .....</b>	<b>15</b>
• <i>Mélanges diphasiques</i> 15	
• <i>Milieux Granulaires</i> 16	
<b>F - Fluides supercritiques.....</b>	<b>21</b>
• <i>Caractérisation théorique des mécanismes de relaxation dans les fluides supercritiques</i> 21	
• <i>Dynamique de corrosion en fond de fissure en eau supercritique.</i> 22	
<b>G - Microfluidique .....</b>	<b>23</b>
<b>H - Perspectives.....</b>	<b>25</b>
<b>Publications F.C.I.H.....</b>	<b>27</b>

## CHAPITRE 3 *Fluides Réactifs et Turbulence* 41

<b>A - Introduction</b> .....	41
<b>B - Turbulence, Interaction, Aéroacoustique</b> .....	43
• <i>Modélisation de la turbulence</i> 44	
• <i>Aéroacoustique</i> . 46	
• <i>Aérodynamique : analyse physique et contrôle</i> . 47	
• <i>Couplage fluide-structure</i> . 48	
• <i>Écoulements diphasiques - injection et atomisation dans les chambres de combustion</i> . 50	
<b>C - Combustion alternative, dépollution, turbulence et cinétique</b> . . . . .	53
<b>D - Méthodes expérimentales et métrologie</b> . . . . .	56
<b>E - Méthodes numérique stochastiques et déterministes, quantification des incertitudes, optimisation et contrôle</b> . . . . .	61
<b>F - Perspectives</b> . . . . .	64
• <i>Présentation générale</i> 64	
• <i>Thèmes de recherche prioritaires pour la période 2009-2012</i> 65	
<b>Publications F.R.T.</b> . . . . .	69

## CHAPITRE 4 *Lutheries - Acoustique - Musique* 89

<b>A - Introduction</b> .....	89
<b>B - Instruments de musique et voix</b> .....	91
• <i>Paramètres de facture</i> 92	
• <i>Contrôle et geste instrumental</i> 95	
• <i>La voix Humaine</i> 97	
<b>C - Perception et cognition</b> .....	101
• <i>Diversité des constructions cognitives élaborées à partir du matériau sonore</i> 102	
• <i>Catégories cognitives et qualités acoustiques</i> 104	
• <i>Constructions langagières et cognitives</i> 107	
<b>D - Techniques audio</b> .....	109
• <i>Traitement du signal</i> 110	
• <i>Patrimoine et culture : préservation du patrimoine sonore</i> 111	
• <i>Lutheries électroniques et création musicale</i> 113	
• <i>Electroacoustique et acoustique des salles</i> 115	
<b>E - Perspectives</b> . . . . .	117
• <i>Thèmes en émergence</i> 117	
• <i>Besoins humains et matériels</i> : 117	
<b>Publications L.A.M.</b> . . . . .	119

## CHAPITRE 5 Mécanique et Ingénierie des Solides et Structures 135

<b>A - Introduction</b> .....	135
<b>B - Mécanique de la rupture</b> .....	137
• Amorçage des fissures dans les matériaux et les structures fragiles	137
• Critères d'amorçage et modèles cohésifs	139
• Modèles cohésifs et lois de fatigue de type Paris	139
• Rupture dynamique et rupture quasi-statique avec instabilité	140
• Sensibilité des modèles cohésifs à la présence de défauts initiaux	141
• Trajet de propagation de fissures en rupture fragile tridimensionnelle	142
• Morphologies de fissures lors du séchage de fluides complexes	144
• Rupture ductile des métaux	147
• Fatigue des élastomères	148
<b>C - Calcul et optimisation des structures</b> .....	149
• Non-linéarités et couplages multi-physiques en optimisation structurale	149
• La méthode polaire-génétique en conception et optimisation de structures et de matériaux « structures » : anisotropie et couplages multi-physiques	151
• Optimisation de structures minces renforcées	154
• Conception optimale de structures composites stratifiées avec prise en compte de contraintes de faisabilité	156
• Couplages multiphysiques dans les turboréacteurs de nouvelle génération	157
• Nano composites et nano structures	158
• Propriétés amortissantes des structures comportant des éléments viscoélastiques	159
<b>D - Structures élancées</b> .....	160
• Coques minces	160
• Rupture des tiges et plaques	160
• Vibrations non linéaires et précontraintes: application à la modélisation des instruments de musique	163
<b>E - Comportement et endommagement des matériaux</b> .....	164
• Approches multi-échelles pour le comportement et l'endommagement de milieux hétérogènes	164
• Endommagement et couplages multiphysiques dans les milieux hétérogènes	166
• Endommagement anisotrope du béton	169
• Modèles non locaux	170
<b>F - Perspectives</b> .....	171
<b>Publications M.I.S.E.S.</b> .....	173

## CHAPITRE 6 *Modélisation - Propagation - Imagerie - Acoustique* 195

<b>A - Introduction</b> .....	195
<b>B - Propagation linéaire, ultrasons et vibrations : théorie et expérimentation</b> .....	198
• Ondes de surface en élasticité linéaire	198
• Ondes de bord	199
• Guides d'ondes piézoélectriques ou piezo-semiconducteurs	200
• Adhésion : microstructure et contrôle par ultrasons	200
• Suivi de la prise de bétons fluides par ultrasons	203
• Tomographie ultrasonore d'écoulements fluides	204
• Mécanique des matériaux adaptatifs	205
• Vibrations et imagerie du champ proche	208
• Transferts solidiens et rayonnement acoustique (Contrat d'encadrement de recherche avec le Centre d'Etudes des Vibrations et de l'Acoustique Automobile - Rouen)	212
• Qualification de méthodes	213
<b>C - Propagation non linéaire: Théorie et expérimentation</b> .....	215
• Introduction	215
• Forces motrices et propagation de singularités	216
• Aéroacoustique	218
<b>D - Acoustique sous-marine</b> .....	224
• Caractérisation des fonds marins	224
• Imagerie multi-harmonique	225
• Détection d'objets enfouis	226
<b>E - Problèmes de bio-mécanique et bio-physique</b> .....	228
• Bio-mécanique non linéaire de la peau	228
• Propriétés mécaniques de la paroi artérielle	228
• Tige élastiques, applications à quelques objets biologiques	229
• Autres travaux :	231
<b>F - Perspectives</b> .....	232
<b>Publications M.P.I.A.</b> .....	235
• Revues à Comité de lecture	235
• Ouvrages	242
• Chapitres d'ouvrages	243
• Colloques avec actes	244
• Colloques sans actes	251
• Thèses	252
• Rapports de contrat	252
• Brevets	255
• Autres	255

## CHAPITRE 7 *Annexe* 257



---

# Préambule

Ce rapport présente les activités de l'Institut d'Alembert et des unités préexistantes sur la période 2003-2007.

Ce document est destiné dans un premier temps à être remis aux tutelles en vue de la demande de contractualisation. Dans un deuxième temps, il constituera un outil de communication du laboratoire, permettant de présenter ses activités de recherche d'une manière détaillée aux partenaires académiques, aux organismes et aux entreprises.

L'établissement d'un tel rapport est un travail très lourd qui mobilise les compétences de nombreux membres du laboratoire. Qu'ils en soient ici remerciés.

Il convient de faire une mention particulière de Michèle Castellengo et Hugues Genevois qui ont mis leur talent et leur compétence au service de la mise en forme et du graphisme de ce document, Marc Redondo qui a réalisé la base de données de publications, Catherine Drouet (site Jussieu et coordination de l'Institut), Catherine Fourcin (Site Lourmel), Evelyne Mignon et Anne Delafoy (site Saint-Cyr) qui ont réalisé l'importante collecte de données exigée par cet exercice.

Gérard Maugin et Stéphane Zaleski





L'Institut constitue l'unité de mécanique la plus importante d'Île-de-France par sa taille et le large éventail de ses thématiques. Il rassemble près de deux cents personnes, dont une centaine de permanents, environ quatre-vingts doctorants et une vingtaine de personnels temporaires, post docs ou autres.

L'unité est installée sur trois sites, le campus Jussieu et la rue de Lourmel à Paris, et le site de Saint-Cyr. Le site de Saint-Cyr héberge une activité expérimentale spécifique et remarquable. Le site de la rue de Lourmel se distingue par le fait qu'il est le siège d'une seule équipe, entièrement regroupée sur ce site : Lutheries - Acoustique - Musique. Le site Jussieu réunit des éléments de diverses équipes de l'institut, principalement orientées vers les activités théoriques et numériques, quoiqu'une petite activité expérimentale soit en train de se mettre en place.

L'institut est engagé dans des recherches fondamentales en mécanique des milieux continus, en pointe de la recherche internationale sur des thématiques diverses. Il combine études théoriques et expérimentales, ainsi que sciences de la nature et sciences de l'homme. Ses interactions avec les grands organismes et les grandes entreprises à caractère industriel sont nombreuses comme en témoignent la vingtaine de thèses CIFRE en cours. En outre, notons le développement d'une recherche motivée par le service qu'elle rend à d'autres sphères sociales (society-driven research). Les synergies espérées entre les diverses colorations de l'activité de l'institut se réalisent au sein des cinq équipes de l'institut, énumérées dans un ordre allant symboliquement du milieu fluide au solide, en passant par les ondes.

- Fluides Complexes et Instabilités Hydrodynamiques (FCIH)
- Fluides Réactifs et Turbulence (FRT)

- Lutheries - Acoustique - Musique (LAM)
- Modélisation, Propagation et Imagerie Acoustique (MPIA)
- Mécanique et Ingénierie des Solides et des Structures (MISES)

*L'équipe Fluides Complexes et Instabilités Hydrodynamiques* se concentre sur des problèmes de milieux fluides ou assimilés, comme les milieux granulaires en écoulement, avec une approche principalement mais pas uniquement centrée sur l'analyse fine des phénomènes étudiés par des méthodes théoriques ou numériques. Elle vise à se maintenir à la pointe de l'actualité internationale sur les phénomènes fluides tels qu'ils sont vus notamment par les physiciens, avec notamment un intérêt particulier pour les questions de non-linéarité, d'instabilités, les singularités et les phénomènes d'échelle multiple. Elle utilise les outils de l'analyse asymptotique, des outils numériques simples, et débute une activité expérimentale de « coin de table ».

*L'équipe Fluides Réactifs et Turbulence* aborde une série de problèmes d'intérêt stratégique pour l'industrie, comme la modélisation et simulation numérique de la turbulence, la combustion dans les fluides et l'interaction fluide structure. Des applications d'un intérêt économique évident sont visées, comme les moteurs en propulsion terrestre et aérospatiale et l'aérodynamique appliquée. C'est une activité à la fois numérique et expérimentale, grosse consommatrice de moyens de calcul sur le site Jussieu et à l'origine de montages expérimentaux uniques en France sur le site Saint-Cyr. Elle constitue l'équipe la plus importante au plan national dans le domaine de la simulation numérique de la dynamique instationnaire de la turbulence.

*L'équipe Lutheries - Acoustique - Musique* réunit des chercheurs animés d'une même passion pour le son et la musique en tant qu'objets culturels, et donc abordés du double point de vue des sciences pour l'ingénieur (physique, acoustique, traitement du signal) et des sciences humaines (psychologie cognitive, linguistique). Leur conjonction traduit le caractère pluridisciplinaire des recherches, non seulement au plan des contenus mais aussi d'un point de vue institutionnel. Soutenue, outre les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines du CNRS, par le ministère de la culture, elle est quasiment l'unique équipe de ce type en France.

*L'équipe Modélisation, Propagation et Imagerie Acoustique* constitue un pôle de compétences dans le domaine de la modélisation, de la simulation et de l'exploitation de la propagation en vue de la caractérisation et de l'imagerie des milieux complexes. Son évidente synergie est obtenue par le regroupement d'un fort potentiel humain composé de théoriciens analystes ou numériciens sur le site Jussieu et d'expérimentateurs sur le site Saint Cyr. Sa capacité à traiter une large gamme de problèmes concernant la propagation des ondes dans un cadre tant théorique qu'applicatif s'appuie sur des moyens expérimentaux importants. Elle possède une visibilité évidente au niveau international, manifestée notamment par les multiples collaborations que ses membres entretiennent avec des partenaires internationaux.

*L'équipe Mécanique et Ingénierie des Solides et des Structures* est concernée par plusieurs thématiques autour de la mécanique du solide déformable. La mécanique de la rupture connaît

---

une nouvelle impulsion avec l'arrivée récente de plusieurs enseignants chercheurs de haut niveau. Les questions d'endommagement et de rupture constituent à la fois une question emblématique de la physique du solide déformable et un champ d'application très vaste. Outre les applications à la biologie, à l'industrie nucléaire, à l'électronique, à l'aérospatial et au domaine pétrolier citons le travail récent sur la rupture de tiges élastiques fléchies. Cette application inhabituelle a attiré une certaine attention médiatique. L'optimisation des structures est un autre point fort de l'équipe.

Complément à la présentation . Le lecteur est renvoyé aux documents administratifs (fichier dit UR1) pour une présentation détaillée des aspects de structuration, personnels, gouvernance, finances, relations internationales, implications dans l'enseignement et demandes de moyens humains et matériels.





**F.C.I.H.**

**Fluides Complexes et Instabilités  
Hydrodynamiques**

---

# Fluides Complexes et Instabilités Hydrodynamiques

## *Chercheurs permanents*

ANTKOWIAK Arnaud	Maître de Conférences UPMC
BOUTHIER Michel	Chargé de Recherches CNRS
CARLES Pierre	Maître de Conférences UPMC
CHASKALOVIC Joël	Maître de Conférences UPMC
CROIZET Cédric	Maître de Conférences UPMC
DARROZES Jean-Sylvestre	Professeur UPMC
DELPRAT Nathalie	Maître de Conférences UPMC
GATIGNOL René	Professeur UPMC
GINTZ Daniel	Maître de Conférences UPMC
JOSSERAND Christophe	Chargé de Recherches CNRS
LAGREE Pierre-Yves	Chargé de Recherches CNRS
LHULLIER Daniel	Directeur de Recherches CNRS
MONAVON Arnault	Maître de Conférences UPMC
ROSSI Maurice	Directeur de Recherches CNRS
STARON Lydie	Chargé de Recherches CNRS
ZALESKI Stéphane	Professeur UPMC

## *Emérites :*

PRUD'HOMME Roger	Directeur de Recherches CNRS
------------------	------------------------------

*Effectifs au 31 Décembre 2007*

# *Fluides Complexes et Instabilités Hydrodynamiques*

---

## *A - Introduction*

La mécanique des fluides conduit à des problèmes d'une complexité indéfiniment croissante.

Une préoccupation qui traverse les activités de ce groupe est de traiter de cette complexité avec rigueur tout en restant en phase avec les questionnements de la communauté internationale des physiciens, mécaniciens des fluides et des mathématiciens.

La complexité peut apparaître à des niveaux divers. Lorsque l'on considère les objets que sont par exemple les tourbillons, la complexité provient du caractère des solutions de l'équation de Navier-Stokes. Cette équation s'écrit simplement, mais possède des solutions multiples, à la dynamique instable ou irrégulière, avec un luxe d'échelles multiples. Au-delà des solutions tourbillonnaires, les instabilités hydrodynamiques apportent des défis similaires. En ajoutant la présence d'une interface et la capillarité, on obtient toute la riche phénoménologie des gouttes, bulles et interfaces considérées isolément ou en relativement petit nombre, et dont l'étude numérique reste un défi à la sagacité des mathématiciens. Un degré supplémentaire de complexité est obtenu en introduisant des structures solides (couplage fluide-structure), ou des écoulements multiphasiques contenant des ensembles statistiques de particules. Enfin, la biomécanique présente le degré de complexité par excellence, celui du vivant.



L'accroissement de la capacité de calcul des ordinateurs rend possible des simulations dont la complexité croît de manière analogue. Pour prendre en exemple le domaine du génie chimique alors qu'il y a une dizaine d'années des simulations d'écoulements multiphasiques étaient rares ou inexistantes, on trouve maintenant un intérêt croissant pour ces simulations. Ceci est manifesté par le succès de conférences comme l'International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Process Industries,

L'exposé détaillé est organisé en six sous thèmes

- 1. Biomécanique fluide
- 2. Gouttes, bulles et changement de phase
- 3. Instabilités et tourbillons
- 4. Mélanges diphasiques, milieux granulaires
- 5. Fluides supercritiques
- 6. Microfluidique

---

## *B - Biomécanique fluide*

Il s'agit là d'un thème particulièrement transversal puisque tous les aspects de modélisation sont mis en jeu: mécanique des fluides, mécanique des solides et résolution numérique. Nous mettons l'accent sur des approches simplifiées et des développements asymptotiques, souvent complémentaires de la résolution numérique brutale des équations.

*B. El Mabsout, D. Gintz, P.-Y. Lagrée, M. Rossi, S. Zaleski*

Le problème de l'écoulement de l'air dans les voies aériennes supérieures (apnée du sommeil, oscillation de la glotte) est examiné par P.Y. Lagrée en collaboration avec l'Institut de la Communication Parlée (ICP) de Grenoble et avec la TU Eindhoven. Il s'agit là de calculer par des méthodes simplifiées de type couche limite l'écoulement de l'air dans un canal présentant un rétrécissement. Plus particulièrement, on calcule la distribution de pression qui sera responsable de la déformation de la paroi. Des comparaisons sur une maquette ont été faites. Des comparaisons avec un code Navier Stokes ont aussi été effectuées. Les temps de calcul de la distribution de pression étant fortement réduits, on peut ensuite se concentrer sur la déformation du canal qui demande elle aussi un certain temps de calcul. Ceci fait l'objet d'une thèse à l'ICP.

Le problème de l'écoulement pulsé du sang dans les grosses artères droites est examiné par P.Y. Lagrée ou M. Rossi. Des modèles simplifiés (par équations moyennées sur la section) permettent alors de retrouver la valeur des paramètres d'une expérience (comme l'élasticité de la paroi ou la viscosité du fluide) par des méthodes d'identification des paramètres fondés sur des méthodes d'optimisation. Les données sont générées synthétiquement par un autre code de calcul par P.Y. Lagrée, tandis que M. Rossi avec P. Flaud de Paris VII ont accès à des données expérimentales. Ce dernier travail met l'accent sur la robustesse de la technique par rapport aux biais expérimentaux. Il fait l'objet d'une thèse en co-tutelle à Paris VII.

Le problème de l'écoulement du sang dans les artères sténosées est examiné par P.Y. Lagrée (en collaboration avec l'IMF Toulouse). Il s'agit cette fois de trouver la meilleure estimation possible du frottement pariétal connaissant la géométrie et le débit. L'application consiste à exhiber un critère de rupture de la paroi de la sténose. Une méthode de type couche limite a été employée. Elle permet de retrouver simplement des résultats de Navier Stokes par une formule analytique explicite et instantanée.

Divers autres problèmes de biomécanique de la circulation sanguine ou d'autres fluides biologiques font intervenir un couplage entre les aspects fluides et les aspects solides, que ce soit dans les vaisseaux ou les valves. Dans cette catégorie générale on trouve plusieurs projets en cours, ainsi l'étude de la valve cardiaque (Lagrée et Frelat) et plus particulièrement sa déformation du point de vue de la mécanique des solides a été abordée, les anévrismes (Lagrée et Destrade, en liaison avec la Pitié Salpêtrière), les écoulements dans les veines (Zaleski en liaison avec les laboratoires Innothéra), l'écoulement de l'urine et les déformations associées de la paroi (B. El Mabsout et D. Gintz avec une collaboration avec l'hôpital Tenon.)

Le problème des écoulements avec réaction à la paroi (dans le dessein de modéliser par exemple la déposition de plaquettes à la paroi artérielle) a été considéré par PY Lagrée : une théorie simplifiée de l'hydrodynamique du réacteur BIACORE a été proposée. Ce réacteur est un outil standard en biologie. On a montré que les effets hydrodynamiques induisent un effet léger mais mesurable sur la mesure des constantes de réaction chimique.

Certains membres de FCIH participent au GDR Biomécanique qui fédère une grande partie de cette activité en France

## *C - Gouttes, Bulles et changement de phase.*

Ce groupe développe, et utilise, des méthodes numériques de suivi d'interface entre fluides pour étudier la dynamique des bulles, gouttes et ondes de surface, associée ou non aux changements de phase.

*R. Gatignol,  
Ch. Josserand,  
R. Prud'homme,  
S. Zaleski*

### C. 1 - Méthodes numériques

La méthode dite de Volume de Fluide (VOF) est développée par S. Zaleski et R. Scardovelli (Bologne). Cette méthode comptabilise la fraction d'une phase prise comme référence dans chaque cellule du maillage. La fraction ou Volume de Fluide est propagée de proche en proche. Les techniques VOF ont connu un développement international intense au cours des dix dernières années, en parallèle avec le développement rapide des méthodes de simulation d'écoulements avec interfaces, incluant des méthodes de frontières immergées (ou marqueurs, que nous utilisons également) et des méthodes de ligne de niveau (ou level set).

R. Scardovelli et S. Zaleski ont démontré qu'une variante de la méthode VOF pouvait conserver exactement la masse tout en éliminant complètement les débris. L'amélioration des méthodes VOF est toujours une direction de recherche active. Ainsi une méthode exactement conservative tridimensionnelle a été développée (Aulisa et al. 2007).



FIGURE 2-1 *Simulation d'un jet d'atomisation Diesel sur maillage adaptatif hiérarchique .*

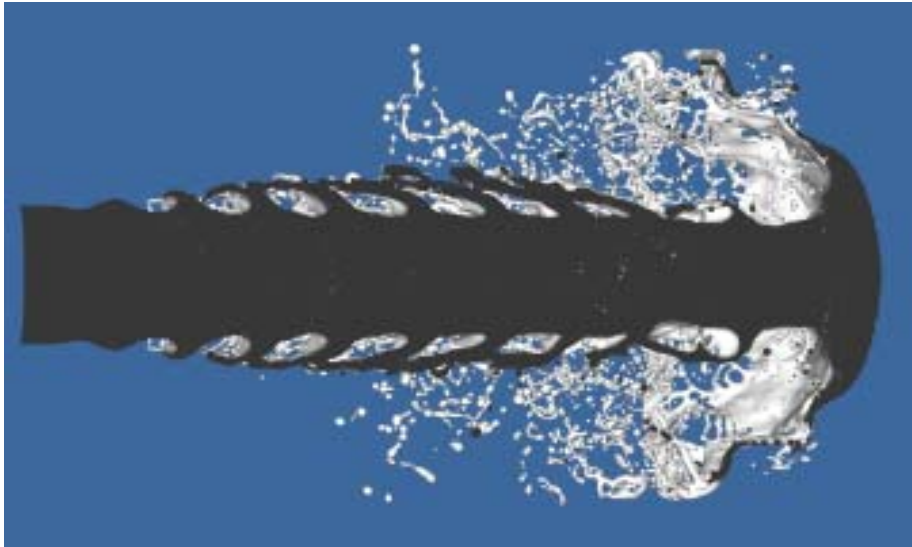
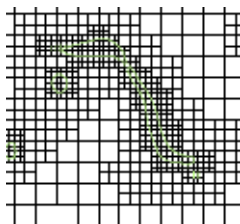


FIGURE 2-2 Coupe de la simulation précédente.

Les perspectives récentes concernent la mise en œuvre de méthode VOF de haute précision dans un cadre de maillage adaptatif (collaboration avec Stéphane Popinet, au NIWA). Ce thème a été très peu exploré : les méthodes VOF en maillage adaptatif n'ont fait jusqu'à présent l'objet d'aucune publication dans la littérature, à l'exception de quelques thèses. D'une façon générale, il existe très peu de travaux sur le suivi d'interfaces en maillage adaptatif. C'est clairement une direction d'avenir, le maillage adaptatif étant destiné à se généraliser en raison de l'économie de points de maillage qu'il permet. Une autre perspective importante est la mise en œuvre de méthodes plus efficaces pour la tension de surface. Les codes actuels sont souvent limités lorsque la tension de surface devient importante par rapport aux autres grandeurs caractéristiques et que simultanément le contraste de densité s'accroît. Ceci limite la possibilité de simuler des écoulements de fluides à effets capillaires importants par rapport à la viscosité, comme l'eau ou les métaux liquides.

## C. 2 - Étude numérique de l'atomisation des jets liquides

FIGURE 2-3 Détail de la simulation des figures précédentes, montrant le raffinement du maillage autour d'un ligament.



L'étude de l'atomisation des liquides dans les écoulements liquide/gaz à grande vitesse est une application très importante de la méthode VOF en maillage adaptatif (figures ci dessus).

Zaleski et divers doctorants et post doctorants ont réalisé les premières simulations numériques directes de ce phénomène (Boeck et al. 2007).

Les mécanismes de formation des gouttes à deux et trois dimensions ont été identifiés et des prédictions peuvent être réalisées sur cette base pour leur distribution de vitesse et de taille. L'atomisation est actuellement un des sujets les plus actifs dans le domaine de la simulation des interfaces. Il fait l'objet d'un projet ANR en collaboration avec A. Cartellier (LEGI Grenoble), J.L. Estivaleres (CERT Toulouse) et O. Simonin (IMFT Toulouse). Outre l'aspect numérique, employant les méthodes VOF, l'étude comporte un aspect analytique lié à l'étude des instabilités de couche de mélange, cité également dans le cadre des activités « instabilités et tourbillons » ci-dessous. Une comparaison des nouveaux modes d'instabilités prédits par Boeck et Zaleski (2005) et Yecko et Zaleski (2005) avec les résultats de l'équipe de Cartellier et Hopfinger à Grenoble est en cours. Une collaboration sur l'atomisation des jets de carburant est également en projet avec l'équipe de N. Peters à Aix La Chapelle dans le cadre du programme CNRS-DFG sur les écoulements diphasiques. Une collaboration a aussi été entamée sur la simulation des jets tridimensionnels avec l'équipe du Prof. Bianchi à Bologne (Bianchi et al. 2005).

Une perspective importante est l'étude de l'atomisation dans des conditions plus réalistes. Ainsi on tiendra compte de l'écoulement à l'intérieur de l'injecteur, en aval de l'atomisation. L'étude emploiera également le code de maillage adaptatif hiérarchique Gerris. Des premiers calculs ont été effectués par Luis Lemoyne dans l'équipe FRT. Il sera nécessaire de développer plus avant le code Gerris pour permettre de simuler des frontières mobiles représentant « l'aiguille » d'un injecteur Diesel.

### C. 3 - Impacts de gouttes

Les impacts de gouttes, sur d'autres liquides ou sur des parois solides, constituent un phénomène remarquable au plan esthétique, comme le montrent les photographies rapides réalisées par E. Edgerton au MIT et souvent reproduites dans l'iconographie publicitaire. Il s'agit d'un problème typique de suivi d'interfaces fluides, avec instabilités, changements de topologie etc. Ils sont étudiés avec C. Josserand par méthodes VOF et marqueurs. Les calculs permettent d'établir des comparaisons utiles avec les observations expérimentales sur l'étalement et la rétractation des gouttes impactantes, sujet assez mal connu et riche physiquement, notamment dans la mesure où il fait intervenir des effets capillaires difficiles à maîtriser par les méthodes actuelles. En particulier, une collaboration avec D. Bonn et D. Bartolo (LPS-ENS) a permis de caractériser quatre régimes d'impacts sur surface solide hydrophobe, selon que l'étalement est dominé par l'équilibre inertie/capillaire ou inertie/viscosité et la rétraction est due aux effets jumelés capillaire-visqueux ou capillaire-inertiel. Cette collaboration expérimentale (C. Josserand, D. Bonn, D. Bartolo) a aussi mis en avant une dynamique surprenante pour les faibles vitesses d'impact : la déformation de la goutte sous forme d'ondes capillaires donne lieu à la création d'une cavité cylindrique au centre de la goutte. Le collapse de cette cavité produit des jets liquides extrêmement fins, signatures de la singularité dynamique du collapse d'une colonne inviscide.

FIGURE 2-4 *Formation de jets fins lors de l'impact de gouttes sur surface hydrophobe à faibles vitesses (environ 0.5 m/s)*

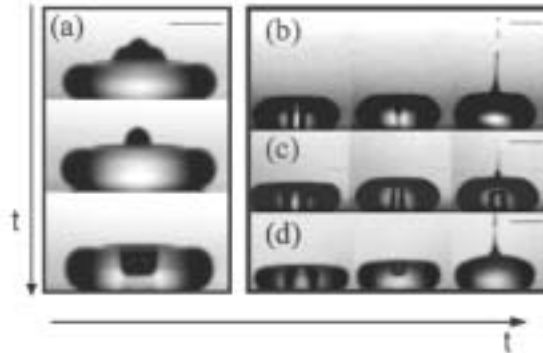
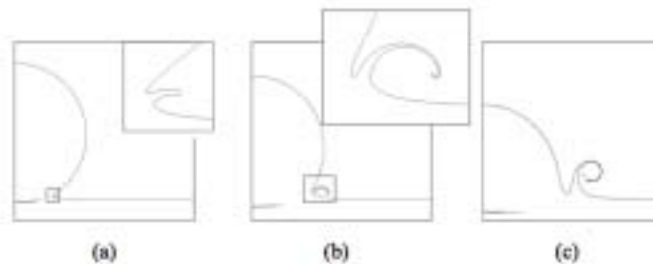


FIGURE 2-5 *Formation d'un jet fin près du point de contact entre une goutte liquide et une couche du même liquide (simulation par méthode VOF, nombre de Reynolds de 1000, nombre de Weber de 8000)*



Les problèmes d'impact de goutte font aussi l'objet d'une collaboration avec Luis Lemoyne de l'équipe FRT : nous avons montré alors comment la présence d'une faible hétérogénéité de la surface pouvait contrôler la formation d'une éclaboussure (splash) (voir rapport de l'équipe FRT section II.)

Divers cas d'évaporation de gouttes sphériques, avec ou sans combustion, sont étudiés par R. Prud'homme en collaboration avec d'autres chercheurs. Le cas d'une goutte de fluide pur à l'état critique plongée dans une ambiance isobare de densité plus faible, qui a fait l'objet de la thèse de S. Préau, a permis d'établir analytiquement et numériquement la loi d'évaporation. Un projet de collaboration est en cours de mise au point avec A. D'Almeida pour traiter le cas de la goutte à température inférieure à la température critique (« goutte froide »), toujours en ambiance à la pression critique. L'évaporation de gouttes liquides dans un mélange fait l'objet d'une étude en collaboration avec l'unité de M. Habiballah à l'ONERA.

Certains membres de FCIH (R.Prud'homme, R. Gatignol) participent au GDR MFA (Microgravité Fondamentale et Appliquée). En collaboration avec D. Beysens et V. Nikolayev (PMMH, ESPCI & UPMC), ils démarrent une étude théorique et asymptotique sur la structuration d'interfaces fluides sous vibrations près du point critique.

## *D - Instabilités et tourbillons*

La notion d'instabilité est centrale en mécanique des fluides: la plupart des écoulements sont en effet organisés en structures de vorticité (nappes ou tourbillons) obtenues via une instabilité ou susceptibles de se déstabiliser. Ainsi les instabilités de couche de mélange engendrent-elles des tourbillons. Ces derniers sont parfois eux-mêmes instables, produisant de petites échelles dans l'écoulement. Par ailleurs, de nombreux mécanismes (cisaillement, capillarité, effet de densité, de champ magnétique) induisent des instabilités aux interfaces fluide-fluide.

*P. Carlès,  
Ch. Josserand,  
P.Y. Lagrée,  
N. Delprat,  
M. Rossi,  
S. Zaleski*

### D. 1 - Instabilités de Tourbillon

M. Rossi développe des travaux concernant la dynamique des tourbillons isolés (jet tourbillonnaire ou instabilité elliptique). Par exemple, une étude par simulation directe d'un jet tourbillonnaire a mis en évidence des scénarii très différents suivant l'intensité de la rotation du jet. Cette thématique sera poursuivie avec Ivan Delbende du LIMSI, (e.g.  valuation de la dissipation et du taux de transfert de l'énergie vers les petites échelles effectuées en parallèle avec des expérimentateurs) et approfondie (e.g. dynamique des vortex écrantés ou de vortex soumis à une rotation superposée).

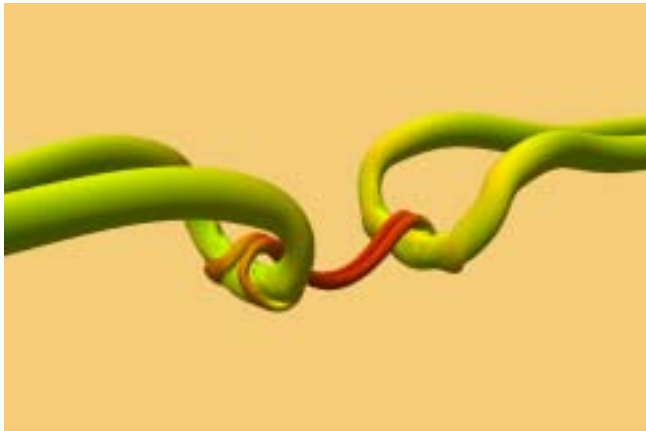


FIGURE 2-6 *La reconnexion de deux tourbillons contrarotatifs*

L'interaction forte entre deux tourbillons est également un problème important pour comprendre la dynamique de certains écoulements (instabilités ou fusion des tourbillons de sillage en aéronautique) et pour extraire les mécanismes élémentaires qui sous-tendent la dynamique des écoulements turbulents. Dans le cadre bidimensionnel, Ch. Josserand et M. Rossi ont décrit la fusion de deux tourbillons co-rotatifs en montrant les différentes étapes qui la caractérisent. Dans le cadre tridimensionnel, M. Rossi avec I. Delbende du LIMSI analyse par le biais d'une modélisation simple et fondée sur des simulations 3D de



l'instabilité de Crow les effets purement tridimensionnels de la reconnexion de deux vortex liés à la courbure ou à l'influence d'une composante axiale de vitesse. Par ailleurs, M. Rossi (avec I. Delbende) étudie par une méthode numérique de type Arnoldi les modes propres de stabilité linéaire dans le cas de deux tourbillons contrarotatifs et par simulation numérique directe tridimensionnelle, la saturation nonlinéaire de l'instabilité elliptique de deux vortex contrarotatifs en présence d'un sillage. Ce dernier aspect modélise une expérience de sillage derrière une sphère et à pour but de caractériser l'effet de ce sillage sur l'instabilité à grande longueur d'onde de Crow. Ces travaux sont effectués dans le cadre d'une ANR.

M. Rossi, G. Pinon (Université du Havre) et I. Delbende (LIMSI), étudient à l'aide d'une méthode particulière développée par G. Pinon au cours de sa thèse, l'instabilité secondaire qui se développe sur un anneau de vorticité lorsque ce dernier est suffisamment déformé par l'instabilité elliptique primaire. On tente actuellement de relier cette instabilité secondaire et le phénomène d'éjection que l'on observe expérimentalement.

## D. 2 - Instabilités gravitationnelles

P. Carlès et Ch. Josserand développent une activité autour des instabilités gravitationnelles d'interfaces. Issue d'une réflexion initiale centrée sur le problème des impacts de liquide, cette activité s'est peu à peu orientée spécifiquement vers l'étude des instabilités de Rayleigh Taylor (RT), Richtmyer-Meshkov (RM).

Ch. Josserand et L. Duchemin se sont intéressés à la dynamique asymptotique en aiguille apparaissant dans la limite d'un rapport de densité infini et en écoulement potentiel pour RT et RM. Une approche locale du champ de vitesse autour de l'aiguille permet de prédire une croissance de la courbure de l'aiguille comme la puissance cubique du temps ainsi qu'une décroissance de la correction à l'accélération. Il est remarquable de trouver ces lois d'échelles similaires pour les deux instabilités alors que l'écoulement présente des propriétés locales différentes. À l'aide d'une étude numérique détaillée d'intégrales de frontières alliant raffinement de maillage et transformation conforme, Ch. Josserand et L. Duchemin ont pu montrer que ces lois d'échelles étaient satisfaites, la correction à l'accélération étant vérifiée sans paramètre ajustable dans la théorie.

Depuis huit ans, Pierre Carlès développe au LMM une activité autour des instabilités gravitationnelles d'interfaces. Issue d'une réflexion initiale centrée sur le problème des impacts de liquide, cette activité s'est peu à peu orientée spécifiquement vers l'étude des instabilités de Rayleigh-Taylor (RT), Richtmyer-Meshkov (RM) et plus généralement de Rayleigh-Taylor à gravité variable, dont RT (à gravité constante) et RM (à gravité impulsionnelle) sont deux cas particuliers.

Dans son volet théorique, le travail sur ce thème s'est concentré sur l'étude des effets dissipatifs (viscosité, miscibilité, ...) et non linéaires sur la déformation d'interface dans ces instabilités. Le résultat principal de cette démarche a été la proposition du premier modèle quantitatif de l'instabilité RM entre deux fluides visqueux, modèle construit à l'aide de la

rencontre des techniques de l'analyse de stabilité faiblement non linéaire et de l'analyse asymptotique. Ce modèle a été confronté avec succès à des simulations numériques diphasiques réalisées à l'Institut (ex-LMM). Au-delà de ce premier résultat, le travail se développe actuellement vers la généralisation de ce modèle à des lois d'accélération plus complexes que pour RM, et à la prise en compte d'autres sources de dissipation (comme la miscibilité des fluides par exemple).

Ce volet théorique se double depuis trois ans d'une activité expérimentale, développée en collaboration avec l'Université Case Western Reserve de Cleveland (USA). Sur une proposition initiale de l'équipe de l'Institut, nous avons développé dans ce laboratoire partenaire une expérience de RT sous lévitation magnétique. L'objectif de cette opération est d'utiliser la gravité artificielle créée par la force magnétique pour : (i) maîtriser parfaitement les conditions initiales dans des expériences de RT classiques ; (ii) pouvoir moduler dans le temps la gravité apparente afin de réaliser des expériences de RT à gravité variable (dont RM). Nous avons déjà obtenu une série de résultats intéressants sur le problème modèle de RT en cellule de Hele-Shaw, instabilité pour laquelle un modèle original a été développé et confronté avec succès aux mesures. Ces résultats ont été étendus au régime de Rayleigh-Taylor 2D. Enfin, nous venons de développer une technique originale permettant de façonner la forme initiale de l'interface à volonté et de manière statique. Ainsi, l'imposition de déformations initiales d'interfaces arbitraires dans une expérience de RT est devenue possible.

Ce travail fait depuis un an l'objet d'une collaboration soutenue avec l'équipe de Kai Kadau du Los Alamos National Laboratory (Los Alamos, USA).

### D. 3 - Instabilités : autres cas

Nous décrivons ci-dessous diverses activités autour des instabilités d'écoulements cisailés : (a) dans des cavités, (b) à la sortie d'une embouchure de flûte, (c) dans canal en présence d'un champ magnétique, (d) dans les mécanismes de l'atomisation.

N. Delprat s'est intéressée au problème de l'analyse des fluctuations cohérentes au sein d'un écoulement affleurant une cavité. Une nouvelle interprétation de la formule de Rossiter, utilisée pour prédire les fréquences des oscillations dans le cas compressible, a été récemment proposée. L'approche choisie est du type « analyse de modulation » et est similaire à celle utilisée dans l'étude des interactions non linéaires dans la transition laminaire-turbulent d'une couche cisailée libre. Ainsi l'aspect non-harmonique de la distribution spectrale a été associé à un processus de modulation d'amplitude induit par des variations dans l'impact des tourbillons avec le coin aval. Cette interprétation a été testée avec des spectres issus de configurations très différentes (entre autres, base de données de la NASA). Elle a permis de justifier simplement certaines propriétés spectrales non-explicitées mais aussi de proposer de nouvelles pistes pour mieux comprendre la physique des écoulements en jeu. Les implications de ce nouveau point de vue sont multiples et continuent d'être explorées (par exemple, rôle de la recirculation dans le processus de modulation, analyse d'instabilités secondaires).

En collaboration avec le LAM (C. Ségoufin et B Fabre), P.Y. Lagrée a comparé des expériences faites à Eindhoven sur l'écoulement sortant d'une embouchure de flûte (canal+ jet) avec des calculs numériques. Ces calculs consistaient en une comparaison de FLUENT, Castem 2000 des équations de couche limite. Une théorie de perturbation du jet a ensuite été développée sur l'écoulement de base déterminé par le calcul numérique.

En collaboration avec Th. Boeck et D. Krasnov de l'université d'Ilmenau (Allemagne), M. Rossi a effectué des travaux sur les instabilités d'un fluide conducteur en présence d'un champ magnétique. Il s'agit d'un écoulement de Hartmann (écoulement dans un canal plan avec un champ magnétique parallèle à la paroi). Cette étude d'instabilité linéaire se concentre sur la notion de croissance transitoire: on détermine par une méthode adjointe la perturbation capable de fournir le taux d'amplification optimal dans une région des paramètres qui est asymptotiquement stable. On sait que de telles perturbations sont pertinentes dans des écoulements de type couche limite et que leur structure correspond à celle de vortex longitudinaux. On a montré que le champ magnétique modifie le caractère longitudinal des perturbations optimales de manière drastique.

Th. Boeck, Ph.Yecko (tous deux anciens post-docs du LMM) M. Rossi et S. Zaleski ont collaboré au problème du développement temporel et spatial des instabilités de couche de mélange diphasique en lien avec les mécanismes de l'atomisation. L'accord avec les expériences a pu être obtenu pour la première fois grâce à la prise en compte des termes visqueux. Des comparaisons récentes ont été menées avec les expériences de Cartellier à Grenoble.

## *E - Mélanges diphasiques, milieux granulaires*

Dans le vaste domaine des mélanges fluide-particules, nous avons concentré nos efforts sur les mélanges solide-gaz et solide-liquide, mais nous avons également abordé les problèmes d'interfaces dans les mélanges liquide-liquide et liquide-gaz. Le point commun de tous ces travaux est une description eulérienne des mélanges, avec des lois de comportement que l'on s'est efforcé de rendre compatibles avec la croissance de l'entropie.

*C. Croizet,  
R. Gatignol,  
C. Josserand,  
D. Lhuillier,  
P.Y. Lagrée,  
L. Staron*

### E. 1 - Mélanges diphasiques

Dans une configuration d'écoulement avec point d'arrêt, un mélange dilué de particules solides dans un gaz a été étudié. Le milieu est décrit par un modèle eulérien de type Marble et une faible aspiration des particules à la paroi est introduite. Loin de la paroi, le mélange est à l'équilibre. Les simulations numériques mettent en évidence l'influence du nombre de Stokes (rapport du temps de mise en vitesse des particules sur le temps macroscopique) et l'existence d'une valeur critique de ce nombre ( $\sigma_c$ )

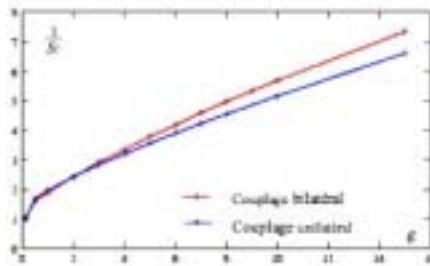


FIGURE 2-7 *Ci-contre Valeur critique du nombre de Stokes en fonction de l'aspiration*

en deçà de laquelle la densité des particules à la paroi diverge. Cette valeur critique dépend de l'intensité de l'aspiration ( $\sigma$ ) et de l'influence des particules sur l'écoulement du gaz (couplage bilatéral) ou non (couplage unilatéral ; voir Figure). L'accroissement illimité de la densité du nuage de particules ne correspond pas aux observations expérimentales. Il est donc nécessaire d'améliorer le modèle utilisé en introduisant une description plus fine de la phase dispersée. Des modèles issus de la théorie cinétique et prenant en compte l'agitation des particules sont en cours d'étude.

On peut en effet s'appuyer sur la théorie cinétique pour introduire une modélisation d'un mélange solide-gaz jusqu'à des concentrations assez élevées. Pour une suspension homogène ou bien hétérogène, de particules sphériques qui interagissent entre elles par le biais de collisions instantanées, binaires, inélastiques et non ponctuelles, des équations de Boltzmann ont été écrites. Dans le cas homogène, il est possible d'introduire une équation simplifiée de type BGK. Dans les deux cas, homogène et hétérogène, des équations moyennes exprimant la conservation de la masse et celle de la quantité de mouvement ont été obtenues. Naturellement, du fait de la dissipation induite par l'inélasticité des collisions, il n'y a pas conservation de l'énergie pour le nuage de particules. Enfin un théorème H, traduisant la compatibilité des modèles avec le second principe de la thermodynamique, est obtenu pour des collisions quasi ponctuelles et faiblement inélastiques. Pour une suspension hété-

rogène moyennée, l'utilisation de la méthode des moments de Grad conduit à des descriptions eulériennes pour l'ensemble des particules et pour chaque population prise séparément. Une difficulté est la modélisation, dans le cas hétérogène, de la fonction de distribution radiale qui traduit l'influence des particules voisines sur la collision de deux particules. Si une modification de la théorie d'Enskog standard est nécessaire pour décrire un gaz hétérogène de type « sphères dures » (Van Beijeren et Ernst, 1973), nous avons montré qu'elle était inutile pour décrire une suspension de particules au niveau de précision généralement utilisé.

Une perspective est de munir les modèles eulériens obtenus de conditions aux limites pariétales adaptées. Il convient alors d'analyser une fine couche pariétale, la couche de Knudsen, où seule la description cinétique est valable. Même avec un choix de modélisation simple sur les lois de collision sphères – parois, l'étude analytique de cette couche est délicate. Elle devient encore plus complexe lorsque l'on cherche à prendre en compte des phénomènes plus réalistes à l'échelle des particules. Dans le cadre de la mise en oeuvre d'un code de calcul eulérien, il semble intéressant de traiter la couche de Knudsen numériquement afin d'obtenir les conditions nécessaires pour résoudre le reste de l'écoulement. On envisage de coupler une résolution cinétique de type DSMC dans la couche de Knudsen avec la résolution d'un modèle eulérien dans le reste de l'écoulement. Ce type de méthode hybride est largement utilisé pour les écoulements monophasiques lorsque les conditions aux limites usuelles ne sont plus valables comme, par exemple, dans le cas où la paroi posséderait des reliefs dont la largeur caractéristique est de l'ordre du libre parcours moyen des molécules (Garcia 1995). Il s'agit donc d'adapter ces méthodes hybrides aux écoulements diphasiques dispersés en prenant en compte les mécanismes collisionnels propres à ces milieux.

Un axe de recherche nouveau en diphasique moyenné est l'étude de l'ébullition en milieu poreux par S. Zaleski. Le dégazage ou l'ébullition en milieu poreux apparaissent lors des éruptions volcaniques ou dans les réservoirs d'huile particulièrement lourde (visqueuse). Le dégazage est analysé par une combinaison de modèles physiques de croissance des bulles et par un modèle de transport de fluide à l'échelle de Darcy.

## E. 2 - Milieux Granulaires

Si on augmente suffisamment la concentration en particules, il arrive un moment où celles-ci sont en contact permanent les unes avec les autres. On parle alors de milieu granulaire. Les milieux granulaires (secs ou mouillés) ont joui d'un intérêt important de la communauté internationale à partir de la décennie 1990-2000. Dans le cadre de l'étude directe du comportement des matériaux granulaires secs des outils de simulation par méthode discrète (Dynamique des Contacts) ont été développés par Lydie Staron: il s'agit non pas d'approcher le milieu granulaire par un continuum dont les propriétés moyennes restent à définir, mais au contraire de modéliser les grains individuellement. Dès lors, la complexité intrinsèque liée au mode d'interaction entre les grains, et les processus complexes de dissipation d'énergie qui en résultent, sont reproduits sans recours à des hypothèses sur le comportement moyen. Deux thématiques sont aujourd'hui abordées: la rhéologie des

écoulements stationnaires d'une part, et d'autre part la dynamique des écoulements de type géophysiques.



FIGURE 2-8 Exemple d'empilement granulaire périodique simulé par Dynamique des Contacts

S'être assuré que nos écoulements satisfont les lois observées expérimentalement, nous établissons l'existence de corrélations spatiales liés aux fluctuations de vitesse des grains. Ces corrélations spatiales, de l'ordre de quelques diamètres de grains, existent en surface comme dans le volume de l'écoulement. La façon dont ces corrélations dépendent des propriétés des grains (coefficient de frottement, restitution élastique) et des propriétés de l'écoulement (vitesse moyenne, épaisseur) est actuellement étudiée. En revanche, il est difficile de mettre en évidence des corrélations liées à la vitesse de rotation des grains, pourtant cruciales dans la dynamique des écoulements granulaires denses. L'étude de l'existence-évolution des corrélations spatiales dans les régimes ralentis-accélérés est actuellement initiée. Cette thématique rejoint les travaux de C. Josserand, P.-Y. Lagrée et D. Lhuillier sur la modélisation continue des écoulements granulaires, et permettra à court terme une comparaison approfondie entre la rhéologie proposée dans leur modèle et le comportement granulaire.

La seconde thématique porte sur le comportement des écoulements géophysiques, et plus particulièrement sur leur capacité à s'écouler sur de très grandes distances, ou encore leur « mobilité », qui en font des phénomènes dangereux et aujourd'hui encore peu compris. Utilisant la simulation discrète, nous mettons en évidence des lois d'échelle simples montrant le lien entre la dynamique des écoulements et la forme du dépôt final. À l'inverse nous montrons que définir un coefficient de frottement effectif pour l'écoulement à partir des caractéristiques du dépôt induit des erreurs importantes. En particulier, nous avons mis en évidence le rôle majeur joué par la déformation du milieu sur les caractéristiques finales de l'écoulement. La comparaison systématique avec des données de terrain nous permet de valider notre approche. À terme, il s'agit de parvenir à caractériser et à évaluer les propriétés de dissipation des écoulements géophysiques afin de rendre possible leur modélisation

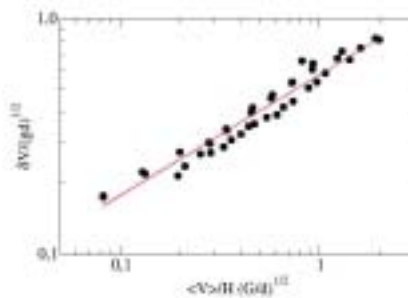
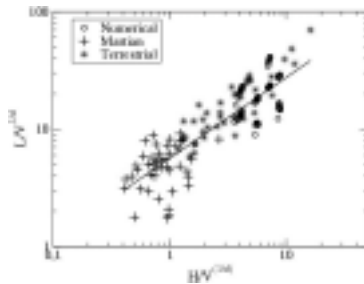


FIGURE 2-9 Fluctuations moyennes des vitesses des grains en fonction du taux de cisaillement pour différentes conditions d'écoulements (42 simulations indépendantes).

par des approximations continues fiables. Ce travail donne lieu à une collaboration avec Eric Lajeunesse (Institut de Physique du Globe de Paris).



**FIGURE 2-10**  
*Ci-contre:*  
*Caractéristiques*  
*géométriques des*  
*dépôts laissés par des*  
*écoulements martiens,*  
*terrestres et*  
*numériques*

En fonction de leur concentration en particules, les milieux granulaires peuvent se comporter comme des fluides ou des solides. Dans une gamme de concentration assez restreinte (pour des fractions volumiques comprises entre 50% et 65% dans le cas de grains sphériques de même taille) les grains sont en contact permanent les uns avec les autres et le milieu se comporte comme un liquide à seuil c'est-à-dire qu'il faut lui imposer un minimum de forces de cisaillement pour le mettre en mouvement. C'est pour décrire ces milieux granulaires

particuliers que C. Josserand, P.-Y. Lagrée et D. Lhuillier ont construit un modèle rhéologique permettant d'expliquer aussi bien les écoulements à surface libre (avalanches denses) que les écoulements confinés (vidange d'un silo). Un des ingrédients du modèle est la pression granulaire et une des originalités est d'avoir considéré qu'une des deux contributions à cette pression était fonction de la seule concentration, conférant ainsi au milieu une sorte de compressibilité. Deux précisions importantes : cette compressibilité n'est pas liée à l'élasticité des grains et elle ne peut être observée que pour des écoulements stationnaires. Nous avons montré que son origine était une entropie de mélange, liée au nombre de micro-états possédant une valeur commune de concentration en grains (seule diffère leur répartition spatiale). Comme le mouvement Brownien est parfaitement négligeable, seul un écoulement stationnaire laisse le temps au milieu d'explorer tous ses micro-états.

Le modèle a été ensuite étendu dans deux directions : la prise en compte du fluide interstitiel et une formulation complète (tridimensionnelle) des lois de comportement. La généralisation 3D du modèle a été proposée par D. Lhuillier qui a montré le lien avec les modèles de fluides micropolaires (prise en compte de la rotation des grains) ainsi qu'avec les modèles de fluides viscoplastiques. Concernant le rôle du fluide entourant les grains P.-Y. Lagrée et D. Lhuillier ont modélisé le comportement d'un milieu granulaire saturé en liquide dans deux situations très différentes : un écoulement confiné et un écoulement à surface libre. Dans le premier cas, il s'agissait de comprendre et d'interpréter le comportement (observé par des équipes de l'ENS et de l'ENPC) d'une pâte granulaire dans un écoulement de Couette. Dans le second, il s'agissait de calculer le flux de grains résultant de l'application d'un écoulement cisailé de fluide pur au-dessus d'un sédiment compact. Dans ce dernier cas, le modèle ne prédit aucun seuil de mise en mouvement des particules, mais, pour les faibles cisaillements, il prédit l'existence d'un transport intermittent dans lequel (pourtant soumis à des forces constantes) les grains exécutent des mouvements de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que les forces appliquées décroissent. Parce que l'observation expérimentale ne porte que sur une surface limitée de sédiment, on a l'impression d'un seuil en dessous duquel aucun grain ne se déplace. Ce résultat est très important pour décrire les phénomènes d'érosion (collaboration avec le FAST à Orsay). Il permet aussi de faire le lien avec le thème de formation de structures telles que les rides ou les méandres.

P-Y Lagrée et K.K.J. Kouakou se sont intéressés à l'érosion et la sédimentation d'un écoulement 2D sur un fond meuble. Il s'agit en fait d'une analyse de stabilité des équations de Navier Stokes sur un fond qui peut être creusé suivant la valeur du frottement pariétal. À noter que l'on rajoute un terme d'inertie dans l'équation du flux de matériaux en fonction du cisaillement pariétal. Une étude asymptotique à grand et à petit nombre de Reynolds a permis de prédire la dépendance du taux de croissance en fonction des différents paramètres. La résolution numérique des équations permet d'observer la naissance de "rides" (conformément à la stabilité linéaire) puis leur grossissement en taille et en largeur. Ces rides se fusionnent ensuite en une "dune" unique. Le déplacement d'une dune unique sur un fond rigide a été étudié, il mène à un problème auto-semblable. La masse de la dune est un paramètre important, et si celle-ci est trop petite, on ne peut observer de mouvement stationnaire de la dune, celle-ci finissant toujours par disparaître.

Dans le même esprit, les instabilités d'un fond érodable menant à la formation de méandres ont été étudiées par C. Josserand, O. Devauchelle, P.-Y. Lagrée et S. Zaleski. L'enjeu est de montrer qu'une mini-rivière laminaire peut former des méandres sans aucun mécanisme turbulent. L'écoulement est simplifié à la « Saint Venant », et une loi simple d'érosion est choisie pour coupler l'écoulement et le lit érodable. Dans un premier temps, une solution autosemblable de l'élargissement d'une rivière droite infinie a été proposée. Si aucun seuil n'est introduit dans la loi d'érosion une rivière s'élargit sans fin. Puis, un modèle de stabilité linéaire de l'évolution du fond dans un canal droit a été résolu. Si la profondeur de l'eau est assez petite par rapport à la largeur du canal, des modes instables apparaissent. Le premier mode (un maximum à un bord, le minimum sur le bord opposé) est un mode de barres alternées, ensuite si la profondeur d'eau devient encore plus petite par rapport à la largeur, un mode avec un maximum à chaque bord et un minimum au centre apparaît, etc. Dans le premier cas il s'agit de l'apparition d'un précurseur de méandre, et dans le second cas d'un précurseur de tresse.

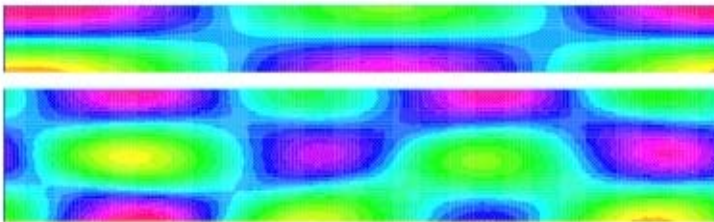


FIGURE 2-11 *Fond d'un canal droit, l'écoulement va de gauche à droite. En haut formation de méandres sous la forme de barres alternées, en bas apparition de tresses pour une rivière deux fois plus large.*

Des calculs obtenus par simulation numérique montrent la formation de chevrons pour certaines valeurs des paramètres. Ces chevrons ont été observés lors du tirage hors d'un bain liquide d'une plaque recouverte de grains (E. Clément et collaborateurs, PMMH-ESPCI). Le cas idéalisé d'un milieu poreux extrait d'un bain liquide a été étudié dans ce contexte par O. Devauchelle, C. Josserand et S. Zaleski. La dynamique est étudiée dans la limite où les équations de lubrification sont pertinentes. On obtient alors un système dynamique qui décrit la transition entre une ligne de contact à angle nul et un film d'épaisseur



finie (film de Landau-Levich-Derjaguin LLD). On montre aussi la possibilité d'avoir deux films LLD d'épaisseur distinctes. Ces deux derniers travaux correspondent au travail de thèse d'O. Devauchelle.

## *F - Fluides supercritiques*

Les spécificités thermodynamiques des fluides supercritiques engendrent des comportements dynamiques surprenants et souvent paradoxaux. Par exemple, leur compressibilité est très grande bien que leur masse volumique soit en même temps très élevée, ce qui les rend intermédiaires entre des liquides et des gaz. En particulier, ils sont le siège d'un quatrième mode de transport de la chaleur, l'effet piston, couplage thermo-acoustique découvert en 1990 et qui gouverne entièrement la relaxation de la température sur des échelles de temps bien plus courtes que la diffusion ou la convection naturelle.

*P. Carlès*

Dans ce contexte, le travail de l'équipe se développe simultanément selon des approches théoriques, numériques et expérimentales. Le volet théorique est réalisé en interne à l'UPMC. Les volets numériques et expérimentaux sont réalisés dans le cadre de coopérations nationales et internationales. On peut schématiquement classer les différents éléments de ce travail selon trois axes principaux:

### **F. 1 - Caractérisation théorique des mécanismes de relaxation dans les fluides supercritiques**

Dans cette catégorie de travaux, l'utilisation de méthodes asymptotiques, numériques et expérimentales vise à caractériser les particularités du transport de masse et de chaleur près du point critique, et plus généralement l'interaction des différents mécanismes de relaxation dans les fluides supercritiques. Les modèles théoriques issus de l'analyse ont déjà été appliqués avec succès, en particulier, au dimensionnement d'une expérience spatiale du département de cryogénie du Jet Propulsion Laboratory (NASA-Caltech, Etats-Unis) dans le cadre d'une prestation contractuelle (expérience MISTE). Ils sont d'autre part exploités comme outils dynamiques pour « sonder » les propriétés des fluides supercritiques très près du point critique, dans une logique de problème inverse. Un projet de développement d'expérience en ce sens, en collaboration avec le JPL, a été sélectionné pour financement par la NASA en 2004 pour 4 ans. Durant la première année de financement, le pilote expérimental a été construit au JPL et est en cours de finalisation, et le développement des premiers modèles théoriques associés a débuté

Fluides supercritiques sous gravité. A l'aide de méthodes mixtes faisant intervenir les outils classiques de l'analyse de stabilité couplés avec les méthodes asymptotiques multi-échelles, on étudie dans cette action l'hydrodynamique des fluides supercritiques en présence d'un champ de gravité (en particulier l'apparition d'ondes internes de gravité et l'instabilité convective de Rayleigh-Bénard). Ces travaux ont montré que ces fluides reproduisaient à petite échelle des mécanismes observés jusque-là seulement dans les écoulements géophysiques, ce qui suggère de les utiliser comme des modèles de laboratoire pour reproduire à petite échelle certains écoulements atmosphériques ou océanographiques. Un examen plus approfondi de ces analogies est en train d'être conduit, au travers d'un rapprochement avec la communauté des géophysiciens.

## **F. 2 - Dynamique de corrosion en fond de fissure en eau supercritique.**

Cette action s'est initiée entre 2000 et 2004 dans le cadre d'un consortium industrie-CNRS impliquant des laboratoires du CNRS et des industriels de l'acier et du génie des procédés (Consortium Matériaux pour les Procédés mettant en œuvre un Fluide Supercritique). L'objectif de notre travail était d'analyser l'influence de l'hydrodynamique particulière des fluides supercritiques sur les mécanismes de corrosion et son rôle éventuel dans les anomalies constatées (corrosions excessivement rapides des aciers sous eau supercritique). Un modèle théorique de comportement du fluide supercritique en fond de fissure a été développé, modèle qui prédit l'existence d'un couplage thermo-chimique entre le fluide supercritique et la paroi d'acier (phénomène de micro-jets par dilatation thermique). Ce mécanisme pourrait participer aux phénomènes de corrosion anormaux qui sont observés. Des confrontations expérimentales avec les mesures du LIMHP sont en cours. En parallèle se développe un travail portant sur l'extension du modèle à d'autres situations présentant des similarités paramétriques, comme le cas des réacteurs tubulaires en eau supercritique, très utilisés dans les procédés d'oxydation hydrothermale.

---

## *G - Microfluidique*

La micro-fluidique traite des écoulements de fluides, mono ou multiphasiques, dans des systèmes de très petites dimensions de l'ordre du micromètre. On s'intéresse ici à la modélisation d'écoulements de gaz dans des micro-filtres utilisés pour capturer et détecter de fines particules. Ces applications intéressent particulièrement les secteurs de l'automobile et de l'environnement. Les micro-filtres envisagés sont composés d'un support solide et d'une région de filtrage qui est une membrane percée de trous dont le diamètre est micro-métrique.

*C. Croizet  
R. Gatignol*

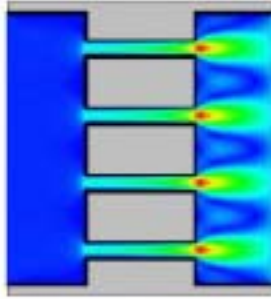
Les premiers résultats sont relatifs à un seul trou ou micro-canal reliant deux chambres dites d'entrée et de sortie (thèse en préparation de D. Ameer et collaboration avec F. Maroteaux, UVSQ). Une description de type gaz raréfié modélisée par la méthode de simulation de Monte-Carlo (DSMC) a été utilisée. Pour des températures d'entrée et de sortie identiques et pour différentes géométries de micro-canaux, la variation de la pression, le profil de la vitesse ainsi que le débit massique ont été comparés entre eux et avec une solution de l'écoulement de type Poiseuille-Hagen avec glissement. Une assez bonne concordance a été observée, en particulier pour les canaux ayant les plus grandes chambres d'entrée.

Les effets simultanés, sur l'écoulement, des différences de pression et de température en entrée et en sortie ont été analysés. Dans les simulations DSMC réalisées, les deux pressions et les deux températures dans les chambres d'entrée et de sortie sont fixées, la pression d'entrée étant supérieure à celle de sortie. Les résultats montrent que l'effet du gradient de température compense l'effet du gradient de pression ; ainsi lorsque la température dans la chambre d'entrée augmente, les autres grandeurs demeurant inchangées, le gradient de pression au sein du micro-canal est d'abord positif puis négatif. Pour une température dite d'équilibre, voisine de celle vérifiant la relation classique de Knudsen établie pour un trou, les deux effets se compensent. Lorsque la température d'entrée est supérieure à la température d'équilibre, le phénomène de transpiration thermique est observé.

Des géométries plus complexes faisant intervenir plusieurs micro-canaux sont actuellement étudiées (Figure Figure 2-12, page 24). L'objectif est de mettre en évidence des lois de types Darcy pour ces micro-filtres.

Des simulations par la méthode des gaz sur réseaux, en vue d'analyser les écoulements dans des micro-canaux en vue d'applications biologiques (collaboration avec J.W. Shim, Docteurant, Microsystem Research Center, Korean Institute of Science and Technology) ont été réalisées. Les résultats obtenus, notamment avec un modèle plan à 19 vitesses (Grosfils et al., 1992), sont en accord avec ceux donnés par les simulations DSMC. Cependant ils sont assez bruités et devraient être améliorés en utilisant les gaz de Boltzmann sur réseaux. Enfin remarquons que les temps de calcul sont très courts comparés à ceux de la méthode DSMC.

**FIGURE 2-12**  
*Simulation  
 d'écoulement en  
 microfiltre englobant  
 plusieurs micro-  
 canaux*



Toujours pour un écoulement dans un micro-canal, une description de type milieu continu à partir des équations de la dynamique des fluides compressibles de Navier-Stokes et de Burnett a été faite. Les adimensionalisations adéquates pour les écoulements à faible nombre de Mach et avec des nombres de Knudsen faibles à modérés ont été discutées. L'introduction d'un petit paramètre lié à la géométrie du micro-canal et l'application du Principe de Moindre Dégénérescence ont permis de construire un modèle d'écoulement et les deux premières approximations ont ainsi

été explicitées. Une validation numérique par une approche DSMC reste à faire.

Les micro-filtres sont utilisés pour capturer de très petites particules. La raréfaction du gaz devant être prise en considération, la condition usuelle d'adhérence gaz-particule est à remplacer par une condition de glissement faisant intervenir le libre parcours moyen du gaz. Dans le cadre de l'approximation de Stokes, une méthode a été proposée pour calculer les efforts exercés sur une particule solide par un fluide visqueux incompressible, les conditions aux limites fluide-particules étant celles du glissement. En utilisant la transformée de Fourier et une formule de réciprocité, ces efforts sont déduits de ceux qui sont obtenus pour deux mouvements simples de vibration de la particule dans un fluide au repos. Les résultats sont explicités pour une particule sphérique. Une attention particulière est portée au terme d'histoire de Boussinesq-Basset.

---

## *H - Perspectives*

L'activité biomécanique fluide continue à être un axe fort du laboratoire, qui devrait être renforcé par l'arrivée de Patrice Flaud deux jours par semaine. Un axe prometteur est de conjuguer les compétences en matière d'instabilité et de développement spatio-temporel des instabilités avec le cadre des écoulements multiphasiques cisailés pertinents pour les études plus appliquées dans le domaine de l'atomisation. Les calculs actuels sont soit des calculs de très grande taille en 3D qui ne permettent qu'une « démonstration » des phénomènes complexes envisagés, soit des calculs 2D pour lesquelles il est déjà possible de varier les paramètres du problème de façon extensive afin d'en tirer des conclusions similaires à celle que l'on peut obtenir d'une activité expérimentale aisément reproductible. Dans l'avenir des calculs 3D de cette sorte seront possibles, renforçant la pertinence de ces calculs pour les besoins de l'environnement socioéconomique. Notons aussi de nouvelles collaborations internationales comme celle débutée par C. Josserand avec les équipes de W. Zhang à Chicago et S. Manservigi à Bologne sur les impacts de gouttes. Les impacts de gouttes, tout comme l'atomisation, font l'objet d'une collaboration étroite avec l'équipe FRT et notamment Luis Lemoyne qui est appelée à se développer. L'activité instabilité est fortement liée aux autres et par exemple à l'étude de l'atomisation. Elle fait l'objet de plusieurs collaborations prometteuses avec des équipes extérieures. L'activité tourbillons devrait recevoir une impulsion nouvelle avec l'arrivée de A. Antkowiak. Dans le domaine des milieux granulaires, on note que de nouveaux problèmes à caractère géophysique ont commencé à être abordés, notamment l'étude des méandres de rivière (thèse de O. Devauchelle) et les levées de débris (activité de L. Staron CR récemment recrutée) ; ces thèmes sont en croissance. Dans le cadre de l'étude d'écoulements dans des micro-filtres, les calculs par la méthode DSMC seront étendus par la simulation et le suivi de fines particules.

Enfin une perspective importante et transversale pour l'équipe FCIH est la mise en place d'une activité expérimentale sur le site Jussieu, à la fois dans une pièce dédiée au 5e étage (15 m<sup>2</sup> environ) et dans la salle RC06 de la barre 46-00 (40m<sup>2</sup>). Cette activité est rendue possible par l'accueil à temps partiel de Patrice Flaud et le recrutement de A. Antkowiak. L'arrivée de Paul Collini dans l'équipe FCIH permettra aussi de développer des expériences d'hydrodynamiques en écoulement diphasique en cavité.

En ce qui concerne les besoins de personnel, l'équipe FCIH a déjà subi et va subir de très nombreux départs à la retraite. En outre il faut anticiper l'essaimage de jeunes HDR dans divers autres laboratoires. Aussi l'équipe souhaite-t-elle faciliter et demander un recrutement important de trois à quatre chercheurs et enseignants chercheurs au cours du prochain quadriennal.

Le développement de ces activités réclame aussi un personnel technique, un programmeur expérimenté pour l'entretien des codes de calcul importants développés dans l'équipe et un technicien pour la plate-forme expérimentale. À terme, vers la fin du quadriennal, l'activité expérimentale, appelée à se développer, pourra bénéficier de locaux supplémentaires.



*Publications F.C.I.H.*

Revue à Comité de lecture

2007

1. Ameer D., Croizet C., Maroteaux F., & Gatignol R. (2007). Modélisation des écoulements dans des micro-filtres par la méthode DSMC *La Houille Blanche*, 6: p.45-50.
2. Aulisa E., Manservigi S., Scardovelli R., & Zaleski S. . (2007). Interface reconstruction with least-squares fit and split advection in three-dimensional Cartesian geometry *J. Comput. Phys.*, 225: p.2301-2319.
3. Boeck T., Li J., Lopez-Pages E., Yecko P., & Zaleski S. (2007). Ligament formation in sheared liquid-gas layers. *Theor. Comput. Fluid Dynamics*, 21: p.59-76.
4. Décobert J., Dupuis N., Lagrée P.Y., Lagay N., et al. (2007). Modeling and characterization of AlGaInAs and related materials using selective area growth by metal-organic vapor-phase epitaxy *Journal of Crystal Growth*, 298: p.28-31.
5. Devauchelle O., Josserand C., Lagrée P.Y., & Zaleski S. (2007). Morphodynamic modeling of erodible laminar channels. *Physical Review E*.
6. Devauchelle O., Josserand C., & Zaleski S. (2007). Forced dewetting on porous media. *J. Fluid Mech.*, 574: p.343-364.
7. Fullana J.M., Dispot N., Flaud P., & Rossi M. (2007). An inverse method for non-invasive viscosity measurements. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 38: p.79-92.
8. Gatignol R. (2007). On the history term of Boussinesq-Basset when the viscous fluid slips on the particle (à paraître). *C.R. Mécanique*, 335.
9. Huang Z., De Luca A., Atherton T.J., Bird M., Rosenblatt C., & Carles P. (2007). Rayleigh-Taylor instability experiments with precise and arbitrary control of the initial interface shape (à paraître en 2007) *Physical Review Letters*
10. Josserand C., Pomeau Y., & Rica S. (2007). Patterns and supersolids. *Euro. Phys. J.S.*, 146: p.47-61.
11. Josserand C., Pomeau Y., & Rica S. (2007). Coexistence of ordinary elasticity and superfluidity in a model of a defect-free supersolid. *Phys. Rev. Lett.*, 98: p.195301.
12. Josserand C., & Rossi M. (2007). The merging of two co-rotating vortices : a numerical study *European Journal of Mechanics / B Fluid*
13. Kadau K., Rosenblatt C., Barber J.L., Germann T.C., et al. (2007). The importance of fluctuations in fluid mixing. *PNAS* 104, 19: p.7741-7745.
14. Lagrée P.Y. (2007). Interactive Boundary Layer in a Hele Shaw cell *Z. Angew. Math. Mech.*, 87: p.486-498.
15. Lagrée P.Y., Van Hirtum A., & Pelorson X. (2007). Asymmetrical effects in a 2D stenosis. *European Journal of Mechanics - B / Fluids*, 26(1): p.83-92.
16. Lebon G., Lhuillier D., & Palumbo A. (2007). A thermodynamic description of thermodiffusion in suspensions of rigid particles. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 146: p.3386-3397.



17. Lhuillier D. (2007). Constitutive relations for steady flows of dense granular liquids *Physica A*, 383: p.267-275.
18. Nguyen X.L., & Chaskalovic J. (2007). Prevalence of residual excessive daytime sleepness in patients correctly treated with continuous positive airway pressure. *Sleep medicine*.
19. Prud'homme R., & El Ganaoui M. (2007). Solid/liquid phase change : recent studies and models *FDMP (Fluid Dynamics and Material Processing Tech. Science Press)*, 3 (2): p.161-172.
20. Prud'homme R., Habiballah M., Matuszewski L., Mauriot Y., & Nicole A. (2007). Theoretical analysis of Transient heating and dynamic response to acoustic oscillation of a vaporizing droplet *JPP*.

## 2006

21. Bartolo D., Josserand C., & Bonn D. (2006). Singular jets and bubbles in drop impact. *Phys Rev. Lett.*, 96: p.124501.
22. Bouthier M. (2006). Roses de mouvements premiers. *C.R. Mécanique*.
23. Bouthier M. (2006). Résolution des Fluides de second grade. *C.R. Mécanique*.
24. Carles P. (2006). Thermoacoustic Waves Near the Liquid-Vapor Critical Point *Physics of Fluids*, 18: p.126102.
25. Carles P., Huang Z., Carbone G., & Rosenblatt C. (2006). Rayleigh-Taylor Instability for Immiscible Fluids of Arbitrary Viscosities : A Magnetic Levitation Investigation and Theoretical Model. *Physical Review Letters*, 96: p.104501.
26. Delprat N. (2006). Rossiter's formula : A simple spectral model for a complex amplitude modulation process ? . *Physics of Fluids*, 18(7): p.1-4.
27. During G., Josserand C., & Rica S. (2006 ). Weak turbulence for a vibrating plate : can one hear a Kolmogorov spectrum ? *Phys Rev. Lett.*, 97: p.025503.
28. Giacometti A., Rossi M., & Battiston L. (2006). Collective dynamics in coupled maps on a lattice with quenched disorder. *Phys Rev. E*, 73: p.03214-03211/036214-036211.
29. Josserand C., Lagrée P.-Y., & Lhuillier D. (2006). Granular pressure and the thickness of a layer jamming on a rough incline. *Europhysics Letters*, 73: p.363-369.
30. Kouakou K.K.J., & Lagrée P.Y. (2006). Evolution of a model dune in a shear flow. *European Journal of Mechanics B / Fluids* 25: p.348-359
31. Lagrée P.Y., & Lhuillier D. (2006). On steady avalanches of dense granular media. *Uzbek J. of Phys.*, 8 (4-5): p.201-207.
32. Lagrée P.Y., & Lhuillier D. (2006). The Couette flow of dense and fluid-saturated granular media. *European Journal of Mechanics B / Fluids* 25: p.960-970.
33. Nicodin I., & Gatignol R. (2006). Unsteady half-space evaporation and condensation problems on the basis of the discrete kinetic theory *Physics of Fluids*, 18: p.127105 127101-127111.
34. Prud'homme R., & El Ganaoui M. (2006). Solid/liquid phase change : recent studies and models 1, n° 1 p.11-21.

2005

35. Bartolo D., Josserand C., & Bonn D. (2005). Retraction dynamics of aqueous drops upon impact on non-wetting surfaces. *J. Fluid Mech*, 545: p.329-338.
36. Boeck T., & Zaleski S. (2005). Viscous versus inviscid instability of two-phase mixing layers with continuous velocity profile *Phys Fluids*, 17: p.032106-032101-032106-032111.
37. Boeck T., & Zaleski S. (2005). Instability of two-phase mixing layers : analysis of exact and approximate base flows from boundary layer theory. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 30: p.215.
38. Bouthier M. (2005). Ecoulements viscoélastiques et potentiels du second ordre. *C.R. Mathématiques*.
39. Carles P., & Dadzie K. (2005). Two time-scales of the Piston Effect. *Physical Review E*, 71: p.066310.
40. Carles P., Zhong F., Weilert M., & Barmatz M. (2005). A Piston-Effect Solution for the relaxation in a cylindrical cell *Physical Review E*, 71: p.0411201.
41. Chapuliot S., Gourdin C., Payen T., Magnaud J.P., & Monavon A. (2005). Hydro-thermal-mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee *Nuclear Engineering and Design*, 235: p.575-596.
42. Chauvière, & Chaskalovic J. (2005). Dusty debris in tornadoes modeled by high Reynolds number two cells vortices. *Int. J. Engng Sci.*, 43: p.1486-1497.
43. Connaughton C., Josserand C., Picozzi A., Pomeau Y., & Rica S. (2005). Condensation of classical nonlinear waves. *Phys. Rev. Lett.*, 95: p.263901.
44. Croizet C. (2005). A BGK model for a suspension of inelastic spheres. *Mathematical and Computer Modelling* 41: p.1379-1388.
45. Delbende I., & Rossi M. (2005). Nonlinear evolution of a swirling jet instability. *Physics of Fluids* 17(4): p.044103.
46. Descazeaud A., Zerbib M., Hofer M.D., Chaskalovic J., Debré B., & Peyromaure M. (2005). Evolution of health-related quality of life two to seven years after retropublic radical prostatectomy : evaluation by UCLA prostate cancer index. *World J Urol.*, 23(4): p.257-262.
47. Duchemin L., Josserand C., & Clavin P. (2005). Asymptotic behaviour of the Rayleigh-Taylor instability *Phys. Rev. Lett.*, 94: p.224501.
48. Josserand C., & Pomeau Y. (2005). Vortices in condensate mixtures *Phys. Rev. A*, 72: p.023618.
49. Kouakou K.K.J., Lagrée P.Y. (2005). Stability of an erodible bed in various shear flow. *European Physical Journal B - Condensed Matter* 47 (1): p.115-125.
50. Lagrée P.Y., Berger E., Deverge M., Vilain C., & Hirschberg A. (2005). Characterization of the pressure drop in a 2D symmetrical pipe : some asymptotical, numerical and experimental comparisons *Z. Angew. Math. Mech.*, 85 (2): p.141-146.
51. Lagrée P.Y., & Lorthois S. (2005). The RNS/Prandtl equations and their link with other asymptotic descriptions. Application to the computation of the maximum value of the Wall Shear Stress in a pipe *Int. J. Engng Sci.*, 43 (3-4): p.352-378.

52. Van Hirtum A., Pelorson X., & Lagrée P.Y. (2005). In-vitro validation of some flow assumptions for the prediction of the pressure distribution during obstructive sleep apnea *Medical and biological engineering and computing* 43 (1): p.162-171.
53. Yecko P., & Zaleski S. (2005). Transient growth in two-phase mixing layers *Journal of fluid mechanics* 528: p.43-52.

## 2004

54. Josserand C. (2004). *Fundamental Fluid Flows*. BP-Institute, Cambridge, Royaume-Uni
55. Josserand C., & Zaleski S. (2004). *Numerical insights of drop impacts on hydrophobic surfaces* Paper presented at the *APS DFD meeting 2004*
56. Josserand C., & Zaleski S. (2004). *Three dimensional numerical simulation of splashing*. Paper presented at the *Euromech 450, Studies on Splashes a century after A.M. Worthington, conférence sur invitation*. Marseille, France
57. Préau S., Prud'homme R., & Gatignol R. (2004 ). *Supercritical vaporization process*. Paper presented at the *ICNPAA*. Timisoara, Roumanie
58. Prud'homme R. (2004 ). *French micro-gravity program for solid/liquid phase change : experiments and models (Keynote)*. Paper presented at the *CTAC 2004*. Melbourne, Australie
59. Prud'homme R., & Préau S. (2004 ). *Echanges thermiques et phases fluides*. Paper presented at the *ICTEA-HT3-06*. Beyrouth, Liban
60. Yecko P., & Zaleski S. (2004 ). *Optimal Disturbances in Two-Phase Mixing Layers*. Paper presented at the *APS DFD meeting 2004*.
61. Zaleski S. (2004 ). *Construction, entretien et diffusion de codes libres en mécanique des fluides : l'entretien de Gerris et SURFER*. Paper presented at the *Journée mécanique des fluides du CINES*.
62. Zaleski S., & Boeck T. (2004). *Numerical investigation of sheared liquid gas flow and atomization*. Paper presented at the *APS DFD meeting 2004*.

## Ouvrages

### 2007

63. Prud'homme R. (2007). *Heterogeneous and reactive fluids : flows and transfers (to be published)*. Series FMIA, Birkhauser, Springer-Verlag. (380 p.)

### 2004

64. Chaskalovic J. (2004). *Méthodes des éléments finis pour les sciences de l'ingénieur*. Tec and Doc - Lavoisier.

## Chapitres d'ouvrages

## 2007

65. El Ganaoui M., Prud'homme R., & Bennacer R. (2007). Melting and solidification - Special Issue. In *Comptes Rendus Mécanique* (Vol. 335, pp. 247-356): Académie des Sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS
66. Carles P. (2007). Thermophysical Approach of Supercritical Fluids In F. Cansell & O. Fouassier (Eds.), *Supercritical Fluids and Materials* Nancy: ISASF.

## 2005

67. Salomov U., Lhuillier D., & Nadim A. (2005). A New Dumbbell-Like Model for Dilute Polymer Solutions. In K. Hutter Y. Wang (Ed.), *Trends in Applications of Mathematics to Mechanics* (pp. 205-213). Aachen, Allemagne: Shaker Verlag.
68. Josserand C., Lagrée P.Y., & Lhuillier D. (2005). Couette Flow of Dry Granular Materials In K. Hutter Y. Wang (Ed.), *Trends in Applications of Mathematics to Mechanics* (pp. 157-164). Aachen, Allemagne: Shaker Verlag.

## 2004

69. Prud'homme R., & El Ganaoui M. (2004). Microgravity / La micropesanteur - Thematic Issue. In *Comptes Rendus Mécanique* (Vol. 332, pp. 319-486): Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.
70. Prud'homme R., & EL Ganaoui M. (2004). *Microgravité et Transferts* Vol. 5, N°5 (pp. 529-634): EDP Sciences.

## Colloques avec actes

## 2007

71. Ameer D., Croizet C., Maroteaux F., & Gatignol R. (2007). *DSMC Simulation of Pressure-Driven Flows and Heat Transfer in Microfilters* Paper presented at the *Proceedings of 25th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Saint-Petersbourg, Russie.
72. Ameer D., Croizet C., Maroteaux F., & Gatignol R. (2007). *Ecoulement induit par un gradient de température dans un micro-canal* Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique (actes sur CD-ROM)* Grenoble, France.
73. Boeck T., Krasnov D., Rossi M., & Zikanov O. (2007). *Transition to Turbulence in Plane Channel Flow with Spanwise Magnetic Field*. Paper presented at the *Proceedings of 11th EUROMECH European Turbulence Conference (ETC 11)*, Porto, Portugal.
74. Boeck T., Krasnov D., Rossi M., Zikanov O., & Knaepen B. (2007). *Transition to turbulence in MHD channel flow with spanwise magnetic field*. Paper presented at the *Proceedings of the 2006 Summer Program*, Center for Turbulence Research, Stanford University

75. Zaleski S., Franco F., & Chraïbi M. (2007). *Bubble Geometry During Solution Gas Drive Process In Heavy Oils* Paper presented at the *CIPC 2007*, Calgary, Canada.

## 2006

76. Chaskalovic J. (2006). *Gravitation theory applied to mathematical modelling in geo-marketing* Paper presented at the *4th International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Material Technologies (MMT-2006)*, University Center de Samaria, Ariel, Israel.
77. Chouly F., Van Hirtum A., Lagrée P.-Y., Paoli J.R., Pelorson X., & Payan Y. (2006). *Simulation of the Retroglossal Fluid-Structure Interaction During Obstructive Sleep Apnea*. Paper presented at the *3rd International Symposium on Biomedical Simulation* Zurich, Suisse.
78. Croizet C., & Gatignol R. (2006). *Grad's Thirteen Moment Equations For A Heterogeneous Dispersed Medium (à paraître)*. Paper presented at the *Proceedings of 25th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Saint-Pétersbourg, Russie.
79. Décobert J., Dupuis N., Lagrée P.Y., Lagay N., et al. (2006). *Modelling and characterization of AlGaInAs and related materials using Selective Area Growth by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy*. Paper presented at the *ICMOVPE - XIII*, Miyazaki, Japon.
80. Dupuis N., Décobert J., Lagrée P.Y., Lagay N., et al. (2006). *Simulation and Characterization of AlGaInAs layers selectively grown by LP-MOVPE*. Paper presented at the *SIOE'06, Semiconductore and integrated optoelectronics*, Cardiff, Royaume-Uni.
81. Josserand C., & Zaleski S. (2006). *Full numerical simulations of droplet impact and splashing* Paper presented at the *DITICE workshop on Drop/wall interaction : Industrial applications, Experiments and Modeling (actes sur CD-ROM)*, Bergamo, Italie.
82. Mazeyrat J., Romain O., Garda P., Lagrée P.Y., et al. (2006). *IEEE Biocas 2006*. Paper presented at the *IEEE Biocas 2006*, Londres, Royaume-Uni
83. Zaleski S. (2006). *Direct Numerical Simulation of Droplet Formation and Breakup*. Paper presented at the *IUTAM Symposium on Computational Approaches to Multiphase Flow* Argonne National Laboratory
84. Zaleski S., & Scardovelli R. (2006). *Recent advances in VOF simulations of two-phase flow* Paper presented at the *Europe-Japan Two Phase Flow Group Meeting (actes sur CD-ROM)*, Kyoto, Japon.

## 2005

85. Bianchi G.M., Pelloni P., Toninel S., Scardovelli R., Leboissetier A., & Zaleski S. (2005). *A Quasi-direct 3D Simulation of the Atomization of High-Speed Liquid Jets* Paper presented at the *Proceedings of ICES 05, 2005 ASME ICE Division Spring Technical Conference*, Chicago, Etats-Unis.
86. Bianchi G.M., Pelloni P., Toninel S., Zaleski S., Leboissetier A., & Scardovelli R. (2005). *Improving the Knowledge of High-Speed Liquid Jets Atomization by Using Quasi-Direct 3D Simulation* Paper presented at the *ICE 2005 - 7th International Conference on Engines for Automobile*, Capri, Italie.

87. Croizet C., & Gatignol R. (2005). *Point d'arrêt d'un milieu diphasique dispersé avec aspiration des particules à la paroi*. Paper presented at the *Actes du 17ème congrès français de mécanique (actes sur CD-ROM)* Troyes, France.
88. D'Almeida A., & Gatignol R. (2005). *Modèles discrets et problèmes d'évaporation et de condensation*. Paper presented at the *Actes du 17ème congrès français de mécanique (actes sur CD-ROM)*, Troyes, France.
89. Décobert J., Lagrée P.Y., Lagay N., Dupuis N., et al. (2005). *MOVPE Selective Area Growth applied to the integration of a AlGaInAs based Electroabsorption Modulator with a spot-size converter* Paper presented at the *11th European Workshop on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (EW-MOVPE XI)*, Lausanne, Suisse.
90. Dispot N., Flaud P., & Rossi M. (2005). *Détermination de la viscosité sanguine par méthodes inverses atraumatiques*. Paper presented at the *Congrès Français de Mécanique* Troyes, France.
91. Gatignol R., & Croizet C. (2005). *Kinetic Modelling of a Heterogeneous Dispersed Medium Rarefied Gas Dynamics* Paper presented at the *Proceedings of the 24th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics* Bari, Italie.
92. Josserand C., Lagrée P.Y., & Lhuillier D. (2005). *Un nouveau modèle pour les milieux granulaires denses en écoulement*. Paper presented at the *Congrès Français de Mécanique*, Troyes, France.
93. Prud'homme R., Habiballah M., Nicole A., & Mauriot Y. (2005). *Instabilités liées au phénomène d'évaporation : Réponse dynamique d'une goutte à un champ acoustique*. Paper presented at the *Congrès Français de Mécanique*, Troyes, France.
94. Rossi M., & Delbende I. (2005). *Dynamique non-linéaire d'un jet tournant*. Paper presented at the *Congrès Français de Mécanique*, Troyes, France.
95. Zaleski S., Franco F., Chraïbi M., & Tardy P. (2005). *Analysis of a macroscopic nucleation model for simulation of the solution gas drive in heavy oils paper SPE 97795*. Paper presented at the *ITOHOS Conference*, Calgary, Canada.

## 2004

96. Boeck T., & Zaleski S. (2004). *Numerical Simulation of Liquid-Gas Interfaces with Applications to Atomization* Paper presented at the *Proceedings of the 21st International Congress of theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, Varsovie, Pologne.
97. Franco F., Zaleski S., Cordelier P.R., Terpolilli P., Tardy P., & Bayon Y. (2004). *A new macroscopic nucleation model for simulation of the solution gas drive in heavy oils* Paper presented at the *Petroleum Society's 5th Canadian International Petroleum Conference (55th Annual Technical Meeting)*, actes sur CD-ROM, Calgary, Alberta, Canada
98. Gatignol R., & Croizet C. (2004). *Kinetic Modelling of a Heterogeneous Dispersed Medium*. Paper presented at the *Proceedings of the 24th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Bari, Italie
99. Josserand C., & Zaleski S. (2004). *Spreading and Retraction of Impacting Drops* Paper presented at the *Proceedings of the 21st International Congress of theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, Varsovie, Pologne.

100. Kulski O., Chaskalovic J., & Plachot M. (2004). *Facteurs explicatifs des pronostics des IIIU : analyse exploratoire de 2089 cycles à l'aide d'outils statistiques de Data Mining* Paper presented at the *9th Meeting of the French Federation of the Reproduction Studies* Palais des Congrès, Paris, France.
101. Nicodin I., & Gatignol R. (2004). *Modeling of the evaporation problem on the basis of the discrete kinetic theory*. Paper presented at the *5th International Conference on Mathematical Problems in Engineering and Aerospace Sciences (ICNPAA-2004)*, actes à paraître, Timisoara, Roumanie.
102. Préau S., Prud'homme R., Ouazzani J., & Zappoli B. (2004). *Pertinence de la comparaison à la loi en  $d^2$  en évaporation supercritique*. Paper presented at the *Microgravity/La micropesanteur - Comptes Rendus Mécanique*.
103. Prud'homme R., & El Ganaoui M. (2004). *Foreword - Editorial in Microgravity/La micropesanteur*. Paper presented at the *Comptes Rendus Mécanique*.
104. Zaleski S. (2004). *High resolution simulations of two-phase mixing layers and ligament formation*. Paper presented at the *IUTAM symposium on "Recent Advances in Disperse Multiphase Flow Simulation"*, *conférence sur invitation*, Argonne National Laboratory, IL.
105. Zaleski S., & Josserand C. (2004). *Droplet-Wall Interaction : Numerical Experiments and Theory*. Paper presented at the *International Conference on Multiphase Flow ICMF 2004*, actes sur CD-ROM.

## Colloques sans actes

### 2007

106. Prud'homme R., Mauriot Y., & Habiballah M. (2007). *Modeling of internal thermal exchanges of a vaporizing droplet submitted to pressure oscillations* Paper presented at the *6th REST Scientific Workshop*. Technical University, Munich
107. Zaleski S., & Chraïbi M. (2007). *Slow degassing in porous media* Paper presented at the *"Promenades dans la physique d'aujourd'hui"*, colloque en l'honneur du 65ème anniversaire de Yves Pomeau. ENS, Paris
108. Zaleski S. (2007). *The Taylor-Culick end rim and mechanics of droplet formation*. Paper presented at the *Symposium on Two-phase incompressible flow : modelling aspects and methods for numerical simulation, RWTH, conférence sur invitation*. Aachen, Allemagne
109. Zaleski S. (2007). *Simulation of Jet and Droplet Formation in Droplet Impact and Atomizing Jets* Paper presented at the *IUTAM symposium on Recent Advances in Multiphase Flows : Numerical and Experimental, conférence sur invitation*. Istanbul, Turquie
110. Zaleski S. (2007). *Recent Advances in the Simulation of Fluid Interfaces and Applications to Droplet atomization and Spashing*. Paper presented at the *International Conference on Fluid Dynamics, ICFD 2007 Conference, conférence sur invitation*. Reading, Royaume-Uni
111. Rossi M. (2007). *Vortex stability* Paper presented at the *Workshop/Summer school, Vortices and vortex sheets : theories, numerics and applications* Porquerolles, Hyères, France

112. Prud'homme R., Mauriot Y., & Habiballah M. (2007). *Modelling of internal exchanges of vaporizing droplet submitted to pressure oscillations*. Paper presented at the *6.REST Scientific Workshop* Munich, Allemagne
113. Sidi-Ali K., & Gatignol R. (2007). *Horizontal stratified gas-liquid flow simulation with CFD code Fluent*. Paper presented at the *ANSYS Regional Conference Converge*. Paris

## 2006

114. Azzami M., Cherigui T., Frelat J., Karouia M., & Lagrée P.Y. (2006). *Déformation de la valve Aortique : première approche mécanique* Paper presented at the *GDR 2760*. Marseille
115. Delbende I., & Rossi M. (2006 ). *Reconnection of vortices without or with axial flow*. Paper presented at the *KTH 26-30 juin 2006 Stockholm BOOK of abstract P311, Euromech Fluid Mechanics Conference*. Stockholm, Suède
116. Delbende I., & Rossi M. (2006 ). *Interaction between antiparallel vortices with or without swirl*. Paper presented at the *2nd SCAT European Workshop, Mathematical Modelling and Challenges in Computational Science*
117. Devauchelle O., Josserand C., & Zaleski S. (2006 ). *Stability analysis of laminar flume flow coupled with sediment transport* Paper presented at the *APS DFD meeting*. Tampa, Floride, Etats-Unis
118. Dispot N., Fullana J.M., Flaud P., & Rossi M. (2006). *Atraumatic Inverse Methods in Haemodynamics*. Paper presented at the *2nd SCAT European Workshop, Mathematical Modelling and Challenges in Computational Science*.
119. Grandjean H., Salsac A.V., Burriesci G., & Zaleski S. (2006). *Motion and deformation of droplets through circular tubes*. Paper presented at the *APS DFD meeting*. Tampa, Floride, Etats-Unis
120. Josserand C. (2006). *Workshop on Dissipative Solitons*. Max Planck Institute, Dresde, Allemagne
121. Josserand C. (2006). *SIAM Conference on Nonlinear waves and coherent structures* Seattle, Etats-Unis
122. Josserand C., Lagrée P.Y., & Lhuillier D. (2006 ). *Entropic pressure in granular liquids* Paper presented at the *Dygram 2006*. Rennes, France
123. Lagrée P.Y. (2006 ). *Boundary layer methods in Biomechanics*. Paper presented at the *Second European Workshop SCAT*. Paris
124. Lagrée P.Y., & Kouakou K.K.J. (2006). *Stability of an erodible bed in a shear flow*. Paper presented at the *Dygram 2006*. Rennes
125. Lagrée P.Y., & Staron L. (2006). *Stability of erodible beds and collapse of column of grains*. Paper presented at the *2nd European Workshop SCAT*. Paris
126. Lhuillier D., & Lagrée P.Y. (2006). *On steady avalanches of dense granular media, role of wall friction*. Paper presented at the *Workshop GDR Midi*. Carry le Rouet, France
127. Scardovelli R., & Zaleski S. (2006). *Recent advances in VOF simulations of two-phase flow*. Paper presented at the *4th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting conférence sur invitation*. Kanbaikan, Doshiba University, Kyoto, Japon



128. Zaleski S. (2006). *Three-Dimensional Spatial Development Of Atomizing Jets : Theory, Simulation And Elementary Processes*. Paper presented at the *Fifth International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Process Industries, conférence sur invitation*. Hilton on the Park, Melbourne, Australie
129. Zaleski S. (2006). *Recent Advances in the numerical simulation of droplet collisions and impacts*. Paper presented at the *Euromech Colloquium 479, Numerical Simulation of Multiphase Flow with Deformable Interfaces, conférence sur invitation*. The Pier, Scheveningen, Pays-Bas

## 2005

130. Chaskalovic J. (2005). *A new mathematical law of the advertising remembering*. Paper presented at the *National Congress of IREP*. Paris, France
131. Delbende I., & Rossi M. (2005). *Aspects of nonlinear interactions in trailing vortices*. Paper presented at the *International Conference on High Reynolds Number Vortex Interactions*.
132. Gatignol R. (2005). *Quelques remarques sur le terme historique de Basset-Boussinesq*. Paper presented at the *Journée "Boussinesq"*. Laboratoire de Mécanique de Lille
133. Josserand C. (2005). *Quelques aspects de la physique des milieux granulaires*. Ecole d'été de Peyresq
134. Josserand C. (2005). *Workshop "Quantum degenerate gases"*. Fondation des Treilles
135. Lagrée P.Y., & Kouakou K.K.J. (2005). *Stabilité d'un fond érodable sous un écoulement cisailé*. Paper presented at the *Workshop GDR Midi*. Carry le Rouet
136. Prud'homme R., & Préau S. (2005). *Non classical regression laws for droplet vaporization*. Paper presented at the *ICCHMT*. Cachan, France
137. Zaleski S. (2005). *Breaking Merging and Splashing Bubbles : The art of fluid interface CFD*. Paper presented at the *Computational Fluid Dynamics, in Chemical Reaction Engineering IV, conférence plénière sur invitation*. Barga, Italie
138. Zaleski S. (2005). *Simulation of three dimensional focusing in splashes and atomizing liquid-gas mixing layers*. Paper presented at the *Focusing Stress in a Soft Interface, conférence sur invitation*. University of Chicago, USA
139. Zaleski S. (2005). *Simulation numérique directe des écoulements complexes avec interfaces 2005*. Paper presented at the *séminaire CEA-GAMNI*. Institut Henri Poincaré, Paris

## 2004

140. Josserand C. (2004). *Fundamental Fluid Flows*. BP-Institute, Cambridge, Royaume-Uni
141. Josserand C., & Zaleski S. (2004). *Numerical insights of drop impacts on hydrophobic surfaces*. Paper presented at the *APS DFD meeting 2004*
142. Josserand C., & Zaleski S. (2004). *Three dimensional numerical simulation of splashing*. Paper presented at the *Euromech 450, Studies on Splashes a century after A.M. Worthington, conférence sur invitation*. Marseille, France
143. Préau S., Prud'homme R., & Gatignol R. (2004). *Supercritical vaporization process*. Paper presented at the *ICNPAA*. Timisoara, Roumanie

144. Prud'homme R. (2004). *French micro-gravity program for solid/liquid phase change : experiments and models (Keynote)*. Paper presented at the *CTAC 2004*. Melbourne, Australie
145. Prud'homme R., & Préau S. (2004). *Echanges thermiques et phases fluides*. Paper presented at the *ICTEA-HT3-06*. Beyrouth, Liban
146. Yecko P., & Zaleski S. (2004). *Optimal Disturbances in Two-Phase Mixing Layers*. Paper presented at the *APS DFD meeting 2004*.
147. Zaleski S. (2004). *Construction, entretien et diffusion de codes libres en mécanique des fluides : l'entretien de Gerris et SURFER*. Paper presented at the *Journée mécanique des fluides du CINES*.
148. Zaleski S., & Boeck T. (2004). *Numerical investigation of sheared liquid gas flow and atomization*. Paper presented at the *APS DFD meeting 2004*.

## Thèses

2004

149. Carlès P. (2004). *Parcours Théorique, Numérique et Expérimental autour de l'Hydrodynamique des Fluides Supercritiques et des Instabilités Gravitationnelles d'Interfaces*. Thèse d'Habilitation à Diriger les Recherches.

## Rapports de contrat

2007

150. Monavon A. (2007). *Influence de la convection naturelle dans un échangeur à plaques*, CEA, Rapport de synthèse SFME/LTMF/RT/07-004/A.

2006

151. Lagrée P.Y. (2006). *Résolution numérique des équations SAG, Epitaxie Sélective*, Rapport Alcatel.
152. Magnaud J.P., Gourdin C., & Monavon A. (2006). *Mise en évidence d'instabilités déterministes dans les essais thermohydrauliques FATHER de 2003*, CEA, Rapport de synthèse SFME/LTMF/RT/06-044/A.
153. Monavon A. (2006). *Evolution d'émulsions dans un procédé d'extraction*, CEA, Rapport de synthèse SFME/LTMF/RT/06-051/A.
154. Monavon A. (2006). *Approximation par tranches de l'écoulement compressible, diphasique et réactif dans un étage d'accélération à poudre (E.A.P.)* ONERA, Rapport de synthèse, convention 02/CNES/0014
155. Monavon A. (2006). *Analyse asymptotique du transport de tourbillons toriques dans un étage d'accélération à poudre (E.A.P.)* ONERA, Rapport de synthèse, convention 02/CNES/0014.

2005

156. Monavon A. (2005). *Modélisation d'un échangeur plan, à plaques, par la méthode des échelles multiples* CEA, Rapport de synthèse SFME/LTMF/RT/05-041/A.

## 2004

157. Delprat N., & Sagaut P. (2004). *Identification et analyse des fluctuations cohérentes au sein de l'écoulement affleurant une cavité par une approche signal* rapport final contrat ONERA.

## Brevets

## 2006

158. Romain O., Mazeyrat J., Kokabi H., Garda P., et al. (2006). Endoprothèse intelligente. France Patent No. BFF06 P0044. UPMC, APHP & CNRS.

## Autres

---



**F. R. T.**

**Fluides Réactifs et Turbulence**

---

# Fluides Réactifs et Turbulence

## *Chercheurs permanents*

CAVADIAS Siméon	Professeur UPMC
CHASSAING Jean-Camille	Maître de Conférence UPMC
DAVID Claire	Maître de Conférence UPMC
DAYMA Guillaume	Maître de Conférence UPMC
DRUAULT Philippe	Maître de Conférence UPMC
GEROLYMOS Georges	Professeur UPMC
GOMEZ Thomas	Maître de Conférence UPMC
GUIBERT Philippe	Professeur UPMC
LEGROS Guillaume	Maître de Conférence UPMC
LE MOYNE Luis	Maître de Conférence UPMC
LUCOR Didier	Chargé de Recherches CNRS
MICHON Guy-Jean	Ingénieur de Recherches UPMC
MITON Hubert	Chargé de Recherche CNRS
MORIN Céline	Maître de Conférence UPMC
ROCHELLE Pierre	Professeur Univ.Paris X
SAGAUT Pierre	Professeur UPMC
VALLET Isabelle	Maître de Conférence UPMC

*Effectifs au 31 Décembre 2007*

# *Fluides Réactifs et Turbulence*

---

## *A - Introduction*

Les activités de recherche de l'équipe sont résolument ancrées dans la double démarche d'accroissement des connaissances fondamentales et de participation à la résolution des grands problèmes sociétaux, l'accent étant porté sur les problèmes liés au développement durable. Dans cet objectif, les débouchés visés concernent l'optimisation des systèmes de propulsion et des engins (réduction de la consommation énergétique et des nuisances sonores) et la mise au point de systèmes de motorisations plus performants et plus propres. Les principaux secteurs d'application sont ceux du transport terrestre et du transport aérien.

Les recherches effectuées au sein de l'équipe couvrent des disciplines variées : mécanique des fluides, aéroacoustique, combustion. Elles sont complétées des travaux transverses dans les domaines de la métrologie, de la modélisation des écoulements et des méthodes numériques. La stratégie de recherche développée par l'équipe vise une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans les applications abordées par l'exploitation simultanée de modélisations, de simulations numériques et d'expérimentations.

Dans le domaine de l'optimisation des systèmes de propulsion et des engins, la maîtrise des efforts aérodynamiques et du bruit rayonné en écoulement turbulent, par des techniques passives ou actives, est au cœur des activités tant fondamentales qu'appliquées.

Dans le domaine de la modélisation des écoulements turbulents, toutes les techniques de simulation existantes (DNS, LES, VLES, URANS, RANS) sont développées, avec des extensions vers les écoulements diphasiques et les champs couplés. De plus, il faut noter l'important développement des travaux sur la modélisation et la propagation des incertitudes (notamment en collaboration avec le laboratoire J.L. Lions).

Dans le domaine de la combustion, une double approche expérimentale et de modélisation est menée afin d'apporter des réponses sur le déroulement de la combustion particulière HCCI où la chimie réactionnelle et la turbulence peuvent interagir et modifier le comportement théoriquement admis.

L'ensemble de ces recherches font l'objet de partenariats académiques et industriels, tant au niveau national qu'international.

Les travaux s'articulent autour de quatre opérations de recherche :

- 1. Turbulence, interactions, aéroacoustique
- 2. Combustion alternative, dépollution, turbulence et cinétique
- 3. Méthodes expérimentales et métrologie
- 4. Méthodes numériques stochastiques et déterministes, quantification des incertitudes, Optimisation et contrôle

L'équipe FRT est née du rapprochement de groupes de recherche très actifs issus de trois des anciens laboratoires qui ont fondé l'Institut Jean Le Rond d'Alembert. Elle est caractérisée par un large spectre thématique, et par sa dispersion sur deux sites géographiques (Jussieu et St-Cyr, le bâtiment 511 à Orsay devant être libéré dans le courant de l'été 2007). Un défi était de dégager des actions qui bénéficient de la mise en commun des compétences des équipes fondatrices. La volonté de recherche de synergies a, durant le premier semestre 2007, mené à la définition d'une thèse visant à appliquer les développements sur la magnétohydrodynamique numérique au contrôle de flamme, à des travaux sur la propagation des incertitudes dans les écoulements de turbomachines, et au dépôt d'une demande d'action ANR et d'un projet européen sur la modélisation avancée des écoulements turbulents. Cette démarche sera accentuée lors du prochain contrat quadriennal, et devrait servir de base à la politique de recrutement pour les années à venir.

La vitalité et la qualité de l'équipe FRT sont attestées par les indicateurs usuels : le taux de publication moyen sur la période 2003-2007 est de 1,7 articles/permanent/an, avec un flux contractuel de 825 k€/an (sommes notifiées, hors salaires). Ceci est d'autant plus remarquable que l'équipe est très majoritairement composée d'enseignants-chercheurs fortement investis dans le fonctionnement de l'université et ayant beaucoup contribué à la constitution de l'Institut Jean Le Rond d'Alembert. Tous les enseignants-chercheurs et chercheurs présents pour le prochain contrat quadriennal sont publiants (critère du Ministère).

## *B - Turbulence, Interaction, Aéroacoustique*

Cette opération de recherche est dédiée à la dynamique de la turbulence pleinement développée avec pour objectif son analyse, sa modélisation et son contrôle, l'accent étant porté sur les interactions entre la dynamique turbulente et un champ couplé ou une interface. Ces actions sont portées par l'intérêt des problèmes soulevés à la fois sur le plan fondamental et par la demande croissante sur ces thématiques en provenance des partenaires ayant un lien direct avec les applications (industriels, EPIC).

*Permanents impliqués : J.C. Chassaing, P. Druault, G. Gérolymos, T. Gomez, P. Guibert, L. Lemoyne, D. Lucor, P. Sagaut, I. Váallet*

On cherche, sur le plan fondamental, à décrire la dynamique en termes d'échanges d'énergie ou d'information (anisotropie) entre des échelles et des modes physiques différents (acoustique, vorticités, entropie). Alors que dans le cas incompressible l'analyse est restreinte aux couplages entre échelles différentes, dans le cas compressible elle doit être étendue pour prendre en compte la nature des fluctuations (par exemple au sens de Kovaszny). Ces couplages entre modes physiques posent bien évidemment une première question relative à leur définition, problème qui demeure encore ouvert dans le cas des écoulements cisailés. Le cas de la magnétohydrodynamique complique encore le problème en accroissant le nombre de modes physiques (ondes magnéto-soniques lentes et rapides, ondes d'Alfvén, ondes d'entropie).

Les différents mécanismes physiques liés aux interactions entre échelles et modes sont pour la plupart mal connus, voire presque inconnus, et leur compréhension nécessite des recherches fondamentales.

Un autre aspect de l'analyse de la dynamique turbulente consiste à identifier et analyser le rôle des structures cohérentes. Outre son aspect théorique, cet aspect revêt une grande importance dans l'analyse des transferts de masse et d'énergie, et occupe donc une place de première importance dans la conception et la compréhension des dispositifs de contrôle d'écoulement.

Cette thématique revêt une importance particulière dans le cadre de l'amélioration de la connaissance et la maîtrise de l'aérodynamique interne des moteurs, où les structures cohérentes jouent un rôle majeur dans le processus de transport, dans l'évolution de la turbulence, dans les phénomènes de transfert thermique, dans la diffusion d'espèces, ou encore dans le caractère non stationnaire ou conditionnel d'un phénomène.

Les travaux sont menés avec la volonté d'aller de la description théorique jusqu'à la production de résultats utilisables par les ingénieurs et les chercheurs développant une activité en lien direct avec l'application.

Les outils d'investigations principaux sont l'analyse théorique, la simulation numérique (simulation numérique directe, simulation des grandes échelles, et approches RANS et hybrides) et les expériences (menées sur le site de Saint-Cyr). Les recherches décrites ici



comprennent également les phases théoriques de modélisation physique et numérique nécessaires au développement des outils de calcul.

## B. 1 - Modélisation de la turbulence

Un premier axe concerne la modélisation des petites échelles turbulentes pour la simulation des grandes échelles. Les recherches regroupées dans ce sous-thème peuvent être déclinées comme suit :

- le développement de modèles sous-maille auto-adaptatifs. (collaborations ONERA et CEA, projets ANR : STI, SIET, STURM, projet PREDIT MIMOSA, contrat DASSAULT Aviation). On entend par modèles auto-adaptatifs des modèles capables de prendre en compte les changements de la dynamique turbulente (comme par exemple ce qui se produit à l'approche d'une paroi solide ou de l'interface entre deux fluides non-miscibles) sans faire intervenir de paramètre de contrôle spécifique (exemple : distance à la paroi, frottement pariétal, ...). Les pistes privilégiées de modélisations multi-échelles sont basées sur des analyses mathématiques rigoureuses (Variational Multiscale Method de Hughes, Approximate Deconvolution Method de Adams, ...). Un autre point d'analyse porte sur les couplages non-linéaires qui peuvent exister entre le schéma numérique et les modèles sous-maille, dans le double but de les quantifier et de les contrôler (collaborations avec les universités de Twente et de Louvain - KUL). Enfin, des recherches sont consacrées aux aspects théoriques de la simulation des grandes échelles : consistance au sens des premiers principes et du nombre de Reynolds, théorie du filtrage.
- La génération de turbulence synthétique (collaboration ONERA), avec pour principale application la génération de conditions aux limites turbulentes instationnaires qui reproduisent les corrélations en deux points et en deux temps des fluctuations turbulentes physiques. Outre la génération d'un tel champ de vitesse synthétique, on aborde le thème de la turbulence synthétique compressible, qui soulève le problème encore très peu abordé de la génération de conditions aux limites pour les variables thermodynamiques.
- La modélisation des parois solides actives. (collaboration avec ONERA, Projet PREDIT PROSODIE). Cette rubrique regroupe les recherches visant à la représentation, sous la forme de conditions aux limites pour les équations de Navier-Stokes et les méthodes de Boltzmann sur réseau, des parois poreuses et/ou non infiniment rigides ainsi que des actionneurs de type MEMS pour le contrôle actif.
- Le développement de modèles sous-maille multi-physiques, c'est-à-dire de la modélisation des fluctuations turbulentes à petites échelles pour des phénomènes physiques qui ne relèvent pas directement de l'aérodynamique. (exemple : production d'ondes acoustiques, mélange d'espèces, ...) Dans le cadre du projet ANSAS (financé par la fondation EADS, action transverse avec l'équipe MPIA) consacrée à la propagation en milieu atmosphérique turbulent, une collaboration a été établie avec EDF pour implanter dans le code Saturne des modèles sous-maille pour la simulation de la couche limite

atmosphérique en présence d'humidité et d'effets de stratification stable ou instable. Le développement de modèles sous-maillage pour la magnétohydrodynamique est mené en collaboration avec le Lawrence Livermore National Laboratory.

Un deuxième axe concerne le développement de modèles de turbulence avancés. Malgré l'évolution rapide des moyens de calcul et le développement de méthodes numériques de plus en plus performantes, l'utilisation de modèles de fermeture de la turbulence avancés avec une approche de type RANS—RSM ou hybride—RSM semble être, à moyen terme, l'unique possibilité de traiter des écoulements complexes à Reynolds élevé, notamment ceux rencontrés dans les configurations de type aérospatial où la complexité de l'écoulement est à la fois due à la géométrie (cavités, soutirages, jeu, ...) et aux phénomènes physiques (zones de recirculation, interaction onde de choc / couche limite, ...). Ainsi nous développons des modèles RSM géométriquement indépendants, et nous avons commencé à travailler sur le développement de modèles hybrides, afin d'effectuer l'analyse physique des écoulements dont l'instationnarité est propre à la turbulence.

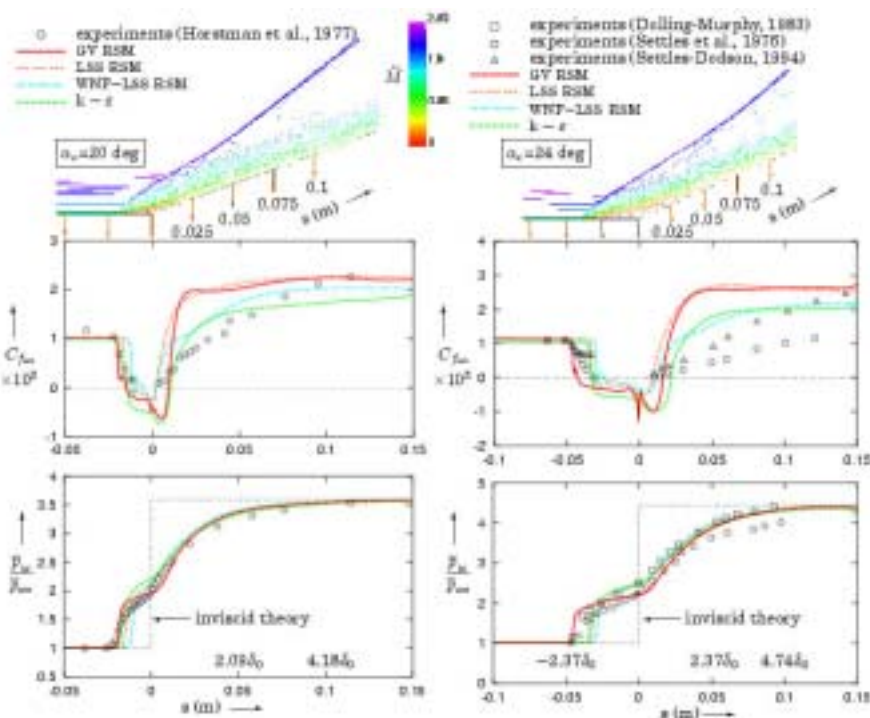


FIGURE 3-1 Comparisons de calculs convergés en maillage avec des mesures expérimentales (Settles et al.) de pression pariétale et de frottement, pour deux angles de la rampe de compression (20 et 24 deg) et plusieurs modèles de turbulence : modèles RSM wall-normal free GV et WNF-LSS, modèle RSM LSS avec normales géométriques et modèle Launder-Sharma à 2 équations.

## B. 2 - Aéroacoustique.

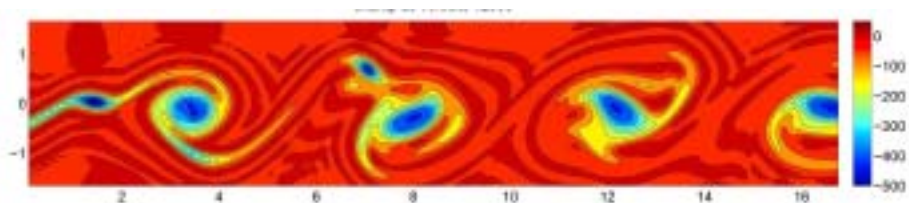
On étudie ici la génération des ondes acoustiques par les fluctuations turbulentes (c'est-à-dire la conversion d'une partie de l'énergie cinétique en énergie acoustique), les couplages aéro-acoustiques donnant naissance à des modes globaux (cavité : collaboration avec Dassault-Aviation, ONERA et IUSTI ; jet : collaboration avec Ladhyx) et la propagation des ondes en écoulement turbulent, avec ou sans présence de parois rigides. Les travaux effectués portent sur l'identification des sources acoustiques, leur modélisation et la propagation en milieu turbulent. Sur cette thématique, il faut noter la participation au projet ANSAS en lien avec l'équipe MPIA (thèses jumelées de A. Dipankar et C. Rollet financées par la Fondation EADS).

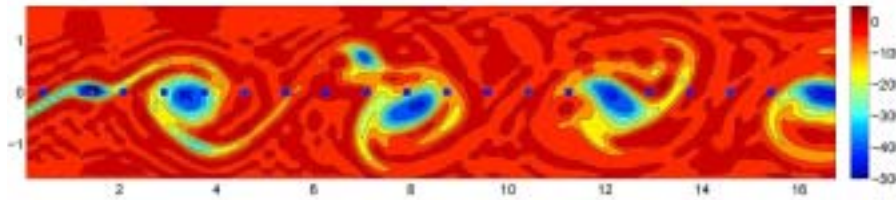
La compréhension du phénomène de génération des ondes acoustiques est aujourd'hui très majoritairement liée aux termes sources (monopôles, dipôles, quadripôles) qui apparaissent dans les analogies acoustiques (Lighthill, Ffowcs-Williams Hawkins) On recherche ici des solutions alternatives qui permettent d'établir un lien de causalité direct entre la génération des ondes acoustiques et les événements cohérents turbulents (contrat Renault). Afin d'analyser ce couplage entre les phénomènes aérodynamiques et acoustiques, des outils de post-traitement et d'analyse tels que l'estimation stochastique et la décomposition orthogonale aux valeurs propres sont utilisés. Plus précisément, il s'agit d'estimer des champs aérodynamiques à partir de la connaissance du champ de pression (hydrodynamique en champ proche ou acoustique en champ lointain) ou inversement d'isoler les structures tourbillonnaires de l'écoulement et d'estimer le champ de pression acoustique associé à ces structures. Pour valider ces différentes approches, des données numériques issues d'une simulation directe d'un écoulement de couche de mélange plane compressible en développement spatial sont utilisées.

Les figures suivantes illustrent un champ de vorticité instantané.

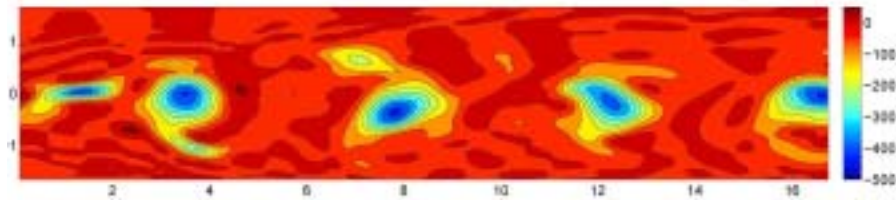
- Figure 3-2 : issu de la simulation directe originale (cas de référence)
- Figure 3-3 : calculé à partir de la connaissance de la pression hydrodynamique en quelques points au centre de la couche de mélange et de la connaissance du tenseur de corrélation pression/vitesse.
- Figure 3-4 : calculé à partir de la connaissance de la pression acoustique en quelques points en champ lointain et de la connaissance du tenseur de corrélation pression/vitesse
- .

**FIGURE 3-2**  
*Champ  
instantané de  
vorticité  
original.*





**FIGURE 3-3**  
*Champ de vorticité  
 issu de l'estimation  
 stochastique basée  
 sur des donn ees de  
 pression  
 hydrodynamiques*



**FIGURE 3-4**  
*Champ de vorticité  
 issu de l'estimation  
 stochastique basée sur  
 des donn ees de  
 pression acoustique*

On peut alors remarquer l'efficacité de la méthode qui permet de restituer la dynamique tourbillonnaire à partir de quelques points de mesure de la pression notamment lorsque ces signaux dit conditionneurs sont situés sur l'axe de la couche de mélange.

Une même analyse a également été effectuée permettant d'accéder à la contribution acoustique relative aux structures tourbillonnaires de l'écoulement. Ces différentes analyses devraient permettre d'identifier les sources acoustiques associées aux phénomènes aéro-dynamiques.

Les travaux sur la modélisation des sources en vue de simulations acoustiques compatibles avec les impératifs de coûts industriels sont menés dans le cadre de contrats avec Dassault Aviation, Airbus et font l'objet d'une collaboration continue avec l'ONERA. Les pistes suivies sont basées sur des modèles de turbulence synthétique, dont on cherche à contrôler les caractéristiques de manière à obtenir un champ acoustique rayonné physique.

### B. 3 - Aérodynamique : analyse physique et contrôle.

Les recherches portent principalement la compréhension et le contrôle des écoulements turbulents. Plusieurs problèmes ont été abordés, parmi lesquels la réduction de la traînée turbulente (projet ANR READY, contrat SNCF, collaboration ONERA) et le contrôle des couplages aéroacoustiques au sein desavit s transsoniques (contrat DASSAULT, collaboration avec ONERA et IUSTI). Une activité renforcée sur l'aérodynamique instationnaire à basse vitesse est développée depuis un an en collaboration avec l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique de l'UPMC dans le cadre de la conception des microdrones à ailes battantes et des drones marins (projet ANR ASAROME). Le contrôle des écoulements de cavité en régime transsonique est illustré ci-dessous.

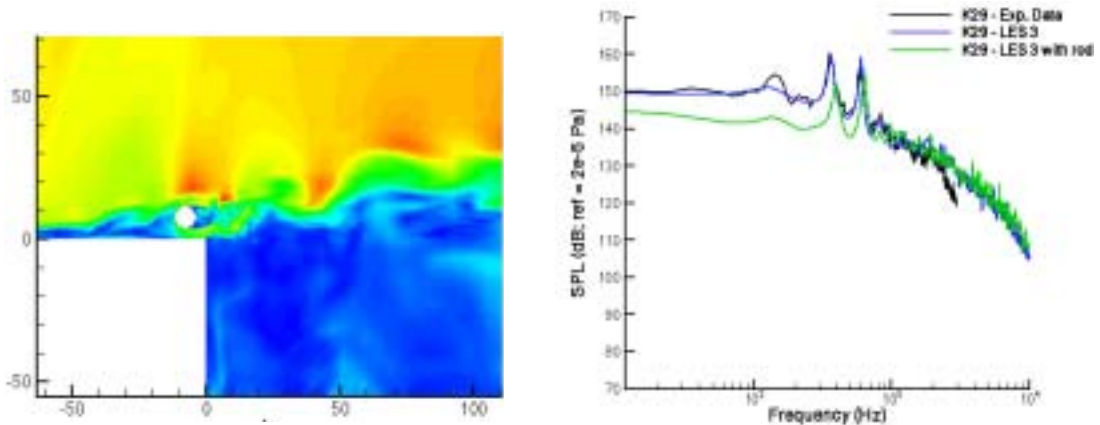


FIGURE 3-5 Atténuation du couplage aéro-acoustique (modes de Rossiter) dans une cavité tridimensionnelle en régime transsonique par un dispositif passif. Le sillage du barreau immergé dans la couche limite modifie la couche cisailée décollée et détruit partiellement le mode hydrodynamique responsable de la résonance. Gauche : coupe du champ de vitesse instantanée calculé par la LES. Droite : spectre de pression pariétale dans la cavité ; noir : soufflerie sans contrôle, bleu : simulation sans contrôle, vert : simulation avec contrôle

## B. 4 - Couplage fluide-structure.

Les activités portant sur les interactions fluide-structure regroupent deux thématiques différentes : l'aéroélasticité des aubages de turbomachine, et le couplage entre les déformations d'une structure souple élancée et l'instationnarité de son sillage.

Les activités de recherche sur les interactions fluide-structure dans le domaine des turbo-réacteurs ont débuté en 2006 dans le cadre d'un Projet BQR UPMC (A. Vincenti et B. Desmorat MISES, J-C Chassaing FRT), avec pour objectif, la mise au point d'un solveur aéro-mécanique pour la conception et l'optimisation d'aubages de soufflantes transsoniques (prise en compte de la déformation de la structure lors de son optimisation aérodynamique). Nous disposons actuellement d'un algorithme de couplage, pour la phase statique, entre un opérateur aérodynamique stationnaire RANS 3-D et le code éléments finis Castem, permettant de réaliser les étapes d'analyse directe et inverse à partir de chargements multi-physiques (centrifuge, température et aérodynamique).

Nous envisageons désormais de prendre en compte l'opérateur des forces d'inerties dans l'algorithme de couplage afin d'étendre la méthode à la prédiction d'instabilités aéroélastiques dynamiques telles que le flottement.

Par ailleurs, nous désirons élargir le domaine d'application de cette méthodologie en nous intéressant, en particulier, à la mise en évidence du phénomène de perte de portance (par effets élastiques) des voilures en régime supercritique ainsi qu'à la prédiction de mécanismes aéroélastiques non-linéaires tels que les cycles limites d'oscillations.

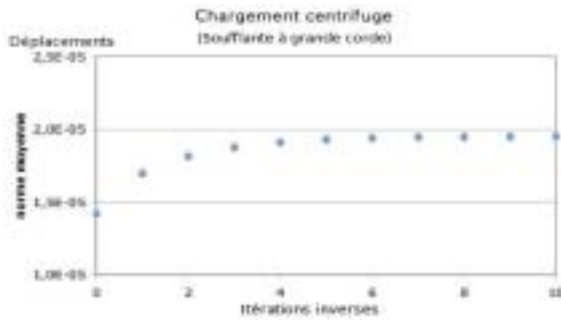


FIGURE 3-6 Convergence du processus itératif de la méthode inverse pour le calcul de la géométrie à froid d'une soufflante à grande corde à partir de la géométrie sous chargement centrifuge

Pour second point, on considère des structures élancées, souples ou rigides, soumises aux efforts produits par un écoulement turbulent, avec le double but d'étudier les déformations et/ou le déplacement de la structure et de caractériser les modifications du sillage turbulent produites par les déplacements de la surface solide. Ces recherches donnent lieu à des collaborations avec le MIT et Brown University.

Les interactions fluide-structure qui nous intéressent se caractérisent par un couplage fort entre le fluide dont les efforts sont suffisamment importants pour déplacer ou déformer une structure ou ses frontières, et le mouvement résultant de cette dernière qui est suffisamment ample ou/et rapide pour modifier l'écoulement. Ces phénomènes couplés souvent non-linéaires tels que les VIV (Vortex-Induced Vibrations) demeurent encore aujourd'hui mal compris, même pour des écoulements incompressibles autour de structures à géométries canoniques simples (par exemple cylindriques) soumises à l'action instationnaire de lâchers tourbillonnaires. Dans le cas de simulations numériques de structures cylindriques élancées, la réponse obtenue dépend du type de structures (géométrie et propriétés mécaniques) et d'écoulements (viscosité, conditions aux bords, conditions initiales, ...) modélisés. Pour la partie structure, nous considérons des cylindres 2D ou 3D plus ou moins allongés, à 1 ou 2 degrés de liberté, rigide ou flexible dans des configurations fixées, forcées ou libre d'osciller. Pour la partie fluide, nous considérons des écoulements uniformes, cisailés (linéairement ou exponentiellement) ou obliques le long de l'envergure de la structure. L'échelle de taille de la structure par rapport aux échelles du fluide conditionne le type de méthode numérique utilisée. Lorsque le rapport d'aspect de la structure est modeste, nous utilisons des simulations numériques directes qui permettent une étude plus fine de la stabilité et la sélection des modes de sillage tourbillonnaires turbulents en fonction de la réponse structurale. Lorsque le rapport d'aspect est grand (risers), la faible résolution numérique le long de l'envergure ne nous permet de capturer que les grandes échelles de l'écoulement qui affectent principalement la réponse du cylindre. Dans ce cas, notre effort se porte d'avantage sur une meilleure description et compréhension de la réponse vibratoire de la structure (qui peut être fortement intermittente et multi-modale) par le biais du développement de représentations hiérarchiques simplifiées (décomposition modale). Ceci nous permet par exemple de mieux comprendre les phénomènes de distribution énergétique sur des modes de réponse statiques.

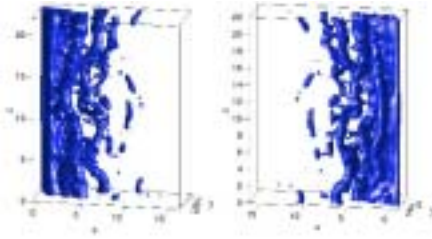


FIGURE 3-7 Distributions de pression dans le sillage de cylindres vibrants rigides soumis à des écoulements turbulents obliques dans le sens des  $z$  croissants (angle d'incidence de 25 degrés par rapport à l'axe du cylindre).

La figure montre un exemple de simulation numérique directe d'une interaction fluide-structure VIV. Cette étude a permis de tester la validité du principe d'indépendance pour des cylindres oscillants inclinés par rapport à l'angle de l'écoulement amont. Il a été conclu que les cylindres pouvaient vibrer de façon significative même pour des angles d'incidence très faibles.

## B. 5 - Écoulements diphasiques - injection et atomisation dans les chambres de combustion.

Ces recherches sont liées à la nécessité de réduction des émissions polluantes et à effet de serre et à l'optimisation des systèmes de propulsion. En effet, les combustibles sous forme liquide dans les réservoirs (combustibles usuels mais aussi la plupart des combustibles gazeux stockés sous pression) doivent passer par une phase liquide dispersée (fines gouttelettes) avant d'être brûlés sous forme gazeuse. Les caractéristiques de cette phase dispersée (spray, brouillard ou jet d'injecteur) conditionnent au premier ordre la qualité de la combustion et le niveau des émissions.

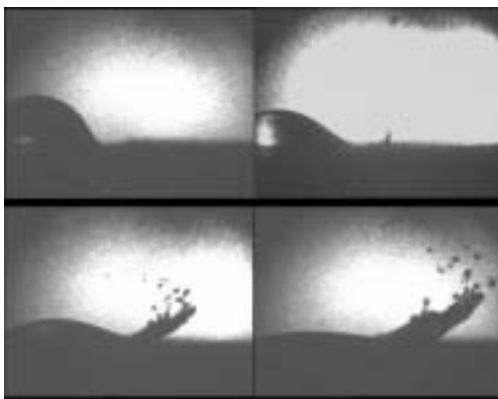


FIGURE 3-8 Etalement et re-pulvérisation d'une goutte déposée sur une plaque lisse avec une aspérité élémentaire (marche de 0,03mm) 500, 800, 1000 et 1500 $\mu$ s après impact

Notre effort de recherche dans cette thématique s'est d'abord concentré ces dernières années, notamment avec le contrat européen DIME, sur les interactions des gouttes avec les parois de chambres de combustion, motivé par la réduction certaine des tailles des moteurs à l'avenir. Nous avons cherché à établir quelles conséquences avait sur la population de gouttes et la vaporisation le phénomène d'impact de gouttes de combustible sur des surfaces rugueuses à des températures comparables avec celles des parois de chambres de combustion. Sur des expériences simplifiées menées avec des gouttes

de taille observable (2mm) nous avons étudié quelles caractéristiques élémentaires de la surface permettaient une éjection de gouttes secondaires en vue de minimiser les dépôts de combustible. Aussi, nous avons étudié quels régimes d'évaporation subissaient ces gouttes issues de l'impact avec la surface.

Ensuite, nous avons cherché à déterminer précisément quelles interactions avaient lieu lors de l'injection entre la phase liquide dispersée et la phase gazeuse environnante. En particulier, nous avons cherché à déterminer l'intensité et la direction des transferts de quantité de mouvement, élément clé pour la formation du mélange réactif. Les premières expériences dans ce sens ont été menées dans le cadre de la thèse de R. TROEGGER en utilisant une méthode PIV globale pour le spray et le gaz environnant. Les champs de vitesses obtenus ne permettaient pas de séparer catégoriquement les gouttes de spray et les particules d'ensemencement du gaz. Néanmoins, des résultats très intéressants sur la localisation des échanges d'énergie ont été possibles. Une nouvelle étude a été amorcée en collaboration avec le groupe PSA sur l'injection pour caractériser plus finement les échanges air/spray.

Pour cela, un premier résultat a été la mise au point du banc d'essais injection dans le cadre de la thèse de R.ROY, qui comporte notamment une enceinte avec de larges accès optiques (120mm), des systèmes de filtration et de manipulation de produits toxiques en sécurité. Les pressions pouvant être atteintes sont de l'ordre de 50bar pour la pression dans l'enceinte et 2000bar pour la pression d'injection, ce qui permet des expériences réalistes. Le dispositif comporte deux systèmes PIV (lasers, optiques et caméras) qui ont servi pour la mise au point de méthodologies avancées de mesure et de discrimination des phases, basées sur la vélocimétrie par images de particules (PIV) appliquée à des traceurs fluorescents (LIF). Des résultats remarquables ont commencé à être publiés et devraient faire l'objet de publications importantes.

Cette technique permet de suivre de façon simultanée les vitesses des deux phases et donc d'étudier les mouvements induits par les gouttes dans l'air qui déforment à leur tour le spray. Un point particulièrement intéressant à étudier réside dans le choix de la base de temps pour la prise d'image. En effet, les vitesses des gouttes et de l'air diffèrent au moins d'un ordre de grandeur. Les mouvements induits dans l'air par les gouttes se font donc avec un retard car il y a transfert de mouvement avec glissement. Il est théoriquement possible de reconstruire le chemin parcouru par les gouttes pour déterminer quelle « classe » de gouttes engendre tel ou tel déplacement.

Une variante de cette technique, est utilisée pour estimer la taille des gouttes du spray. En effet, l'intensité de la diffusion MIE dépendant du diamètre et la fluorescence, sous certaines conditions, du volume des gouttes, il est possible en calculant le ratio des deux intensités de remonter au diamètre moyen de Sauter (SMD). Aussi, si le gaz environnant n'est pas ensemené et que le signal MIE est utilisé pour réaliser des images synchrones avec le signal de LIF, nous avons la possibilité d'évaluer le SMD. La calibration de cette estimation est particulièrement difficile du fait de la difficulté de générer des gouttes de différents diamètres calibrés dans la plage qui nous intéresse (5 $\mu$ m à 100 $\mu$ m). Une première tentative a été réalisée en appliquant la technique aux gouttes d'huile d'ensemencement, dont le diamètre est relativement homogène, et de valeur connue (avec une certaine marge d'imprécision). Cette démarche donne une première estimation du niveau d'intensité du SMD correspondant aux gouttes d'huile. En prenant soin de mesurer et compenser les variations d'intensité des tirs lasers, il est ainsi possible de calibrer la mesure des tailles des gouttes du spray.



En perspective nous avons l'intention d'étudier les zones proches de l'injecteur pour contribuer à la connaissance des mécanismes intervenant dans l'atomisation, par des moyens expérimentaux mais aussi de simulation numérique. L'expérience de membres de l'équipe FCIH de l'institut a permis d'amorcer une véritable recherche complémentaire calcul/expérience qui doit être poursuivie.

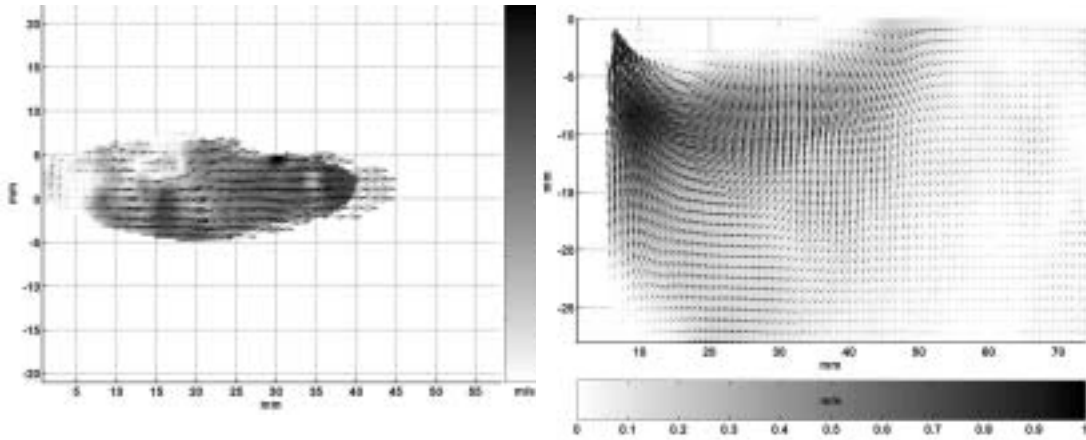


FIGURE 3-9 Champs de vitesse du spray et du gaz (40 bar pression d'injection - 1 bar pression ambiante, 200  $\mu$ s après début injection,  $Dt = 300\mu$ s,  $Dt' = 295\mu$ s)

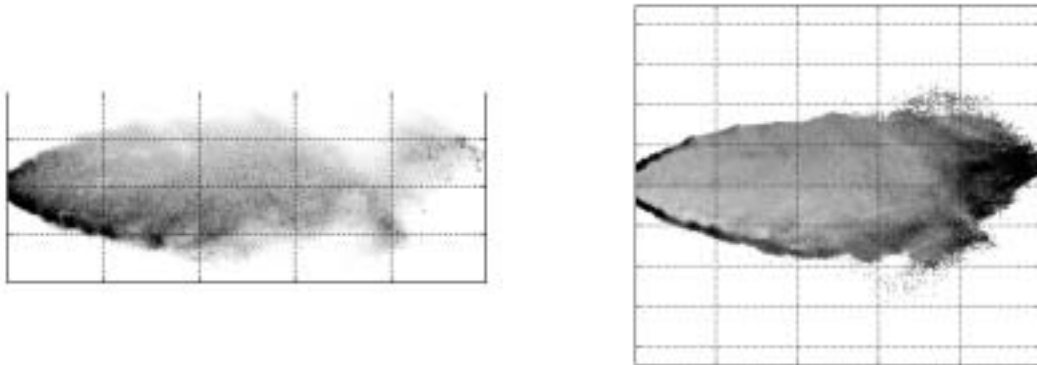


FIGURE 3-10 Images MIE, LIF et SMD d'un injecteur swirl -pression d'injection 120 bar; pression ambiante 1bar; 500 $\mu$ s après le début de l'injection (unités : mm , échelle de gris arbitraire).

## *C - Combustion alternative, dépollution, turbulence et cinétique*

Concilier baisse de consommation et réduction des émissions polluantes des moteurs à combustion interne passe aujourd'hui par une compréhension aigüe de chacun des phénomènes physico-chimiques mis en jeu tout au long de l'histoire du processus de combustion. Cet objectif est d'autant plus urgent que le contexte, économique comme politique, presse en ce sens. La combustion par compression d'une charge homogène et pré-mélangée, dite HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), est indéniablement l'une des solutions les mieux à même de répondre à ces justes exigences. L'équipe FRT concentre ainsi une partie de ses efforts autour d'un sujet à ce jour aussi délicat que prometteur: la maîtrise du seul phénomène d'inflammation d'un mélange gazeux partiellement homogène et réactif. En effet, les phénomènes de transport entretenant les zones réactionnelles proposent des échelles de temps caractéristiques relativement étendus, créant ainsi des couplages entre différents modes de propagation de la combustion. De ces couplages naît un champ d'investigation à la fois large et peu exploré, ouvrant sur des opportunités de contrôle du processus d'inflammation. La compréhension du processus de combustion s'appuie aussi sur une démarche visant à une meilleure analyse des processus cinétiques. En particulier, les schémas réactionnels sont rarement validés dans des environnements réels de type moteur. Ainsi l'équipe répond-elle notamment aux « besoins d'études fondamentales pour comprendre des mécanismes élémentaires mais aussi pour analyser les couplages, les problèmes multi-échelles inhérents à la combustion et les flammes dans des conditions extrêmes (...) » relevés par le CNRS (rapport de conjoncture 2004 du département SPI).

*Permanents impliqués :*  
*P. Guibert,*  
*S. Cavadias,*  
*G. Legros,*  
*G. Dayma*

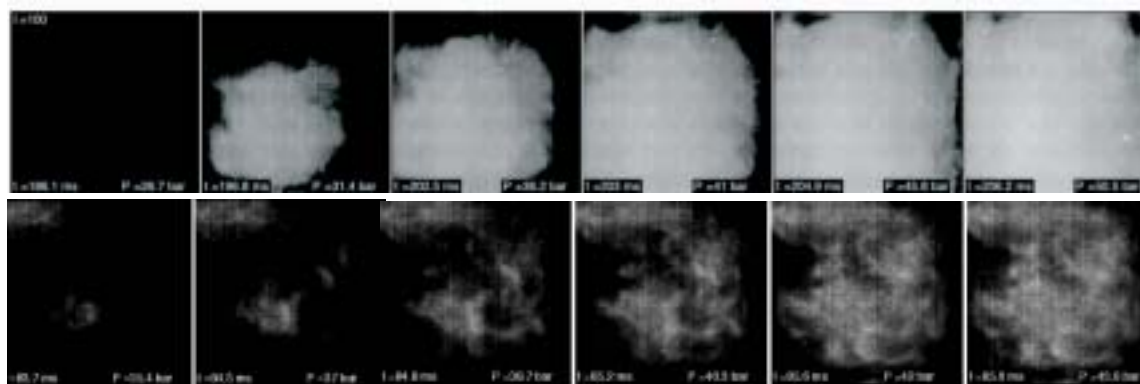


FIGURE 3-11 a/ et b/ Visualisations directes sur MCR. Propane ( $F=0.45$ ), Iso-octane ( $F=0.45$ )

Les figures Figure 3-11 a/ et b/ illustrent la diversité des modes de propagation de la combustion à travers un mélange réactif homogène en concentration. Le mélange est ici porté aux conditions d'inflammabilité au sein d'une Machine à Compression Rapide. Cet outil innovant, mis au point sur le site de Saint-Cyr, permet l'étude fine des conditions aérother-

mochimiques d'un mélange, éventuellement réactif, soudainement comprimé dans son intégralité et ainsi piégé dans un volume constant à haute pression et haute température. La philosophie qui a commandé à la conception de cet outil a permis d'y incorporer des éléments susceptibles d'asservir différents modes de transfert de masse et de chaleur. A titre d'illustration, le spectre de la turbulence peut être modelé par l'intermédiaire de grilles de turbulence. Les propagations reproduites en figures Figure 3-11 a et b sont à ce titre évocatrices: alors que le niveau de turbulence préexistant à l'inflammation est ici identique, deux mélanges, de richesse égale mais constitués de combustibles différents, présentent des topologies de fronts de propagation fort différentes. Tandis que l'inflammation du mélange contenant du propane procède rapidement par propagation de type front de flamme, l'activité chimique du mélange comportant de l'isooctane transparait, elle, de façon volumique dans un premier temps avant de laisser place à une inflammation de type front flamme. Une telle divergence de comportement à l'inflammation a alors des conséquences significatives sur la libération d'énergie et la constitution post-combustion du mélange.

Le processus cinétique reste dans tous les cas très important. Pour aider à une modélisation pertinente et en particulier de la cinétique réactionnelle, un travail complémentaire sur la validation de schémas est mené. La démarche consiste à mesurer la dégradation des carburants, la formation et la consommation des composés intermédiaires de la combustion (insaturés, oxygénés) et l'apparition des produits finaux (monoxyde et dioxyde de carbone) pendant les différentes phases du cycle de combustion. Ces mesures sont effectuées par chromatographie en phase gazeuse avec une détection par spectrométrie de masse pour les composés carbonés et couplés par une détection par ionisation de flamme FID. La quantification des composés a lieu dans des fenêtres temporelles suffisamment étroites (Figure 3-12) qui permettent de suivre les différents régimes de la combustion (flamme froide, NTC, flamme principale). Les constructeurs automobiles et les pétroliers sont demandeurs de tels mécanismes et des mesures de validation car ils devraient permettre à terme d'optimiser la composition des carburants automobiles afin de réduire la formation des polluants.

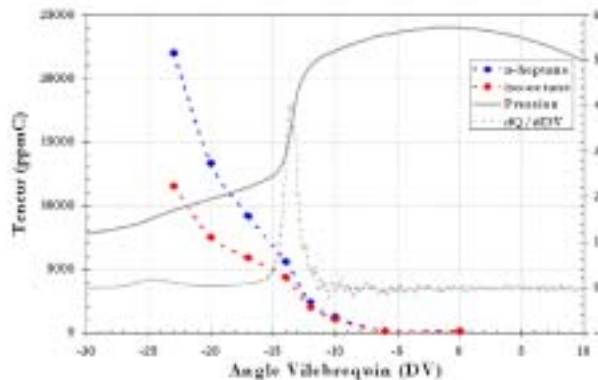


FIGURE 3-12 Evolution de la pression, du dégagement de chaleur et de la fraction molaire des réactifs en fonction de l'angle du vilebrequin en combustion HCCI.

C'est donc tout naturellement que l'équipe fait partie intégrante depuis 2004 du Pôle de Recherche National à Implantation Régionale « PNIR Carburants et Moteurs » qui regroupe 19 laboratoires de recherche autour des problématiques : carburant, injection, contrôle, mélange et combustion dans les moteurs alternatifs. En particulier, l'équipe participe à l'action « Combustion Alternative Maîtrisée » dont l'enjeu est le contrôle et l'optimisation du mode. L'objectif consiste ici à dégager les outils qui permettront à terme de prédire l'autoinflammation en fonction des caractéristiques thermo-chimiques du mélange carburé et de fournir une analyse détaillée du processus de combustion. Cette action CAM repose ainsi sur l'étude des mécanismes couplés entre la physique et la chimie de la combustion. De fait, l'équipe FRT collabore avec le laboratoire de Physico-Chimie des processus de Combustion et de l'Atmosphère (PC2A - Lille), le Laboratoire de Combustion et de Détonique (LCD - Poitiers) et le Département de Chimie Physique des Réactions (DCPR - Nancy) afin d'étudier les mécanismes de combustion de différents alcanes sur différentes machines à compression rapide, ce qui permettra d'approfondir la connaissance des cinétiques d'oxydation et d'auto-inflammation à basses températures.

Forte de cette contribution à un réseau d'envergure nationale, l'équipe FRT s'implique fortement dans les programmes PREDIT ou pôle de compétitivité MOVEO à vocation mondiale lié aux problématiques suscitées. Elle est en effet à l'initiative de deux projets PREDIT, financés à l'échéance 2007-2011. Le programme original MODELESSAIS permet ainsi la coordination d'actions expérimentales et numériques, ce afin de proposer une modélisation validée sur une gamme de paramètres aérothermiques suffisamment large.

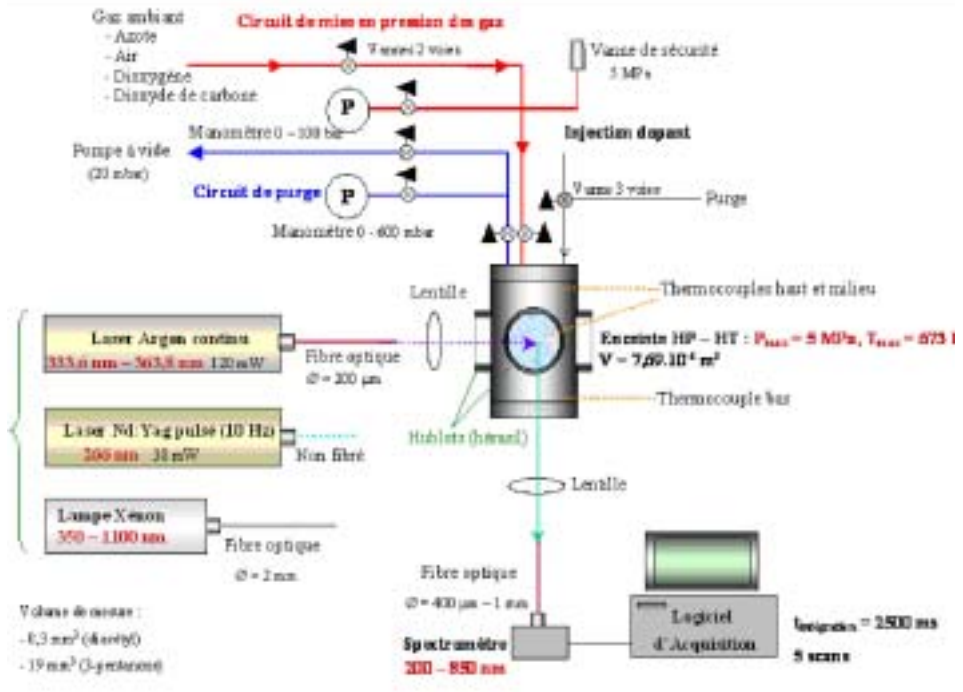
L'étude de la cinétique chimique qui conditionne le développement de la réactivité des espèces en fonction des conditions aérothermocinétiques de la chambre fait, elle, l'objet du programme PREDIT EATS FUTURE.

## D - Méthodes expérimentales et métrologie

*Permanents impliqués :*

*P. Guibert,  
C. Morin,  
L. Lemoyne*

Le domaine s'attachant à la compréhension du processus de combustion dans les moteurs à combustion interne dépend en grande partie de la capacité de contrôler la phase de mélanges gazeux en particulier la répartition spatio-temporelle de la richesse essence/ air avant le début de la combustion. Il va donc de soi que la mise en place d'outils de mesure quantitatifs par exemple, ceux qui sont relatifs à la mesure de concentration d'espèces s'impose dans les développements des combustions alternatives modernes. La plupart des techniques utilisées dans la littérature et du domaine applicatif concerné sont principalement basées sur la mesure optique utilisant les propriétés photo-physiques des molécules organiques voir atomique. Dans le travail mis en œuvre, la démarche observée se veut plus vaste essentiellement justifiée par la nécessité d'une meilleure caractérisation du processus de formation des émissions polluantes.



**FIGURE 3-13**  
*Montage expérimental. Enceinte pressurisée pour l'étude de la fluorescence induite par laser en conditions maîtrisées*

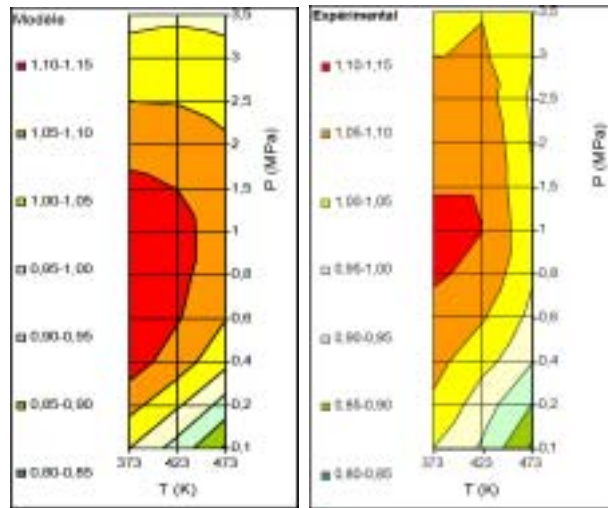
La technique de la fluorescence induite par laser (LIF) est particulièrement développée pour la mesure qualitative ou semi-quantitative de concentration d'espèces ou de température. Avant de réaliser des mesures quantitatives de concentration dans un environnement présentant de fortes variations spatio-temporelles en pression et température (comme dans la chambre de combustion d'un moteur), il est nécessaire d'effectuer une première phase d'analyse du signal LIF en fonction de paramètres thermodynamiques fixés et constants spatialement ainsi que temporellement. Des études de fluorescence avec une recherche

fondamentale sur la sensibilité des dopants (diacétyl, 3-pentanone, formaldéhyde, fluorenone) aux paramètres thermodynamiques et spectroscopiques (température, pression, concentration en dopant et en oxygène, gaz ambiant, puissance laser, longueur d'onde d'excitation) ont été conduites.

L'étude paramétrique sur la LIF a été réalisée sur une enceinte haute pression - haute température pour différents gaz ambiants (air reconstitué, azote, dioxygène, dioxyde de carbone) et deux dopants (3-pentanone et 2,3-butanedione ou diacétyl). L'intérêt d'un tel système est de déterminer indépendamment l'influence de chaque paramètre expérimental (pression, température, énergie

laser, densité ou fraction molaire du dopant, quenching) sur l'évolution du signal LIF d'un dopant pour ensuite mieux définir son comportement dans un environnement où tous ces facteurs conjuguent simultanément leurs effets (cas du moteur). L'étude paramétrique a tout d'abord permis de vérifier expérimentalement l'influence des facteurs thermodynamiques sur le comportement du rendement quantique de fluorescence pour ensuite mieux appréhender son évolution à l'aide d'un modèle. Le modèle photophysique développé pour la molécule de 3-pentanone permet d'estimer l'évolution du rendement quantique de fluorescence en fonction des paramètres thermodynamiques influents. L'expression du rendement de fluorescence qui est intégrée dans ce modèle tient compte des principaux mécanismes de désexcitation : la fluorescence, la relaxation vibrationnelle, le croisement inter-système et le quenching causé par le dioxygène. Ainsi la modélisation traduit globalement les effets de la pression (qui accentue la relaxation vibrationnelle vers des niveaux excités plus favorables à l'émission de fluorescence) et de la température (qui augmente l'énergie vibrationnelle de la molécule et contribue à la décroissance).

Une méthodologie de mesures par LIF a été développée afin de caractériser la concentration de l'EGR (recirculation des gaz d'échappement) sur moteur. La technique d'EGR est développée afin de réduire les émissions d'oxydes d'azote (NOx). Les essais LIF sont alors réalisés sur un banc de type "moteur transparent" entraîné et permettent la visualisation ainsi que la quantification de la distribution des gaz d'échappement recirculés en fonction des paramètres de fonctionnement du moteur et de sa configuration d'introduction. En outre, cette étude est complétée par des mesures de visualisation de l'aérodynamique interne dans le cylindre par vélocimétrie par imagerie de particules (PIV). Les images expérimentales acquises avec le couplage PIV / LIF ont permis de corréler les mesures de con-



**FIGURE 3-14** *Comparaison modèle - expérience du rendement quantique de fluorescence pour la molécule 3-pentanone. Le modèle considère quatre processus de transfert énergétique : le taux de relaxation non-radiatif, le taux de relaxation vibrationnelle, le taux de fluorescence et le taux de quenching avec l'oxygène.*

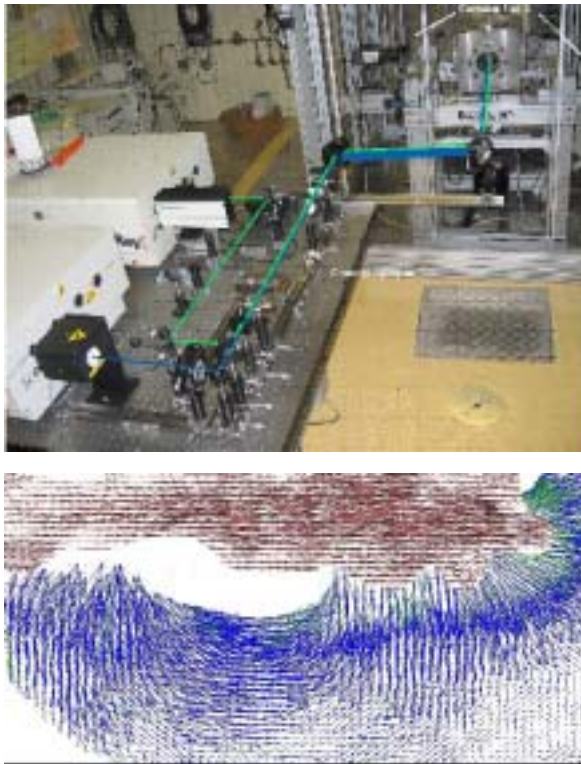
centration par LIF aux mouvements aérodynamiques observés sur les images PIV. À partir des images LIF acquises selon différents points de fonctionnement moteur, il est également possible d'estimer l'évolution du rendement quantique de fluorescence en fonction des effets conjugués de la pression et de la température au sein de la chambre de combustion et de comparer ces tendances à la cartographie du rendement de fluorescence tracée dans le cadre de l'étude paramétrique LIF sur l'enceinte haute pression - haute température. La comparaison des résultats obtenus en statique dans l'enceinte avec ceux obtenus sur moteur où le cycle impose un lien dynamique entre la pression et la température est primordiale. En dynamique, l'émission de la fluorescence est plus influencée par la température, alors qu'en statique les effets de pression et de température se compensent globalement

Ce travail a fait l'objet de deux contrats signés entre l'entreprise Renault et l'Université Pierre et Marie Curie.

Un autre aspect concerne la détection des aldéhydes, polluants non réglementés par LIF et chromatographie en phase gazeuse sur moteur. Le formaldéhyde ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) se révèle être un traceur adapté dans l'étude des flammes froides. Pour détecter cette espèce importante dans le processus de combustion, deux techniques ont été développées : la fluorescence induite par laser et l'analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse et la détection par ionisation de flamme (GC/MS/FID). Concernant la fluorescence du formaldéhyde, l'influence des paramètres thermodynamiques (température, pression, concentration en oxygène) a été caractérisée sur l'enceinte haute pression - haute température. À partir des données expérimentales, l'évolution du rendement quantique de fluorescence du formaldéhyde a été estimée et comparée au modèle photo physique développé pour ce composé. Pour compléter cette analyse spectroscopique, des mesures de concentration en aldéhydes ont été effectuées sur un moteur CFR (Cooperative Fuel Research) à partir de l'analyse des gaz d'échappement par GC/MS/FID. Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'entreprise Air Liquide.

Dans ce thème de développement de techniques expérimentales, une seconde action s'intéresse à la mise en place d'une méthodologie permettant de caractériser la dynamique de la phase liquide produite par un spray haute pression et aussi celle de la phase gazeuse simultanément. De nombreuses études se sont développées autour du thème de la préparation du mélange et notamment sur la caractérisation du spray de carburants induits par l'injecteur. En effet, lors d'une injection de carburant, le spray interagit avec le milieu gazeux environnant et entraîne de l'air chaud qui favorise l'évaporation des gouttelettes du spray et améliore ainsi la répartition du carburant sous forme de vapeur. Le contrôle du mélange air/carburant et la connaissance du phénomène d'entraînement d'air par le spray dans la chambre de combustion deviennent indispensables pour optimiser la combustion. Ce présent travail s'oriente sur une amélioration de la connaissance et de la compréhension des phénomènes liés à l'interaction entre le jet de carburant et l'air. L'amélioration de ces connaissances passe par une caractérisation et une visualisation des vitesses du spray et de l'entraînement d'air induit. Ce travail fait suite au développement de la PIV et la dual PIV (vélocimétrie par images de particules). Les deux phases sont discernées par l'utilisation d'une FPIV (vélocimétrie par images de particules fluorescentes). La première étape du

travail consiste à fournir un couple de traceurs qui présentent des spectres d'émission séparés et décalés par rapport aux longueurs d'onde incidentes excitatrices. La phase gazeuse estensemencée de particules dopées et le carburant est lui-même dopé par un second traceur. La difficulté est de s'assurer que le comportement des deux phases est bien représenté par les deux traceurs et que les conditions de pression et de température rencontrées ne perturbent pas l'émission fluorescente. La seconde particularité de la mesure est qu'elle doit être simultanée malgré des temps caractéristiques des deux phases très différents. Cette technique permet aussi d'approcher la mesure granulométrique sous certaines hypothèses de travail. L'outil développé aujourd'hui est capable de fournir les champs simultanés aérodynamiques des phases liquide et gazeuse avec une mesure relative du diamètre de Sauter. Une interprétation des transferts de quantité de mouvement entre les deux phases est en cours.



**FIGURE 3-15** Montage de l'expérience. Principe de la dual PIV simultanés fluorescente à deux longueur d'onde permettant de mesurer le champ aérodynamique de la phase liquide et celui de la phase gaz entraînée. Exemple de résultat de champs instantanés de vecteur vitesse des gouttes du spray liquide (rouge) et du gaz ambiantensemencé (bleu).

Les perspectives s'inscrivent dans un besoin de caractériser les hétérogénéités locales de température et de concentration dans le cas de l'étude de la combustion HCCI (voir thème 2).



Pour les mesures du champ de température instantané bidimensionnel et des champs de concentration dans la chambre de combustion, la technique de la fluorescence induite par laser à deux longueurs d'onde est en cours de développement. L'étude du processus de fluorescence sur une MCR permettra également de contrôler et de définir précisément l'évolution simultanée des paramètres thermodynamiques, par rapport aux essais LIF réalisés sur moteur (notamment la température au sein de la chambre de combustion qui est seulement estimée). La MCR permettra d'observer en dynamique l'évolution de l'intensité de fluorescence en considérant des conditions thermodynamiques caractéristiques du cycle moteur et il sera alors possible d'étudier l'impact réel sur l'émission de fluorescence d'une augmentation rapide et importante de la température.

Les travaux envisagés feront partie d'un programme entre industriels et plusieurs laboratoires, le programme PREDIT - MODELESSAIS

## *E - Méthodes numérique stochastiques et déterministes, quantification des incertitudes, optimisation et contrôle*

*Permanents impliqués :*

*J.C. Chassaing  
C. David,  
G. Gérolimos,  
T. Gomez,  
D. Lucor,  
P. Sagaut*

Ce thème de recherche regroupe toutes les activités qui ont trait au développement de modèles numériques efficaces pour la description et la prédiction des systèmes physiques complexes correspondant aux thématiques décrites plus haut. Ici aussi, il existe une très forte demande du secteur aval, qui soulève de très nombreuses questions sur le plan théorique, et qui ne reçoit actuellement pas les réponses nécessaires au niveau national. L'équipe FRT se positionne ici à la frontière entre la mécanique des fluides numérique « traditionnelle » et les mathématiques appliquées « à la française ». Dans cette perspective, des relations avec le Laboratoire Jacques Louis Lions ont été nouées. Les recherches entamées au sein de l'équipe FRT peuvent être regroupées comme suit :

Un premier axe concerne les recherches nécessaires visant aux développements de méthodes numériques efficaces pour les modèles physico-mathématiques non-linéaires. La notion d'efficacité inclut ici les aspects pratiques de réduction du temps de calcul, mais également des aspects théoriques comme la mise au point de méthodes numériques respectant les symétries et les invariants des modèles continus (par exemple : invariance galiléenne, conservation de la masse, second principe de la thermodynamique, ...). Les travaux portant sur la conservation du groupe de Lie des symétries à 1 paramètre des équations de Navier-Stokes sont réalisés en collaboration avec l'ONERA et le LEPTAB à La Rochelle. L'analyse des propriétés non-linéaires des schémas numériques (analyse en ondes résonnantes, solitons parasites, ...) fait l'objet d'une collaboration avec le IIT Kanpur (projet sous financement CEFIPRA). L'optimisation des schémas et la généralisation des schémas DRP (Dispersion Relation Preserving) par des méthodes algébriques avancées est également abordée. Par ailleurs, un effort important est consacré aux méthodes de Boltzmann sur réseau, sur la base du code L-BEAM développé en collaboration avec Renault dans le cadre du projet PREDIT MIMOSA. Ce code est actuellement en cours de transfert à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Cette approche fait également l'objet de nombreux contrats : projet PREDIT PROSODIE, contrat avec Renault, SNCF, Alstom.

Un autre axe concerne le développement de méthodes numériques robustes et efficaces pour la simulation des écoulements complexes, en utilisant des modèles de turbulence avancés, soit en approche RANS, soit en approche hybride. Le développement de modèles statistiques de fermeture de la turbulence avancés, destinés à l'analyse physique des écoulements complexes, ne peut être réalisé qu'avec un code numérique robuste. Cela implique une implémentation soignée des conditions aux limites, l'utilisation d'un schéma numérique adapté, et des limiteurs numériques efficaces. Ceci s'explique par le fait qu'un modèle de turbulence avancé est capable de prédire des caracté-

ristiques physiques complexes des écoulements simulés, et demande donc une méthode numérique avec des limiteurs également basés sur la physique (traduits mathématiquement par le concept de réalisabilité introduit par Schumann en 1977 puis repris par Lumley en 1978). Il faut également noter que l'initialisation de l'écoulement doit être relativement simple et de préférence semi-analytique afin d'éviter tout calcul préliminaire, par exemple sur plaque plane, ou bien avec un modèle de turbulence à 0 équations de transport. Dans ce contexte, nous avons développé une méthodologie numérique de résolution des équations de Navier-Stokes compressibles avec fermetures aux tensions de Reynolds (il n'existe que 3 méthodes publiées pour des écoulements 3-D complexes avec interaction onde de choc - couche limite turbulente), aussi bien pour des écoulements stationnaires qu'instationnaires.

Un dernier axe concerne la modélisation et la propagation des incertitudes en mécanique. La notion d'incertitude englobe l'ensemble des différences qui peuvent exister entre un modèle classique parfaitement déterminé, et un système physique réel, c'est-à-dire les erreurs et le manque d'information portant sur les conditions aux limites, les conditions initiales, les valeurs des constantes physiques, ... La prise en compte de ces incertitudes dans les modèles en mécanique numérique est aujourd'hui une demande très forte qui soulève de nombreuses questions théoriques. Les recherches portent sur les aspects théoriques de la modélisation des incertitudes (méthodes auto-adaptatives, méthodes efficaces pour les espaces de grande dimension, extension aux systèmes à réponse discontinue dans l'espace des paramètres incertains, ...) et sur l'emploi de ces méthodes pour analyser des écoulements de référence. Par ailleurs, on s'intéresse également à l'emploi de ces méthodes pour le développement de stratégies d'optimisation ou de contrôle robustes. Ces travaux font l'objet de collaborations avec le Laboratoire Jacques Louis Lions, le laboratoire de Statistiques et de Probabilité de l'Université Paris 7, Brown University, le CEA et l'ONERA, et sont soutenus par des contrats du CEA et d'Airbus, ainsi que la chaire d'excellence obtenue par D. Lucor. Un fait notable a été l'organisation (avec le laboratoire JL Lions) du CEMRACS 2006 sur cette thématique.

Tout système physique possède un certain niveau de variabilité dont l'importance croît avec la nécessité d'une solution toujours plus performante et fiable. D'un autre côté, les techniques de calcul déterministe de plus en plus précises, montrent l'incapacité à prédire le comportement de systèmes où la part d'aléas est influente. Une approche possible, permettant d'améliorer la prédiction dans ce cas, est de placer l'analyse dans un contexte multi-échelles. Cependant, même si cette course vers la probable source de variabilité permet de descendre dans la hiérarchie des échelles, elle ne permet pas de la supprimer. De plus, cette approche va souvent de pair avec une complexité accrue de l'analyse du système. Une alternative consiste à décrire cette variabilité dans un contexte probabiliste, associant des distributions de probabilités à ses différents niveaux. Cette approche maintient l'analyse au niveau d'une seule échelle, tout en représentant de façon rationnelle les effets des fluctuations des sous-échelles.

La quantification d'incertitude (QI) peut donc être comprise comme une étude de l'erreur obtenue par des calculs numériques, que ce soit au niveau de sa description que de ses conséquences. Il s'agit donc d'être capable de fournir des barres d'erreurs associées aux algo-

rithmes de nos simulations numériques en mécanique des fluides. Ces incertitudes peuvent se manifester à de multiples niveaux (conditions d'opération, propriétés physiques de l'écoulement ou du milieu, lois constitutives, modèles mathématiques, schémas numériques, ...). Nos méthodes de calcul utilisées pour représenter les fonctions aléatoires considérées et propager l'incertitude à travers le modèle mathématique sont basées sur les représentations spectrales stochastiques de type Chaos Polynomial similaires à la méthode des éléments finis stochastiques. Ces méthodes présentent l'avantage de pouvoir assigner certaines distributions aux paramètres d'entrée du système et de les propager à travers le modèle jusqu'à la solution. Elles présentent également l'avantage d'être en général plus économique que des approches par tirages bruts de type Monte-Carlo.

Dans l'exemple suivant, on étudie la sensibilité spatiale d'une couche de mélange aux incertitudes qui peuvent être présentes dans les conditions aux limites amont de l'écoulement. En particulier, les amplitudes des termes de forçage à l'entrée du domaine de calcul sont traitées comme des variables aléatoires de distributions connues. Une méthode de collocation stochastique de type Chaos Polynomial non-intrusif est utilisée.

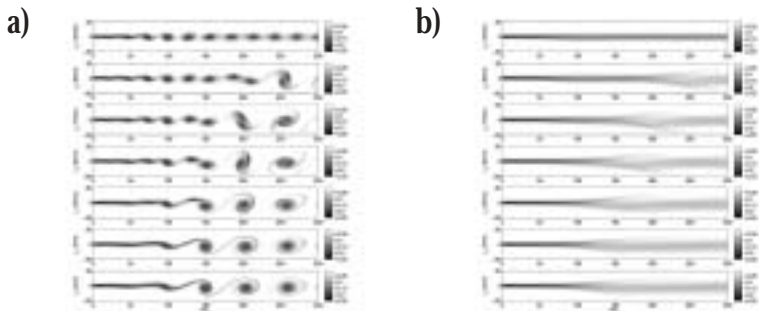


FIGURE 3-16 Variabilité de la distribution spatiale (a) instantanée et (b) moyenne du champ de vorticité d'une couche de mélange 2D forcée en fonction de l'amplitude du mode de forçage fondamental.

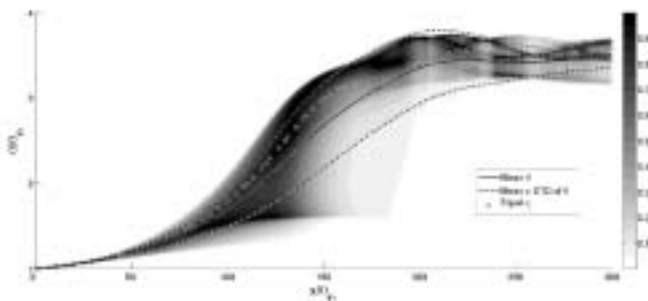


FIGURE 3-17 Evolution de la densité de probabilité de l'épaisseur de quantité de mouvement moyenne de la couche de mélange le long de la direction axiale de l'écoulement.

## *F - Perspectives*

### F. 1 - Présentation générale

Le prochain contrat quadriennal sera pour l'équipe FRT l'occasion d'achever sa consolidation (rappelons qu'elle résulte de la fusion de trois groupes issus de laboratoires différents) et de s'affirmer comme un acteur incontournable du paysage académique français sur ses thèmes de recherche prioritaires sur lequel le CNRS et l'UPMC puissent s'appuyer pour porter des actions d'envergure nationale. Un atout important de l'équipe, qu'il faudra utiliser, est son large spectre d'outils et de méthodes (expériences, simulation numérique et théorie). Pour éviter une dispersion thématique trop forte qui nuirait au développement scientifique de l'équipe en la privant d'une nécessaire visibilité thématique et en empêchant la constitution de la masse critique nécessaire, le travail engagé en vue de la mutualisation des efforts et des outils sur des actions prioritaires sera poursuivi et amplifié. Bien sûr, la liberté et l'autonomie nécessaires pour assurer à tout chercheur les meilleures conditions pour une activité créative et fructueuse resteront au cœur des préoccupations de l'équipe. Bon nombre de thèmes de recherche développés au sein de l'équipe FRT sont à vocation multidisciplinaire. La stratégie adoptée pour relever ces défis repose sur le développement de collaborations externes, plutôt que de tenter de redévelopper toutes les compétences en interne. L'Université Pierre et Marie Curie, par sa taille et son excellence, est un lieu privilégié pour cela. La recherche de collaborations, soit au sein de l'Institut Jean Le Rond d'Alembert, soit avec d'autres laboratoires travaillant sur les mêmes disciplines, mais aussi avec des laboratoires relevant d'autres disciplines (par exemple, mathématiques : Laboratoire Jacques Louis Lions ; robotique : Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique) sera poursuivie et amplifiée afin d'enrichir les travaux. De plus, l'équipe FRT souhaite s'inscrire dans la politique de développement des pôles de recherche de l'UPMC, en développant des actions avec d'autres équipes du pôle « Modélisation et Ingénierie », mais également en apportant ses compétences en mécanique à des projets transverses entre pôles. Elle est également désireuse de s'impliquer fortement dans les actions à caractère national du CNRS (PNIR, ...)

Un défi important posé à l'équipe FRT pour le prochain contrat quadriennal est sa contribution au développement du site de Saint-Cyr l'Ecole (partagé avec l'équipe MPIA). Elle peut et doit certainement jouer un rôle majeur sur ce point, en y développant un pôle d'excellence scientifique de niveau international, leader en France, sur certains aspects de la combustion pour les moteurs internes. Il s'agira ici de poursuivre le travail entamé depuis plusieurs années par Ph. Guibert, en alliant recherche fondamentale et recherche appliquée. Le regroupement sur ce site de bancs d'essai de grande qualité et d'une grande rareté est un atout fort, ainsi que la jeunesse et le dynamisme des personnels impliqués. Toutefois, il semble évident que la constitution d'une équipe leader dans ce domaine ne pourra se faire sans une augmentation du potentiel humain présent sur le site, ainsi que le développement d'une activité de modélisation théorique et numérique associée. Les recrutements annuels ne suffiront certainement pas, et l'intégration de chercheurs venant

d'autres laboratoires sera une piste à étudier. Sur le plan académique, les collaborations avec d'autres laboratoires seront amplifiées.

Un autre enjeu important pour l'équipe sera de se positionner comme un acteur majeur dans le domaine de la modélisation et de la simulation des écoulements turbulents. Sa maîtrise équilibrée de toutes les approches de la simulation de turbulence (du calcul stationnaire - RANS- à la simulation numérique directe - DNS - en passant par la simulation des grandes échelles - LES- ainsi que les méthodes hybrides) et ses liens avec les équipes en pointe des secteurs du transport terrestre (Renault, Alstom, SNCF) et aérien (EADS, Airbus, Dassault, Safran, ONERA, Cerfacs), ainsi que du secteur de l'énergie (EDF, CEA) en font un acteur à peu près unique dans le paysage académique français. Pour continuer à accroître son potentiel dans ce domaine, le développement d'actions communes, mais aussi de plateformes logicielles de recherche ouvertes et l'accès à des moyens de calcul compétitifs seront des éléments importants. Sur les deux derniers points, les partenariats actuels avec de grands organismes de recherche (comme EDF (code Saturne), le CEA (code TRIO\_U) ou l'ONERA et d'autres laboratoires (TREFLE, LEGI) seront poursuivis et si possible amplifiés. Ici aussi, la possibilité de s'adjoindre les compétences de collègues en provenance d'autres laboratoires pourrait être envisagée sur la période 2009-2012 afin de répondre à des besoins qui ne pourraient pas être palliés par les seuls recrutements sur le contingent de l'UPMC.

Enfin, les activités expérimentales dans le domaine des turbomachines seront poursuivies dans le cadre de la convention de recherche avec l'ENSAM-Lille (Laboratoire de Mécanique de Lille) relative au déménagement du banc CME2 (qui demeure propriété de l'UPMC).

## F. 2 - Thèmes de recherche prioritaires pour la période 2009-2012

Dans le cadre du prochain contrat quadriennal, l'équipe FRT souhaite concentrer ses efforts autour des quatre axes de recherche suivant (donnés sans ordre de priorité):

Combustion pour les moteurs automobiles. L'équipe FRT tente aujourd'hui d'apporter une contribution aux progrès substantiels réalisés dans le domaine de la combustion. Or « la communauté française et notamment les laboratoires CNRS jouent un rôle significatif dans ces développements avec des apports reconnus au niveau international en théorie de la combustion, dans l'analyse et la modélisation des mécanismes de la combustion turbulente, dans la représentation de la cinétique chimique et des phénomènes de transport au niveau moléculaire, dans le domaine des instabilités et du contrôle de la combustion (...) » (rapport de conjoncture 2004 du département SPI du CNRS). C'est pourquoi l'équipe FRT s'est attelée à « travailler sur des projets fédérateurs [et] à se regrouper autour de bancs d'essais communs » telle la Machine à Compression Rapide.

Pour autant, de l'aveu même du CNRS, la taille de la communauté travaillant dans le domaine de la combustion reste réduite, aux niveaux aussi bien mondial que national, et ce alors que la combustion intervient pour 85 % des besoins en énergie primaire (9.3 Gtep des

10.6 Gtep consommés dans le monde en 2000). En particulier, « le nombre de chercheurs impliqués dans le secteur stratégique de la modélisation et de la simulation numérique de la combustion est relativement faible si on prend en compte les enjeux du secteur. » Or, l'équipe FRT s'est notamment constituée avec la certitude qu'« il faudra (...) renforcer l'interaction entre théorie, simulation et expérimentation. Dans le même temps, ces objectifs nécessitent le renforcement d'actions expérimentales, l'extension de méthodes de mesures, notamment optiques, et le développement d'outils de caractérisation. »

Cette action de recherche s'articule autour d'une plateforme expérimentale couvrant l'ensemble des besoins par une analyse progressive et constructive. En particulier, plusieurs expériences sont disponibles pour traiter des aspects chimique et physique des processus étudiés (brûleur, machine à compression rapide optique, enceinte HP HT, mono cylindre à taux de compression variable et bancs moteur).

À moyen terme, l'équipe FRT espère ainsi le soutien des organismes de tutelle sous forme de recrutement afin de reconnaître les efforts d'interaction numérique/expérimental dans le domaine de la combustion.

Le verrou scientifique auquel l'équipe sera confrontée dans un proche avenir concernera tout particulièrement une description précise des régimes de combustion rencontrés dans le cas des combustions alternatives de type HCCI. Ce mode de combustion induit une interaction entre la combustion en masse contrôlée par la chimie d'autoinflammation et la combustion par déflagration contrôlée par la turbulence. Ceci peut se traduire par des temps caractéristiques de la chimie réactionnelle du même ordre de grandeur que ceux des mélanges, mais aussi par des conditions de diffusion de chaleur et d'espèces qui sortent de la gamme habituellement rencontrée.

Ce sont là autant d'enjeux, tant expérimentaux que numériques, que l'équipe FRT souhaite relever. L'importance des réponses qu'elle y apportera dans le futur dépend en partie du soutien que l'équipe recevra.

Simulation des écoulements turbulents en interaction (couplage fluide-structure, thermodynamique hors équilibre, ...). Une force de l'équipe FRT réside dans sa maîtrise, très rare dans le paysage académique français, de l'ensemble des techniques des écoulements turbulents (allant de la simulation numérique directe à la simulation statistique au sens de Reynolds, en passant par la simulation des grandes échelles). Dans le cadre du prochain contrat quadriennal, outre l'application de ces méthodes à des fins de compréhension de la physique de certains écoulements, il est proposé de continuer les recherches sur la modélisation des échelles turbulentes non résolues. Les verrous scientifiques actuels sur lesquels l'effort devrait porter en priorité sont les approches hybrides de type RANS/LES (comprenant aussi bien la mise au point de modèles que la théorie du filtrage associée), la théorie de la simulation des grandes échelles (modélisation, théorie du filtrage, notion de consistance étendue, ...) ainsi que l'extension de ses méthodes aux cas où le champ aérodynamique est non linéairement couplé avec un autre système physique. Dans le cas de l'interaction fluide-structure, on vise des applications à l'étude du phénomène de VIV (Vortex Induced Vibration) pour des corps élancés immergés et l'aéroélasticité des

voilures portantes. Des efforts accrus devraient être consacrés aux problèmes d'interaction fluide-structure, car il s'agit d'une thématique sur lequel l'Institut Jean Le Rond d'Alembert possède tous les atouts pour devenir un acteur majeur sur le plan national. De plus, cette thématique est potentiellement porteuse d'interactions fructueuses avec les mathématiciens appliqués, l'IFR « Cœur-Muscles-vaisseaux » de la Pitié-Salpêtrière et les équipes d'imagerie médicale de l'UPMC. Pour le couplage avec la thermodynamique hors équilibre, on traitera du couplage avec les écoulements réactifs. Il s'agira là d'une étape importante dans le développement des compétences en simulation des écoulements réactifs. Les discussions sur ce thème avec le Cerfacs et le laboratoire EM2C devraient se concrétiser. Les applications relevant de l'aérodynamique instationnaire (vol battu, réponse d'une surface portante à des rafales de vent, ...) seront recherchées, car, outre leur intérêt théorique, elles sont à la base des recherches menées en commun avec l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique.

Méthodes numériques stochastiques et déterministes. Il est maintenant acquis que la mise au point de méthodes numériques efficaces (nécessaires pour la réalisation de simulations numériques de systèmes à échelle 1) ne peut être faite qu'avec une analyse approfondie du modèle physique, en y incluant les modèles de turbulence employés pour représenter les échelles physique non résolues. Ici aussi, la double compétence équilibrée de l'équipe FRT sur les méthodes numériques et la modélisation de la turbulence la place dans une position privilégiée au niveau national. En conséquence, conjointement avec les recherches sur la modélisation physique, les recherches sur les méthodes numériques seront poursuivies. Il s'agit ici de travaux visant à la mise au point de schémas précis et efficaces pour les approches décrites plus haut (DNS, LES, RANS).

Par ailleurs, la maturité grandissante des outils numériques commerciaux ou à vocation industrielle (codes de l'ONERA, du CEA, de EDF, ...) engendre une demande accrue concernant la modélisation des systèmes physiques complexes réels, et donc de la modélisation et de la propagation des incertitudes. L'équipe FRT est aujourd'hui un des principaux acteurs académiques français sur ce thème pour les applications relevant de la mécanique des fluides, et a pour volonté d'accroître ses efforts dans ce domaine lors du prochain contrat quadriennal.

Sur ces deux sujets, on renforcera les liens existants, en particulier avec le Laboratoire Jacques Louis Lions, ainsi que les partenariats en aval (actuellement : Airbus, CEA, ONERA).

Aéroacoustique. L'équipe FRT développe aujourd'hui une activité de grande ampleur en aéroacoustique numérique (2 projets PREDIT, 2 contrats européens, plusieurs contrats directs d'industriels, et plus de 5 doctorants et post-doctorants). Les recherches portant aussi bien sur la propagation des ondes acoustiques au sein d'un écoulement turbulent, mais aussi la compréhension des mécanismes de génération de bruit par la turbulence seront poursuivies. On cherchera notamment à trouver des définitions alternatives des sources acoustiques au moyen d'outils mathématiques avancés, et cela en collaboration avec l'équipe MPIA. Outre les recherches faites en commun avec l'équipe MPIA et les partenaires amont actuels (ONERA, Renault, SNCF, Alstom, ...), on cherchera à établir des partenariats ciblés avec d'autres équipes de recherche académiques, par exemple dans le



cadre des actions du programme IROQUA. Sur cette thématique, le positionnement de l'équipe FRT est bien sûr conditionné par la politique menée au niveau du laboratoire (l'aéroacoustique y étant dispersée sur 3 équipes) et sur la capacité commune à faire émerger une action transverse visible au niveau national.

Évolution des effectifs. L'équipe FRT est jeune, et ne connaîtra que peu de départs à la retraite durant la période 2009-2012. Deux membres partiront à la retraite entre 2007 et 2008. En revanche, de nombreux membres de l'équipe devraient obtenir une Habilitation à Diriger des Recherches, puis une qualification pour les concours de professeurs des Universités. Une certaine instabilité est donc envisageable durant la période 2009-2012. Ce départ d'éléments jeunes et dynamiques (tous les membres de FRT présents lors du prochain contrat sont publiants) devra donc être anticipé pour éviter des pertes de compétence dangereuses sur des thèmes prioritaires et porteurs.

Une faiblesse de l'équipe FRT est certainement la petitesse de son effectif CNRS, issu de la formation initiale des équipes de l'Institut d'Alembert (la majorité des chercheurs relevant de la section 10 ayant été regroupée au sein de l'équipe FCIH). Après le départ à la retraite de H. Miton en 2008, D. Lucor sera le seul chercheur CNRS membre de l'équipe. L'accroissement des effectifs CNRS de l'équipe FRT devrait être considéré comme une priorité : la qualité de l'équipe permet certainement un tel accueil dans les meilleures conditions, l'apport de chercheurs dégagés des contraintes d'enseignement accroîtrait le potentiel de l'équipe de manière significative, et permettrait de stabiliser le potentiel de recherche (la plupart des passages CR-DR se faisant sans mobilité thématique ou géographique). Un tel apport serait certainement ressenti par l'équipe comme un signe positif fort en provenance d'une de ses tutelles. Enfin, il permettrait de garantir la mixité « culturelle » de l'équipe et une compréhension accrue des fonctionnements et des politiques des deux tutelles.

## *Publications F.R.T.*

Revues à Comité de lecture

2007

1. Benarafa Y., Cioni O., Ducros F., & Sagaut P. (2007). Passive scalar wall modelling in a heated and turbulent plane channel flow *Int. J. Heat Mass Transfer*.
2. Chassaing J.C., & Gerolymos G.A. (2007). Time-Domain Implementation of Nonreflecting Boundary-Conditions for the Nonlinear Euler Equations. *Appl. Math. Modell.*, 31.
3. Chassaing J.C., & Gerolymos G.A. (2007). Time-Linearized Time-Harmonic 3-D Navier-Stokes Shock-Capturing Schemes *Int. J. for Numer. Meth. Fluids*.
4. Chassaing J.C., Sayma A.I., & Imregun M. (2007). A Combined Time and Frequency Domain Approach for Acoustic Resonance Prediction. *Journal of Sound and Vibration*.
5. Dandois J., Garnier E., & Sagaut P. (2007). Numerical simulation of active separation control by synthetic jet. *J. Fluid Mech.*, 574: p.25-58.
6. David C., Fernando R., & Feng Z. (2007). A note on "general solitary wave solutions of the Compound Burgers-Korteweg-de Vries Equation" *Physica A : Statistical and Theoretical Physics*, 375: p.44-50.
7. David C., & Sagaut P. (2007). Theoretical optimization of finite-difference schemes. *Discrete and continuous dynamical systems*
8. Desquennes G., Terracol M., & Sagaut P. (2007). Numerical investigation of the tone noise mechanism over laminar airfoils. *Journal of Fluid Mechanics*
9. Druault P., & Chaillou C. (2007). Use of Proper Orthogonal Decomposition for reconstructing the 3-D-3-C in-cylinder mean flow field from PIV data *Compte-Rendus Mécaniques* 335-1: p.42-47.
10. Fuentes A., Legros G., El-Rabii H., Vantelon J.P., Joulain P., & Torero J.L. (2007). Laser-induced incandescence calibration in a three-dimensional laminar diffusion flame *Experiments in Fluids* 43: p.939-948.
11. Fuentes A., Rouvreau S., Joulain P., Vantelon J.P., et al. (2007). Sooting behaviour dynamics of a non-buoyant laminar diffusion flame. *Combustion Science and Technology*, 179: p.3-19.
12. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2007). Robust Implicit Multigrid Reynolds-Stress-Model Computations of 3-D Turbomachinery Flows *ASME J. Fluids Eng.*, 129.
13. Gomez T., Sagaut P., Schilling O., & Zhou Y. (2007). Large-eddy simulation of very large kinetic and magnetic Reynolds number isotropic magneto-hydrodynamic turbulence *Phys Fluids*, 19: p.048101.
14. Hoarau E., & David B. (2007). Lie group computation of finite difference schemes *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series A* 14: p.180-184.
15. Hoarau E., David C., Sagaut P., & Lê T.H. (2007). Lie group study of finite difference schemes. *Discrete and Continuous Dynamic Systems*.

16. Jouhaud J.C., Sagaut P., Montagnac M., & Laurenceau J. (2007). A surrogate-model based multi-disciplinary shape optimization method with application to a 2D subsonic airfoil *Computers and Fluids* 36: p.520-529.
17. Labourasse E., Lacanette D., Toutant A., Lubin P., et al. (2007). Towards large eddy simulation of isothermal two-phase flows : governing equations and a priori tests. *Int. J. Multi-phase Flows* 33: p.1-39.
18. Larchevêque L., Sagaut P., & Labbé O. (2007). Large-eddy simulation of a subsonic cavity flow including asymmetric effects. *J. Fluid Mech.* 577: p.105-126.
19. Le Cong T., Dagaut P., & Dayma G. (2007). Oxidation of natural gas/syngas mixtures and effect of burnt gas recirculation : Experimental and detailed kinetic modeling *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*.
20. Le Moyne L., Freire V., & Queiros-Conde D. (2007). Fractal dimension and scale entropy applications in sprays *Chaos, Solitons and Fractals*.
21. Léonard S., Terracol M., & Sagaut P. (2007). Commutation error in LES with time-dependent filter width. *Computers and Fluids* 36: p.513-519.
22. Lesshafft L., Huerre P., & Sagaut P. (2007). Frequency selection in globally unstable round jets. *Phys Fluids* 19: p.0540108.
23. Lu S.Y., & Sagaut P. (2007). Pseudo-characteristic formulation and dynamic boundary conditions for computational aeroacoustics. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 53: p.201-227.
24. Lu S.Y., & Sagaut P. (2007). Direct sensitivity analysis for smooth unsteady compressible flows using complex differentiation. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 53: p.1863-1886.
25. Lucor D., Enaux C., Jourdren H., & Sagaut P. (2007). Multi-Physics Stochastic Design Optimization : Application to Reacting Flows *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 196: p.5047-5062.
26. Lucor D., Meyers J., & Sagaut P. (2007). Sensitivity analysis of LES to subgrid-scale-model parametric uncertainty using Polynomial Chaos *J. Fluid Mech.* 585: p.255-279.
27. Lucor D., & Triantafyllou M.S. (2007). Riser response analysis by modal phase reconstruction (à paraître pour publication). *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
28. Machrafi H., Guibert P., Cavadias S., & Morin C. (2007). HCCI engine modeling and experimental investigations - Part 1 : The reduction composition and validation of a n-heptane/iso octane mechanism *Combustion Science and Technology* 179: p.2561-2580.
29. Machrafi H., Guibert P., & Siméon C. (2007). Reduction, composition and validation of a n-heptane/iso-octane mechanism and the influence of NO on auto-ignition for HCCI engine applications *Combustion Science and Technology*.
30. Meyers J., & Sagaut P. (2007). Is plane channel flow a friendly test-case for the testing of LES subgrid scale models ? *Phys Fluids* 19: p.048105.
31. Modica V., Morin C., & Guibert P. (2007). 3-Pentanone laser-induced fluorescence in high pressure and high temperature conditions : measurements and modeling *Applied Physics B Lasers and Optics* 87: p.193-204.
32. Sauret E., & Vallet I. (2007). Near-Wall Turbulent Pressure Diffusion Modelling and Influence in 3-D secondary Flows *ASME J. Fluids Eng.* 129: p.634-642.

33. Sengupta T.K., Dipankar A., & Sagaut P. (2007). Error dynamics : beyond Von Neumann analysis (à paraître pour publication). *J. Comput. Phys.*
34. Serinyel Z., Lemoyne L., & Guibert P. (2007). Premixed charge auto-ignition as an alternative combustion mode for the future of internal combustion engines. *An overview International Journal of Vehicle Design*, 44(1/2): p.20-40.
35. Simon F., Deck S., Guillen P., Sagaut P., & Merlen A. (2007). Numerical simulation of the compressible mixing layer past an axisymmetric trailing edge. *Journal of Fluid Mechanics*.
36. Sivaramakrishnan R., Brezinsky K., Dayma G., & Dagaut P. (2007). High pressure effects on the mutual sensitization of the oxidation of NO and CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> blends *Physical Chemistry Chemical Physics*, 9: p.4230-4244.
37. Trapier S., Deck S., & Sagaut P. (2007). Time-frequency analysis and detection of supersonic inlet buzz (à paraître pour publication). *AIAA Journal*.
38. Vallet I. (2007). Reynolds-Stress Modelling of 3-D Secondary Flows with Emphasis on Turbulent Diffusion Closure *ASME J. Applied Mechanics*, 74: p.1142-1156.
39. Vallet I. (2007). Reynolds-Stresses Modelling of M=2.25 Oblique-Shock-Wave/Turbulent-Boundary-Layer Interaction *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*
40. Vincent L., Larocque J., Lacanette D., Toutant A., Lubin A., & Sagaut P. (2007). Direct numerical simulation of phase separation and a priori two-phase LES filtering (à paraître pour publication). *Computers and Fluids*

## 2006

41. Benarafa Y., Cioni O., Ducros F., & Sagaut P. (2006). RANS/LES coupling for unsteady turbulent flow simulation at high Reynolds number on coarse meshes. *Comput. Meth Applied Mech. Engng*, 195: p.2939-2960.
42. Chandesris M., Serre G., & Sagaut P. (2006). A macroscopic turbulence model for flow in porous media suited for channel, pipe and rod bundle flows *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49: p.2739-2750.
43. Dagaut P., & Dayma G. (2006). Hydrogen-enriched natural gas blend oxidation under high-pressure conditions : Experimental and detailed chemical kinetic modelling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31: p.505-515.
44. Dagaut P., & Dayma G. (2006). Mutual Sensitization of the oxidation of nitric oxide and a natural gas blend in a JSR at elevated pressure : Experimental and detailed kinetic modeling study *Journal of Physical Chemistry A* 110: p.6608-6616.
45. Dandois J., Garnier E., & Sagaut P. (2006). Unsteady simulation of a synthetic jet in a crossflow *AIAA Journal*, 44: p.225-238.
46. Dayma G., & Dagaut P. (2006). Effects of air contamination on the combustion of hydrogen-Effect of NO and NO<sub>2</sub> addition on hydrogen ignition and oxidation kinetics *Combustion Science and Technology*, 178: p.1999-2024.
47. Desquennes G., Terracol M., Manoha E., & Sagaut P. (2006). On the use of a high order overlapping grid method for coupling in CFD/CAA coupling. *J. Comput. Phys.*, 220: p.355-382.

48. Gourdain N., Burguburu S., Leboeuf F., & Miton H. (2006). Numerical simulation of rotating stall in a subsonic compressor. *Aerospace Science and Technology* 10: p.9-18.
49. Guéniche H.A., Glaude P.A., Dayma G., Fournet R., & Battin-Leclerc F. (2006). Rich methane premixed laminar flames doped with light unsaturated hydrocarbons- I. Allene and propyne *Combustion and Flame*, 146: p.620-634.
50. Guibert P., Modica V., & Morin C. (2006). Influence of pressure, temperature and gas phase composition on biacetyl laser induced fluorescence *Experiments in Fluids*, 40: p.245-256.
51. Jouhaud J.C., Sagaut P., & Labeyrie B. (2006). A Kriging approach for CFD/Wind tunnel data comparison. *J. Fluids Engng*, 128: p.847-855.
52. Leclerc E., Sagaut P., & Mohammadi B. (2006). On the use of incomplete sensitivities for feedback control of laminar vortex shedding. *Computers and Fluids*, 35: p.1432-1443.
53. Legros G., Fuentes A., Rollin B., Joulain P., Vantelon J.P., & Torero J.L. (2006). Soot volume fraction measurements in a three-dimensional laminar diffusion flame established in microgravity. *Combustion Science and Technology*, 78: p.813-835.
54. Legros G., Fuentes A., Rollin B., Joulain P., Vantelon J.P., & Torero J.L. (2006). Extinction simulation of diffusion flame established in microgravity. *Journal of the Energy Institute*, 79: p.207-211.
55. Léonard S., Terracol M., & Sagaut P. (2006). A wavelet-based adaptive mesh refinement criterion for large eddy-simulation. *Journal of Turbulence*, 7: p.N64.
56. Lesshafft L., Huerre P., Sagaut P., & Terracol M. (2006). Nonlinear global modes in hot jets *J. Fluid Mech.*, 554: p.393-409.
57. Levasseur V., Sagaut P., Chalot F., & Davroux A. (2006). An entropy-variable based VMS/GLS method for the simulation of compressible flows on unstructured grids. *Comput. Meth. Applied Mech. Engng.*, 195: p.1154-1179.
58. Levasseur V., Sagaut P., & Mallet M. (2006). Subgrid models for large-eddy simulation using unstructured grids in a stabilized finite element framework. *Journal of Turbulence*, 7: p.N28.
59. Lombaert K., Le Moyne L., Tardieu de Maleissye J., & Amouroux J. (2006). Experimental study of PAH in engine soot by isotopic tracing *Combust. Sci. and Tech.*, 178: p.707-728.
60. Lucor D., Mukundan H., & Triantafyllou M.S. (2006). Riser Modal Identification in CFD and Full-Scale Experiments. *Journal of Fluids and Structures*, 22: p.905-917.
61. Martaj N., Grosu L., & Rochelle P. (2006). Exergetical analysis and design optimization of the Stirling engine. *International Journal of Exergy*, 3: p.45-67.
62. Merahi L., Sagaut P., & Abidat Z. (2006). A closed differential model for large-scale motion in HVBK fluids. *Europhys. Lett.*, 75: p.757-763.
63. Meyers J., & Geurts B.J. (2006). Successive inverse polynomial interpolation to optimize Smagorinsky's model for large-eddy simulation of homogeneous turbulence. *Physics of Fluids*, 18: p.118102.
64. Meyers J., & Sagaut P. (2006). On the model coefficients for the standard and the variational multi-scale Smagorinsky model. *J. Fluid Mech.*, 569: p.287-319.

65. Meyers J., Sagaut P., & Geurts B.J. (2006). Optimal model parameters for multi-objective large-eddy simulations. *Phys Fluids*, 18: p.095103.
66. Reboux S., Sagaut P., & Lakéhal D. (2006). Large-eddy simulation of sheared interfacial flows. *Phys Fluids*, 18: p.105105.
67. Roudnitzky S., Druault P., & Guibert P. (2006). Proper Orthogonal Decomposition of in-cylinder engine flow into mean component, coherent structures and random Gaussian fluctuations. *J. of Turbulence*, 7-70: p.1-19.
68. Sagaut P., & Ciardi M. (2006). A finite-volume variational multiscale method coupled with a discrete interpolation filter for LES of isotropic turbulence and fully developed channel flow. *Phys Fluids*, 18: p.115101.
69. Simon F., Deck S., Guillen P., & Sagaut P. (2006). Reynolds-average Navier-Stokes/Large-eddy simulations of supersonic base flow *AIAA Journal*, 44: p.2578-2590.
70. Su C.H., & Lucor D. (2006). Covariance kernel representations of multidimensional second-order stochastic processes *Journal of Computational Physics*, 217: p.82-99.
71. Tromeur E., Garnier E., & Sagaut P. (2006). Large-eddy simulation of aero-optical effects in a spatially developing turbulent boundary layer *Journal of Turbulence*, 7: p.N1.
72. Tromeur E., Garnier E., & Sagaut P. (2006). Analysis of the Sutton model for aero-optical properties of compressible boundary layers *J. Fluids Engng.*, 128: p.239-246.

## 2005

73. Burbeau A., & Sagaut P. (2005). A dynamic p-adaptative discontinuous Galerkin method for viscous flows with shocks. *Computers and Fluids* 34: p.401-417.
74. Chaillou C., Roy R., Druault P., Guibert P., & Pajot O. (2005). Swirl characterization in steady and unsteady flows with PIV measurements. *Int. Journal of Vehicle and Design*, 39: p.383-402.
75. Ciardi M., Sagaut P., Klein M., & Dawes W.N. (2005). A dynamic finite-volume scheme for large-eddy simulation on unstructured grids *Journal of Computational Physics*, 210: p.632-655.
76. Couplet M., Basdevant C., & Sagaut P. (2005). Calibrated reduced-order POD-Galerkin system for fluid flow modeling. *Journal of Computational Physics*, 207: p.192-220.
77. Dagaut P., & Dayma G. (2005). The high-pressure reduction of nitric oxide by a natural gas blend *Combustion and Flame*, 143: p.135-137.
78. Dagaut P., Mathieu O., Nicolle A., & Dayma G. (2005). Experimental study and detailed kinetic modeling of the mutual sensitization of the oxidation of nitric oxide, ethylene and ethane *Combustion Science and Technology*, 177: p.1767-1791.
79. Druault P., Delville J., & Bonnet J.P. (2005). Experimental 3D analysis of the large scale behaviour of a plane turbulent mixing layer. *Flow, Turb and Comb.*, 74: p.207-233.
80. Druault P., Delville J., & Bonnet J.P. (2005). Proper Orthogonal Decomposition of the mixing layer flow into coherent structures and turbulent gaussian fluctuations *Compte-Rendus Mécaniques* 333-11: p.824-829.
81. Druault P., Guibert P., & Alizon F. (2005). Use of Proper Orthogonal Decomposition for time interpolation from PIV data *Exp. in Fluids*, 39: p.1009-1023.

82. Druault P, Largeau J.F., Coiffet F., Delville J., Bonnet J.P., & Lardeau S. (2005). Numerical investigations of turbulent inflow condition generation for LES *J. of Fluids Eng.*, 127-5: p.945-948.
83. Fuentes A., Legros G., Joulain P., Vantelon J.P., & Torero J.L. (2005). Evaluation of the extinction factoring a laminar flame established over a pmma plate in microgravity. *Micro-gravity Science and Technology*, 17: p.10-14.
84. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2005). Mean-flow-multigrid for implicit Reynolds-stress-model computations *AIAA Journal*, 43: p.1887-1898.
85. Josserand C., Lemoyne L., Troeger R., & Zaleski S. (2005). Droplet impact on a dry surface : triggering the splash with a small obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 524: p.47-56.
86. Joulain P., Cordeiro P., Rouvreau S., Legros G., Fuentes A., & Torero J.L. (2005). Influence of g-jitter on the characteristics of a non-premixed flame : experimental approach. *Micro-gravity Science and Technology Journal*, 16: p.328-332.
87. Legros G., Fuentes A., Ben-Abdallah P., Baillargeat J., et al. (2005). Three-dimensional recomposition of the absorption field inside a nonbuoyant sooting flame. *Optics Letters*, 30: p.3311-3313
88. Lucor D., Foo J., & Karniadakis G.E. (2005). Vortex mode selection of a rigid cylinder subject to VIV at low mass-damping. *Journal of Fluids and Structures*, 20: p.483-503.
89. Machrafi H., Lombaert K., Cavadias S., Guibert P., & Amouroux J. (2005). Reduced chemical reaction mechanisms : experimental and HCCI modelling investigations of auto-ignition processes of iso-octane in internal combustion engine. *Fuel*, 84: p.2330-2340.
90. Michon G.J., Miton H., & Ouayhaya N. (2005). Unsteady Three-Dimensional Off-design Velocity and Reynolds Stresses in an Axial Subsonic Compressor *Journal of Propulsion and Power*, 21: p.961-972.
91. Montreuil E., Labbé O., & Sagaut P. (2005). Assessment of non-Fickian subgrid-scale models for passive scalar in a channel flow. *International Journal for Numerical Method in Fluids*, 49: p.75-98.
92. Renard J.B., Daugeron D., Personne P., Legros G., et al. (2005). Optical properties of randomly distributed soot : improved polarimetric and intensity scattering functions. *Applied Optics*, 44: p.591-596.
93. Sagaut P., & Levasseur V. (2005). Sensitivity of spectral variational multiscale methods for large-eddy simulation. *Phys. Fluids*, 17: p.035113.
94. Terracol M., Manoha E., Herrero C., Labourasse E., Redonnet S., & Sagaut P. (2005). Hybrid methods for airfrane noise numerical prediction *Theoret. Comput. Fluid Dyn.*, 19: p.197-227.
95. Touchard S., Buda F., Dayma G., Glaude P.A., Fournet R., & Battin-Leclerc F. (2005). Experimental and modeling study of the oxidation of 1-pentene. *International Journal of Chemical Kinetics*, 37: p.451-463.

## 2004

96. David C., Touratier M., & C., Ossadzow-David. (2004). A multilayered Piezoelectric Shell theory *Composites Science and Technology*, 64: p.2121-2137.

97. Delbende I., Gomez T., Josserand C., Nore C., & Rossi M. (2004). Various aspects of fluid vortices *C.R. Mécanique*, 332(9): p.767-781.
98. Druault P., & Guibert P. (2004). Use of turbulent flow statistical properties for correcting erroneous velocity vectors in PIV *Compte-Rendus Mécaniques*, 332: p.731-736.
99. Druault P., Lardeau S., Bonnet J.P., Coiffet F., et al. (2004). A methodology for the generation of realistic 3D turbulent unsteady inlet conditions for LES *AIAA Journal*, 42: p.447-456.
100. Faure T.M., Miton H., & Vassilieff N. (2004). A laser-Doppler anemometry technique for Reynolds stresses measurement *Exp. Fluids* 37: p.465-467.
101. Gerolymos G.A., Sauret E., & Vallet I. (2004). Oblique-shock-wave/Boundary-layer interaction using near-wall Reynolds-stress models *AIAA Journal*, 42: p.1089-1100.
102. Gerolymos G.A., Sauret E., & Vallet I. (2004). Influence of inflow-turbulence in shock-wave/Turbulent-boundary-layer interaction computations. *AIAA Journal*, 42: p.1101-1106.
103. Gerolymos G.A., Sauret E., & Vallet I. (2004). Contribution to the single-point-closure Reynolds-stress modelling of inhomogeneous flow. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* 17: p.407-431.
104. Labourasse E., & Sagaut P. (2004). Advances in RANS-LES coupling, a review and an insight into the NLDE approach *Archives in Rational and Computational Mechanical Engineering* 11: p.199-256.
105. Larchevêque L., Sagaut P., Le T.H., & Comte P. (2004). Large-Eddy Simulation of a compressible flow in three-dimensional open cavity at high Reynolds number *Journal of Fluid Mechanics* 516: p.265-301.
106. Legros G., Joulain P., Vantelon J.P., Breillat C., & Torero J.L. (2004). Epaisseur Optique d'une Couche de Suie formée par une Flamme de Diffusion établie en Micropesanteur. *Mécanique et Industrie*(5): p.597-605.
107. Lombaert K., Morel S., Le Moyne L., Adam P., Tardieu de Maleissye J., & Amouroux J. (2004). Non destructive analysis of metallic elements in diesel soot collected on filters : benefits of laser induced breakdown spectroscopy *Plasma Chemistry Plasma Processing* 24: p.41-56.
108. Lombaert K., Morel S., Le Moyne L., Lelièvre J., et al. (2004). Mineral and organic analysis of Diesel soot by Trelibs ; SEM/EDS, ESR and GC/MS : Influence of air/fuel ratio and fuel composition clean air *International Journal on Environmental Combustion Technologies* 5(1).
109. Lucor D., & Karniadakis G.E. (2004). Noisy Inflows Cause a Shedding-Mode Switching in Flow past an Oscillating Cylinder *Physical Review Letters* 92: p.154501-154501-154501-154504.
110. Lucor D., & Karniadakis G.E. (2004). Predictability and Uncertainty in Flow-Structure Interactions. *European Journal of Mechanics / B Fluids (EJMB)*, 23/1: p.41-49.
111. Lucor D., & Karniadakis G.E. (2004). Adaptive Generalized Polynomial Chaos for Non-linear Oscillators. *SIAM Journal on Scientific Computing (SISC)*, 26: p.720-735.



112. Morin C., Chauveau C., Dagaut P., Gokalp I., & Cathonnet M. (2004). Vaporization and oxidation of liquid fuel droplets at high temperature and high pressure : application to n-alkanes and vegetable oil methyl esters *Combustion Science and Technology*, 176: p.499-529.
113. Sagaut P., Garnier E., Tromeur E., Larchevêque L., & Labourasse E. (2004). Turbulent inflow conditions for LES of subsonic and supersonic wall-bounded flows. *AIAA Journal*, 42: p.469-478.

## Ouvrages

### 2006

114. Sagaut P., Deck S., & Terracol M. (2006). *Multiscale and multiresolution approaches in Turbulence* Londres, Royaume-Uni: Imperial College Press. (352 p.)

### 2005

115. Sagaut P. (2005). *Large-eddy simulation for incompressible flows - An introduction (third edition)*. Berlin, Allemagne: Springer-Verlag. (556 p.)

### 2004

116. Lombaert K., Le Moyne L., Guibert P., & Amouroux J. (2004). *Thermo- and Fluid- Dynamic Processes in Diesel Engines 2*: Springer Verlag Book.
117. Sagaut P. (2004). *Large-eddy simulation for incompressible flows - An introduction (revised second edition)*. Berlin: Springer-Verlag. (426 p.)

## Chapitres d'ouvrages

### 2007

118. David C. (2007). Multilayered piezoelectric plates and shells. In *Composite Materials Research Trends*: Novartis.
119. Sagaut P. (2007). Introduction to Large-Eddy Simulation. In T. Huttli C. Wagner, P. Sagaut eds (Ed.), *Large-Eddy Simulation for Acoustics* (pp. 46 pages). Cambridge, Royaume-Uni: Cambridge University Press.
120. Sagaut P. (2007). Subgrid scale modeling issues and approaches. In L. Margolin F. Grinstein, B. Rider eds (Ed.), *Implicit Large Eddy Simulation : computing turbulent fluid dynamics* (pp. 25 pages). Cambridge, Royaume-Uni: Cambridge University Press.

### 2006

121. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2006 ). Reynolds-stress Turbulence Modelling for CFD. In J.F. Brouckaert eds (Ed.).

### 2005

122. Guibert P. (2005). Modélisation du cycle moteur. Approche zéro dimensionnelle In *Collection technique de l'ingénieur; Traité mécanique et chaleur* (Vol. B3, Moteurs thermiques, BM, pp. 16 pages): Techniques de l'Ingénieur, Paris.
123. Guibert P. (2005). Modélisation du cycle moteur - Moteur à allumage commandé In *Collection Techniques de l'Ingénieur; Traité mécanique et chaleur* (Vol. B3, Moteurs thermiques, BM, pp. 28 pages): Techniques de l'Ingénieur, Paris.
124. Lucor D. (2005). Propagation d'incertitudes dans les simulations numériques d'écoulements turbulents In *Techniques de l'Ingénieur; Sciences et Techniques*.

## 2004

125. Guibert P., Morin C., & Mokhtari S. (2004). Auto-ignition generated combustion. Part 2 : Experimental Analysis In *MTZ Worldwilde (Motor Technische Zeitschrift) 2/2004, 65* (pp. 17-20).
126. Sagaut P. (2004). Turbulence direct numerical simulation and large-eddy simulation. In E. Stein, R. de Borst & T.J.R. Hughes (Eds.), *Encyclopedia of computational mechanics* (Vol. 3, pp. 30). Chichester: Wiley.
127. Stan C., & Guibert P. (2004). Auto-ignition generated combustion. Part 1 : Thermodynamic Fundamentals. In *MTZ Worldwilde (Motor Technische Zeitschrift) 1/2004, 65*.

## Colloques avec actes

## 2007

128. Chassaing J.C., Gerolymos G.A., & Vallet I. (2007). *Turbulence-Structure Modification from Low-Frequency Shock-Wave Micro-oscillations* Paper presented at the *37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit - AIAA paper 2007-4116*, Miami, Etats-Unis.
129. Dayma G., Hadj Ali K., & Dagaut P. (2007). *Experimental and detailed kinetic modeling study of the high pressure oxidation of methanol sensitized by nitric oxide and nitrogen dioxide*. Paper presented at the *Proceedings of the Combustion Institute*.
130. Delattre G., Manoha E., Redonnet S., & Sagaut P. (2007). *Time-domain simulation of sound absorption on curved wall*. Paper presented at the *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - AIAA paper 2007-3493* Rome, Italie.
131. Dubreuil A., Foucher F., Mounaim-Rousselle C., Dayma G., & Dagaut P. (2007). *HCCI combustion : Effect of NO in EGR*. Paper presented at the *Proceedings of the Combustion Institute*.
132. Gerolymos G.A., Sénéchal D., & Vallet I. (2007). *Pressure, Density and Temperature Fluctuations in Compressible Turbulent Flow I*. Paper presented at the *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - AIAA paper 2007-3408*, Rome, Italie.
133. Gerolymos G.A., Sénéchal D., & Vallet I. (2007). *Pressure Fluctuations in Compressible Channel Flow*. Paper presented at the *37th AIAA Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2007-3863* Miami, Etats-Unis.

134. Gerolymos G.A., Sénéchal D., & Vallet I. (2007). *DNS of Compressible Channel Flow using Low-Diffusion High-Order Upwind Schemes* Paper presented at the *18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2007-4196* Miami, Etats-Unis.
135. Gerolymos G.A., Sénéchal D., Vallet I., & Younis B.A. (2007). *Comparison of Tensor Representations of Velocity/Pressure-Gradient, Pressure-Strain and Pressure-Velocity Correlations with Plane Channel Flow DNS Data*. Paper presented at the *11th European Turbulence Conference*, Porto, Portugal.
136. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2007). *Advances in the Numerical Computation of Complex Flows using Reynolds-Stress Models* Paper presented at the *18th AIAA Computational Fluid Dynamic Conference - AIAA paper 2007-3963* Miami, Etats-Unis.
137. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2007). *Influence of Temporal and Spatial Discretization on Hybrid RSM-VLES Computation*. Paper presented at the *18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2007-4094*, Miami, Etats-Unis
138. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2007). *Reynold-Stress Model Computation of various 3-D Ducts Flow*. Paper presented at the *37th AIAA Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2007-4351*, Miami, Etats-Unis.
139. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2007). *Low-Diffusion Approximate Riemann Solvers for Reynolds-Stress Transport*. Paper presented at the *18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2007-4467*, Miami, Etats-Unis.
140. Guibert P., Keromnes A., & Legros G. (2007). *Development of a Turbulence Controlled Rapid Compression Machine for HCCI Combustion*. Paper presented at the *International conference on fuel and lubricants, IMechE - SAE paper 2007/01 1869*, Kyoto, Japon.
141. Kuhni M., Modica V., Morin C., & Guibert P. (2007). *Detection of aldehydes by laser induced fluorescence and gas chromatography in engine*. Paper presented at the *European Combustion Meeting 2007*, Crète, Grèce.
142. Le Moyne L., Guibert P., Roy R., & Jeanne B. (2007). *Fluorescent-PIV Spray/Air interaction analysis of high-pressure gasoline injector* Paper presented at the *International conference on fuel and lubricants SAE - IMechE, SAE paper 2007/01 1825*, Kyoto, Japon.
143. Lucor D., & Triantafyllou M.S. (2007). *Parametric study of two degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a cylinder in a two-dimensional flow*. Paper presented at the *Proceedings of the IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows and Their Control*, Corfou, Grèce.
144. Machrafi H., Guibert P., & Cavadias S. (2007). *The effect of EGR on HCCI combustion - impact of diluting thermal and chemical aspects : experimental and numerical approaches* Paper presented at the *European Combustion Meeting*, Crète, Grèce.
145. Marié S., Ricot D., & Sagaut P. (2007). *Accuracy of Lattice Boltzmann Method for aeroacoustics simulations* Paper presented at the *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - AIAA paper 2007-3515*, Rome, Italie.
146. Pamies M., Garnier E., Sagaut P., & Merlen A. (2007). *An improvement of opposition control at high Reynolds numbers* Paper presented at the *IUTAM Symposium Flow Control and MEMS*.
147. Sagaut P. (2007). *On the use of LES for flow control : the compressible cavity flow case*. Paper presented at the *IUTAM conference on Unsteady separated flows and their control*, Corfou, Grèce.

148. Sagaut P., Meyers J., & Geurts B.J. (2007). *What is a good subgrid model?* Paper presented at the *2nd workshop on LES for external aerodynamics*, Londres, Royaume-Uni.
149. Sagaut P., Meyers J., & Geurts B.J. (2007). *Uncertainty modeling error charts and improvement of subgrid models* Paper presented at the *2nd Symposium on hybrid RANS-LES methods*, Corfou, Grèce.

## 2006

150. Akiki R., Bailly Y., Le Moine L., & Hervé P. (2006). *Experimental study of the vortex in swirl tube separators*. Paper presented at the *12th International Symposium on Flow Visualization* Gottingen, Allemagne.
151. Dandois J., Garnier E., & Sagaut P. (2006). *DNS/LES of active separation control*. Paper presented at the *3rd AIAA Flow control conference - AIAA paper 2006-3026*, San Francisco, Etats-Unis.
152. David C. (2006). *Finite difference schemes as a matrix equation : a new approach* Paper presented at the *SIAM-GAMM Conference on Applied Linear Algebra* Dusseldorf, Allemagne.
153. David C., & Sagaut P. (2006). *Theoretical optimization of finite difference schemes* Paper presented at the *AIMS Conference "Dynamical Systems and Differential Equations"*, Poitiers.
154. Fuentes A., Legros G., Claverie A., Joulain P., Vantelon J.P., & Torero J.L. (2006). *Interactions between Soot and CH in a Laminar Boundary Layer Type Diffusion Flame in Microgravity*. Paper presented at the *Proc. Combust. Inst. 31*, Heidelberg, Allemagne.
155. Gerolymos G.A., Sénéchal D., & Vallet I. (2006). *RSM-VLES Multiblock Implicit Solver using High-Order Upwind Scheme*. Paper presented at the *AIAA Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2006-3909*, San Francisco, Etats-Unis.
156. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2006). *Robust Implicit Multigrid Reynolds-Stress Model Computation of 3-D Turbomachinery Flows* Paper presented at the *ASME paper GT-2006-91324, 51 ASME Gas Turbine and Aeroengine Technical Congress and Exposition* Barcelone, Espagne.
157. Gourdain N., Burguburu S., Michon G.J., Ouayhaya N., Leboeuf F., & Plot S. (2006). *About the Numerical Simulation of Rotating Stall Mechanisms in Axial Compressors*. Paper presented at the *ASME Turbo Expo 2006*, Barcelone, Espagne.
158. Hoarau E., David C., Sagaut P., & Le T.H. (2006). *Lie group stability study of finite difference schemes* Paper presented at the *AIMS Conference "Dynamical Systems and Differential Equations"*, Poitiers.
159. Chassaing J.C., Gerolymos G.A., & Jeremiasz J.G. (2006). *GMRES Solution of Compressible Linearized Navier-Stokes Equations without Pseudo-Time-Marching* Paper presented at the *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting - AIAA paper 2006-688*, Reno, Nevada, Etats-Unis.
160. Ko J., Lucor D., & Sagaut P. (2006). *Uncertainty quantification of plane mixing layers using the Polynomial Chaos approach*. Paper presented at the *6th EUROMECH Fluid Mechanics Conference, KTH Mechanics*, Stockholm, Suède.
161. Lesshafft L., Huerre P., Sagaut P., & Terracol M. (2006). *Dynamics of hot jets : a numerical and theoretical study*. Paper presented at the *International conference on Boundary and Interior Layers - Computational and Asymptotic Methods*, Gottingen, Allemagne.

162. Levasseur V., Sagaut P., Mallet M., & Chalot F. (2006 ). *Large-eddy simulation of the compressible flow over an open cavity*. Paper presented at the *7th World Congress of Computational Mechanics*, Los Angeles, Etats-Unis.
163. Lucor D., & Triantafyllou M.S. (2006 ). *Riser response analysis by modal phase reconstruction* Paper presented at the *Proceedings of OMAE 2006, 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Hambourg, Allemagne.
164. Meyers J., & Sagaut P. (2006 ). *On the required Reynolds-number dependence of variational multi-scale Smagorinsky models*. Paper presented at the *ECCOMAS European Conference on Computational Fluid Dynamics*, art. n° 439, Egmond aan Zee, Pays-Bas.
165. Meyers J., Sagaut P., & Geurts B.J. (2006 ). *A framework to assess the quality and robustness of LES codes* Paper presented at the *ASME Joint U.S. - European Fluids Engineering Summer Meeting*, Miami, Etats-Unis.
166. Simon F., Deck S., Guillen P., & Sagaut P. (2006 ). *RANS/LES simulations of supersonic base flow*. Paper presented at the *44th AIAA Aerospace sciences Meeting and Exhibit - AIAA paper 2006-898*, Reno, Nevada, Etats-Unis
167. Vallet I. (2006 ). *Reynolds-Stress Modelling of 3-D Secondary Flows with Emphasis on Turbulent Diffusion Closure*. Paper presented at the *36th AIAA Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2006-3741*, San Francisco, Etats-Unis.

## 2005

168. Alizon F., Guibert P., Dumont P., & Dupont A. (2005). *Convective heat transfer in the combustion Chamber of an internal combustion engine. Influence of in-cylinder aerodynamics* Paper presented at the *Vehicle Thermal Management Systems - SAE paper 2005 01 2028 (référence du papier proceeding)*.
169. Benarafa Y., Ducros F., & Sagaut P. (2005 ). *RANS/LES coupling using a forcing term approach*. Paper presented at the *4th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*.
170. Brac J., & Sagaut P. (2005 ). *Vorticity field and acoustic sources in a turbulent flow at very low Mach number and high Reynolds number*. Paper presented at the *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*.
171. Chandesris M., Serre G., & Sagaut P. (2005). *A macroscopic turbulence model for flow in porous media suited for channel, pipe and rod bundle flows* Paper presented at the *International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*.
172. Chassaing J.C., & Gerolymos G.A. (2005 ). *Time-linearized Navier-Stokes analysis of vibrating compressors*. Paper presented at the *Proceedings of the 2005 International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics (IFASD)*, Munich, Allemagne.
173. Dagaut P., Dayma G., & Nicolle A. (2005). *The oxidation of hydrogen-enriched natural gas blends at 1-10 atm : Experimental and modelling* Paper presented at the *20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*.
174. Dagaut P., Dayma G., & Nicolle A. (2005 ). *Kinetic Effects of Air Contamination on the Combustion of Hydrogen*. Paper presented at the *20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*.

175. Dagaut P., Dayma G., & Nicolle A. (2005). *Experimental and detailed chemical kinetic modeling of the interactions of NO and simple hydrocarbons at moderate temperatures* Paper presented at the *European Combustion Meeting (ECM 2005)*.
176. Dagaut P., Dayma G., & Nicolle A. (2005). *Experimental and detailed chemical kinetic modeling study of the oxidation of hydrogen-enriched natural gas blends* Paper presented at the *European Combustion Meeting (ECM 2005)*.
177. David C., Marcilhac M., & Rigolot A. (2005). *Stability and bifurcations of asymptotic solutions in non-linear mechanics* Paper presented at the *GAMM Colloquium*.
178. David C., Marcilhac M., & Rigolot A. (2005). *Stabilité et Bifurcations de solutions asymptotiques en mécanique des solides non linéaires* Paper presented at the *Colloque national en Calcul de Structures*
179. Desquennes G., Terracol M., Manoha E., & Sagaut P. (2005). *An overlapping grid method for CFD/CAA coupling - Numerical and theoretical aspects* Paper presented at the *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit - AIAA paper 2005-2872*
180. Fuentes A., Legros G., Joulain P., Vantelon J.P., & Torero J.L. (2005). *Caractérisation de l'extinction en queue d'une flamme de diffusion établie en micropesanteur*: Paper presented at the *17ème Congrès Français Mécanique*, Troyes, France.
181. Gueniche H.A., Glaude P.A., Dayma G., Fournet R., & Battin-Leclerc F. (2005). *The effect of allene and propyne addition on the structure of a rich CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar flame*. Paper presented at the *European Combustion Meeting (ECM 2005)*.
182. Legros G., Fuentes A., Rollin B., Joulain P., Vantelon J.P., & Torero J.L. (2005). *Extinction Simulation of a Diffusion Flame Established in Microgravity*: Paper presented at the *4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*, Paris, France.
183. Lesshaft L., Huerre P., Sagaut P., & Terracol M. (2005). *Global modes in hot jets, absolute/convective instabilities and acoustic feedback*. Paper presented at the *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit - AIAA paper 2005-3040*
184. Lucor D., Mukundan H., & Triantafyllou M. (2005). *DNS-based Multi-Modal Decomposition of VIV*. Paper presented at the *Proceedings of the 4th Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations (BBVIV4)*.
185. Machrafi H., Lombaert K., Cavadias S., & Guibert P. (2005). *Reduced chemical reaction mechanisms: Experimental and HCCI modelling investigations of autoignition processes of n-Heptane in internal combustion engines*. Paper presented at the *SAE 2005 - SAE paper 2005 24 035*.
186. Michon G.J., Miton H., & Ouayhaya N. (2005). *Experimental study of the unsteady flows and turbulence structure in an axial compressor from design to rotating stall conditions* Paper presented at the *6th European Conference on Turbomachinery*, Lille, France.
187. Modica V., Morin C., & Guibert P. (2005). *Measurements of 3-pentanone laser induced fluorescence with applications for imaging concentration in engine*. Paper presented at the *European Combustion Meeting 2005*, Louvain-la-Neuve, Belgique.
188. Morin C., Le Moyne L., Chauveau C., & Gokalp I. (2005). *Experimental and theoretical study of n-alkanes droplet vaporization. Application to droplets suspended and impacting on hot solid plates* Paper presented at the *20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS)*, Orléans, France.

189. Rochelle P., & Grosu L. (2005). *Etude d'une machine de Vuilleumier à piston liquides* Paper presented at the *Journée thématique "Machines thermiques exotiques"*, Société Française des Thermiciens Paris.
190. Sauret E., & Vallet I. (2005). *Near-Wall Turbulent Pressure Diffusion Modelling and Influence in 3-D Secondary Flows* Paper presented at the *Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Williamburg, Etats-Unis.
191. Stan C., Troeger R., Stanciu A., Guibert P., Le Moyne L., & Bonn  ty J. (2005). *Air/spray interaction under direct injection SI engine conditions* Paper presented at the *2005 SAE Brasil Fuels and Lubricants Meeting - SAE paper 2005 01 2105*, Rio de Janeiro, Br  sil.
192. Troeger R., Le Moyne L., & Guibert P. (2005). *Reciprocative influence of fuel and air motion during injection in SI-Engines* Paper presented at the *SAE Brazil Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition - SAE paper 2005 02 3021*, Mario Henrique Simonsen Convention Center, Rio de Janeiro, Br  sil.

## 2004

193. Bertier N., Courbet B., Dutoya D., Vuillot F., & Sagaut P. (2004). *Large-eddy simulation of a subsonic flow past a cavity on unstructured grids* Paper presented at the *42th AIAA Aerospace Sciences Meeting - AIAA paper 2004-2884*.
194. Chassaing J.C., & Gerolymos G.A. (2004). *Time-linearized time-harmonic 3-D Navier-Stokes shock-capturing schemes* Paper presented at the *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - AIAA paper 2004-2817* Manchester, Royaume-Uni.
195. Chassaing J.C., & Gerolymos G.A. (2004). *Time-domain implementation of nonreflecting boundary-conditions for the nonlinear Euler equations* Paper presented at the *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference - AIAA Paper 2004-2967*, Manchester, Royaume-Uni.
196. Couplet M., Sagaut P., & Basdevant C. (2004). *Reduced order modelling of a turbulent separated flow* Paper presented at the *ECCOMAS 2004*.
197. Dandois J., Garnier E., & Sagaut P. (2004). *Case 2 : synthetic jet in a crossflow*. Paper presented at the *NASA Langley Workshop on CFD Validation of Synthetic Jets and Turbulent Separation Control*.
198. David C., Marcihac M., & Rigolot A. (2004). *Recursive differential systems in non-linear mechanics* Paper presented at the *SIAM Colloquium*.
199. Deron R., Tromeur E., Dussauge J.P., Garnier E., & Sagaut P. (2004). *Study of turbulent boundary layer optical effects using Shack-Hartmann wavefront analysis and LES simulations*. Paper presented at the *Proceedings of the 10th European Turbulence Conference*.
200. Druault P., Largeau J.F., Coiffet F., Lardeau S., & Bonnet J.P. (2004). *Numerical validation of a new methodology for the generation of realistic turbulent inflow conditions for LES*. Paper presented at the *ASME 2004 Heat Transfer / Fluids Engineering Summer Conference, paper n   561652004* Charlotte, Caroline du Nord, Etats-Unis.
201. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2004). *Mean-flow-multigrid for implicit k-eps and Reynolds-stress-model computations* Paper presented at the *34th AIAA Fluid Dynamics Conference - AIAA paper 2004-2527*.

202. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2004 ). *Turbulence modelling and computational analysis of aircraft engine turbomachinery : turbo\_3D@RSM\_3D* Paper presented at the *Proceedings of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*.
203. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2004 ). *Efficient and robust implicit multigrid Reynolds-stress-model computation of 3-D compressible flows* Paper presented at the *ECCOMAS 2004*.
204. Gourdain N., Burguburu S., Leboeuf F., & Miton H. (2004 ). *Numerical simulation of rotating stall in a subsonic compressor*. Paper presented at the *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit - AIAA paper 2004-3933*.
205. Grosu L., & Rochelle P. (2004 ). *Etude énergétique et exergetique des échangeurs de chaleur d'un moteur à air chaud. Optimisation selon l'approche de la thermodynamique en dimensions finies*. Paper presented at the *Colloque Franco-Roumain COFRET'04*.
206. Labbé O., & Sagaut P. (2004 ). *Numerical simulation behind an A300 Airbus model*. Paper presented at the *ICMAR 2004*.
207. Lombaert K., Le Moyne L., Guibert P., & Amouroux J. (2004 ). *Isotopic tracing potential for pollutant formation investigation on engines*. Paper presented at the *THIESEL 2004 Conference on Thermo- and Fluid- Dynamic Processes in Diesel Engines*, Valencia, Espagne.
208. Lucor D., Su C.H., & Karniadakis G.E. (2004 ). *Generalized polynomial chaos applied to flow-structure interaction problems*. Paper presented at the *Proceedings of the ICOSAHOM'04*
209. Lucor D., Su C.H., & Karniadakis G.E. (2004 ). *Derivation of covariance kernels from dynamical systems and PDE's for stochastic inputs* Paper presented at the *Proceedings of the ICOSAHOM'04*.
210. Rochelle P. (2004 ). *LTD Stirling engine simulation and optimisation using "Finite Dimension Thermodynamics"* Paper presented at the *Proceedings of the 12th ISEC*, Durham, Royaume-Uni.
211. Rochelle P. (2004 ). *Theoretical study of a Stirling hydro pulse-jet*. Paper presented at the *Proceedings of the European Conference on Stirling Engine, ECOS 2004*.
212. Seror C., Sagaut P., & Belanger A. (2004 ). *A numerical aeroacoustics analysis of a detailed landing gear*.

## Colloques sans actes

## 2007

213. Lucor D. (2007). *Introduction aux Méthodes Spectrales Stochastiques* Paper presented at the *Incertitudes et Simulation Conference*. Bruyères le Châtel, France

## 2006

214. Lucor D. (2006). *Spectral methods for stochastic uncertainty quantification : Application to fluid flows*. Paper presented at the *Numerical and Stochastic Models (NSM) Conference*. Paris, France



Thèses

2007

- 215. Levasseur V. (2007). *Simulation des grandes échelles en éléments finis stabilisés : une approche variationnelle multi-échelles* Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 216. Jeremiasz J.G. (2007). *Méthodes de Krylov pour les équations de Navier-Stokes non-linéaires, linéarisées et pour l'optimisation aérodynamique* Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

2006

- 217. Chaillou C. (2006). *Développement d'outils de description et de caractérisation de l'aérodynamique. Application aux écoulements internes issus des cylindres des moteurs automobiles*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 218. Chandesris M. (2006). *Modélisation méso-micro d'écoulements turbulents*. Doctorat Université Pierre et Marie Curie.
- 219. Léonard S. (2006). *Extension de la méthode LES au cas des filtres variables en temps*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie
- 220. Marcilhac M. (2006). *Mécanique non linéaire des milieux élancés* Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 221. Modica V. (2006). *Développement d'une mesure quantitative de concentration d'espèces dopées par fluorescence induite par laser. Application aux conditions moteurs*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 222. Troeger R. (2006). *Développement d'imagerie de particules appliquée aux jets d'injection*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

2005

- 223. Bertier N. (2005). *LES en maillages non-structurés en énergétique (à soutenir en 2005)*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 224. Neubauer J. (2005). *Aérodynamique 3D instationnaire des turbomachines axiales multiétages*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 225. Reijasse P. (2005). *Aérodynamique des tuyères propulsives en sur-détente : décollement libre et charges latérales en régime stabilité*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 226. Alizon F. (2005). *Corrélation aérodynamique interne et échanges de chaleur aux parois d'une chambre de combustion d'un moteur alternatif*
- 227. Benarafa Y. (2005). *Développements de méthodes hybrides RANS/LES et applications à la fatigue thermique dans les réacteurs* Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- 228. Raverdy B. (2005). *Simulation des grandes échelles de l'écoulement se développant dans un étage complet de turbine basse pression*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

2004

229. Sauret E. (2004). *Analyse et développement de modèle de turbulence au second ordre proche paroi*. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

## Rapports de contrat

## 2007

230. Chassaing J.C., Gerolymos G.A., Guenanff R., Sénéchal D., & Vallet I. (2007). *Improvement of fan broadband noise prediction : experimental investigation and CFD/CAA modelling of major noise sources* 8 rapports - CE ProBand.
231. Chassaing J.C., Gerolymos G.A., & Vallet I. (2007). *Environmentally friendly aero engine* CE FP6 VITAL.

## 2006

232. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2006). *Amélioration de Modèles Reynolds-Stress, Tranche 2 (4 rapports)* PEA DGA-Onera-Dassault.

## 2005

233. Gerolymos G.A. (2005). *Modélisation aérodynamique des nageoires de soufflantes*, Contrat SNECMA.
234. Gerolymos G.A. (2005). *Analyse aérodynamique et aéroacoustique de soufflantes*, Contrat Turboméca.
235. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2005). *Modélisation de la turbulence en écoulement supersonique* Contrat RRIT "Recherche aéronautique sur le supersonique".
236. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2005). *Réponse Forcée des Machines Centrifuges : Etude Aérodynamique Instationnaire* Contrat Turbomeca.
237. Guibert P. (2005). *Etude de stratégies nouvelles de dépollution pour les moteurs HCCI, Post-traitement catalytique* Rapport de fin de contrat Renault LMP/UPMC convention P6 L252.
238. Guibert P., & Alizon F. (2005). *Transferts de chaleur convectifs dans la chambre de combustion des moteurs à combustion interne. Influence de l'aérodynamique interne*, Rapport de fin de contrat et de thèse Renault LMP/UPMC convention AURA 10244.
239. Guibert P., & Machrafi H. (2005). *Etude de la combustion HCCI : aspects physiques et physico-chimiques* Rapport d'avance n° 1 du Projet ChCH PREDIT/LMP/CNRS convention CNRS 510409
240. Guibert P., & Modica V. (2005). *Etude de la stratification de l'EGR. Développement d'une méthodologie de caractérisation du champ aérodynamique et du champ scalaire de concentration des gaz recyclés par PIV et PLIF simultanées*, Rapport de fin de contrat Renault LMP/UPMC Convention P6 L394.
241. Guibert P., & Nowak L. (2005). *Développement d'une méthodologie de prélèvement et d'analyse fine des hydrocarbures formés dans la chambre de combustion*, Rapport intermédiaire de thèse PSA LMP/UPMC convention P6 N475.

- 242. Guibert P., & Roy R. (2005). *Etude de l'impact du processus d'injection sur la préparation du mélange. Travail initié dans des conditions d'atmosphère contrôlée suivi d'une application au moteur à combustion interne de nouvelle génération*, Rapport intermédiaire de thèse PSA LMP/UPMC convention P6 N679.
- 243. Joulain P., Legros G., Fuentes A., Rouvreau S., et al. (2005). *Combustion Criteria for Space Materials*, European Space Agency, Estec, Netherlands.
- 244. Le Moyne L. (2005). *Auto-ignition modelling and introduction to measurement techniques*, Rapport intermédiaire ECO Engines, Réseau d'excellence CEE LMP/UPMC convention P6 N93I.

## 2004

- 245. Chaillou C., Roy R., Druault P., & Guibert P. (2004). *Etude du swirl par supports et méthodes expérimentales croisées*, Rapport de fin de contrat PSA LMP/UPMC convention AURA 10256
- 246. Chassaing J.C., Gerolymos G.A., Sauret E., Sénéchal D., & Vallet I. (2004). *Développement de méthodes de calcul pour l'aérodynamique instationnaire : application à la détermination des limites de stabilité de l'écoulement au sein d'une prise d'air supersonique*, Contrat RRIT "Recherche aéronautique sur le supersonique"
- 247. Gerolymos G.A., & Michon G.J. (2004). *Etude centrifuge avec rouet à intercalaire : validation sur APS 3000 et LSCC*, Contrat Turboméca.
- 248. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2004). *Calculs stationnaires et instationnaires turbo 3D.4.*, Contrat SNECMA.
- 249. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2004). *Réponse forcée des machines centrifuges : étude aérodynamique*, Contrat Turboméca.
- 250. Gerolymos G.A., & Vallet I. (2004). *Evaluation de Modèles Reynolds-Stress Existant, Tranche 1 (4 rapports)*, PEA DGA-Onera-Dassault
- 251. Guibert P. (2004). *Etude de stratégies nouvelles de dépollution pour les moteurs HCCI, Post-traitement catalytique*, Rapport intermédiaire de contrat Renault LMP/UPMC convention P6 L252.
- 252. Guibert P. (2004). *Etude de stratégies d'hybridation* Rapport intermédiaire de contrat Renault LMP/UPMC convention P6 L278

## Brevets

## 2007

- 253. Guibert P. (2007). Procédé d'initiation de la combustion HCCI dans un moteur à combustion interne, et moteur faisant application. France Patent No. 07 0261410. U.P.M.C./C.N.R.S.

---



**L.A.M.**

**Lutheries - Acoustique - Musique**

---

# Lutheries, acoustique, musique

## *Membres Permanents*

BESNAINOU Charles	Ingénieur de Recherches CNRS
DAUDET Laurent	Maître de Conférences UPMC
DUBOIS Danièle	Directeur de Recherches CNRS
FABRE Benoît	Professeur UPMC
FONTAINE Jean-Marc	Ingénieur de Recherches M. Culture
GENEVOIS Hugues	Ingénieur de Recherches M. Culture
POLACK Jean-Dominique	Professeur UPMC

## *Emérite*

CASTELLENGO Michèle	DR CNRS
---------------------	---------

*Effectifs au 31 Décembre 2007*

# *Lutheries - Acoustique - Musique*

---

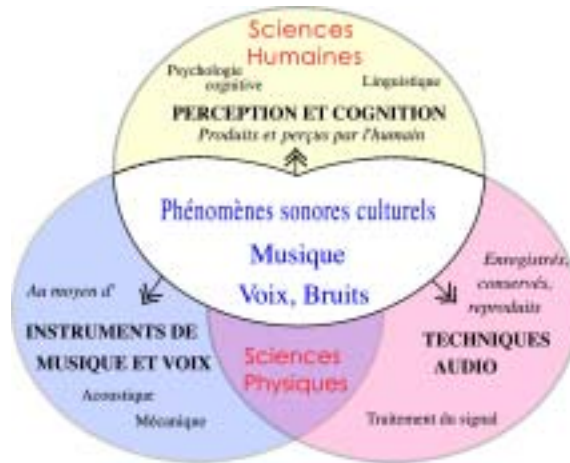
## *A - Introduction*

L'équipe "Lutheries - Acoustique - Musique" (LAM) rassemble des chercheurs animés d'une même passion pour le son et la musique en tant qu'objets culturels, et donc abordés du double point de vue des sciences pour l'ingénieur (physique, acoustique, traitement du signal) et des sciences humaines (psychologie cognitive, linguistique). Leur conjonction traduit le caractère pluridisciplinaire des recherches, non seulement au plan des contenus mais aussi d'un point de vue institutionnel.

Historiquement, l'acoustique musicale a pour objet l'étude du fonctionnement des instruments de musique, objets technologiques et culturels qui, sous une apparence relativement simple, concrétisent l'aboutissement d'un savoir empirique ayant atteint un haut niveau d'expertise. C'est dans l'interaction musicien-instrument que sont produits des sons complexes suscitant des écoutes culturellement investies, où le phénomène acoustique est instauré comme musique, bruit ou parole. En effet, dans l'écoute de la musique, l'être humain ne se préoccupe pas de mesure, mais d'identification, d'évaluation, et d'appréciation qualitative.

C'est pourquoi l'acoustique musicale s'intéresse à la qualité sonore, de la génération des sons à leur perception. L'analyse des phénomènes sonores et de leurs qualités passe aussi par l'enregistrement, la reproduction, la conservation et l'indexation des documents sonores, et c'est tout naturellement que ces technologies font l'objet de recherches qui s'inscrivent dans le domaine de l'acoustique musicale, là encore rele-

vant à la fois, comme objets techniques, des sciences de l'ingénieur comme des sciences de la culture.



Ainsi, même sans considérer les caractéristiques proprement artistiques, l'acoustique musicale suppose de prendre en compte des approches issues de divers domaines disciplinaires, tant au sein des sciences physiques que des sciences humaines (aéroacoustique, études des phénomènes vibratoires, propriétés mécaniques et acoustiques des matériaux composites, acoustique architecturale, électroacoustique, traitement du signal, sémiophysique, psychologie cognitive et linguistique).

Chacun des trois grands thèmes sous lesquels sont regroupées les recherches du LAM se définit en outre par la diversité des contributions disciplinaires dans l'analyse d'objets d'études spécifiques :

- les instruments, ou sources sonores « primaires », pour le thème instruments et voix ;
- la catégorisation et l'émergence du sens pour le thème perception et cognition ;
- le son en tant que tel et la notion de « sources virtuelles », pour le thème techniques audio.

Cette approche, pluridisciplinaire et originale, permet seule d'obtenir des résultats scientifiquement fondés et des développements applicatifs trouvant des débouchés industriels et commerciaux.

---

## *B - Instruments de musique et voix*

Ce thème regroupe les études sur le fonctionnement physique des instruments de musique. Celles-ci portent sur des instruments aussi variés que les flûtes et instruments à embouchure de flûte (orgues), le piano et les instruments à cordes et la voix humaine. Les approches vont de l'analyse détaillée des mécanismes physiques, présentant souvent de fortes non-linéarités, jusqu'à leur modélisation à des fins de synthèse sonore. Bon nombre de directions d'étude sont suggérées par l'observation de l'art du facteur d'instrument et nécessitent d'être confrontées à l'expertise des instrumentistes. L'articulation musicien-instrument conduit à regrouper les recherches sous trois rubriques :

Les paramètres de facture. Le premier axe de recherche vise à mettre en évidence les paramètres physiques (liés à la géométrie et aux caractéristiques mécaniques) modifiant le comportement et les qualités acoustiques des instruments. Ainsi, par exemple, un projet concerne l'influence de la nature de l'écoulement (notamment l'effet du déclenchement de la turbulence sur le jet) et de la géométrie (arrondi de type lèvres, chanfreins...) sur la production aéroacoustique dans les instruments de la famille des flûtes et un autre s'intéresse aux effets de la charge statique (précontrainte) sur la dynamique des tables d'harmonie de piano.

Ces recherches supposent parfois la mise au point de techniques originales, ainsi, le comportement non-linéaire du violon est étudié par réciprocity en excitant l'instrument par un champ sonore focalisé par retournement temporel. Enfin, la mise en oeuvre de techniques de contrôle actif, dans le but d'ajuster les comportements vibratoires de structures (barre de xylophone, caisse de violoncelle), permet d'amener des instruments acoustiques dans des zones de fonctionnement nouvelles.

Le geste instrumental et la notion de contrôle en temps-réel. L'étude des interactions entre le musicien et son instrument est capitale pour comprendre le fonctionnement des instruments, tant il est avéré que les sons produits sont le fruit de ces échanges d'énergie et d'information (souffles, pressions, positions, accélérations...). Pour cela, il est nécessaire d'analyser le geste instrumental, en travaillant notamment avec des experts. Une meilleure connaissance des contrôles exercés par l'instrumentiste permet en outre de déterminer les paramètres pertinents susceptibles de piloter des modèles de synthèse sonore.

La voix humaine. Comme pour les instruments de musiques auxquels elle peut se trouver assimilée, la voix est d'abord traitée ici comme phénomène acoustique, mais en prenant immédiatement en compte dans l'analyse ses propriétés spécifiques (comme phénomène humain, incluant donc des déterminations d'ordre physiologique, et phénomène de langue, imposant donc les caractéristiques des unités pertinentes à cet objet à tous les niveaux (phonétique, phonologique, prosodique, énonciatif, sémantique (intelligibilité), y compris dans la description physique.



## B. 1 - Paramètres de facture

### B.1.a - Modélisation de la mise en charge de la table d'harmonie du piano

A. Mamou-Mani,  
Ch. Besnainou -  
collaboration  
J. Frelat : équipe  
MSS

Cette thèse s'inscrit dans une collaboration entre l'équipe LAM et l'équipe « Solides et Structures » de l'Institut. Elle vise la modélisation de deux éléments du savoir-faire des fabricants de piano : « la mise en charge » et « la précontrainte » de la table d'harmonie. Ces deux étapes sont considérées comme déterminantes quant à la qualité sonore de l'instrument.

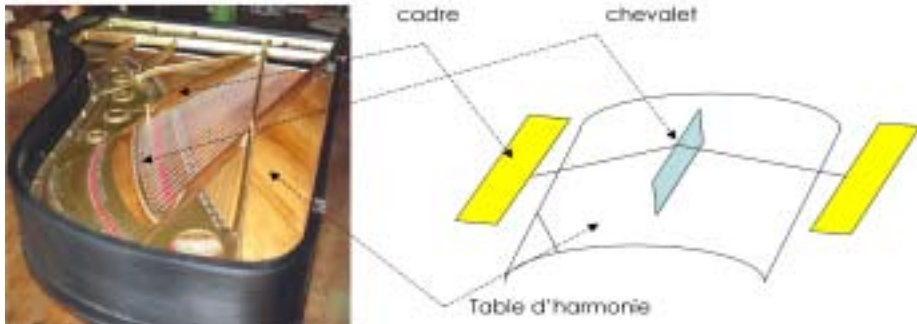


FIGURE 4-1 -  
Piano expérimental  
du LAM

Une approche combinant modélisations mécaniques et tests perceptifs a donc été adoptée afin d'identifier et modéliser le rôle de ces paramètres dans le processus de fabrication d'instruments de qualité. À ce jour, des modèles non-linéaires (analytiques et numériques) de structures précontraintes ont été réalisés (cf équipe Solides et Structures de l'Institut). Expérimentalement, les vibrations non-linéaires d'une poutre chargée en son centre ont été étudiées et l'extension à des tables d'harmonie est en cours. Ne perdant pas de vue la problématique de lutherie à l'origine de ce travail, cette thèse est aussi l'occasion de clarifier les concepts de « mise en charge » et de « précontrainte » et leur importance perceptive. Elle inclut donc une analyse de données issues d'évaluations recueillies auprès de facteurs et de musiciens (P. Cheminée)

### B.1.b - Étude de l'instabilité de l'écoulement couplé à un champ acoustique

F. Blanc,  
P.-Y. Lagrée,  
B. Fabre  
Projet inscrit dans le  
PPF Lacmé UPMC

Dans les flûtes, la production sonore par couplage d'une instabilité d'écoulement avec un résonateur a été rendue optimale, de manière empirique, par les facteurs d'instruments. Les modèles actuels permettent seulement de rendre compte du comportement d'une flûte à bec à géométrie simplifiée. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre les interactions entre écoulement et champ

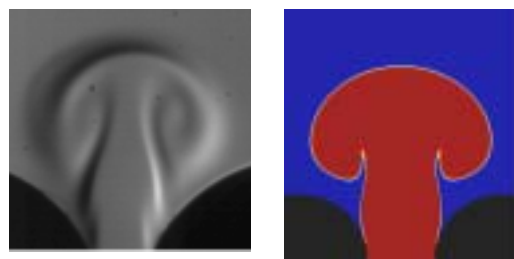


FIGURE 4-2 (a) Image tirée d'un film de départ impulsionnel de jet issu d'un canal à sortie arrondie. (b) Simulation d'un écoulement dans cette même géométrie

acoustique afin d'améliorer la pertinence des modèles physiques d'instruments de musique de la famille des flûtes.

Le travail repose sur l'observation expérimentale dans des instruments réels ou simplifiés (géométrie idéalisée) menée en parallèle à la simulation numérique directe d'écoulement. Les premiers éléments obtenus pour des départs impulsifs ont fait usage de la caméra rapide Phantom récemment acquise ainsi que du logiciel de simulation Gerris. Ils montrent l'influence de l'arrondi de sortie du canal de formation du jet sur la naissance de ce dernier.

### B.1.c - Focalisation, localisation et analyse à hyper-résolution de sources acoustiques et vibratoires dans le domaine audible

Cette thèse de doctorat, fortement interdisciplinaire, s'inscrit dans une logique de collaboration internationale entre le Laboratoire d'Acoustique Musicale, le Laboratoire Physique de l'Homme Appliquée à son environnement (Toulouse) et le Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), dans le cadre d'un programme de cotutelle de thèse entre ces laboratoires.

*E. Bavu,  
Ch. Besnainou  
collaborations avec  
V. Gibiat (Toulouse  
III) et A. Berry  
(Université de Sher-  
brooke)*

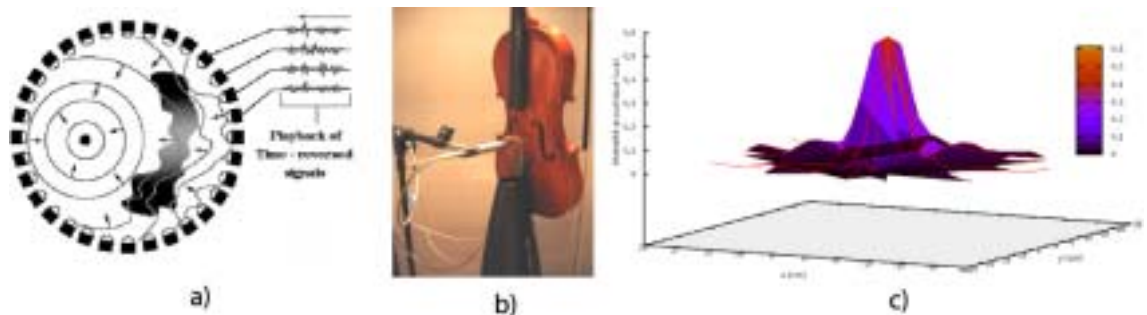


FIGURE 4-3 - Focalisation sur la table d'harmonie grâce au miroir à retournement temporel : (a) processus de retournement ; (b) dispositif de mesure et de puits acoustique ; (c) diagramme de focalisation spatiale

Deux nouvelles générations de miroir à retournement temporel et de puits à retournement temporel dans le domaine audible ont été réalisés (acoustique et vibratoire), permettant d'exciter à distance, à hyper-résolution une structure quelconque. Parallèlement à cette étude, une méthode de localisation et d'analyse à hyper-résolution de sources vibratoires a été réalisée grâce au puits vibratoire numérique à retournement temporel, notion nouvelle développée dans le cadre de cette thèse de doctorat.

Une méthode d'analyse à hyper-résolution de sources acoustiques tridimensionnelles basée sur le puits acoustique numérique est en cours de finalisation. Le dispositif est aujourd'hui opérationnel pour réaliser une analyse complète hyper-résolue et une localisation de sources vibratoires et acoustique précise.

Cette méthode adaptative permet d'étudier des structures diverses sans modifier le protocole ni la théorie sous-jacente. Elle sera donc appliquée à l'étude de tables d'harmonies d'instruments à cordes et aux structures issues du monde de l'industrie aéronautique, en collaboration avec Joe Curtin, luthier, et les sociétés Bombardier, Bell hélicoptères, et Pratt & Witney

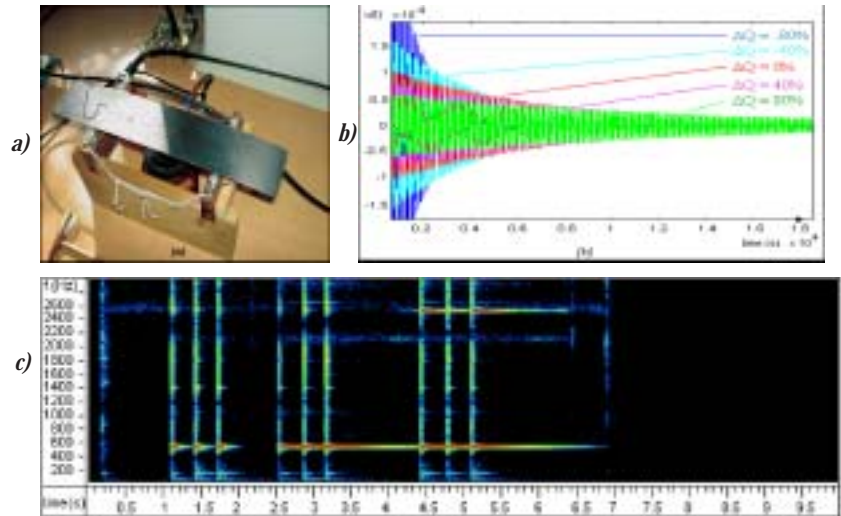
#### B.1.d - Contrôle actif appliqué aux instruments acoustiques

Henri Boutin,  
Charles Besnainou,  
Jean-Dominique  
Polack

Appliquer le contrôle actif, développé principalement dans la réduction de bruit (Active Noise Control), à la structure vibrante d'un instrument acoustique en est un moyen efficace d'élargir les possibilités acoustiques d'un instrument. Les premiers essais réalisés au LAM sous la direction de Charles Besnainou (CNRS) ont permis de modifier, à l'aide de capteurs et actionneurs piézoélectriques, son comportement vibratoire en déplaçant ses modes en fréquence, ou en changeant leurs gains et facteurs de qualité.

FIGURE 4-5

(a) *Lame de xylophone en composite sur laquelle est appliqué un contrôle actif numérique (par DSP).*  
(b) *Simulation de signaux temporels, vitesse de la lame au capteur, pour différentes corrections de facteurs de qualité Q.*  
(c) *Mesure temporelle et spectrogrammes de la vitesse de la lame au capteur, pour différentes corrections de Q.*



Cette thèse, encadrée par Charles Besnainou et codirigée par Jean-Dominique Polack et Denis Matignon (ENST), l'objet d'une co-tutelle avec le CNMAT (David Wessel, Berkeley University). Le travail s'orientera chronologiquement suivant 3 grands axes qui relèvent autant de l'acoustique, que du traitement du signal et de l'électronique :

- réalisation d'un violoncelle actif, via 2 boucles de contrôle ; l'une conférant au chevalet un mouvement à plusieurs degrés de liberté, l'autre agissant sur l'âme de l'instrument
- modélisation du violoncelle, utilisation et validation de modèles déjà existants de chevalets. Cette étude permettra de préciser l'emplacement optimal des capteurs et actionneurs.
- explication de certaines méthodes qu'utilisent les luthiers pour le réglage fin du chevalet, qui ont un effet déterminant sur le son de l'instrument.

## B. 2 - Contrôle et geste instrumental

### B.2.a - Analyse et synthèse des paramètres de contrôle dans le jeu instrumental : applications aux instruments de musique de la famille des flûtes et à la synthèse sonore

Dans le jeu de la flûte traversière, la production d'un son nécessite un apprentissage avancé car le flûtiste contrôle le son par de nombreux paramètres. La modélisation du jeu de tels instruments doit prendre en compte l'instrument mais aussi l'instrumentiste. Nous avons réalisé une expérience dans laquelle plusieurs flûtistes ont été invités à jouer sur une flûte traversière aménagée spécifiquement. Le dispositif mis en place permet la mesure des paramètres principaux du point de vue du fonctionnement physique. Les tâches musicales à réaliser ont été définies en discussion avec des flûtistes afin de couvrir l'ensemble des techniques de jeu classiques. Les sujets de l'étude sont douze flûtistes internationaux de haut niveau.

Les résultats de ces mesures ont mis en évidence certaines stratégies communes à l'ensemble des flûtistes (un exemple est présenté dans la figure ci-dessous), toutefois il existe une grande dépendance des paramètres à la séquence musicale à jouer.

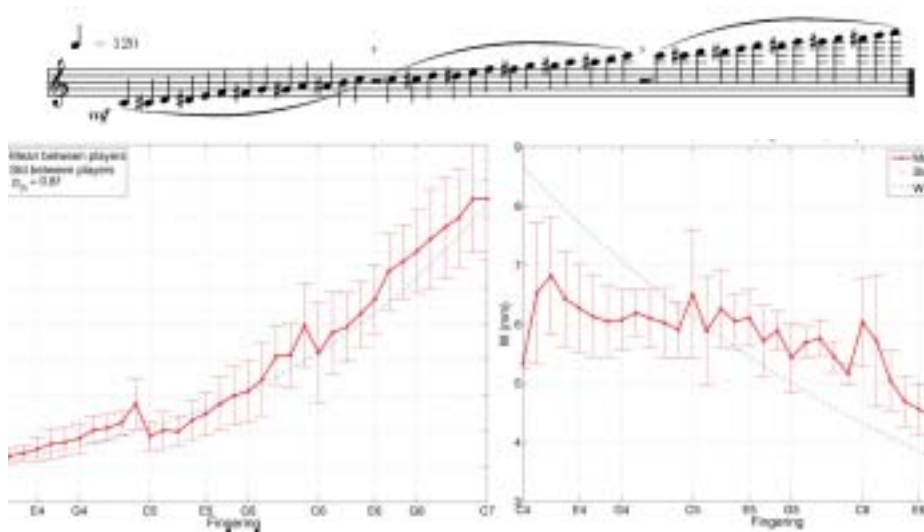


FIGURE 4-6 Gamme chromatique ascendante couvrant l'ensemble de la tessiture de l'instrument et paramètres de contrôle utilisés par l'ensemble des flûtistes. Une grande cohésion existe entre les joueurs pour la pression dans la bouche de l'instrumentiste ( $p_m$  à gauche), qui conforte les modèles existants. Les résultats sur la distance de jeu entre les lèvres de l'instrumentiste et le biseau ( $W$  à droite) varient plus fortement entre les flûtistes et bouleversent les résultats des précédents travaux.

Ces éléments sont utilisés pour calculer des descripteurs de « haut niveau » du jet, qui permettant une modélisation fine de l'état de l'instabilité hydrodynamique. Les modèles développés sont implémentés numériquement pour contrôler un synthétiseur virtuel

*N. Montgermont,  
F. Blanc,  
B. Fabre  
Ce travail s'inscrit  
dans le projet ANR  
« Consonnes » ANR-  
05-BLAN-0097-01*

d'instruments à embouchure de flûte afin d'éprouver la validité des modèles du flûtiste, mais aussi de l'influence d'une instabilité hydrodynamique sur un champ acoustique.

Parallèlement, une étude a été menée sur les paramètres de facture et de contrôle dans les familles de flûtes. En comparant les dimensions des instruments d'une famille, et en observant la façon dont un musicien s'adapte en changeant d'instrument dans la même famille, nous avons pu interpréter l'homogénéité sonore attendue d'une famille d'instruments en termes de contenu spectral des sons produits.



FIGURE 4-7 *Détails des fenêtres de jeu de cinq flûtes d'une famille de flûtes à bec. Alors que les extrêmes de ces cinq flûtes sonnent à deux octaves d'intervalle, les dimensions des fenêtres varient dans des proportions nettement plus faibles, permettant à un flûtiste de transposer sa technique de jeu à toutes les flûtes de la famille.*

### B.2.b - Étude des flûtes d'accord

*Fabre B.,  
Montgermont N.,  
Blanc F -  
Collaboration avec  
le Musée de La Couture-Boussey*

A la demande du Musée des Instruments à Vents de La Couture-Boussey (Haute Normandie), nous avons mené une étude sur des flûtes d'accord. Il s'agit d'instruments doubles, constitués de deux perces et deux bords de flûtes dans une même pièce de bois, et destinés à être joués simultanément par un seul instrumentiste produisant deux notes.

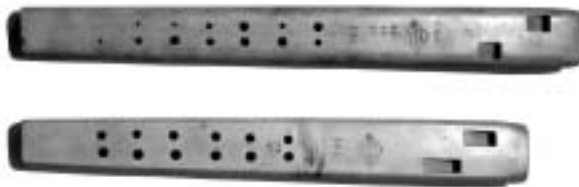


FIGURE 4-8 *deux flûtes d'accord conservées au Musée des Instruments à Vent de la Couture-Boussey.*

Ces flûtes ont sans doute été utilisées par les facteurs jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle. Nous avons étudié sur ces flûtes l'influence des différents couplages entre les deux sous-instruments : couplages acoustiques entre les trous latéraux et couplage hydrodynamique au travers de la bouche du musicien. Nous développons actuellement une simulation sur ordinateur qui incluent ces différents couplages et permettra de tester les effets de modifications géométriques.

### B.2.c - *Influence du geste sur l'oscillation de la corde frottée du violon*

Ce travail de thèse est mené en collaboration entre l'IRCAM (équipe acoustique instrumentale), le LAM et le KTH à Stockholm. L'objectif de la thèse est de mettre en rapport : le geste du violoniste au niveau de l'archet, avec les effets de ce geste sur la vibration de la corde et du violon. Cette étude se décline selon trois axes :

- l'étude mécanique: modélisation du système et des interactions
- l'étude gestuelle: analyse du geste instrumental et mise en rapport avec l'intention musicale
- Un développement technologique: dispositifs de mesures et implémentation numérique dans une perspective de temps réel

*Demoucron M.,  
Fabre B. -  
Collaboration avec  
R. Caussé: IRCAM  
- travail inscrit dans  
le projet ANR «  
Consonnes » ANR-  
05-BLAN-0097-01*

### B.2.d - *Contrôle gestuel d'instruments de synthèse sonore*



FIGURE 4-9 *Geste de contrôle avec le Méta-instrument*

Seul un contrôle en temps-réel de la synthèse sonore permet un jeu musical expressif. Pour cela, dans la lignée de ce que l'on a coutume d'appeler aujourd'hui l'étude des interfaces homme-machine, le développement d'outils spécifiques permettant la représentation et l'analyse des signaux issus des capteurs a été entrepris. Ils font l'objet d'une diffusion à l'intérieur d'un réseau scientifique financé par l'ANR. (collaboration avec S. de Laubier : Studios Puce Muse - dans le cadre du projet 2PIM /ANR RIAM 2006; cf "Lutheries électroniques et création musicale", page 113)

*Genevois H.*

## B. 3 - La voix Humaine

Parmi les sources sonores la voix humaine tient une place particulière. Elle s'inscrit dans une chaîne complexe dans laquelle l'instrument, au sens facture, est entièrement sous le contrôle d'un sujet humain qui ajuste l'ensemble des mécanismes de production sur le retour perceptif qu'il en a par la boucle audiophonatoire. Cet « instrument » est un organe vivant qui s'adapte différemment selon les situations de communication, privilégiant tantôt les variations rapides de spectre (parole) et tantôt les variations de hauteur fondamentale et de qualité sonore (voix chantée). Pluridisciplinaires par nature les recherches sur la voix suscitent de nombreuses collaborations extérieures et donnent lieu, au sein de l'équipe à des travaux réunissants s'inscrivant aussi bien en perception (cf D. Dubois "Evaluation de la qualité de la restauration d'enregistrements sonores dégradés", page 106) qu'en traitement du signal (cf "Patrimoine et culture : préservation du patrimoine sonore", page 111)

**B.3.a - Mécanismes laryngés et registres des chanteurs**

Henrich N.,  
Castellengo M.,  
Roubeau B. (hôpital  
Tenon),  
Lamesch S., (mas-  
tère).  
Collaboration  
Robert Expert,  
chanteur.

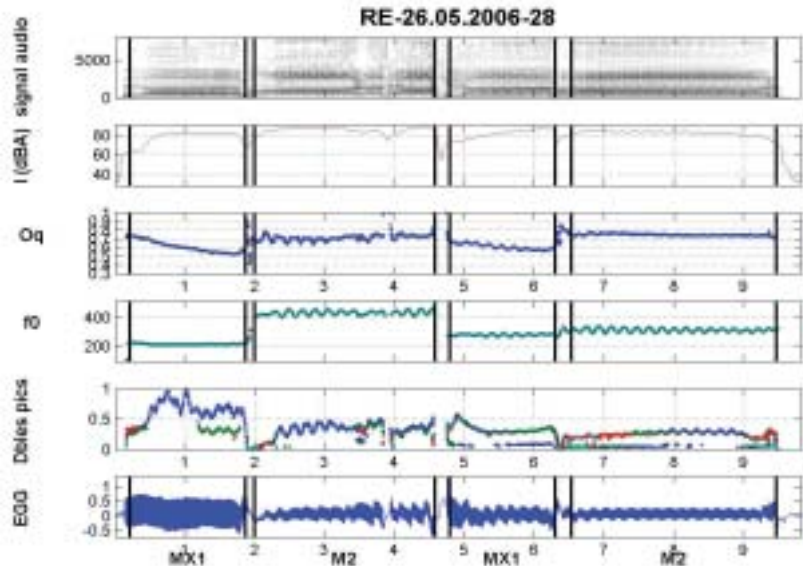
Au cours de son travail de thèse, Nathalie Henrich a mis au point une méthode de mesure de la détection des pics d'ouverture et fermeture glottique sur les signaux dérivés de l'EKG, ce qui permet une détermination très fiable de la fréquence fondamentale  $f_0$  et du quotient ouvert  $Oq$  et une analyse des doubles pics du signal DEGG. Nous avons pu développer la caractérisation des mécanismes laryngés (cf Henrich et coll. 2004, 2005) et reprendre sur une base objective l'étude des registres des chanteurs, objet de controverses entre scientifiques et artistes, depuis les premières observations de Manuel Garcia. Deux communications ont été présentées au congrès PEVOC (Henrich 2005, Castellengo 2005).

La voix mixte .

Castellengo M.,  
Lamesch S.,  
Expert R.,  
Henrich N.

La voix mixte est un registre développé par certains chanteurs pour arriver à obtenir une qualité vocale homogène sur la totalité de leur tessiture, malgré l'utilisation de plusieurs mécanismes provoquant habituellement d'importantes modifications de timbre. Castellengo (2004, 2007) et Lamesch et al. (2007) ont montré que la voix mixte était toujours produite dans l'un des mécanismes vibratoires laryngés précédemment identifié. Il existe donc deux types de voix mixte, Mx1 et Mx2, qui consistent principalement en ajustements résonantiels

**FIGURE 4-10** La confrontation des mesures glottographiques, acoustiques et spectrales permet d'objectiver le mécanisme vibratoire impliqué dans le registre de voix mixte.



### B.3.b - *Qualité vocale dans le chant lyrique : perception, verbalisation et corrélats acoustiques.*



FIGURE 4-11 *Les formes lexicales relevées dans le discours des experts s'exprimant sur la qualité vocale ont pu être réparties selon 4 catégories : son, interprétation, hédonisme, technique et physiologie.*

Porter un jugement sur la qualité vocale d'un chanteur c'est apprécier de façon globale une prestation acoustique incluant divers aspects de technique de chant (physiologie, qualité du timbre, intelligibilité) et de style d'interprétation. Pour faire la part des divers domaines nous effectuons avec le groupe Danièle Dubois (cf thème II), une analyse des verbalisations produites par les chanteurs eux-mêmes ou par des auditeurs experts, afin d'identifier les termes les plus significatifs (sourd,

*Henrich N., Dubois D., Castellengo M., Garnier M., (DEA), Sotiropoulos D. (DEA)*

nasal, timbré, clair) susceptibles de correspondre à des indices spectraux et temporels développés par ailleurs. La validation finale exige des tests d'écoute. (Garnier, 2005)

### B.3.c - *Analyse de qualités vocales de la voix chantée*

Parmi les différentes qualités vocales que peut produire un chanteur, certaines sont obtenues par des ajustements laryngés. Un paramètre appelé pente spectrale, semble particulièrement déterminant pour caractériser ces différences. Or son estimation est actuellement délicate. Le travail de thèse vise à chercher des moyens d'approche de la pente spectrale pour pouvoir ensuite évaluer des variations de ce paramètre en termes de hauteur et intensité, pour une qualité vocale « neutre ». Il est ensuite prévu de réenregistrer les mêmes chanteurs produisant des qualités vocales spécifiques, pour comparer la valeur du paramètre de pente spectrale à celui de référence, à intensité et hauteur donnée. La collaboration avec le LIMSI permettra de valider les résultats obtenus en utilisant la synthèse vocale.

*Lamesch S. (Thèse), Doval B., LIMSI - Dr de thèse, Castellengo M.*

### B.3.d - *Le forçage vocal et la communication en milieu bruyant*

Dans des conditions perturbantes telles que des environnements bruyants, certaines personnes sont plus susceptibles que d'autres de développer des troubles de la voix. Le but de cette thèse a été de comprendre l'origine de ces différences afin de prévenir le forçage vocal. Jusqu'à présent, l'explication de ces différentes sensibilités a été principalement cherchée du côté de la variabilité des constitutions physiologiques et des facteurs environnementaux auxquels sont confrontées ces personnes. Nous avons plutôt exploré l'hypo-

*Garnier M. (thèse soutenue en 2007), Henrich N., Dubois D., Castellengo M., collaboration ICP, Grenoble.*



thèse que ces différences puissent également provenir du comportement d'adaptation du locuteur à la situation de communication.

C'est pourquoi nous avons tout d'abord examiné en quoi les différentes modifications acoustiques et articulatoires peuvent être interprétées en termes de stratégies de communication visant à émerger du bruit ambiant, à faciliter la reconnaissance audiovisuelle des unités phonétiques pour l'interlocuteur, à renforcer les indices prosodiques de structuration de l'énoncé ou encore les mots de l'énoncé portant le plus d'information. Nous avons apporté plusieurs arguments en faveur d'une adaptation de la parole dans le bruit qui ne serait pas uniquement vocale, réflexe et subie, mais également en partie intentionnelle, communicationnelle et gérable par le locuteur. Pour cela, nous avons enregistré deux bases de données constituées de parole semi-spontanée en interaction avec un interlocuteur et pour une immersion des locuteurs dans le bruit par le biais de haut-parleurs. Nous avons au préalable montré l'apport de ces méthodologies pour pouvoir tester nos hypothèses sur le forçage vocal et sur l'adaptation de la parole dans le bruit.

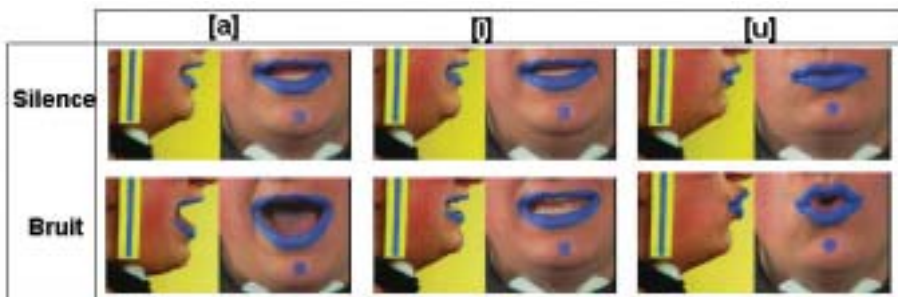


FIGURE 4-12 *Dispositif de lip-tracking utilisé pour étudier l'évolution des mouvements articulatoires labiaux (collaboration GIPSA-Lab). On observe dans le bruit un renforcement du contraste visuel entre les voyelles ouvertes [a], étirées [i] et arrondies [u]*

L'examen individuel des comportements d'adaptation de la parole dans le bruit nous a permis de mettre en évidence des différences au niveau de l'adoption combinée des différentes stratégies de communication –celles-ci n'étant pas équivalentes vis-à-vis de la charge qu'elles font porter au larynx– ainsi qu'au niveau de la réorganisation de l'adaptation en fonction du contexte (type et niveau de bruit). Nous avons pu relier ces variabilités comportementales à des profils laryngés différents, ouvrant en cela de nouvelles perspectives pour l'étude et la prévention du forçage vocal.

### B.3.e - *Enregistrements anciens de voix lyrique*

La voix fait également partie d'une autre thématique de recherche plus directement inscrite sur les problématiques de conservation du patrimoine sonore mené au LAM par JM Fontaine, et plus largement développé dans le thème "Restauration de documents sonores", page 112

## *C - Perception et cognition*

Ce thème développe la notion de qualité sonore, en prenant en compte les phénomènes acoustiques dans leurs réalités d'objets de culture et, donc, dans leurs significations. L'accent y est porté sur les processus d'interprétation et de jugement par des sujets humains, ainsi que sur le couplage des descriptions s'appuyant sur les outils des sciences humaines et sur ceux des sciences physiques. Il apporte à l'équipe des outils théoriques (contribution de la linguistique et de la psychologie au développement d'une sémio-acoustique) et méthodologiques (caractérisation de la validité écologique des dispositifs expérimentaux). Par ailleurs, il s'insère plus largement dans la thématique d'analyse des relations entre langage, cognition, et modalités sensibles qui constitue le thème central du LCPE, équipe SHS qui a rejoint le LAM en 2001. Les projets en cours concernent :

La diversité des constructions cognitives élaborées à partir du matériau sonore. Elle concerne l'articulation des descriptions linguistiques et physiques des phénomènes acoustiques dans leur élaboration conceptuelle. Elle se décline dans deux types d'opérations de recherches : d'une part l'exploration de la diversité des ressources linguistiques qui, en français mais aussi en d'autres langues, permettent d'appréhender, de communiquer et de construire des connaissances à propos des phénomènes acoustiques, et d'autre part la poursuite du programme « Sémantique des Objets Sonores », qui fédère plusieurs équipes CNRS dans l'analyse à la fois cognitive et physique des divers objets sonores et, plus précisément conduit à questionner la notion de timbre.

les catégories cognitives et qualités acoustiques. Ce thème regroupe les recherches visant à l'identification des structures cognitives, en particulier des structures catégorielles, qui organisent en mémoire les perceptions des phénomènes acoustiques dans leur diversité. À la différence des recherches psychophysiques classiques, l'acquis des recherches du LCPE permet de privilégier l'analyse des phénomènes présentant un caractère global, ou « situé », tels qu'une ambiance urbaine, un discours, un chant, un bruit « ordinaire » (à la différence des stimulations analytiques et paramétrées a priori des situations de laboratoire). Cette problématique s'est avérée particulièrement productive dans le domaine de l'environnement sonore et a donné lieu à plusieurs thèses.

les constructions langagières et cognitives et la multimodalité dans des environnements complexes. Ces travaux relatifs à la modalité auditive s'inscrivent plus généralement dans les travaux du LCPE concernant l'identification des constructions langagières et cognitives dans les diverses modalités sensorielles. La comparaison entre modalités visuelles, olfactives, tactiles et auditives, contribue en effet au développement d'une théorie générale des représentations cognitives construites autant sur les sensibilités individuelles que sur des connaissances « objectives » requérant l'établissement d'un consensus. Les travaux sur ce thème, menés en coopération avec la demande industrielle ou appliquée, concernent l'évaluation perceptive multimodale d'environnements complexes (qualité visuelle de l'habitacle automobile : thèse de C. Cance ; confort global dans les trains : thèse de G. Delepaud ou encore la pollution).

Les aspects méthodologiques. Enfin, transversalement à ces recherches décrites à partir de leurs thématiques, une attention particulière est portée aux aspects méthodologiques, à travers les conditions de production et de recueil des données langagières (contrôle des questions d'enquête) et à leur analyse (analyse psycholinguistique en contraste avec l'analyse de contenu), ainsi qu'à la mise en place de dispositifs expérimentaux de laboratoires dont la « validité écologique » est contrôlée. Cela nous a conduit à appliquer et développer des méthodes de questionnement non plus fondés sur les a priori d'une connaissance physique, mais centrées sur les critères de sens commun des auditeurs ou « usagers » (qu'autorisent par exemple les méthodes de tri libre). Dans ce cadre, sont également développés des outils statistiques pertinents et fiables en regard des propriétés des objets « mesurés ».

## C. 1 - Diversité des constructions cognitives élaborées à partir du matériau sonore

### C.1.a - *Ressources linguistiques*

*D. Dubois,  
P. Cheminée,  
L. Maxim,  
Ph. Resche-Rigon*

Il s'agit d'identifier les modes de construction et d'expression en langue et en discours à propos des divers objets sonores étudiés. En effet, l'exploration de la diversité des modes de lexicalisation dans les modalités sensibles a permis de montrer que non seulement les langues ne pouvaient être considérées comme de simples nomenclatures, mais a conduit à attacher une attention toute particulière aux procédés discursifs de construction des catégories diversement lexicalisées. En particulier nous avons pu systématiser un contraste (encore schématique) entre des discours ordinaires, différents discours de spécialité ou d'experts, les discours scientifiques ou encore les discours des corpus littéraires dans divers domaines spécifiés, comme la pratique et l'évaluation de la qualité de pianos par exemple, ou la voix chantée. Tout en restant électivement centré sur les formes lexicales, on inclut l'analyse des marques prosodiques de l'énonciation (en liaison avec les analyses de discours « spontanés » développées dans l'équipe de M. Morel à Paris 3) également indicatrices du rapport du sujet aux stimulations acoustiques, et du type de conceptualisation qu'il leur attribue. La thèse de L. Maxim (Université de Paris 3) concerne plus particulièrement les procédés autonymiques dans le discours d'experts relativement à leur évaluation de la qualité sonore. En d'autres termes, il s'agit de repérer quels procédés linguistiques et discursifs utilisent les experts, comment ils maîtrisent le langage pour exprimer leur sensibilité et leurs jugements. Du point de vue cognitif, cette connaissance est essentielle afin d'émettre, à partir des données textuelles ou discursives, des inférences valides concernant les caractéristiques des structures cognitives.

### C.1.b - *Sémantique et Objets Sonores (SOS)*

Ce programme, qui fédère plusieurs équipes CNRS, était géré par le département STIC. Il concerne la relation entre description « qualitative » d'un jugement humain (généralement qualifié de subjectif, mais nous préférons dire cognitif) et description physique de signaux (ou stimuli), relatifs à une grande diversité d'objets sonores (tels une ambiance urbaine, un discours, un chant, un bruit, ...) qui se trouvent constitués dans les processus cognitifs d'identification et de connaissance. Ce problème, largement développé dans le domaine spécifique de la parole où se trouvent associés des linguistes, en particulier phonologues, phonéticiens et acousticiens, est ici généralisé à une plus large diversité d'objets sonores qui, à partir d'une « même » matérialité physique, conduisent à des conceptualisations structurellement et sémantiquement différentes. Il en est ainsi :

- des textures, contours, signatures acoustiques, dans l'identification des objets familiers ;
- des sons du langage, phonétique, phonologie, prosodie, intonation et de leur contribution à l'identification de la signification du discours et des conceptualisations des propriétés et qualités de voix, du chant et de la voix chantée (cf D.2.a -Restauration de documents sonores)
- du timbre des instruments de musique ;
- des « ambiances » d'espaces architecturaux, des TGV, des salles de concerts dans la qualification des lieux et de leur « confort » ;
- du bruit, des bruits et des sons, dans les environnements divers (ambiances urbaines, bruits des transports, ...) en tenant compte de la diversité des cultures et de leurs rapports au bruit ou, plus précisément, de la notion même de « bruit ».

### C.1.c - *La notion de timbre*

Un concept a particulièrement retenu notre attention, celui de timbre en acoustique. M. Castellengo et D. Dubois ont en effet repéré que le traitement de cette propriété des sons musicaux (et de la voix) demeurait problématique dans la littérature contemporaine. Nous avons ainsi pu relever que cette notion était principalement connotée de manière négative, en raison de la difficulté à l'appréhender à partir des descripteurs ordinaires fournis par l'acoustique. Une analyse symétrique délibérément fondée dans le repérage du timbre comme objet cognitif, a été menée : Comme tel, le timbre peut être évoqué avec des termes en relation avec des propriétés du son ou bien en rapport avec nature de la source, et ce, en fonction de l'orientation cognitive de l'écoute. Cette réflexion s'est prolongée et élargie sur l'analyse du timbre dans les descriptions de phénomènes musicaux contemporains chez les musiciens

La diversité des pratiques d'écoutes d'un même phénomène physique selon les auditeurs a également été identifiée lors de tests d'écoutes des diverses versions remasterisées d'un même enregistrement original de Caruso, et a ainsi permis de préciser l'optimisation du couplage physique/perceptif en vue de la reproduction de documents anciens. (S. Morange et J.M. Fontaine, "Restauration de documents sonores", page 112).

*Coordination*  
*D. Dubois en collaboration avec*  
*M-A Morel (EA 1483-Paris 3),*  
*A. Riolland (UMR 7018, CNRS-Paris 3),*  
*M. Davy (IRC-CyN UMR 6597) et*  
*G. Hégron (CERMA, UMR 1563)*  
*G. Sabah (LIMSI),*  
*F. Poisson, M. Mzali (SNCF Service de la recherche)*

*M. Castellengo,*  
*D. Dubois;*  
*associé : P. Gaillard (Toulouse)*

## C. 2 - Catégories cognitives et qualités acoustiques

### c.2.a - *Acoustique et environnements urbains*

*D. Dubois,  
coll. Brigitte  
Schulte-Fortkamp  
(TU-Berlin)*

Un thème de recherche dans lequel le LAM est particulièrement productif et original est celui des ambiances sonores dans des espaces complexes, les trains, et les sites urbains notamment. Amorcé dès les années 1990 à l'initiative de Michèle Castellengo dans le cadre d'une collaboration, alors externe, avec Danièle Dubois, ce thème a déjà donné lieu à 6 thèses, « validées » dans des postes de responsabilité... extérieurs au CNRS et à l'Université française (Université McGill, services de la recherche de la SNCF ; de France Télécom)

Récemment ce thème a pris une envergure internationale et a suscité des coopérations avec les universités de Berlin, Rome, Leiden, Munich, Groningen... et l'intérêt pour des industriels (Boeing). Un réseau existe maintenant qui conduit régulièrement des sessions spécifiques dans la plupart des congrès internationaux d'acoustique (AAA ; Internoise). Ce travail s'est concrétisé par la publication d'un numéro spécial de AA&A, coordonné par D. Dubois et B. Schulte Fortkamp; 2006) qui fait le point de la recherche internationale sur ce thème et inscrit ce domaine dans une communauté particulièrement vivante et productive. Par l'observation selon laquelle c'est en fonction de l'identification des sources que les humains estiment la « nuisance sonore », se développe un nouveau terrain de coopération avec le thème III (L. Daudet et P. Leveau) à travers la modélisation physique du signal, susceptible de précisément rendre compte de l'identité des sources (et non seulement d'indicateurs et paramètres physique du son).

Cette implication internationale ne nous conduit cependant pas à négliger les recherches de terrain au niveau national avec une forte implication avec les équipes françaises (Institut d'Urbanisme de Paris, INRETS ; Ecole d'Architecture de Nantes), dans le cadre de séminaires, de contrats et dans la formulation de réponses à des appels d'offres. en manifestant en particulier la nécessité d'intégrer les données de l'acoustique classique aux données récentes acquises dans le domaine des sciences humaines (linguistique, psychologie, sociologie, géographie urbaine), domaines où ces mesures physiques peuvent être identifiées dans leurs significations responsables des jugements de nuisance ou d'agrément, et où, là encore, le LAM fait figure de pionnier et d'expert dans ces initiatives.

### c.2.b - *Multi-exposition route-rail et descripteurs qualitatifs*

*E. Walker / thèse  
soutenue en 2006,  
J.D. Polack ;  
coll. C. Cremezi-  
Charlet, SNCF)*

Ce projet visait la caractérisation des situations de multi-exposition "route - rail" au travers de l'évaluation conjointe de descripteurs acoustiques novateurs, conformément aux données sensibles issues d'enquête ou d'expérimentations auprès d'individus, riverains potentiels de voies routières et ferroviaires. Nos précédents travaux sur les représentations sensibles de sujets ont montré l'importance de l'identification de sources sonores ou d'événements, émergeant d'un continuum, dans le jugement de situations sonores ou de séquences rediffusées. Comment déterminer des descripteurs permettant de caractériser les "différences perçues" et quelles sont-elles quand il s'agit de situations sonores multi-exposées ? Les principaux objectifs sont d'établir une réflexion sur les méthodes d'évaluation de situations sonores de multi-exposition, et de définir de nouveaux critères qualitatifs des

situations de multi-exposition à partir de l'analyse des enregistrements sonores en termes de processus stochastiques. La validation de ces critères demande la mise en œuvre de nouvelles expérimentations dont le protocole méthodologique est en cours de définition. Il s'agira de définir si ces critères sont pertinents d'un point de vue "sensible", concernant l'impact perceptif et de santé sur l'individu. Ce projet, qui fait l'objet de la thèse d'Eva Walker (bourse CIFRE/SNCF), s'est effectué en collaboration avec la Direction de la Recherche et de la Technologie de la SNCF, et le laboratoire LTE de l'INRETS. Il s'inscrit dans les thématiques du projet PREDIT "Gêne sonore en situation de multi-exposition", soumis par le LTE (INRETS Bron), le CSTB (Grenoble) et le LMRTE (Université de Cergy-Pontoise). Il s'inscrit également dans les thématiques du GDR 2493 « bruit des transports ».

### c.2.c - Indicateurs sonores urbains pertinents pour les périodes sensibles

Répondre aux attentes du public en matière d'environnement sonore demande encore beaucoup d'efforts quant à sa description au moyen d'indices. Dans la logique de la dernière directive européenne sur le bruit, qui fixe le Lden comme descripteur unique tout en laissant à chaque pays la possibilité d'utiliser des indices complémentaires, le but de ce projet de recherche, qui fait l'objet de la thèse de Benjamin Robin (cofinancement Adème/INRETS) est d'améliorer la description de la perception sonore pour des sites urbains et pendant les périodes sensibles (matinée et soirée).

*B. Robin / thèse en cours d'achèvement,  
J.D. Polack ;  
J. Poitevineau,  
coll. J. Beaumont,  
INRETS*

On choisit de s'intéresser à toutes les particularités du bruit, plus précisément aux émergences et au bruit de fond. Pour cela, on a effectué dans un premier temps la synthèse des variables pouvant jouer un rôle dans la définition du bruit et de la perception, ces variables pouvant caractériser l'environnement, l'infrastructure et le véhicule. Les différentes combinaisons de variables acoustiques et non-acoustiques donnent naissance à un grand nombre de situations. Une analyse de ces données a permis de déterminer quelques sites types pour effectuer des mesures et des enquêtes de perception.

Ce travail a permis de comparer trois méthodes d'analyse de données et d'en établir les avantages et inconvénients. Mais le principal résultat de cette triple analyse est la confirmation de l'opposition sémantique entre sources et bruit de fond. Mieux, nous mettons en évidence que la gêne est contrôlée par l'absence ou la présence de sources humaines ou liées à la nature, ce



FIGURE 4-13 - *Prise de son et mesures sur un site parisien.*

qui plaide pour la reconnaissance automatique de sources pour évaluer l'environnement sonore (cf. post-doc Marcela Morvidone).

Ce travail s'est effectué en collaboration avec le Laboratoire Transports et Environnement de l'INRETS, l'Institut Polytechnique de Turin, et Acouphen. Ce projet s'inscrit dans les thématiques du GDR « Bruits des transports » (GDR CNRS 2493), et a reçu un financement du PREDIT dans le cadre du programme « Bruit et nuisances sonores ».

### *c.2.d - Relations entre propriétés physiques et perception auditive*

*D. Dubois,  
Ch. Besnainou,  
P. Cheminée)*

Une série d'expérimentations s'est attaché à coupler la mise en place de contraintes mécaniques dans la production des sons de piano, étudiées comme telles dans la thèse de A. Mamou-Mani (cf Thème I), avec les jugements qualitatifs de deux groupes d'auditeurs : des facteurs d'instruments et des pianistes. Il s'agit d'identifier les propriétés perçues par les auditeurs, à partir de l'analyse linguistique de leurs discours, et de les mettre en relation avec les propriétés physiques contrôlées dans l'expérimentation. Le but est de parvenir au couplage de la modélisation physique et de la modélisation cognitive, et à l'identification des relations complexes qui relient ces deux espaces de description, afin d'améliorer concrètement la qualité des instruments. D'un point de vue perceptif, on voudrait savoir comment sont perçues les différences qualitatives liées aux trois charges. La « charge » peut se définir comme la pression plus ou moins grande exercée par les cordes sur la table d'harmonie par l'intermédiaire du chevalet, la pression se réglant en atelier. Cette plus ou moins grande pression a des effets sur le son, sa durée, son intensité, sur l'attaque, la résonance et la couleur, autant de paramètres qui définissent le timbre.

L'analyse linguistique permet d'identifier comment ces différences de charge sont perçues. Elle montre que différents experts, ici trois pianistes et trois facteurs de pianos, chacun avec le point de vue qui est celui de sa corporation, et indépendamment des appréciations ou jugements qu'ils peuvent porter, perçoivent de manière fine et globalement juste les effets sur le son des modifications qui ont été pratiquées sur les instruments. Il est intéressant de constater que cette « expertise d'usage », subjective, correspond à une « réalité » acoustique mesurable.

### *c.2.e - Evaluation de la qualité de la restauration d'enregistrements sonores dégradés*

*S. Morange ;  
D. Dubois,  
J.-M. Fontaine,  
J. Poitevineau,  
Ph. Resche-Rigon)*

Cette thématique concerne la problématique de la restauration appliquée au domaine sonore, en particulier la restauration des enregistrements anciens et l'évaluation de la perception des différents types de restaurations (plus largement développée dans le thème III). Les études entreprises en relation avec les recherches du thème III visent à préciser, par l'analyse des critères qui les justifient, les propriétés des catégories structurant les jugements. Un premier travail a été effectué sur un corpus d'enregistrements anciens « restaurés » en vue de leur réédition ; cf D.2.a - Restauration de documents sonores. Il s'agissait de disques de Caruso. Cette recherche conduit à traiter la voix comme un objet spécifique (tant dans ses caractéristiques identitaires que dans ses rapports au « bruit de fond » (ici l'orchestre) dont la description physique doit tenir compte dans l'identification des indicateurs de mesure pertinents.

### C. 3 - Constructions langagières et cognitives

Plus génériquement, l'ensemble de ces développements théoriques sur les relations entre l'organisation cognitive des catégories sémantiques du sonore, et leurs manifestations en langue et en discours se construisent en couplage avec les recherches dans d'autres domaines sensoriels. Ainsi peut-on évaluer la généralité des relations entre l'expression de la subjectivité et les jugements perceptifs, tout comme la construction d'une connaissance objective, en acoustique, à partir de la comparaison avec le domaine de la vision ou de l'olfaction, et a fortiori avec les domaines génériques de la subjectivité tel celui du « confort » à bord des trains par exemple, ou celui de perception de la pollution.

#### c.3.a - *Couleurs, textures et matières dans un habitacle d'automobile*

Cette étude vise à identifier les facteurs visuels pertinents qui contribuent au jugement sur la qualité de l'habitacle automobile, et à élaborer des dispositifs expérimentaux écologiquement valides, par l'analyse des discours produits par les sujets. Les interactions entre les valeurs visuelles (couleurs, formes, matières) qui contribuent à la construction de l'espace intérieur d'un véhicule sont évalués de manière contrastée en mémoire et sur sites en situations naturelles où elles se trouvent intégrées à des matérialités tactiles, à la possibilité d'interactions kinesthésiques, et des situations de « réalité virtuelle » où seules les composantes visuelles sont reproduites soit sur des écrans, soit dans des situations d'immersion en 3D. L'étude repose sur l'analyse comparative des commentaires descriptifs des « mêmes » habitacles automobiles dans ces diverses situations.

*C. Cance - Thèse  
CIFRE,  
D. Dubois,  
Ph. Resche-Rigon ;  
Coll. A. Bardot  
A. Giboreau, PSA)*

#### c.3.b - *Évaluation du confort à bord des trains*

Si les recherches menées en collaboration avec la SNCF ont déjà permis d'analyser certaines composantes du confort acoustique (M. Mzali), la SNCF s'intéresse actuellement à la notion de « confort global » à bord des trains. Ce concept concerne non seulement les composantes visuelles, auditives, olfactives, et kinesthésiques qui ont déjà pu être étudiées isolément, mais marque son originalité en centrant l'analyse sur leurs relations de dépendance, y compris avec d'autres aspects du voyage (ex : sa durée, son prix, ses motifs, etc). Ces relations sont identifiées à partir d'une analyse psycholinguistique de l'expression en langue, et en discours du ressenti des usagers, et corrélées aux mesures physiques recueillies dans les mêmes conditions de circulation. Ce travail offre ainsi une mise à l'épreuve de nos hypothèses relatives à la sémantique lexicale et au caractère productif d'une démarche sémiophysique qui partant de l'analyse des représentations cognitives à partir de leur expression en langue permet d'identifier les éléments physiques sur lesquels il est possible de faire intervenir des mesures correctrices pour l'amélioration du confort en train.

*G. Delepaut-Thèse  
Cifre,  
D. Dubois ;  
Coll. M. Mzali  
S. Guerrand,  
SNCF)*



### *C.3.c - Perception de la pollution*

*D. Dubois,  
A. Lammel,  
S. Morange,  
J. Poitevineau,  
Ph. Resche-Rigon*

Cette étude qui bénéficie d'un financement de l'ADEME se propose d'abord d'analyser la représentation de la « pollution atmosphérique », sa place dans la catégorie pollution, sa dynamique dans la catégorie « artefact » et production humaine, son domaine d'appartenance (scientifique ou de sens commun) à partir des cadres théoriques et des méthodes issues des travaux sur la catégorisation.

La méthode a porté sur l'analyse linguistique de deux types de discours : un corpus de réponses à des questionnaires ouverts et un corpus d'articles de presse (presse d'information générale et presse de vulgarisation scientifique). L'étude de ces corpus a permis, avec les mêmes outils, d'identifier l'évolution de la notion de pollution à travers son explicitation, son contexte d'énonciation et ses variations selon le type de discours dans lequel elle s'actualise.

Dans une deuxième étape, à partir des cadres de l'anthropologie, les modèles mentaux, ainsi que les modèles culturels sous-jacents à la représentation de la pollution seront mis en évidence, en faisant l'hypothèse d'une contradiction entre système holistique et système analytique.

### *C.3.d - Méthodologie de production et de recueil des données verbales*

*C. Cance,  
G. Delepaut,  
D. Dubois,  
Ph. Resche-Rigon,  
J. Poitevineau*

Si le domaine auditif constitue un terrain privilégié d'étude et de tests d'hypothèses théoriques relativement à la construction de la diversité des catégories cognitives, la mise en place des recherches expérimentales en acoustique suscite également nombre de questions méthodologiques. Nous procédons donc, sur l'ensemble des thématiques développées dans le thème II, à l'élaboration de problématiques concernant :

- - une réflexion sur la validité écologique des situations de laboratoire (incluant les conditions d'enregistrement, de restitution et de « distribution » des stimulations sensorielles) ;
- - le contrôle systématique des conditions de production et de recueil des données langagières (en particulier les consignes en jeu dans les situations de productions verbales provoquées, la construction de questionnaires spécifiquement centrées sur l'analyse sensorielle, la polysémie et le contrôle sémantique des « étiquettes verbales » utilisées dans les échelles d'évaluation subjectives) ;
- - la nécessité d'intégrer la réflexion sur la pertinence des traitements, inférences et interprétations de ces données linguistiques en regard des structures cognitives ;
- - le développement d'outils statistiques spécifiquement adaptés aux données et concepts des sciences humaines.

---

## *D - Techniques audio*

Ce thème regroupe les activités consacrées à la conservation des enregistrements sonores, à la prise de son et aux techniques de restitution et de projection sonores. Cette activité se caractérise par le fait que les objets qu'elle étudie – CD, DVD et autres supports d'information ; haut-parleurs et systèmes de diffusion – n'ont de sens qu'en tant que médiateurs et « transducteurs ». En effet, contrairement aux instruments de musique, ou à la voix, qui produisent directement les sons caractéristiques permettant de les identifier (on parlera alors de sources primaires), ces objets constituent des sources secondaires et, pour les dispositifs de restitution, peuvent être utilisés de manière à donner l'illusion de sources virtuelles. De plus, ce domaine de recherche se caractérise également par son caractère technologique, qui repose sur des compétences en traitement du signal, en électroacoustique et en modélisation acoustique. Les projets en cours concernent :

le traitement du signal. Cette thématique, faisant appel à des techniques d'approximation non-linéaire, s'intéresse à l'étude des "bonnes" représentations des signaux musicaux c'est-à-dire approximant un signal avec un faible nombre de paramètres pertinents. Les applications en sont par exemple l'extraction d'informations dans le domaine musical, comme la reconnaissance automatique des instruments (thèse P. Leveau), ou la compression audio (thèse E. Ravelli). D'autres applications concernent l'analyse de signaux fortement non-stationnaires, comme les transitoires d'attaque des instruments de musique.

Le patrimoine et la culture. Cette thématique, qui s'inscrit dans le cadre notamment des plans de numérisation du Ministère de la Culture, s'intéresse à la préservation des supports mais également aux modalités d'extraction et de restauration des enregistrements, sujet qui associe l'évaluation cognitive des jugements portés par des auditeurs avec l'analyse acoustique des traitements. Un Groupement d'Intérêt Scientifique, intitulé "Conservation des informations enregistrées sur disques optiques numériques GIS – DON", a été constitué dans la perspective de proposer un type de support / système répondant aux exigences de conservation des données à long terme.

D'autre part, dans l'esprit de l'accord de coopération qui lie le LAM et le Laboratoire d'ethnomusicologie (CNRS/Musée de l'Homme : UMR 7186), un groupe de recherche associant, outre ces deux équipes, le LIP6, l'ENST, l'INA, la MMSH et plusieurs entreprises privées est en cours de constitution sous l'égide du pôle de compétitivité francilien Cap Digital. Il vise la création d'outils de navigation, d'indexation, de documentation et d'extraction automatique destinés à des bases de données audio, et prenant donc en compte les spécificités temporelles de ce type de fichiers.

La lutherie électronique et la création musicale. Cette thématique a démarré en 2004 avec l'étude des Ondes Martenot dans le double but d'aider la conservation des instruments existants, d'étudier les conditions de leur restauration, et d'en construire des répliques utilisant des technologies actuelles. Par ailleurs, grâce à un soutien de l'ANR-

RIAM (projet 2PIM), elle développe plus généralement le contrôle gestuel de la synthèse sonore et de ses conditions de sa restitution dans l'espace.

La diffusion audio et l'électroacoustique. Cette thématique est principalement illustrée par l'étude des enceintes acoustiques aux forts déplacements, qui constitue la thèse de Guillaume Pellerin. Plus précisément, il s'agit de modéliser par des techniques numériques l'écoulement dans l'évent d'une enceinte acoustique. Sur cette thématique, l'équipe est impliquée dans la création de l'entreprise Haliaetus Technologies.

## D. 1 - Traitement du signal

*L. Daudet,  
Doctorants :  
P. Leveau,  
E. Ravelli.  
Coll. G. Richard,  
Telecom Paris,  
Post-doctorants  
M. Morvidone  
D. Sodoyer*

Cette thématique concerne l'étude de « bonnes » représentations numériques des sons, c'est-à-dire quasi-optimales selon un critère donné. En particulier, nous nous intéressons à des représentations par formes d'ondes sur des dictionnaires fortement redondants (espaces de représentation plus grands que des bases orthonormales) qui permettent de représenter simultanément les parties tonales et les parties transitoires des sons musicaux avec un faible nombre de coefficients (critère de parcimonie). Nous cherchons à définir des algorithmes qui sont à la fois rapides et efficaces (faiblement sous-optimaux).

Deux pistes sont poursuivies en fonction de la généralité du dictionnaire. Dans un premier cas, nous considérons des dictionnaires d'atomes temps-fréquence génériques de type Gabor, et nous nous intéressons à la relation entre le degré de redondance et la compacité des représentations obtenues. L'application naturelle en est le codage audio (thèse E. Ravelli, bourse « présidence » UPMC, co-encadrement G. Richard - Telecom Paris). Outre que les résultats préliminaires montrent des performances remarquables à très bas débit, les représentations obtenues sont naturellement « progressives » en ce qu'elles hiérarchisent l'information sonore par ordre d'importance décroissante : ceci permet un codage « emboîté » où la précision de codage s'adapte au plus finement à la bande passante disponible.

De plus, en collaboration avec l'INRIA - Rennes (Rémi Gribonval) et l'EPFL-Lausanne (Pierre Vandergheynst), nous avons démarré début 2007 un projet d'évaluation collaborative des performances de ce type de représentations pour la classification par genre (« tags » des sites collaboratifs de type Last.fm) sur une base de donnée musicale de taille conséquente (env. 2 300 albums à ce jour). Une autre collaboration a de plus démarré en 2006 avec l'Université de Californie à Santa Barbara (co-encadrement thèse B. Sturm), sur l'utilisation des inefficiences des algorithmes de décomposition pour la segmentation automatique.

Dans un autre contexte d'application, nous cherchons à savoir si ce genre de méthodes peut s'appliquer aussi à l'identification de sources dans des bruits de l'environnement urbain (Post-doctorat M. Morvidone, bourse Ville de Paris 2006-2007).

Dans un second cas, nous nous intéressons à des dictionnaires appris sur des sources identifiées, ici des instruments jouant en solo. Ainsi nous obtenons des décompositions semi-

paramétriques « mi-niveau » de la musique, qui permettent d'effectuer sur des données symboliques, et donc rapidement, la plupart des tâches d'extraction d'information. Ce schéma est particulièrement bien adapté à l'analyse d'enregistrements polyphoniques, domaine peu abordé dans l'état de l'art à cause de sa complexité, mais riche en applications.

Nous avons montré (thèse de Pierre Leveau, co-encadrement G. Richard - Telecom Paris) que des résultats prometteurs étaient notamment obtenus pour l'identification d'instruments harmoniques avec un degré de polyphonie allant jusqu'à 5. Dans le cas d'enregistrements stéréophoniques, nous nous sommes intéressés de plus à la possibilité d'utiliser l'information sur la répartition spatiale des sources pour aider à l'identification des sources (post-doc CNRS D. Sodoyer, 2006-2007).

En dernier lieu, ce type d'analyse multi-échelles nous a permis de progresser dans la détection et la caractérisation d'événements fortement instationnaires comme les transitoires d'attaque des instruments ou les signaux émis par des insectes (détection d'insectes xylophages, collaboration E. Maurin, D. De Reyer, Laboratoire de Restauration des Monuments Historiques). Signalons finalement que nous utilisons également des techniques de traitement d'image, pour le projet en cours de Lecture optique de cylindres d'orgues mécaniques (collaboration O. Romain, LISIF, projet soutenu par le PPF LACME)

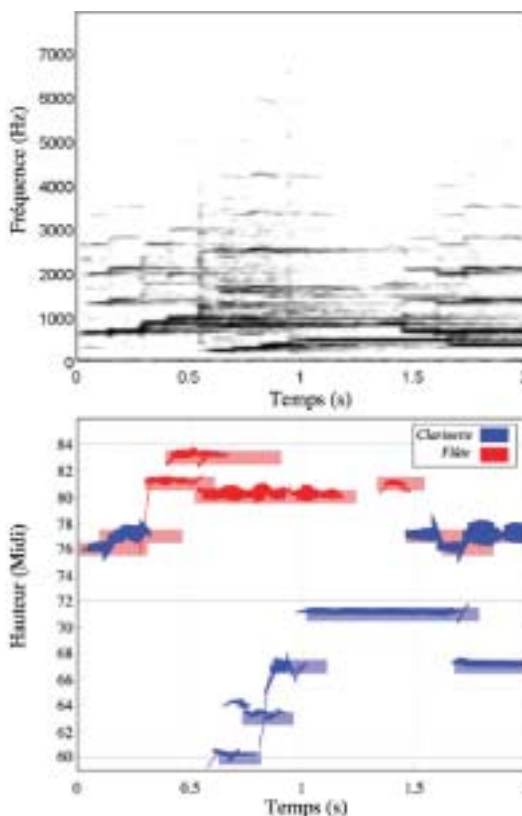


FIGURE 4-14 - Visualisation d'un duo flûte-clarinette par atomes harmoniques appris (thèse P. Leveau). Haut - Représentation temps-fréquence classique (spectrogramme). Bas - Représentation du même signal dans le plan temps-hauteur sur des groupes d'« atomes » spécifiques à des instruments

## D. 2 - Patrimoine et culture : préservation du patrimoine sonore

Les enregistrements constitués sous forme analogique posent la question de la conservation des supports originaux, des dispositifs de lecture (de leur adaptation voire de leur redéfinition) et de l'adoption des procédures de restitution de l'enregistrement les plus

adaptées. En outre, pour répondre aux objectifs de diffusion des documents sonores, les notions très délicates de la restauration des informations sonores dont la qualité est jugée non satisfaisante sont abordées du point de vue de l'auditeur et de l'opérateur. La préservation des documents numérisés passe également par l'entremise de supports et parmi ceux-ci des disques optiques.

#### *D.2.a - Restauration de documents sonores*

*Coordination  
J.-M Fontaine*

Toute intervention de restauration d'un document enregistré devenu « œuvre sonore originale » génère des interrogations bien peu explicitées. Il convenait d'entreprendre des investigations sur le geste de restauration, prenant en compte, en première partie, l'expérience acquise dans d'autres disciplines (cinéma sonore par exemple) et porter notre réflexion dans un contexte plus général de l'acte restaurateur. (J.-C. Sevin, doctorant, J. Cheyronnaud : Shadyc EHESS-CNRS, J.-M. Fontaine).

Une étude de cas de restauration d'un document sonore ancien, associant l'évaluation cognitive identifiée à partir des jugements de différents types d'auditeurs et la description acoustique des traitements a mis l'accent sur les relations qui peuvent être établies entre les acteurs de remastering et les publics concernés. Outre l'élaboration d'un mode opératoire, des indications intéressantes ont été recueillies à propos de la manière dont différents traitements appliqués à un enregistrement très bruité étaient reçus. En outre, une étude des discours de professionnels en technique du son, effectuée dans une perspective psycholinguistique a apporté des éléments de connaissance des différents rapports au son des acteurs de la restauration et de la valorisation d'enregistrements anciens.

En collaboration avec L. Daudet et H. Galiègue, nous avons mené une étude sur la caractérisation des défauts apparaissant dans les signaux sonores issus de disques optiques défectueux, mais toujours lisibles par des lecteurs standard. Ceci doit nous amener à des techniques originales de restauration du signal en se basant sur la fusion des signaux issus de multiples lectures.

Grâce à un financement du Ministère de la Culture, nous bénéficions d'outils performants de traitements d'enregistrements dégradés. Cette station, évolutive, offre la possibilité d'approfondir au plan expérimental, les travaux relatifs aux traitements de restauration.

## D.2.b - Les disques optiques



FIGURE 4-15 - De l'analogique au numérique : quelques supports d'enregistrement sonore.

Pour les enregistrements constitués ou transférés en mode numérique, notamment dans le cadre des plans de numérisation du Ministère de la Culture, les préoccupations se portent sur les supports / formats que dont la qualité initiale et la stabilité doivent être validées dans une perspective d'espacement des procédures de migration. Cette thématique s'intéresse particulièrement aux disques optiques, un type de support parmi d'autres mais qui se montre tout à la fois avantageux sur de nombreux aspects et exigeant.

Un Groupement d'Intérêt Scientifique, intitulé "Conservation des informations enregistrées sur disques optiques numériques GIS - DON", a été constitué à cet effet entre l'UPMC, le CNRS, l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand, le Laboratoire National d'Essais et plus récemment le CEA - LETI.

*J.-M. Fontaine,  
J.-D. Polack ;  
Collaboration  
J. Perdereau, LNE)*

Le groupement a pour objet de mettre en œuvre les compétences et les moyens de ses membres afin de réaliser, de développer, d'entretenir et de promouvoir l'infrastructure nationale dans le domaine de la recherche pour la conservation des données enregistrées sur les supports optiques. L'objectif principal est de garantir la conservation de données numériques en définissant des exigences spécifiques à cet usage, en particulier le type de support à privilégier et la définition des procédures permettant l'accès aux données dans une perspective de long terme. Le programme de recherche propose de lancer des études sur l'archivage des données sur DON en prenant en compte l'évolution du contexte technique et normatif.

## D. 3 - Lutheries électroniques et création musicale

Le XXe siècle a vu le développement de nouveaux instruments et l'émergence de nouvelles formes musicales (synthétiseurs, synthèse des sons par ordinateur, musique concrète, musiques électroacoustique et mixte...). Dans la continuité de ses travaux sur les instruments de musique « traditionnels », dont le fonctionnement relève de la mécanique, l'équipe élargit dorénavant son champ d'études à ces nouvelles lutheries.

### D.3.a - *Lutheries électroniques et patrimoine musical*

*H. Genevois  
Collaborations  
Musée de la Musique  
Conservatoire  
National Supérieur*

En lien avec cette thématique, une recherche sur les « lutheries électroniques » a été entreprise, en collaboration avec le Musée de la musique et le Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse. Cette étude s'attache plus particulièrement à l'étude acoustique et électronique de l'Onde Martenot, instrument inventé au milieu des années 1920 et pour qui de très nombreuses oeuvres ont été écrites, notamment par Olivier Messiaen. Ce travail s'est concrétisé notamment par la tenue d'une journée d'étude sur les instruments du XXe siècle à la Cité de la musique. Un travail est en cours avec différents partenaires (CNAM, INP...) pour créer une formation à la restauration d'électroniques anciennes.



FIGURE 4-16 - *L'Onde Martenot (détails de la touche d'intensité et diffuseurs)*



### D.3.b - *Lutheries électroniques et création musicale*

*H. Genevois  
Collaboration avec  
les Studios Puce  
Muse,  
le LIMSI,  
la Grande Fabrique,  
le LABRI / Bor-  
deaux II,  
l'Université McGill  
et l'IRCAM)*

Grâce à l'obtention d'un financement par l'ANR (2PIM - RIAM 2006), un programme de recherche ambitieux sur le geste instrumental et les nouvelles interfaces a été entrepris. Il vise plusieurs objectifs :

- - modéliser le comportement d'objets « audiovisuels » (contrat 2005 du CNC sur l'utilisation de modèles physiques temps-réel pour la création) et étudier leur comportement dynamique. Pour cela, outre le développement de prototypes pilotables par un système de capteurs de mouvements, une étude perceptive des formes engendrées sera entreprise, visant à mieux comprendre les phénomènes de fusion sensorielle (toucher, ouïe, vue) à l'oeuvre lors de la manipulation de tels instruments virtuels. Cette étude commence en 2007 en liaison avec D. Dubois et C. Cance (perceptions synesthésiques) ;
- - réaliser un prototype de contrôle gestuel de la voix chantée (en liaison avec la thèse de S. Lamesch et le LIMSI) ;
- - développer de nouveaux outils pour la création sonore en proposant une approche globale de la synthèse (de l'analyse du geste instrumental au contrôle de la « projection » électroacoustique) (cf D.4.) .

## D. 4 - Electroacoustique et acoustique des salles

### D.4.a - Diffusion audio et électroacoustique

L'idée originale de Jean-Pierre Morckerken était d'adapter la technologie de la tuyère aux événements d'enceintes acoustiques. Apportant une approche aérodynamique au domaine acoustique, cette technologie, en minimisant jets et tourbillons qui créent de la distorsion acoustique, permet d'augmenter le niveau et la qualité de restitution sonore aux basses fréquences.

L'enceinte à tuyère a fait l'objet du dépôt d'un brevet auprès de l'INPI en 2001, et d'une création d'entreprise, Haliaetus Technologies, en juin 2004, création qui a reçu le 2<sup>e</sup> prix spécial au Concours national de la création d'entreprise innovante : ministère de la recherche en 2004.

*G. Pellerin / thèse soutenue en 2006, J.D. Polack ; Collaboration J.P. Morckerken, Haliaetus Technologies)*

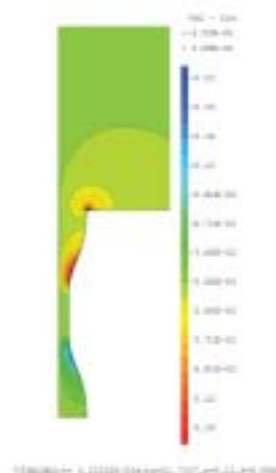


FIGURE 4-17 - L'enceinte commercialisée par Haliaetus Technologies. A droite : Profil des vitesses dans la tuyère

### D.4.b - Projecteur sonore multicanal

Dans le cadre des développements liés au contrôle gestuel de la synthèse sonore (cf III-c), un premier prototype de diffuseur sonore à rayonnement contrôlable a été réalisé. Par sa conception mi-électroacoustique / mi-logicielle, il se démarque du système développé au SoundLab de l'Université de Princeton en offrant 12 voies programmables indépendamment (niveaux, filtres, délais...) et un contrôle gestuel précis des très nombreux paramètres accessibles, et ce en temps-réel. Sur le même principe, un modèle utilisant des haut-parleurs et amplificateurs de meilleure qualité va être réalisé d'ici la fin de l'année 2007. Il permettra en outre la mise en vibration contrôlée d'éléments de lutherie (gongs, cymbales...) via des transducteurs magnétostrictifs.

*H. Genevois  
Collaboration avec le GMEM  
les Studios Puce  
Muse*



D.4.c - *Acoustique des salles*

G. Defrance,  
J.D. Polack ;  
Collaboration  
B. Katz, LIMSI

L'acoustique des salles a trouvé un regain d'intérêt dans l'équipe LAM du fait du projet de la nouvelle salle de concert de Paris et de la demande de plusieurs bureaux d'étude de remettre à jour le logiciel MIDAS d'analyse de salle, développé naguère par J.D. Polack et H. Marshall (Université d'Auckland, NZ), logiciel dont la particularité est de permettre la mesure sur maquettes.

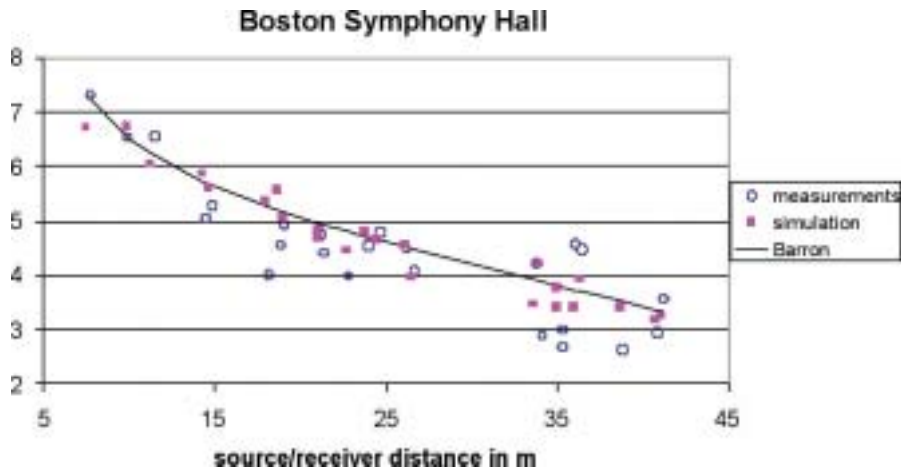


FIGURE 4-18 - *Intensité sonore normalisée dans une salle : comparaison entre mesure, simulation, et le modèle de Barron.*

La thèse de G. Defrance (bourse Ile-de-France) a démarré en 2006 par la réécriture sous MatLab du logiciel MIDAS. Elle se continue par la simulation stochastique de salles pour évaluer l'influence propre de la géométrie sur les indices acoustiques ( FIGURE 4-18 ). La prochaine étape est la reproduction sonore de salles dans la salle d'écoute sèche du site Lourmel. Intensité sonore normalisée dans une salle : comparaison entre mesure, simulation, et le modèle de Barron. Parallèlement, J.D. Polack poursuit ses travaux sur l'approximation semi-classique dans les salles, dans l'espoir de mettre en évidence une éventuelle « rigidité spectrale » liée à la géométrie.

---

## *E - Perspectives*

### E. 1 - Thèmes en émergence

Outre la poursuite des projets de recherche liés aux thématiques « traditionnelles » du LAM, trois thèmes en émergence se développent au sein de l'équipe.

Le premier concerne le geste instrumental et la notion de contrôle en temps réel. S'appuyant sur un projet financé par l'ANR RIAM, ce thème vise à développer de nouveaux concepts de lutherie informatique, mais aussi de contrôle « augmenté » d'instruments de musique plus classiques. En jeu est la compréhension des interactions entre instrumentiste et instrument, tant d'un point de vue mécanique que cognitif, les deux étant étroitement liés.

Le second thème concerne la conceptualisation et les représentations du signal, notamment pour aider à la navigation dans les corpus de documents temporels, principalement sonores. Ce thème est pluridisciplinaire, car il concerne tout autant la modélisation et l'algorithmique que les aspects perceptifs et cognitifs, aspects qu'il est indispensable de prendre en compte pour que l'extraction automatique d'information corresponde aux attentes de l'utilisateur humain. C'est pourquoi ce thème intéresse le pôle de compétitivité Cap Digital, et certains grands utilisateurs publics et privés.

Le troisième thème concerne la restauration du patrimoine sonore, et plus particulièrement la perception de cette restauration par les auditeurs. La pertinence de ce thème est aiguë aujourd'hui où beaucoup d'opérations de re-mastering, voire de remixage d'enregistrements historiques sont en cours ou en projet. Les compétences de l'équipe LAM dans ce domaine sont uniques, puisqu'elles couvrent aussi bien les techniques audio que la perception et l'algorithmique.

### E. 2 - Besoins humains et matériels :

Postes. Pour les 4 années à venir, les besoins en personnel de l'équipe LAM sont :

- un mécanicien des instruments de musique, poste demandé en 2008 (pour rappel) ;
- un chercheur en perception/sciences cognitives, spécialisé en acoustique (CNRS ?) ;
- un ingénieur en lutherie composite, pour remplacer Charles Besnainou ;
- un enseignant-chercheur en aéroacoustique ;
- un spécialiste de la conservation des enregistrements sonores (chercheur ou ingénieur de recherche), pour remplacer le départ de Jean-Marc Fontaine. Etant donné la position internationale unique du LAM en ce domaine, cette demande est prioritaire ;

- un technicien du son, pour l'entretien du matériel audio (et l'enseignement de l'acoustique et de l'électroacoustique). Ce poste peut être partagé avec le site de St-Cyr (équipe MPIA) ;
- un développeur informatique (traitement du signal) pour optimiser les programmes conçus au LAM, notamment en vue de leur valorisation.

Matériels. Les équipements demandés par le LAM concernent principalement l'accès à des moyens de calculs rapides, par exemple la grappe de calculateur de l'Institut. Une liaison Internet rapide est nécessaire pour cela.

Il faut également prévoir l'achat d'un analyseur DVD de nouvelle génération (Blue Ray, ou HDVD, soit environ 200 k€).

Locaux et retour à Jussieu. Le retour sur le campus de Jussieu est aujourd'hui repoussé à la mi 2013 (voir calendrier réactualisé sur l'Intranet de l'UPMC : <http://intra.upmc.fr/epcj/calendrier20072007.jpg>). Il faut demander avec insistance un retour précoce.

De plus, la superficie actuellement accordée au LAM est de seulement 580 m<sup>2</sup> SHON, soit inférieure à la surface du site de Lourmel, alors que l'effectif est en croissance. De plus, aucune chambre sourde n'est prévue dans le projet, bien qu'une chambre de 50 m<sup>2</sup> utiles (100 m<sup>2</sup> hors tout) est demandée depuis le début du projet de désamiantage du campus par le LAM. Cette chambre anéchoïque est également demandée par l'équipe MPIA.

*Publications L.A.M.*

Revue à Comité de lecture

2007

1. Bavu E., Besnainou C., Gibiat V., Rosny J., & Fink M. (2007). Subwavelength sound focusing using a time-reversal acoustic sink *Acta Acustica united with Acustica*, 93(5): p.706-715.
2. Castellengo M., & Dubois D. (2007). Timbre ou timbres ? Propriété du signal, de l'instrument ou construction(s) cognitive(s) ? *Les cahiers de la SQRM (Société Québécoise de Recherches Musicales)*, 9 (1-2): p.25-38.
3. De La Cuadra P., Vergez C., & Fabre B. (2007). Visualization and analysis of jet oscillation under transverse acoustic perturbation *Journal of Flow Visualization and Image Processing*.
4. Delepaut G. (2007). Formes linguistiques adjectivales et identification des représentations cognitives. *CEDILL (Didactique et Linguistique)*.
5. Gaillard P., Castellengo M., & Dubois D. (2007). Variabilité temporelle et perception des transitoires d'attaque. *Les cahiers de la SQRM (Société Québécoise de Recherches Musicales)*, 9 (1-2): p.39-48.
6. Garnier, Maeva, Henrich, Nathalie, & Castellengo, Michèle. (2007). Characterisation of Voice Quality in Western Lyrical Singing : from Teacher's Judgements to Acoustic Descriptions. *journal of interdisciplinay music studies (JIMS)*, 1(2): p.62-91.
7. Giboreau A., Egoroff C., Guerrand S., Urdapilleta I., et al. (2007). Defining sensory descriptors : towards writing guidelines based on terminology. *Food, Quality and preferences*, 18: p.265-274
8. Leveau P., Vincent E., Richard G., & Daudet L. (2007). Instrument-specific harmonic atoms for mid-level music representations *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 16(1): p.116-128.
9. Polack J.-D. (2007). The relationship between eigenfrequency and image source distribution in rectangular rooms *Acta Acustica*.
10. Ravelli E., & Daudet L. (2007). Embedded polar quantization *IEEE Signal Processing Letters*, 14(10): p.657-660.
11. Rollet F., Morlat S., Gardette J.L., Fontaine J.-M., Perdereau J., & Polack J.-D. (2007). Ageing and durability of Digital Optical Discs. *Journal of Culture Heritage*.

2006

12. Addison P.S., Morvidone M., Watson J.N., & Clifton D. (2006). Wavelet transform reassignment and the use of low-oscillation complex wavelets. *Mechanical System and Signal Processing* 20: p.1429-1443.
13. Bello J.P., Daudet L., & Sandler M. (2006). A comparison of frequency and time-domain methods for automatic piano transcription. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing* 14(6): p.2242-2251.

14. Daudet L. (2006). Sparse and structured decompositions of signals with the Molecular Matching Pursuit *IEEE transactions on speech and audio processing* 14 (5): p.1808-1816.
15. Davies M., & Daudet L. (2006). Sparse audio representations using the MCLT *Signal Processing Numéro spécial : "Sparse Approximation in Signal and Image Processing"*, 86(3): p.457-470.
16. Dubois D. (2006). Des catégories d'odorants à la sémantique des odeurs : une approche cognitive de l'olfaction. *Terrain*, 47: p.89-106.
17. Dubois D. (2006). Sens communs et sens commun : Expériences sensibles, connaissance(s) ou doxa ? *Langue Française* N° Spécial "sens commun".
18. Dubois D., & Giboreau A. (2006). Descriptors : attributes ? labels ? terms ? names ? A contribution of psycholinguistics to sensory evaluation *Workshop on 6th Pangborn, Food Quality and preferences*, 17: p.669-672
19. Dubois D., Guastavino C., & Raimbault M. (2006). A cognitive approach to soundscapes : using verbal data to access auditory categories *Acta Acustica and Acustica*, 92: p.865-874.
20. Dubois D., & Schulte-Forkamp B. (2006). Recent issues in Soundscapes research. *Acta Acustica and Acustica*, Numéro spécial 92 (6).
21. Hampton J., Dubois D., & Yeh W. (2006). Effects of classification context on categorization in natural categories *Memory and cognition*, 34: p.1431-1443.
22. Henrich N. (2006). Mirroring the voice from Garcia to the present day : some insights into singing voice registrers *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 31: p.3-14.
23. Lecoutre M.P., Rovira K., Lecoutre B., & Poitevineau J. (2006). People's intuitions about randomness and probability : An empirical study. *Statistics Education Research Journal*, 5: p.20-35.

## 2005

24. Antoine J.P., Bogdanova I., Jacques L., Morvidone M., & Vandergheynst P. (2005). Stereographic wavelet frames on the sphere. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 19: p.223-252.
25. Bavu E., Smith J., & Wolfe J. (2005). Torsional Wves in a Bowed String. *Acta Acustica united with Acustica*, 91: p.241-246.
26. Bello J.P., Daudet L., Abdallah S., Duxbury C., Davies M., & Sandler M. (2005). A tutorial on onset detection in music signals. *IEEE transactions on Speech and Audio Processings*, 13(5.2): p.1035-1047.
27. Castellengo M. (2005). Manuel Garcia jr, a clear-sighted observer of human voice production *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 30: p.163-170.
28. Garnier M., Henrich N., Dubois D., Castellengo M., Poitevineau J., & Sotiropoulos D. (2005). Etude de la qualité vocale dans le chant lyrique. *Scolia*, 20: p.151-169.
29. Guastavino C., Katz B., Polack J.-D., Levitin D., & Dubois D. (2005). Ecological validity of soundscape reproduction. *Acta Acustica*, 91: p.333-341.

30. Henrich N., D'Alessandro C., Castellengo M., & Doval B. (2005). Glottal open quotient in singing : Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity and fundamental frequency *Journal of the Acoustical Society of America* 117: p.1417-1430.
31. Lecoutre B., Poitevineau J., & Lecoutre M.P. (2005). A reason why not to ban Null Hypothesis Significance Tests/Une raison pour ne pas abandonner les tests de signification de l'hypothèse nulle. *La Revue de Modulad*, 33: p.249-253.
32. Raimbault M., & Dubois D. (2005). Urban Soundscapes : Experiences and knowledge. *Cities* 195: p.339-350.
33. Rouby C., Thomas-Danguin T., Sicard G., Vigouroux M., et al. (2005). Influence du contexte sémantique sur la performance d'identification d'odeurs. *Psychologie Française*, 50: p.225-239.

## 2004

34. Daudet L., & Sandler M. (2004). MDCT Analysis of sinusoids : explicit results and applications to coding artifacts reduction. *IEEE transactions on Speech and Audio Processing* 12(3): p.302-312.
35. Dubois D., Guastavino C., Maffiolo V., & Raimbault M. (2004). A cognitive approach to soundscapes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(5): p.2495-2496.
36. Henrich N., D'Alessandro C., Castellengo M., & Doval B. (2004). On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of non-pathological voice phonation *Journal of the Acoustical Society of America*, 115: p.1321-1332.
37. Lecoutre B., Poitevineau J., & Lecoutre M.P. (2004). Fischer : Responsable, not guilty. Discussion of D.J. Denis's paper. The modern hypothesis testing hybrid : R.A. Fischer's fading Influence *Journal de la SfdS*, 145.
38. Poitevineau J. (2004). L'usage des tests statistiques par les chercheurs en psychologie : aspects normatif, descriptif et prescriptif *Mathématiques et Sciences Humaines*, 42: p.5-25.
39. Roubeau B., Castellengo M., Bodin P., & Ragot M. (2004). Phonégogramme par registre laryngé. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 56: p.321-333.
40. Segoufin C., Fabre B., & De Lacombe L. (2004). Experimental investigation of the flue channel geometry influence on edge-tone oscillations. *Acustica/acta Acustica*, 90: p.966-975.

## Chapitres d'ouvrage

## 2007

41. Delepaut G., & Dubois D. (2007). Dénominations et représentations sémantiques du trajet en train. In G. Cislaru, O. Guérin, K. Morim & al (Eds.), *L'acte de nommer : Une dynamique entre langue et discours*. Paris, France: Presses Sorbonne Nouvelle.
42. Faburel G., Polack J.D., & Beaumont J. (2007). Bruit des transports. Etat et perspectives scientifiques. In: La Documentation française (février 2007). .

43. Garnier M., Dubois D., & Henrich N. (2007). Bruit et voix : de l'adaptation au forçage vocal. Conceptions et implications méthodologiques. In B. Vaxelaire, R. Stock, G. Kleiber & F. Marsac (Eds.), *Perturbations et Réajustements. Langue et langage* (pp. 63-71).

## 2006

44. Cheminée P., Dubois D., & Resche-Rigon P. (2006). Couleur de pensée, couleur du temps : Penser la couleur et variations diachroniques du lexique de la couleur. In *Studia Romanica* (Vol. N° spécial, les couleurs en question, pp. 23-46).
45. Daudet L. (2006). A review on techniques for the extraction of transients in musical signals. In *Computer Music Modeling and Retrieval, Springer Lecture Notes in Computer Science series* (pp. 219-232): Springer
46. Daudet L., & Torresani B. (2006). Sparse adaptive representations for musical signals. In A. Klapuri & M. Davy (Eds.), *Signal Processing Methods for Music Transcription* (pp. 65-98): Springer.
47. Dubois D. (2006). Soundscapes. In B. Schulte-Fortkamp (Ed.), "*Acta Acustica et Acustica*", special issue 92, *Direction d'ouvrage*.
48. Dubois D. (2006). Green grass and blue : Cognitive categories of colors and smells and language. In R. Rapp & P. Sedimeier (Eds.), *Perspectives on cognition : Festschrift in honor of Manfred Wettler* (pp. 311-325).
49. Dubois D. (2006). From Psychophysics to semiophysics : Categories as Acts of Meaning : a case study from olfaction and audition, back to colors. In M. Plumacher & P. Holz (Eds.), *Speaking of colors and odors. An interdisciplinary approach to cognitive and linguistic categorization of color vision and olfaction, Converging Evidence in Language and Communication Research* (pp. 45-119). Amsterdam, Pays-Bas.
50. Fontaine J.M., Cathaly-Prétou G., Lafosse J., Perdereau J., & Thomas M. (2006 ). Acquérir, Graver, Contrôler, Conserver. In Lafosse J. (Ed.), *L'archivage sur CD-R*. Paris: Eyrolles.

## 2005

51. Bensa J., Dubois D., Kronland-Martinet R., & Ystad S. (2005). Perception and cognitive evaluation of a piano synthesis model In *Computer Music and retrieval Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 3310, pp. 232-245): Springer Verlag.

## Colloques avec actes

## 2007

52. Almeida A., Fabre B., & Montgermont N. (2007 ). *Evolution of sound spectra of flue instruments with the control parameters and the role of aeroacoustical sources*. Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics*, Barcelone.
53. Blanc F., Lagrée P.Y., Fabre B., & Almeida A. (2007 ). *Influence of the geometry of the channel exit on the jet birth in flue instruments*. Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics* Barcelone.

54. Cance C. (2007). *Une perspective issue de la linguistique cognitive : Design automobile et Perception des usagers* Paper presented at the *FORUM PRO : Rencontres entre linguistes et professionnels, conférence sur invitation*, Univ. Lyon.
55. Cance C., Delepaut G., Dubois D., & Morange S. (2007). *Des adjectifs aux qualités sensibles* Paper presented at the *Colloque international "Les adjectifs"*, Villeneuve d'Ascq, France.
56. Castellengo M., Lamesch S., & Henrich N. (2007). *Vocal registers and laryngeal mechanisms, a case study : the french "voix mixte"*. *Conférence invitée* Paper presented at the *19th I.C.A.*, Madrid.
57. Cornuz G., Ravelli E., Leveau P., & Daudet L. (2007). *Object coding of harmonic sounds using sparse and structured representations*. Paper presented at the *Proceedings of the Digital Audio Effects Workshop (DAFx'07)* Bordeaux, France.
58. De La Cuadra P., Cadiz R.F., Fabre B., & Montgermont N. (2007). *Performance control of a flute physical model using fuzzy logic*. Paper presented at the *International Computer Music Conference* Barcelone.
59. De La Cuadra P., Fabre B., & Abel J. (2007). *Real-time implementation on selected parameters from a flute-like physical model*. Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics*, Barcelone.
60. Fontaine J.M. (2007). *Qualitative evaluation and physical description of restoration treatments of ancient recordings* Paper presented at the *Conference CIRMMT, conférence invitée*, Mc Gill University, Montréal, Canada
61. Galiegue H., Fontaine J.M., & Daudet L. (2007). *Analysis and restauration of faulty audio Cds* Paper presented at the *Proceedings of AES Audio Engineering Society 122th Convention*, Vienne, Autriche.
62. Lamesch S., & Doval B. (2007). *What are the spectral differences for singing sounds produced by different laryngeal mechanisms in the same pitch range ?* Paper presented at the *Proceedings of the 19th International Congress on Acoustics*, Madrid.
63. Lamesch S., Expert R., Castellengo M., & Henrich N. (2007). *Investigating "voix mixte" : a scientific challenge towards a renewed vocal pedagogy*. Paper presented at the *3rd Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM07)*, Tallin, Estonie.
64. Leveau P., Sodoyer D., & Daudet L. (2007). *Automatic Instrument Recognition in a polyphonic mixture using Sparse Representations* Paper presented at the *Proceedings of the International Symposium on Music Information Retrieval (ISMIR'07)*, Vienne, Autriche.
65. Montgermont N., Fabre B., & De La Cuadra P. (2007). *Flute control parameters : fundamental techniques overview* Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics*, Barcelone.
66. Morange S., Fontaine J.M., & Dubois D. (2007). *Voices of Caruso : Cognitive evaluation and acoustic analysis of reedited editions* Paper presented at the *3rd Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM07)*, Tallin, Estonie.
67. Ravelli E., Richard G., & Daudet L. (2007). *Extending transform coding to very low bitrates using overcomplete dictionaries* Paper presented at the *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, New Paltz, N.Y., Etats-Unis.



68. Richard G., Leveau P., Daudet L., Essid S., & David B. (2007). *Towards polyphonic musical instruments recognition* Paper presented at the *Proceedings of International of Congress of Acoustic*, Madrid, Espagne
69. Sturm B.L., Shynk J.J., & Daudet L. (2007). *Short-term measurement of dark energy in sparse atomic estimations* Paper presented at the *41st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* Asilomar, CA, Etats-Unis.

## 2006

70. Bavu E., Besnainou C., & Gibiat V. (2006). *Techniques de Retournement Temporel dans le domaine audible : Applications à l'étude de sources basses fréquentes* Paper presented at the *8ème Congrès de la Société Française d'Acoustique*, Tours, France.
71. Cance C. (2006). *Couleurs et termes de couleur en discours*. Paper presented at the *Colloque International des Etudiants Chercheurs en Didactique des Langues et Linguistique, LIDILEM, actes à paraître* Grenoble, France.
72. Cance C., Dubois D., Giboreau A., & Bardot A. . (2006). *Les couleurs, du discours aux concepts : construction d'une méthodologie linguistico-cognitive située* Paper presented at the *9èmes Rencontres Jeunes Chercheurs ED 268 Langages et Langues*, Paris, France.
73. Dalle J.M., Daudet L., & Den Besten M. (2006). *Mining CVS signals* Paper presented at the *Proceedings of the Workshop on Public Data about Software Development (W6PDaSD)*, Como, Italie.
74. Dubois D., & Castellengo M. (2006). *Du signal acoustique aux significations Psycho-acoustique et recherches cognitives* Paper presented at the *8ème Congrès de la S.F.A.*, Tours, France.
75. Fabre B. (2006). *Facture et jeu des flûtes : une analyse acoustique des stratégies* Paper presented at the *Colloque ACFAS (Association Francophone pour le savoir), Conférence invitée*, Mc Gill, Canada.
76. Fabre B., Montgermont N., & Gabriel J. (2006). *Scaling of flute-like instruments : an analysis from the point of view of the hydrodynamic instability of the jet* Paper presented at the *ASA Meeting Conférence invitée*, Providence, Rhode Island, Etats-Unis.
77. Févotte C., Daudet L., Godsills S., & Torresani B. (2006). *Sparse regression with structured priors : application to audio denoising* Paper presented at the *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'06)*, Toulouse, France.
78. Garnier M., Bailly L., Dohen M., Welby P., & Loevenbruck H. (2006). *Etude acoustique et articulatoire de la parole Lombard. Effets globaux sur l'énoncé*. Paper presented at the *Actes des XXVIèmes Journées d'Etudes sur la Parole*, Dinard, France
79. Garnier M., Bailly L., Dohen M., Welby P., & Loevenbruck H. (2006). *An acoustic and articulatory study of Lombard speech. Global effects at utterance level* Paper presented at the *ICSLP*, Pittsburgh, Etats-Unis.
80. Garnier M., Bailly L., Dohen M., Welby P., & Loevenbruck H. (2006). *The Lombard effect : a physiological reflex or a controlled intelligibility enhancement*. Paper presented at the *ISSP*, Ubatuba, Brésil.

81. Garnier M., Henrich N., Dubois D., Poitevineau J., & Polack J.D. (2006). *Peut-on considérer l'effet Lombard comme un phénomène linéaire en fonction du niveau de bruit ?* Paper presented at the *8ème Congrès Français d'Acoustique*, Tours, France.
82. Leveau P., & Daudet L. (2006). *Multiresolution partial tracking with modified Matching Pursuit* Paper presented at the *Proceedings of the 14th European Signal Conference (EUSIPCO'06)*, Florence, Italie.
83. Leveau P., Vincent E., Richard G., & Daudet L. (2006). *Mid-level sparse representations for timbre identification : design of a data-driven harmonic dictionary* Paper presented at the *Proceedings of the 1st Workshop on learning the Semantic of Audio Signals (LSAS'06)*, Athènes, Grèce.
84. Montgermont N., Fabre B., & De La Cuadra P. (2006). *Etude des paramètres de jeu dans la flûte traversière* Paper presented at the *8ème Congrès Français d'Acoustique*, Tours, France.
85. Polack J.D. (2006). *Acoustic Reverberation time and mean absorption in concert halls* Paper presented at the *6th International Conference on Auditorium Acoustics*, Copenhagen, Denmark.
86. Polack J.D. (2006). *Auralisation and virtual acoustics : a fast expanding business* Paper presented at the *Symposium 40ème anniversaire de l'Association Belge des Acousticiens ABAV*.
87. Polack J.D. (2006). *Are concert halls random number generators ?* Paper presented at the *4th Joint Meeting of the ASA and ASJ, conférence sur invitation*, Honolulu, Etats-Unis.
88. Polack J.D., Faburel G., & Beaumont J. (2006). *Transportation noise in France : lessons from Framework Program PREDIT 2*. Paper presented at the *InterNoise 2006*, Honolulu, Etats-Unis.
89. Ravelli E., & Daudet L. (2006). *Representation of audio signals in overcomplete dictionaries, what is link between redundancy factor and coding properties ?* Paper presented at the *Proceedings of the Digital Audio Effects Workshop (DAFx'06)*, Montréal, Canada.
90. Sturm B.L., Daudet L., & Roads C. (2006). *Pitch-shifting audio signals using sparse atomic approximations* Paper presented at the *Proceedings of the Workshop on Audio and Music Computing for Multimedia (AMCMM 06)* Santa Barbara, CA, Etats-Unis.

## 2005

91. Cance C. (2005). *Indices linguistiques du statut cognitif des modalités sensorielles en discours : couleur et lumière dans l'habitacle automobile*. Paper presented at the *Atelier du Sensolier, conférence sur invitation*, Paris.
92. Castellengo M., & Dubois D. (2005). *Timbre ou timbres ? Propriété du signal, de l'instrument ou construction cognitive ?* Paper presented at the *Conference on interdisciplinary Musicology (CIM05)*, Montréal, Canada.
93. Dacremont C., Egoroff A., Jauneau A., et al. (2005). *Rules to elaborate attribute definitions : do they improve definition efficiency ?*. Paper presented at the *Communication affichée au 6th Pangborn* Harrogate, Royaume-Uni.
94. Daudet L. (2005). *A review on techniques for the extraction of transients in musical signals* Paper presented at the *Computer Music Modeling and Retrieval Conference (CMMR'05)*, Pise, Italie.
95. Daudet L., Mignot R., & Romain O. (2005). *Playing cylinders of mechanical organs with an optical reader*. Paper presented at the *Digital Audio Effects Workshop (DAFx'05)*, Madrid, Espagne.

96. De La Cuadra P., Fabre B., & Abel J.S. (2005). *A physical model and experimental tested for real-simulation of flute-like instruments* Paper presented at the *IEEE Workshop on applications of signal processing to audio and acoustics 2005*, New-York, Etats-Unis.
97. De La Cuadra P., Fabre B., Abel J.S., & Smith J.O. (2005). *A physical model and experimental testbed for real-time simulation of flute-like instruments* Paper presented at the *149th ASA meeting Conférence invitée*, Vancouver, Canada.
98. De La Cuadra P., Fabre B., Montgermont N., & De Ryck L. (2005). *Data acquisition and analysis on modern flute playing parameters : a comparison between an advanced and a beginner player* Paper presented at the *Forum Acusticum. 2005*, Budapest, Hongrie.
99. De Reyer D., Maurin E., Fontaine J.-M., & Daudet L. (2005). *Detection of xylophage larvae Anobium punctatum and Lyctus brunneus by acoustic emission*. Paper presented at the *14th International Meeting of the International Council of Museums-Committee for Conservation (ICOM-CC 05)*, Den Haag, Hollande.
100. Delepaut G., Dubois D., Mzali M., & Guerrand S. (2005). *Identification du "sentir ensemble" en linguistique cognitive* Paper presented at the *8ème RJC ED, "Langage et Langues"* Paris, France.
101. Delepaut G., Dubois D., Mzali M., & Guerrand S. (2005). *Catégories d'analyse du confort du voyage en train* Paper presented at the *Actes du colloque "Catégorisation et catégories : des théories cognitives aux pratiques en évaluation sensorielle"*, Paris, France.
102. Dubois D. (2005). *Les sens des sens : constructions cognitives et désignations des catégories du sensible (sous presse)*. Paper presented at the *CIL 2005 : le sens, c'est de la dynamique : la construction du sens en sciences du langage et en psychologie*, Montpellier, France.
103. Dubois D. (2005). *De l'expérience subjective des couleurs à l'objectivité de la couleur : approches cognitives* Paper presented at the *Ecole de printemps Okhra*, Roussillon.
104. Essid S., Leveau P., Richard G., Daudet L., & David B. (2005). *On the usefulness of differentiated transient/steady-state processing in machine recognition of musical instruments* Paper presented at the *AES 118th convention*, Barcelone, Espagne.
105. Fontaine J.M., & Poitevineau J. (2005). *Are there criteria to evaluate optical disc quality that are relevant for end-users ?* Paper presented at the *Audio Engineering Society, 119th Convention* New-York, Etats-Unis.
106. Gaillard P., Castellengo M., & Dubois D. (2005). *L'apport de la catégorisation à l'étude du transitoire d'attaque du steeldrum ; contribution à la définition du timbre causal*. Paper presented at the *Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM05)*, Montréal, Canada.
107. Gherghinoiu C., Besnainou C., & Castellengo M. (2005). *Comparative study made on timbre perception*. Paper presented at the *EAA Forum Acusticum Conference*, Budapest, Hongrie.
108. Giboreau A., Dacremont C., Guerrand S., & Dubois D. (2005). *The relative efficiency of comparative and monadic protocols* Paper presented at the *Communication affichée au 6th Pangborn*, Harrogate, Royaume-Uni.
109. Hurtado-Huyssen A., & Polack J.D. (2005). *Acoustic intensity in multichannel rendering systems* Paper presented at the *AES 119th Convention*, New-York, Etats-Unis.
110. Jacquemin C., Afonso A., Blum A., et al. (2005). *Design d'environnements multimodaux interactifs communicants*. Paper presented at the *H2PTM'05*, Paris, France.

111. Krstulovic S., Gribonval R., Leveau P., & Daudet L. (2005). *A comparison of two extensions of the matching pursuit algorithm for the harmonic decomposition of sounds* Paper presented at the *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA'05)* New-Paltz, N.Y., Etats-Unis
112. Leveau P., Daudet L., Krstulovic S., & Gribonval R. (2005). *Model-based matching pursuit - Estimation of chirp factors and scale of Gabor atoms with iterative extension*. Paper presented at the *Proceedings of the workshop on "Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations (SPARS'05)"* Rennes, France.
113. Polack J.D., Vogel C., Maffiolo V., Guastavino V., & Katz B. (2005). *Reproduction sonore et validité écologique* Paper presented at the *Villes et Images sonores, conférence invitée*, Noisy-le-Grand, France.
114. Vergez C., De La Cuadra P., & Fabre B. (2005). *Jet motion in flute-like instruments: experimental investigation through flow visualization and image processing* Paper presented at the *Forum Acusticum*, Budapest, Hongrie.

## 2004

115. Bensa J., & Daudet L. (2004). *Efficient modeling of "phantom" partials in piano tones* Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA 2004)*, Nara, Japon.
116. Candel D., & Dubois D. (2004). *Values and usage of definitions* Paper presented at the *7ème Congrès ISAPL* Université de Silésie, Cieszyn, Pologne.
117. Candel D., Dubois D., & Marchaudon P. (2004). *From lexicography to cognitive semantics* Paper presented at the *7ème Congrès ISAPL* Cieszyn, Pologne.
118. Castellengo M. (2004). *Flute-like instrument transients: An analytical study of mouth-tone production versus pressure rise time*. Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics*, Nara, Japon.
119. Castellengo M. (2004). *Problématique de l'étude de la qualité sonore des instruments de musique* Paper presented at the *COST du Pôle national d'innovation des métiers de la musique*.
120. Castellengo M., Chuberre, & Henrich N. (2004). *Is Voix Mixte, the Vocal Technique Use to Smooth the Transition across the two Main Laryngeal Mechanism and Independent Mechanism?* Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics*, Nara, Japon.
121. Daudet L. (2004). *Sparse and structured decompositions of audio signals in overcomplete spaces* Paper presented at the *Digital Audio Effects Workshom (DAFx'04)*, Naples, Italie.
122. Daudet L., Molla S., & Torresani B. (2004). *Towards a hybrid audio coder*. Paper presented at the *Third International Conference on Wavelet Analysis and Its Applications*, Chongqing, Chine.
123. Davies M., & Daudet L. (2004). *Fast sparse subband decomposition using FIRSP* Paper presented at the *12th European Signal Processing Conference (EUSIPCO'04), sur CD-ROM*, Vienne, Autriche.
124. De La Cuadra P., & Fabre B. (2004). *Analysis of jet instability in flute-like instruments by means of image processing: effect of the excitation amplitude* Paper presented at the *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA 2004)*, Nara, Japon.

125. De La Cuadra P., Fabre B., Henrich N., & Robin T. (2004). *Analysis of jet instability in flute-like instruments by means of image processing : effect of the channel geometry on the jet instability*. Paper presented at the *International Congress on Acoustics (ICA)*, Kyoto, Japon.
126. Derrien O., & Daudet L. (2004). *Reduction of artefacts in MPE-AAC with MDCT spectrum regularisation*. Paper presented at the *AES Audio Engineering Society, 116th Convention 2004*, Berlin, Allemagne.
127. Dubois D., Delepaut G., Guerrand S., & Hudson R. (2004). *Verbal descriptions of smells in various "natural" and cultural contexts* Paper presented at the *5th Pangborn sensory Science Symposium, Food quality and preferences*, Florence, Italie.
128. Dubois D., Guastavino C., & Maffiolo V. (2004). *A cognitive approach to soundscapes : Acoustic phenomena between "noise(s)" and "sounds" ?* . Paper presented at the *Joint Congress CFA/DGA'04*, Strasbourg, France.
129. Dubois D., Guastavino C., Maffiolo V., & Raimbault M. (2004). *A cognitive approach to soundscapes* Paper presented at the *147th ASA meeting conférence sur invitation*.
130. Dubois D., Urdapiletta I., & Guerrand S. (2004). *How to get a cognitive representation from linguistic descriptions, The case for odors, flavors and noises* Paper presented at the *Fifth Pangborn sensory Science Symposium, Food quality and preferences*, Florence, Italie.
131. Garnier M., Dubois D., Poitevineau J., Henrich N., & Castellengo M. (2004). *Description verbale et acoustique de la qualité vocale dans le chant lyrique*. Paper presented at the *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*, Marseille.
132. Garnier M., Dubois D., Poitevineau J., Henrich N., & Castellengo M. (2004). *Perception et description verbale de la qualité vocale dans le chant lyrique : une approche cognitive*. Paper presented at the *JEP'04 XXVèmes Journées d'Etude sur la Parole 2004*, Fès, Maroc.
133. Henrich N. (2004). *Etude de la qualité vocale dans le chant lyrique*. Paper presented at the *XVèmes Rencontres Linguistiques en Pays Rhénan, Conférence invitée*, Strasbourg, France.
134. Leveau P., Daudet L., & Richard G. (2004). *Methodology and Tools for the elevation of automatic onset detection algorithms in music*. Paper presented at the *International Symposium on Music Information Retrieval (ISMIR'04)*, Barcelone, Espagne.
135. Pellerin G., Polack J.-D., & Morkerken J.-P. (2004). *Sound source design in the very low frequency domain*. Paper presented at the *116th Convention of the Audio Engineering Society*, Berlin, Allemagne.
136. Polack J.-D., Castellengo M., Maffiolo V., Guastavino V., & Katz B. (2004). *Soundfield reproduction : the limits of the physical approach*. Paper presented at the *CFA/DAGA'04*, Strasbourg, France.
137. Polack J.-D., Isabey B., & Leroy P. (2004). *Loudspeaker positioning in rectangular rooms*. Paper presented at the *CFA/DAGA*, Strasbourg, France.

## Colloques sans actes

## 2007

138. Cance C. (2007). *Matérialités et inscriptions linguistiques des couleurs : représentations ou constructions cognitives ?*. Paper presented at the *Colloque des Jeunes chercheurs en Sciences Cognitives* Lyon
139. Castellengo M., & During J., & Lamesch S. (2007). *The iranian tahrir : acoustical analysis of an ornamental vocal technique*. Paper presented at the *3rd Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM07)*. Tallinn, Estonie
140. Fabre B. (2007). *Flute-like instruments : a perfect joint between acoustics and hydrodynamics*. Paper presented at the *ASA Meeting*. Salt Lake City, Etats-Unis
141. Garnier M., Dubois D., & Henrich N. (2007). *A new approach to study different speakers, adaptation strategies to a noisy environment*. Paper presented at the *Care of the professional voice*. Philadelphie, Etats-Unis
142. Maurin E., De Reyser D., Daudet L., & Fontaine J.M. (2007). *Signals emitted by larvae of insects in dry wood and acoustic detection*. Paper presented at the *COST meeting "wood science for conservation of cultural heritage"*. Bruxelles, Belgique
143. Polack J.D., Pronello C., Beaumont J., et al. (2007). *Pertinence des descripteurs d'ambiance sonore urbaine : application aux bruits des transports pendant les périodes sensibles*. Paper presented at the *Séminaire PREDIT "Bruit des transports terrestres"* Nantes, France

## 2006

144. Cance C., Dubois D., Giboreau A., & Bardot A. (2006). *Colours and colour terms in discourses*. Paper presented at the *2nd Language, Culture and Mind Conference*. Paris
145. Candel D., & Dubois D. (2006). *Vers une définition de "qualité de vie"*. Paper presented at the *Revue Francophone de Psycho-Oncologie*.
146. Delepaut G., Dubois D., Mzali M., & Guerrand S. (2006). *Categorisations and properties of comfort in trains*. Paper presented at the *International Colloque Language, Culture and Mind 2* ENST, Paris
147. Garnier M., Dubois D., & Henrich N. (2006). *Constitution de corpus de parole semi-spontanée environnement bruyant : intérêts et applications d'une telle méthodologie*. Paper presented at the *Actes des rencontres jeunes chercheurs en parole* Paris, France
148. Henrich N., Lortat-Jacob B., Castellengo M., Bailly L., & Pelorson X. (2006). *Period-doubling occurrences in singing: the "bassu" case in traditional Sardinian "Atenore" SINGING*. Paper presented at the *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*. Tokyo, Japon
149. Montgermont N., Fabre B., & De La Cuadra P. (2006). *Paramètres de jeu dans la flûte traversière : de l'intention musicale à l'instabilité hydrodynamique*. Paper presented at the *Journées des Jeunes chercheurs en Acoustique musicale, Audition et Signal audio*.
150. Mzali M., Talotte C., Delepaut G., & Poisson F. (2006). *Physical measurements in commercial travels: correlation between criteria and passenger's judgements*. Paper presented at the *WCCR*. Montréal

2005

151. Castellengo, M. (2005). *Manuel Garcia junior, a clear-sighted observer of human voice production*. Paper presented at the *7ème Pan European Voice Conference (PEVOC)*. Londres
152. Henrich N. (2005). *Mirroring the voice from Garcia to the present day : some insights into singing voice registrers* Paper presented at the *7ème Pan European Voice Conference (PEVOC)*, *Conférence invitée*. Londres
153. Morange S., Fontaine J.-M., Vogel C., Poitevineau J., & Dubois D. (2005). *Appartenances catégorielles d'un objet complexe, la voix : Approches linguistiques et psycho-cognitives* Paper presented at the *Catégorisation et catégories*. Paris, France
154. Poitevineau J. (2005). *To test or not to test... (L'usage des tests statistiques chez les chercheurs)* Paper presented at the *Séminaire M2S3 du Centre Maurice Halbwachs*. ENS, Paris

2004

155. Castellengo M., & Henrich N. (2004). *Vibration et Perception : l'Alchimie de la voix chantée*. Paper presented at the *Conférence à l'Espace des Sciences de l'ESPCI*. Paris, France
156. Fontaine J.M. (2004 ). *Research on AV carriers for long term storage*. Paper presented at the *TAPE Seminar-European commission on Preservation and Access*. Amsterdam, Pays-Bas
157. Gendrot G., Henrich N., Schade G., Muller F., & Expert R. (2004 ). *Vocal folds vibratory patterns of laryngeal mechanism M0 as investigated with high speed cinematography and electroglottography* Paper presented at the *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*. Marseille, France
158. Henrich N., Doval B., & D'Alessandro C. (2004 ). *Modelling the glottal flow : the mathematical approach*. Paper presented at the *Summer School on "Cognitive and physical models of speech production, perception and perception-production interaction"* Lubmin, Allemagne
159. Henrich N., Gendrot C., Schade G., Muller F., & Expert R. (2004 ). *Characterization of features observed on the derivative of EGG signal by the use of high speed cinematography* Paper presented at the *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*. Marseille
160. Henrich N., Wolfe J., & Smith J. (2004). *Resonance measurements in the case of tenor voice*. Paper presented at the *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*. Marseille

Rapports de contrat

2007

161. Sevin J.C., Cheyronnaud J., & Fontaine J.M. (2007). *Rapport d'étude bibliographique et thématique sur la restauration du son*, Ministère de la Culture - LAM - EHESS - CNRS.
162. Daudet L. (2007 ). *Représentations parcimonieuses et structurées de signaux audio*, Rapport de fin de contrat ACI "Jeunes chercheuses et jeunes chercheurs" 2003-2006 N°9034.

163. Polack J.D., Pronello C., Beaumont J., Robin B., et al. (2007). *Pertinence des descripteurs d'ambiance sonore urbaine : application aux bruits des transports pendant les périodes sensibles* Rapport final PREDIT

## 2006

164. Daudet L. (2006). *Détection acoustique d'insectes xylophages* Rapport de fin de contrat, Ministère de la Culture et de la Communication 2005-2006.
165. De Senigon R., Fontaine J.M., & Polack J.D. (2006). *Recherche sur un estimateur de la dégradation des disques optiques (CD-R)*, Ministère de la Culture - LAM.

## 2005

166. Morange S., Vogel C., Dubois D., Fontaine J.M., & Poitevineau J. (part.). (2005). *Restauration de documents sonores anciens. Evaluation cognitive et description acoustique d'un enregistrement de Caruso*, Ministère de la Culture - LAM.
167. Robin B., Pronello C., Polack J.D., Arras C., et al. (2005). *Pertinence des descripteurs d'ambiance sonore urbaine : application aux bruits des transports pendant les périodes sensibles*, Rapport intermédiaire PREDIT.

## Thèses

## 2007

168. Garnier M. (2007). *Communiquer en environnement bruyant : de l'adaptation jusqu'au forçage vocal*. Doctorat, UPMC, Paris.

## 2006

169. Pellerin G. (2006). *Etude du haut-parleur aux forts déplacements. Application à l'optimisation des Tuyères acoustiques* Doctorat, UPMC, Paris.

## 2005

170. Jeanjean S. (2005). *Vers l'optimisation du rayonnement d'un haut-parleur dans un habitacle automobile : résolution des problèmes de modélisation*. Doctorat, UPMC, Paris.
171. Morange S. (2005). *Approches structurale, prosodique, psycho-cognitive de quelques propriétés linguistiques subjectives de la parole : l'exemple de trois Montmartrois âgés* Doctorat, Université Paris 3, Paris.

## 2004

172. Corteel E. (2004). *Caractérisation et extensions de la Wave Field Synthesis en conditions réelles* Doctorat, UPMC, Paris.



Autres

Magazines

173. Beaumont J., Lesaux S., Robin B., Polack J.D., et al. (2004). Pertinence des descripteurs d'ambiance sonore urbaine - Applications aux bruits des transports pendant les périodes sensibles. *Acoustique et Technique*, 39.
174. Dubois D. (2006). Dessine-moi une odeur. *Pour la Science*, 349, 54-58.
175. Dubois D., Guastavino C., & Raimbault M. (2004). Les catégories cognitives du bruit urbain : des discours aux indicateurs physiques. *Acoustique et Technique*, 39, 49-57.
176. Guastavino C., Cheminée P., Dubois D., Polack J.D., Arras C., & Droin L. (2005). Perception des basses fréquences dans l'environnement urbain. *Acoustique et Technique*.
177. Guastavino C., Cheminée P., Dubois D., Polack J.D., Arras C., & droin L. (2006). Basses fréquences en milieu urbain : qu'en disent les citoyens? *Acoustique et Technique*, 44.

---



**M. I. S. E. S.**

**Mécaniques et Ingénierie des Solides  
et Structures**

---

# Mécanique et Ingénierie des Solides et Structures

## *Chercheurs permanents*

ALLICHE Abdenour	Maître de Conférences UPMC
AUDOLY Basile	Chargé de Recherches CNRS
BEN HAMIDA Abdelwahed	Maître de Conférences UPMC
DESMORAT Boris	Maître de Conférences IUT Cachan
DUMONTET Hélène	Professeur UPMC
FERNANDES Armancio	Maître de Conférence UPMC
FRELAT Joël	Chargé de Recherches CNRS
LAZARUS Véronique	Maître de Conférences UPMC
LEBLOND Jean-Baptiste	Professeur UPMC
LEGUILLON Dominique	Directeur de Recherches CNRS
LENE Françoise	Professeur UPMC
MARIGO Jean-Jacques	Professeur UPMC
MAURINI Corrado	Maître de Conférences UPMC
MULLER Patrick	Maître de Conférences UCP Cergy
NEUKIRCH Sébastien	Chargé de Recherches CNRS
TURBE Nicole	Professeur IUFM Créteil
VINCENTI Angela	Maître de Conférences UPMC

## *Emérites :*

DUVAUT Georges	Professeur UPMC
SANCHEZ-PALENCIA Enrique	Directeur de Recherches CNRS

*Effectifs au 31 Décembre 2007*

# *Mécanique et Ingénierie des Solides et Structures*

---

## *A - Introduction*

Cette équipe est issue historiquement de la fusion du Thème 4 de l'ex-LMM et de l'ex-LM2S, dont les contours s'estompent progressivement.

Sans prétendre couvrir la totalité du domaine concerné, elle en aborde de nombreux aspects modernes et importants. Ses activités sont subdivisées pour la clarté dans ce document en quatre thèmes :

- 1. Mécanique de la Rupture
- 2. Calcul et Optimisation des Structures
- 3. Structures Elancées
- 4. Comportement et Endommagement des Matériaux

Les interactions entre ces thèmes sont cependant notables, et il ne faut donc pas prêter trop d'importance à cette subdivision. Par exemple, l'usage des méthodes numériques, particulièrement celle des éléments finis constitue un dénominateur commun à tous les thèmes.

Chacun des thèmes fait l'objet de collaborations diverses, soit avec d'autres équipes de l'Institut (collaboration de J. Frelat avec les équipes LAM et MPIA par exemple), soit, dans de nombreux cas, avec le mode industriel ou semi-industriel (AREVA, IFP, etc....).

L'équipe s'appuie sur le parcours de Master 2e année Modélisation et Simulation en Mécanique des Solides, qui comporte une orientation « recherche » intitulée Modélisation en Mécanique des Solides, dirigée par H. Dumontet et F. Léné, et une orientation « professionnelle » intitulée Calcul de Structures Mécaniques, dirigée par J.J. Marigo. L'effectif de ce parcours est actuellement de l'ordre de 25 étudiants.

Les années qui viennent de s'écouler ont vu la création de deux séminaires réguliers. Le premier, animé par B. Audoly et P. Muller, a vocation à accueillir des orateurs confirmés, souvent invités de l'étranger pour l'occasion. Le second, animé par V. Lazarus et A. Vincenti, est un « séminaire des thésards » destiné à permettre à ces derniers d'exposer leurs travaux en public pour la première fois, afin de les familiariser avec cet exercice et de favoriser des échanges fructueux avec leurs collègues, jeunes et confirmés.

Deux recrutements ont été réalisés récemment : celui d'H. Dumontet (mutation) comme professeur, sur une thématique « homogénéisation », et celui, tout récent, de C. Maurini, comme maître de conférences, sur une thématique « méthodes numériques ».

Le nombre de thèses en cours fin 2007, sur des sujets tant « industriels » (bourses CIFRE) qu'« universitaires », ainsi que les perspectives détaillées ci-après, attestent de la vitalité des recherches menées dans cette thématique, en prise avec les problèmes les plus modernes de la mécanique des solides théorique et appliquée.

---

## *B - Mécanique de la rupture*

### **B. 1 - Amorçage des fissures dans les matériaux et les structures fragiles**

Point de départ de cette activité, D. Leguillon a défini un critère permettant de prédire l'initiation de nouvelles fissures dans les matériaux et les structures fragiles (Leguillon, 2002). Des résultats d'essais, empruntés à la littérature, sur éprouvettes entaillées en V (PMMA, Dunn et al., 1997, alumine, Yosibash et al., 2003) en ont permis la validation expérimentale. Par la suite, ce critère a été appliqué avec un certain succès au collage structural : plaques d'acier collées par une résine époxy (Leguillon et al., 2003, coll. LTPCM de Grenoble).

*D. Leguillon et collaborateurs*

La période de quatre ans du plan quadriennal écoulé a été employée à de nouvelles applications, les unes dans un cadre contractuel, les autres non.

Cependant, deux études importantes n'entrent dans aucun des cadres ci-dessous. La première concerne la prise en compte de chargements complexes. La formulation du critère est évidemment plus lourde, mais divers exemples montrent la bonne corrélation essais/théorie tant sur le niveau de chargement provoquant la rupture que sur la direction prise par la fissure qui est maintenant une inconnue supplémentaire du problème (Yosibash et al. 2006, Leguillon et al. 2007, soumis). La seconde est consacrée à l'étude de la croissance des fissures en milieu poreux. Elle met en évidence une compétition entre renforcement dû à l'émoussement des fissures par les pores et un affaiblissement lié à une porosité croissante (Leguillon, Piat, 2007).

Thèse d'O. Cherti Tazi. Menée en collaboration avec le SPCTS de Limoges avec un financement MESR, elle a été consacrée à l'étude des déviations de fissures dans un empilement de couches céramiques denses et poreuses (Leguillon et al., 2005 et 2006). Elle a montré, comme les expériences faites à Limoges, qu'il était nécessaire d'intercaler des couches de très forte porosité pour obtenir la déviation des fissures et un effet de renforcement apparent. Malheureusement, ces porosités dégradent de manière trop significative les propriétés élastiques du composite pour présenter un intérêt industriel.

IFP et thèse de D. Picard. Consacrée au développement des diaclases et des couloirs de fracturation dans les empilements géologiques, elle a été réalisée dans le cadre d'un financement CIFRE avec l'IFP. Elle a permis d'analyser le mécanisme de step-over : le réamorçage d'une fissure dans un banc voisin (grès) en « sautant » l'interbanc plus ductile (argile). Incidemment, une étude a permis d'estimer l'influence du rayon en fond d'entaille qui résulte inévitablement de l'usinage sur les propriétés à rupture des éprouvettes céramiques entaillées (Picard et al., 2006).

IFP et thèse de D. Quesada. Une nouvelle thèse, intitulée Genèse de la fracturation naturelle des réservoirs pétroliers avec financement CIFRE fait suite à la thèse de D. Picard. Dans une première phase, l'amorçage de fissure autour d'une cavité soumise à une compression a été étudié mettant en évidence la possibilité de croissance de fissures parallèlement à la direction de compression. Un effet de taille important a pu être mis en évidence (Leguillon et al. 2007). Cette étude va se prolonger en prenant en compte un réseau de cavités et en s'appuyant sur des résultats expérimentaux obtenus par K. Sab et K. Miled à l'ENPC.

ITER et thèse de C. Henninger. Dans le cadre d'une collaboration avec le LCTS de Bordeaux et le CEA de Cadarache, une étude a été menée sur la tenue des tuiles de protection du limiteur dans l'actuel réacteur de fusion nucléaire Tore Supra (figure ci-dessous).



**FIGURE 5-1** *Aiguille formant le limiteur du réacteur de fusion Tore Supra. La partie supérieure plus sombre est composée de tuiles de CFC protégeant la partie métallique contenant le circuit de refroidissement.*

Elles sont faites d'un revêtement de CFC (composite carbone/carbone) sur un substrat de cuivre. Les conditions d'élaboration et d'utilisation impliquent des variations de température importantes et un taux élevé de contraintes résiduelles pouvant provoquer le décollement du revêtement. Cette étude a permis d'étendre les conditions d'application du critère en prenant en compte des contraintes résiduelles d'origine thermique et plastique. L'étude a confirmé qu'aucun arrachement de tuile n'était possible pendant la phase d'élaboration de la structure (refroidissement de 450°C). Ceci est conforme aux observations, les arrachements n'ont été effectivement constatés qu'en service après cyclage thermique.

CIEL et thèse de S. Murer. A une échelle différente, la problématique des piles à combustible, est identique à la précédente. La présence de contraintes résiduelles thermiques dues à l'élaboration peut conduire à la séparation des composants. Cette étude en est à ses débuts, elle est menée en collaboration avec le LTPCM et le CEA de Grenoble et GDF (St Denis) dans le cadre de l'ANR CIEL (programme PANH). Des simulations en chargement thermique monotone ont permis de calibrer les paramètres mais ce sont les chargements de fatigue qui vont être dimensionnants dans cette situation.

STRESSNET. Des contraintes thermiques résiduelles sont également présentes après élaboration dans les composants électroniques qui résultent d'un assemblage de divers éléments : substrat de silicium, diélectrique, conducteur métallique, couche de passivation.

Elles peuvent conduire jusqu'à leur séparation. Au cours d'une collaboration avec le LTPCM et le CEA-LETI de Grenoble, des essais mécaniques ont mis en évidence des mécanismes de rupture complète plutôt que des décohésions. Ce résultat a été corroboré par la théorie : les longueurs de rupture entrant en jeu sont en général bien plus grandes que la taille des différents composants, 350 nm pour une ligne de cuivre par exemple (Brillet-Rouxel et al. 2007).

Perspectives. C'est la prise en compte des chargements de fatigue qui constitue la perspective la plus importante du prochain plan quadriennal. Elle intéresse au premier chef les projets CIEL, ITER et STRESSNET. Elle va nécessiter une refonte importante de l'approche, de type très exclusivement « rupture fragile », qui est employée actuellement. D'autres perspectives plus modestes sont en gestation comme la prise en compte du « T-stress » dans la déviation des fissures dans les multicouches, les ruptures simultanées intervenant en dynamique ou encore l'étude des singularités 3D et des « shadow terms » (expression due à M. Dauge (Rennes) et Z. Yosibash (Beer-Sheva)).

## B. 2 - Critères d'amorçage et modèles cohésifs

Si l'on considère des modèles cohésifs, c'est-à-dire où l'énergie de surface dépend du saut de déplacement, et si l'on considère que l'initiation de la fissuration correspond à une perte de stabilité de la réponse élastique (ce qui signifie que la réponse élastique n'est plus un minimum local de l'énergie), alors on obtient un critère d'initiation portant sur le tenseur des contraintes (contrairement à la théorie de Griffith où il porte sur le taux de restitution d'énergie). Suivant la régularité et l'isotropie de l'énergie de surface à l'origine, on obtient différents types de critères. Lorsque l'énergie de surface est isotrope et dérivable en 0, on obtient un critère de traction maximale et de cisaillement maximal. Lorsqu'elle admet seulement des dérivées directionnelles en 0, on obtient de façon générique un critère convexe de type courbe intrinsèque, non borné dans la direction des compressions hydrostatiques.

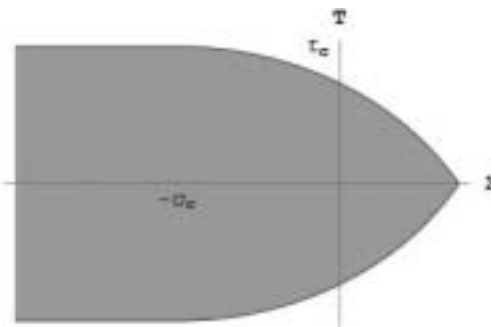


FIGURE 5-2 Représentation dans le plan de Mohr  $\Sigma - T$  (contrainte normale - cisaillement) du critère d'amorçage de type courbe intrinsèque obtenu à partir de la condition de stabilité pour un modèle cohésif général

J.J. Marigo  
et collaborateurs

## B. 3 - Modèles cohésifs et lois de fatigue de type Paris

En utilisant des modèles cohésifs de type Dugdale-Barenblatt, où l'énergie de surface dépend de l'histoire du saut de déplacement, en y introduisant une condition d'irréversibi-

J.J. Marigo  
et collaborateurs



lité et en adoptant un principe de moindre énergie comme loi d'évolution de la fissuration, on montre que l'on peut rendre compte des phénomènes de fatigue, c'est-à-dire d'évolution de la fissuration sous chargement cyclique. De plus, en faisant tendre la longueur interne du modèle de Dugdale-Barenblatt vers 0, on obtient à la limite des lois de fatigue de type Paris, c'est-à-dire  $\frac{dG}{dN} = G^m$ ,  $G$  désignant le taux de restitution d'énergie et  $\frac{dG}{dN}$  la vitesse d'avancée de la fissure (dérivée par rapport au nombre de cycles). On sait construire explicitement cette loi dans des cas simples et l'on retrouve des lois puissances quand  $G$  est petit devant  $G_c$ .

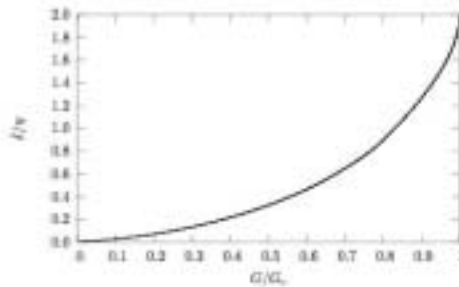


FIGURE 5-3 *Loi de Paris obtenue dans un problème d'essai de pelage*

## B. 4 - Rupture dynamique et rupture quasi-statique avec instabilité

*J.J. Marigo  
et collaborateurs*

Sur un problème modèle unidimensionnel de décollement de film mince avec énergie de surface de type Griffith, on montre que la solution dynamique converge, lorsque la vitesse de chargement tend vers 0, vers une solution quasi-statique présentant une phase instable de propagation due à une chute de la ténacité à partir d'un point II. En particulier, le saut

de fissuration induit par cette instabilité est régi par le principe de conservation de l'énergie quasi-statique, l'énergie cinétique pouvant être négligée.

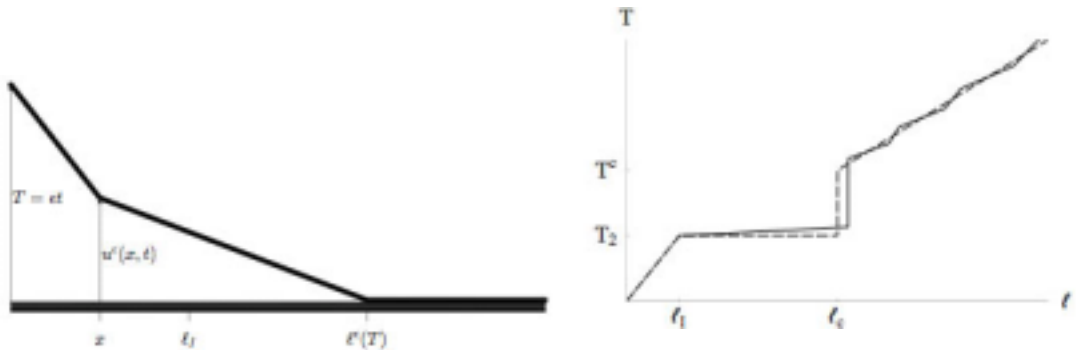


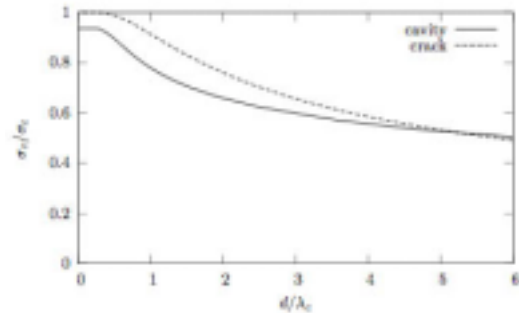
FIGURE 5-4 Le problème de décollement dynamique de film mince. *A gauche : géométrie et chargement; A droite : comparaison des solutions  $T \rightarrow l(T)$  dynamique (trait plein) et quasi-statique (trait pointillé) pour une vitesse de chargement  $\varepsilon = c/20$ ,  $T$  désignant l'ouverture imposée en  $x=0$ ,  $l(T)$  la longueur de décollement et  $c$  la célérité du son*

## B. 5 - Sensibilité des modèles cohésifs à la présence de défauts initiaux

Si l'on utilise des modèles cohésifs, l'initiation d'une fissure cohésive a lieu dès que les contraintes correspondant à la solution élastique atteignent un certain seuil. Par conséquent, la charge d'amorçage est très sensible à la présence de singularités et donc à la forme des défauts préexistants. On montre en revanche que la charge à rupture est surtout sensible à la taille du défaut, plus qu'à sa forme. Par exemple, si l'on considère une plaque carrée contenant un défaut central (fissure ou cavité circulaire), soumise à une traction simple, et si l'on adopte le modèle cohésif de Dugdale, on montre analytiquement pour la fissure, et numériquement pour la cavité, que la contrainte à rupture de la plaque avec défaut tend vers la contrainte critique du matériau lorsque la taille du défaut est petite devant la longueur interne du matériau (alors que la contrainte d'amorçage est nulle pour une fissure et vaut un tiers de la contrainte critique pour une cavité). Ce résultat permet d'avancer l'idée qu'avec les modèles cohésifs, les structures sont insensibles aux défauts de petite taille.

*J.J. Marigo  
et collaborateurs*

**FIGURE 5-5** Rapport entre la contrainte à rupture de la plaque contenant un défaut et la contrainte critique du matériau en fonction du rapport entre la taille du défaut et la longueur interne du matériau. En trait plein : cas où le défaut est une cavité circulaire ; en pointillé : cas où le défaut est une fissure (non-cohésive)



## B. 6 - Trajet de propagation de fissures en rupture fragile tridimensionnelle

V. Lazarus  
J.B. Leblond et colla-  
borateurs

Ces travaux de recherche concernent, dans le cadre de la mécanique de la rupture fragile, la détermination du trajet de propagation tridimensionnel de fissures. D'une part, on cherche à déterminer le trajet non-coplanaire en présence des modes II et III de cisaillement plan et antiplan, le problème étant la détermination de critères quantitatifs donnant la direction de propagation pour un chargement donné. D'autre part, on cherche à déterminer l'évolution de la forme du front de fissure lors de la propagation coplanaire de fissures planes, analytiquement ou numériquement selon les cas envisagés, le critère de propagation donnant la loi d'avance en fonction du chargement étant supposé connu.

### B.6.a - Propagation non coplanaire en présence des modes II+III

Collaboration avec  
M. Fulland et F.-  
G. Buchholz, FAM,  
Université de Pader-  
born, Allemagne

Expérimentalement, il est avéré que quel que soit le chargement appliqué sur un corps fragile fissuré, la fissure se propage en essayant de se rapprocher d'une situation de mode I pur. Ceci se traduit, en présence de mode III, par une rotation progressive de la fissure autour de la direction de propagation. Ainsi dans une expérience de flexion 4 points d'une poutre contenant une fissure initiale inclinée, cette dernière tourne autour de la direction de propagation pour venir se placer dans le plan médian sollicité en mode I uniquement. Les critères permettant de prédire cette rotation existent, mais sont encore sujets à controverses. Schollmann et al. (2002) proposent une version tridimensionnelle du critère de la contrainte d'ouverture maximale. Lazarus et al. (2001) proposent un critère basé sur la valeur moyenne du taux de restitution d'énergie le long du front. Une comparaison de ces deux critères a été effectuée par M. Fulland, F.-G. Buchholz et V. Lazarus sur des expériences de flexion et a



**FIGURE 5-6** Rotation d'une fissure autour de la direction de propagation dans une éprouvette en PMMA chargée en flexion 4 points

montré qu'à cause de la présence concomitante de mode II et de mode III, les deux critères donnent des résultats satisfaisants, mais que le critère de Schollmann et al. sous-estime la rotation par rapport à celui de Lazarus et al. dans les zones où le mode III est prépondérant.

### B.6.b - Déformation coplanaire du front d'une fissure plane hétérogène

Les problèmes considérés ici concernent l'étude du changement de forme du front d'une fissure plane lorsqu'elle se propage de façon coplanaire. La loi donnant l'avancée du front en fonction des facteurs d'intensité de contraintes est supposée connue (loi de Paris pour la fissuration subcritique ou la fatigue, loi de Griffith pour la rupture brutale). La détermination du trajet de propagation passe donc par la détermination des facteurs d'intensité de contraintes à chaque étape de la propagation.

Pour cela, l'outil théorique utilisé est la théorie des fonctions de poids tridimensionnelles de Bueckner-Rice, qui donne la variation des facteurs d'intensité de contraintes résultant d'une petite perturbation coplanaire du front de fissure, sous forme d'une intégrale le long du front d'une fonction dépendant des facteurs d'intensité initiaux, de l'avancée normale et des fonctions de poids. Cette théorie a été initiée dans le cas bidimensionnel par Bueckner (1970) et Rice (1972), et dans le cas tridimensionnel par Rice (1972) et Bueckner (1973). Elle a ensuite été étendue, dans divers cas particuliers, dans des travaux de Gao, Rice et Leblond, le pionnier étant Rice (1985). L'extension de la théorie au cas général d'une fissure plane de forme arbitraire, sous chargement quelconque, a finalement été obtenue par Favier et al. (2006). Cette théorie a été appliquée pour déterminer les grandes déformations du front de fissure et le désordre du front d'une fissure se propageant dans un milieu hétérogène.

*E. Favier, thèse 2001-2005,  
N. Pindra, thèse 2005-  
Collaboration avec  
J. Schmittbuhl et  
R. Toussaint, IPG  
Strasbourg*

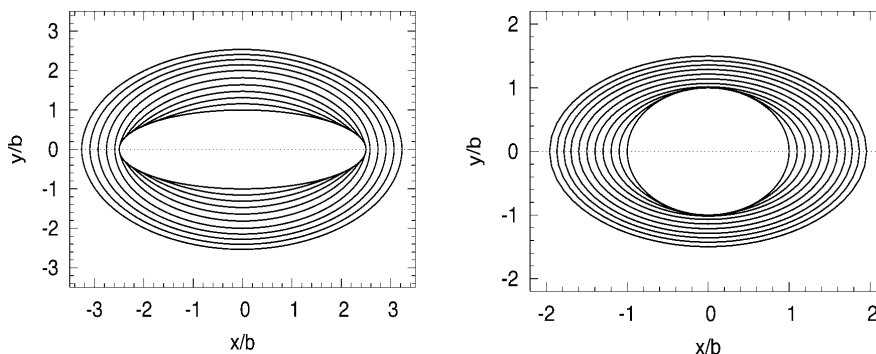


FIGURE 5-7 *Déformation sous chargement de mode II+III d'une fissure elliptique (à gauche) et circulaire (à droite) vers la même forme elliptique - Propagation en rupture fragile, suivant le critère de Griffith*

Pour l'étude des grandes déformations du front de fissure, Bower et Ortiz (1990) ont développé une méthode efficace de prédiction du trajet de propagation de fissures planes chargées en mode I. Cette méthode a été reprise et considérablement simplifiée par Lazarus

(2003) puis étendue au mode mixte II+III par Favier et al. (2006). La méthode repose sur une utilisation itérative des formules générales de Bueckner-Rice. Elle nécessite uniquement le maillage du front de fissure initial. En guise d'application, nous avons étudié le trajet de propagation de fissures de formes initiales variées (cercle, rectangle, ellipse, coeur). Pour toutes ces configurations la forme d'équilibre trouvée est un cercle en mode I et une quasi-ellipse en mode II+III, le rapport des axes dépendant du coefficient de Poisson.

Pour l'étude du désordre du front d'une fissure se propageant dans un milieu hétérogène, nous évaluons le comportement de grandeurs statistiques liées à la perturbation du front (fonction d'autocorrélation notamment) quand la distance de propagation tend vers l'infini. L'étude se fait de manière complètement analytique et mêle utilisation de la transformation de Fourier et de la théorie de Bueckner-Rice. L'étude a été faite dans le cas de la fissure en forme de fente infinie en

mode I par Favier et al. (2006b), en mode II+III et pour une fissure d'interface semi-infinie lors de la thèse de N. Pindra. Les résultats seront comparés à des expériences qui font l'objet d'une collaboration avec J. Schmittbuhl et R. Toussaint (IPG, Strasbourg).



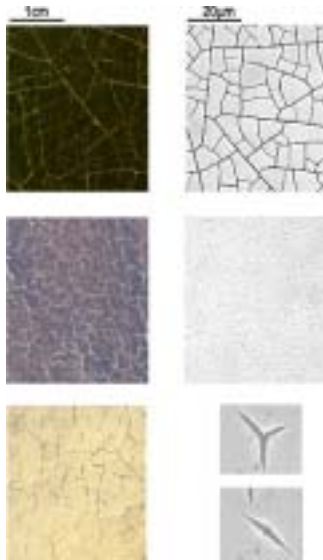
FIGURE 5-8 Propagation d'un front de fissure le long d'une interface hétérogène dans un plexiglas

## B. 7 - Morphologies de fissures lors du séchage de fluides complexes

*V. Lazarus  
et collaborateurs*

Ces travaux ont débuté en janvier 2006 grâce à un congé pour recherche et conversion thématique, puis une délégation au CNRS, de 6 mois chacun, de V. Lazarus, s'inscrivant dans l'ANR JC05 43351 jeunes chercheuses et jeunes chercheurs 2005. Le titre de ce congé était « De l'histoire d'un système complexe aux morphologies des déformations induites par relaxation des contraintes ». Il s'agit de recherches menées conjointement avec L. Pauchard (FAST, UMR 7608), B. Abou (MSC, UMR 7057) et K. Sekimoto (MSC, UMR 7057).

Lors du séchage de suspensions de particules colloïdales (de taille variant de 1 nm à 1 mm), la suspension, initialement stable sous l'effet de l'agitation thermique, est déstabilisée, les particules s'agglomèrent et forment une matrice solide poreuse se rétractant avec l'évaporation du liquide. Lorsque la rétraction est limitée par l'adhésion à une paroi rigide, des contraintes mécaniques se développent et peuvent donner naissance à des fractures de morphologies très variées. L'objectif de cet axe de recherche est de prédire les contraintes mécaniques se développant lors du séchage et de relier cette répartition des contraintes à la formation des fissures en s'appuyant sur deux types d'expériences-modèles : le séchage isotrope en couche mince et le séchage directionnel en profondeur, en cellules minces plates ou circulaires.

B.7.a - *Séchage isotrope en couche mince*

**FIGURE 5-9** *Comparaison des morphologies de fissures extraites des « Apôtres » (à gauche) et obtenues expérimentalement en faisant varier la composition à épaisseur fixée (à droite) : « dureté » décroissante de haut en bas*

Des expériences-modèles de séchage de films de particules colloïdales réalisées conjointement avec L. Pauchard (FAST) et B. Abou (MSC) ont permis de reproduire les différentes morphologies que l'on peut observer dans la nature en faisant varier la composition du mélange (proportion calibrée de billes rigides et souples) et l'épaisseur du film déposé. On constate, en particulier, l'existence d'une épaisseur critique, dépendant de la composition du mélange, et d'un seuil de concentration en billes molles (dépendant de l'épaisseur), en dessous desquels aucune fracture n'apparaît. Ces mesures sont couplées avec des mesures de contraintes mécaniques réalisées en déposant une couche du mélange sur une lame métallique flexible, dont les propriétés mécaniques sont parfaitement connues (Peterson et al., 1999), l'une de ses extrémités étant fixe tandis que l'autre est libre. Ces contraintes mesurées sont alors utilisées dans des modèles de couches minces précontraintes pour prédire l'avancée des fissures en fonction de leur géométrie, en utilisant les outils de mécanique de la rupture fragile.

*Collaborations*  
L. Pauchard  
(FAST)  
B. Abou (MSC)

Nous appliquons les résultats, en liaison avec le Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF, UMR 171), à l'authentification d'une série de onze apôtres conservée au Musée Toulouse-Lautrec d'Albi. Ces onze tableaux sont attribués à Georges de La Tour, mais des copies auraient remplacé les originaux à des dates encore incertaines. Pour cette authentification, les morphologies de fractures observées dans les peintures sont comparées à celles obtenues expérimentalement dans des conditions maîtrisées, afin de concourir, par problème inverse, à la détermination de leur origine (Pauchard et al., 2007). Par ailleurs, une collaboration avec S. Faure (CEA Valrhô) est à l'étude sur l'application des expériences à la caractérisation mécanique des gels aspirables utilisés pour la décontamination superficielle des cuves de réacteur.

## B.7.b - Séchage directionnel en cellules capillaires

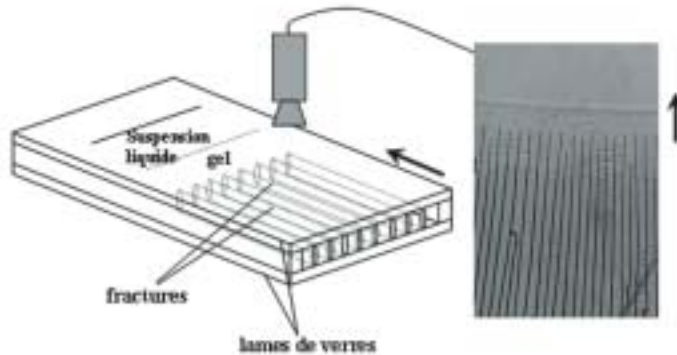


FIGURE 5-10 Séchage en cellule mince et développement d'un réseau parallèle de fissures suivant la direction du séchage

Collaboration avec  
L. Pauchard et  
G. Gauthier, FAST

Le système modèle est composé d'une suspension colloïdale concentrée de billes de silice (diamètre de l'ordre de 20 nm) dans de l'eau, contenue dans une cellule mince (Allain et Limat, 1995) ou circulaire (Gauthier et al., 2007). La géométrie comprend une unique surface par laquelle s'évapore le solvant. Sous l'effet de l'évaporation, un gel colloïdal se forme, se rétracte et des fissures croissent de façon directionnelle et alternée dans le milieu. Nous étudions le problème de la détermination théorique des contraintes se formant lors du séchage. Le milieu est poreux et chargé par le fluide qui s'évapore. La détermination de la loi de comportement (poroélastique, poroviscoélastique, poroplastique) et des conditions initiales et aux limites (chargement en pression ou en flux donné) est envisagée par problème inverse, en s'appuyant sur la formation de fissures comme signature de la présence de contraintes mécaniques. Des similitudes entre la formation de ces fissures de séchage et celles se développant lors du refroidissement des coulées de lave (Ryan et Sammis, 1978) peuvent être notées, ce qui permet de considérer qu'il s'agit d'expériences-modèles pour la formation des colonnes basaltiques.

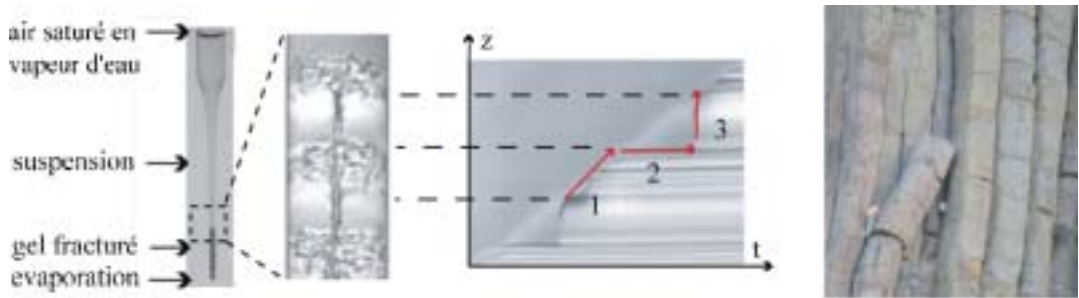


FIGURE 5-11 Séchage en cellule circulaire et développement de fissures alternées présentant de fortes analogies avec les colonnes basaltiques (photo de droite)

## B. 8 - Rupture ductile des métaux

K. Enakoutsu et J.B. Leblond ont procédé à un examen critique d'une variante non-locale du modèle de Gurson précédemment proposée par J. Devaux, J.B. Leblond et G. Perrin. Deux critères ont été utilisés pour juger de la pertinence de cette proposition : l'absence de sensibilité des résultats numériques au maillage et la capacité du modèle à reproduire les résultats d'expériences typiques de rupture ductile. La conclusion est que moyennant une petite modification, le modèle proposé constitue une solution possible au problème de la localisation infinie de l'endommagement et de la déformation dans le modèle de Gurson.

*J.B. Leblond et collaborateurs*

K. Enakoutsu et J.B. Leblond ont de même procédé à une étude critique d'un modèle « micromorphique » de rupture ductile précédemment proposé par M. Gologanu, J.B. Leblond et G. Perrin. L'étude des prédictions du modèle a permis là encore d'établir d'une part l'indépendance des résultats numériques vis-à-vis du maillage, d'autre part sa capacité à reproduire les résultats d'expériences de rupture ductile typiques. Le modèle constitue donc une seconde réponse possible au problème de la localisation infinie de l'endommagement et de la déformation dans les solides poreux ductiles.

Avec P. Saillard et G. Mottet, J.B. Leblond a défini une approche unifiée des phénomènes, éventuellement couplés, de coalescence des cavités et de formation de bandes de cisaillement dans les solides poreux plastiques. Cette approche repose sur une schématisation d'un volume représentatif élémentaire dans un matériau poreux sous la forme d'une superposition de couches homogènes (modèle « sandwich »). Le modèle obtenu a été validé par comparaison avec des simulations micromécaniques 2D et 3D de cellules élémentaires avec conditions aux limites périodiques. Ce modèle devrait permettre la reproduction de résultats d'expériences de rupture ductile en mode mixte réalisées au CEA, jusqu'ici hors de portée.



## B. 9 - Fatigue des élastomères

*J.B. Leblond et collaborateurs*

J.B. Brunac, O. Gérardin et J.B. Leblond ont défini une loi heuristique de propagation des fissures dans les élastomères soumis à des chargements cycliques 3D quelconques. Le principe, inspiré des travaux de Dang Van sur l'amorçage des fissures de fatigue dans les métaux, consistait à caractériser approximativement un cycle de chargement quelconque au moyen de deux paramètres seulement, de manière à définir un cycle de chargement 1D « équivalent ». Ils ont également défini une méthode numérique combinant la loi précédente et la mécanique de l'endommagement continu, qui permet de simuler la propagation de fissures de fatigue dans les élastomères soumis à des chargements cycliques 3D quelconques. Ces travaux ont été appliqués, à l'aide du code DELI de Michelin, à divers problèmes de ruine par fatigue de structures élastomériques 2D et 3D.

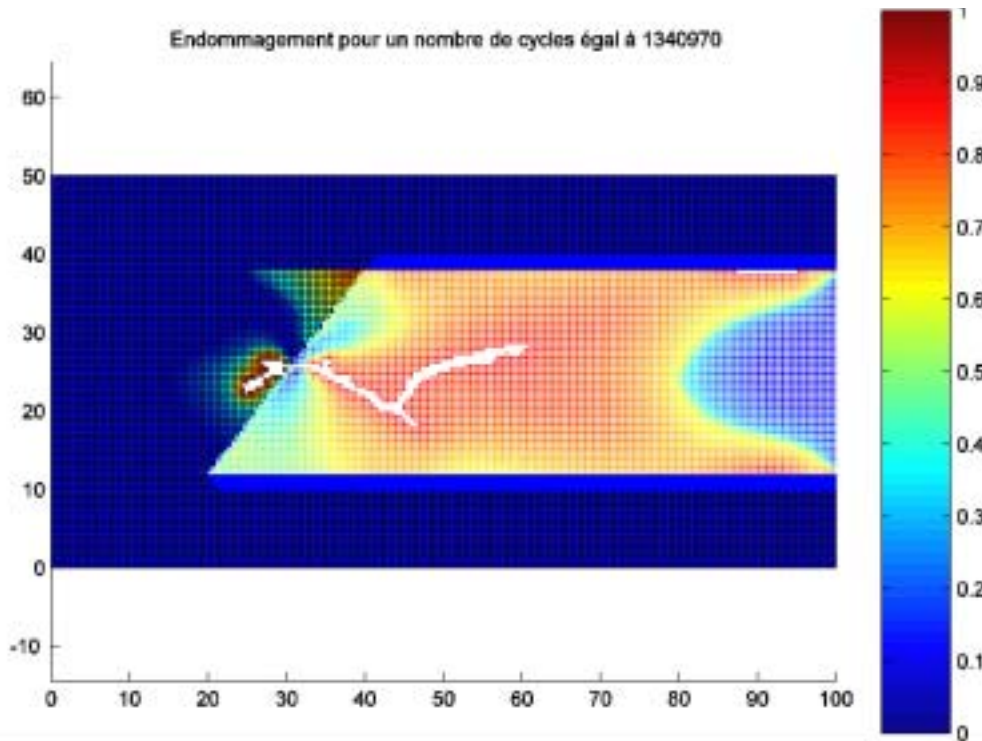


FIGURE 5-12 *Endommagement par fatigue d'une structure élastomérique hétérogène*

---

## *C - Calcul et optimisation des structures*

### **C. 1 - Non-linéarités et couplages multi-physiques en optimisation structurale**

L'optimisation structurale est devenue un outil numérique incontournable dans une démarche de conception de structures complexes (géométrie, comportement mécanique ...). Les outils numériques doivent être performants en termes de coût de calcul, tout en prenant en compte de manière fine les non-linéarités des problèmes mécaniques considérés qui sont, dans les applications modernes, le plus souvent multi-physiques. Dans ce cadre, la mise au point d'outils numériques est confrontée à la nécessité de mener de front :

*B. Desmorat*

- la modélisation du problème mécanique,
- la mise au point de la méthode de résolution (par éléments finis dans les cas considérés),
- le choix d'algorithmes d'optimisation.

Les travaux menés lors de la période couverte dans ce rapport se sont articulés autour de trois thématiques.

#### ***C.1.a - Maximisation de la rigidité structurale avec prise en compte de contact unilatéral***

Dans une démarche d'optimisation topologique (positionnement de vide et de matière dans un domaine considéré), une méthodologie a été développée pour prendre en compte des conditions de contact unilatéral. L'originalité du travail réside dans une formulation continue (en opposition à discrétisée) simultanée du modèle mécanique avec contact unilatéral et du problème d'optimisation. L'algorithme d'optimisation découlant de cette formulation est numériquement performant car il utilise un maillage fixe et des calculs de sensibilité locaux (en utilisant des paramètres d'optimisation distribués). Cet algorithme repose sur une étude préalable qui permet, en utilisant le concept de potentiel thermodynamique positivement homogène, d'étendre l'algorithme des directions alternées, initialement introduit en élasticité linéaire (Allaire et al. 1993), à la prise en compte de lois de comportement élastiques non linéaires.

La démarche développée est toutefois limitée à une géométrie de la zone de contact prédéfinie et fixée, et n'introduit aucune contrainte sur la pression de contact (maximale ou homogène sur la zone de contact). Ces deux aspects seront pris en compte ultérieurement.

### *C.1.b - Maximisation de la durée de vie en fatigue d'une structure élasto-plastique endommageable*

La maximisation de la durée de vie en fatigue oligocyclique d'une structure élasto-plastique endommageable a été rendue possible par la définition d'un problème mécanique original, pour rendre compte du comportement d'une telle structure en régime d'accommodation. Le problème mécanique introduit est similaire à un problème d'élasticité non-linéaire basé sur l'utilisation des amplitudes de contrainte et de déformation totale. Cette formulation permet, à l'aide d'un calcul par éléments finis élastique non-linéaire, de déterminer les amplitudes de contrainte et de déformation totale au sein d'une structure sous chargement cyclique, sans avoir à calculer de manière incrémentale la réponse élasto-plastique de la structure. Cette formulation est à la base d'un problème d'optimisation topologique défini à l'aide des potentiels thermodynamiques du problème d'élasticité non-linéaire, qui permet de maximiser la durée de vie en fatigue calculée à partir de la loi d'endommagement de Lemaître.

Cette démarche d'optimisation, maintenant validée en optimisation topologique avec prise en compte de matériaux homogènes isotropes, sera généralisée pour prendre en compte des matériaux hétérogènes anisotropes. Les applications visées sont l'optimisation de la répartition des renforts au sein de matériaux composites métal-métal par exemple. Une autre direction de recherche sera l'optimisation de la durée de vie en fatigue vis-à-vis de la forme de trous au sein d'une structure.

### *C.1.c - Maximisation de la rigidité structurale avec prise en compte de contraintes thermiques*

Dans le but d'appliquer une démarche d'optimisation topologique à une structure soumise à un chargement thermo-mécanique, la formulation du problème d'optimisation de la rigidité structurale a été étendue aux comportements élastiques avec prise en compte de contraintes initiales, dont la thermo-élasticité faiblement couplée est un cas particulier. L'optimisation de l'orientation des renforts d'un matériau composite à fibres longues curvilignes a été réalisée, avec cependant une limitation liée à une hypothèse d'indépendance du champ de température vis-à-vis des paramètres d'optimisation. Cette limitation est encore plus stricte dans le cas de l'optimisation topologique, car le seul cas entrant dans ce cadre est celui d'un champ de température homogène.

La suite de l'étude portera sur l'extension de cet algorithme d'optimisation à un chargement thermique quelconque induisant un champ de température non homogène et dépendant des paramètres d'optimisation. La difficulté majeure réside dans la perte de la propriété de localité des calculs de sensibilité. Le calcul de sensibilité devient global sur toute la structure, via le problème de thermique.

### C.1.d - Autres thèmes en cours d'étude

Enfin, la prise en compte d'une non-linéarité de comportement de type viscoélastique dans une démarche d'optimisation structurale est à l'étude, ainsi que le cas multi-physique de l'optimisation structurale, avec prise en compte du couplage de comportements élastique et piézo-électrique.

## C. 2 - La méthode polaire-génétique en conception et optimisation de structures et de matériaux « structurés » : anisotropie et couplages multi-physiques

### c.2.a - La méthode polaire en conception optimale de matériaux « structurés » : anisotropie et couplages multi-physiques

Angela Vincenti  
et collaborateurs

L'anisotropie des matériaux « structurés » (par exemple, les composites stratifiés à fibres longues) est une des difficultés majeures dans la description de leur comportement, à cause des outils mathématiques classiquement utilisés, qui sont basés sur une représentation cartésienne des tenseurs de déformations, de contraintes, de rigidité, etc. Une avancée importante dans la représentation de l'anisotropie en élasticité repose sur l'utilisation des invariants des tenseurs, et cela se révèle un élément crucial quand ces invariants ont une signification physique claire, comme c'est le cas pour la méthode polaire. Élaboré par Georges Verchery en utilisant un changement de variable dans le plan complexe du type de celui introduit par Green et Zerna, la méthode polaire a été appliquée d'abord à la représentation des tenseurs de l'élasticité plane dans la description du comportement des composites stratifiés.

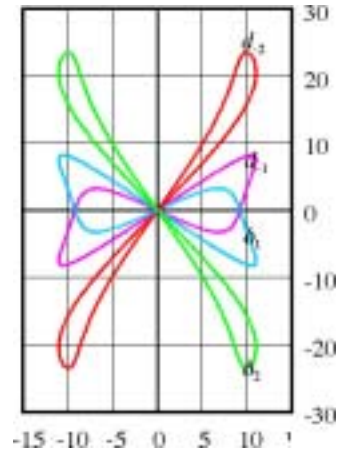


FIGURE 5-13  
Graphique des solutions au problème de la quasi-homogénéité de stratifiés composites à 6 couches ayant la symétrie du carré

Les composantes polaires permettent une interprétation claire des symétries élastiques. Un travail est en cours pour l'approfondissement de l'analyse de ces propriétés de symétrie et pour la comparaison entre la méthode polaire et des méthodes classiques de décomposition tensorielle (collaboration avec Nestor Zouain, Universidade Federal de Rio de Janeiro – Brésil). Les objectifs sont d'une part de mettre en valeur l'efficacité de la représentation polaire, et de pouvoir étendre son application au-delà du cadre de l'élasticité bidimensionnelle.

Grâce à son efficacité et à sa simplicité dans la description de l'anisotropie, la méthode polaire a trouvé une application importante pour la formulation des problèmes de conception des symétries élastiques des composites stratifiés (travaux de A. Vincenti en collaboration avec P. Vannucci, Université de Versailles). Pour la première fois, une formulation

unique et générale de ces problèmes a été proposée sous la forme d'un problème d'optimisation mono-objectif et sans contraintes, où les variables d'optimisation sont tous les paramètres constitutifs d'un stratifié (nombre des couches, matériau et orientation de chaque couche). L'approche adoptée est très innovatrice, et cela pour plusieurs raisons : d'abord, parce qu'elle permet de s'affranchir de toute hypothèse simplificatrice et de traiter les problèmes de conception des stratifiés dans la plus grande généralité, en prenant en compte plusieurs critères simultanément et au même titre, et spécialement des critères qui ne pouvaient pas être exprimés dans le cadre des méthodes classiques de représentation des tenseurs. Cela a donc permis de proposer des nouvelles solutions à ces problèmes. Ensuite, l'approche proposée en termes d'un problème d'optimisation ouvre la voie à l'intégration de nouveaux critères de conception des stratifiés, qui peuvent se rajouter à la formulation originale sous la forme de nouvelles fonctions objectifs ou de contraintes de l'optimisation. La formulation des problèmes de conception optimale des stratifiés donne finalement lieu à des problèmes d'optimisation mono- ou multi-objectif, avec ou sans contraintes, fortement non linéaires et non convexes, régis par un grand nombre de variables de nature variée (continues, discrètes et/ou groupées).

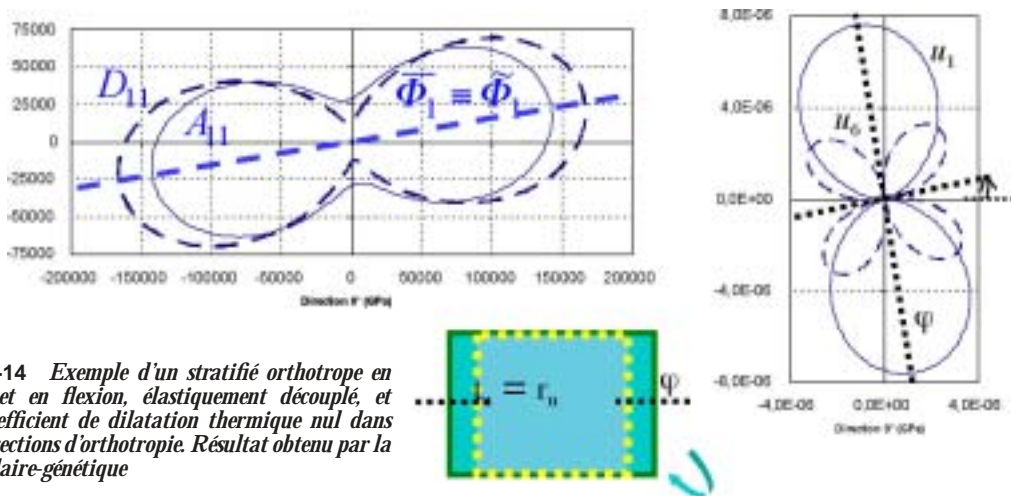


FIGURE 5-14 Exemple d'un stratifié orthotrope en membrane et en flexion, élastiquement découplé, et ayant le coefficient de dilatation thermique nul dans l'une des directions d'orthotropie. Résultat obtenu par la méthode polaire-génétique

De cette manière, on peut traiter la conception des stratifiés aux états limites (maximisation de la résistance à la rupture ou de la charge critique de flambage) et/ou le dimensionnement de leur rigidité (maximisation du module d'Young en membrane et/ou en flexion), le respect de conditions de symétries élastiques étant introduit comme une contrainte de l'optimisation (travaux de thèse de M. R. Ahmadian, dirigés par P. Vannucci et A. Vincenti).

En perspective, de nouveaux critères peuvent être recherchés afin de pouvoir envisager une conception globale des stratifiés, tels que la résistance à l'endommagement, la minimisation du poids, mais aussi l'optimisation des propriétés dynamiques, comme par exemple la maximisation des fréquences propres.

En plus des propriétés élastiques, la méthode polaire a aussi été appliquée à la représentation du comportement thermo-élastique et piézo-élastique des stratifiés (travaux de A. Vincenti en collaboration avec P. Vannucci), ouvrant ainsi la voie à la conception des composites dans un cadre multi-physique. Les problèmes traités et résolus jusqu'à présent portent sur la recherche de stratifications optimales vis-à-vis du comportement thermo-élastique (isotropie de la dilatation, stabilité dimensionnelle) et du comportement piézo-élastique (isotropie de la déformation, stabilité dimensionnelle en présence d'actuateurs piézo-électriques).

Les compétences développées en conception de l'anisotropie des composites stratifiés peuvent être mises au service d'applications industrielles ou académiques, comme c'est le cas dans le dimensionnement à la rigidité d'une table d'harmonie de piano réalisée en matériau composite renforcé en fibre de carbone (collaboration avec C. Besnainou, équipe LAM).

### *c.2.b - Mise en œuvre de méthodes numériques performantes en optimisation : l'algorithme génétique BIANCA*

À l'origine, le développement de l'algorithme génétique BIANCA a été spécialement dédié au traitement des problèmes de conception optimale de composites stratifiés (travaux de A. Vincenti en collaboration avec P. Vannucci, Université de Versailles), qui sont des problèmes d'optimisation fortement non linéaires et non-convexes, dépendant d'un grand nombre de variables de différentes natures (réelles et continues, discrètes et/ou groupées). L'architecture de BIANCA et les stratégies mises en place sont donc inspirées par la nécessité de disposer d'un outil robuste et fiable pour la résolution de ces problèmes d'optimisation très délicats.

Ensuite, l'exigence a été d'étendre et d'enrichir la structure de BIANCA, de sorte à pouvoir appliquer cette méthode très performante au cas de problèmes mono- ou multi-objectif, avec ou sans contraintes, etc. Une nouvelle version de l'algorithme génétique BIANCA a été conçue et réalisée dans le cadre de la thèse de M. R. Ahmadian (thèse co-dirigée par P. Vannucci et A. Vincenti). BIANCA est maintenant un cluster d'algorithmes génétiques, pouvant fonctionner selon diverses combinaisons de stratégies d'optimisation. Les principaux points de nouveauté et d'originalité dans BIANCA sont:

- l'enrichissement de la représentation de l'information selon la métaphore biologique (population, individus, chromosomes, gènes) pour améliorer et étendre les performances de l'algorithme, en vue de l'application à des problèmes comportant un grand nombre de variables ;
- la création de stratégies de résolution performantes pour le traitement de divers types de problèmes d'optimisation : mono- ou multi-objectif, avec ou sans contraintes, etc.

En perspective, et bien au-delà du cadre de la conception optimale des composites, BIANCA est conçu pour être un outil applicable de manière générale aux problèmes d'optimisation en mécanique. Dans ce sens, le point-clef sera le couplage de l'algorithme génétique BIANCA avec des codes de calcul de structures par éléments finis.

### C. 3 - Optimisation de structures minces renforcées

*F. Léné,  
N. Turbé,  
G. Duvaut  
et collaborateurs*

Cette opération de recherche concerne essentiellement l'optimisation de structures composites minces renforcées pour lesquelles se posent les problèmes du nombre, de la position, de la nature des renforts eu égard à l'utilisation et aux conditions de fonctionnement de ces structures.

#### *C.3.a - Optimisation de structures composites à fibres longues*

Des progrès récents dans le domaine de la fabrication permettent d'envisager la réalisation de structures composites à renforts curvilignes et taux volumiques variables. Il devient alors essentiel de déterminer avec précision quels sont, en chaque point, l'orientation et le taux de fibres optimaux, c'est-à-dire ceux qui minimisent une fonctionnelle constituée de la souplesse de la structure, mesurée par le travail des forces extérieures dans le déplacement solution, et d'une fonction du volume de fibre utilisé représentant à la fois le surcoût pondéral et financier dû à l'inclusion des fibres.

La méthode proposée est originale. Elle repose sur les formulations variationnelles du problème d'élasticité et peut s'appliquer à des structures bi ou tridimensionnelles. L'algorithme de minimisation procède en deux étapes : une étape locale et une étape globale, et converge très rapidement en un nombre réduit d'itérations. La méthode a été appliquée à des structures bidimensionnelles en déformations ou contraintes planes, avec ou sans trous, ainsi qu'à des structures de type coques élastiques. Elle a été menée dans le cadre d'une collaboration tripartite regroupant l'ONERA et la Société Aérospatiale, avec un financement des services techniques du Ministère de la Défense

#### *C.3.b - Aide à la conception des voiles de bateaux*

L'étude entreprise sur ce thème, initiée par une collaboration avec l'IFREMER et la voileirie « Incidences », a pour objectif d'élaborer des techniques visant à optimiser la qualité et les performances des voiles de bateau. Elle a donné lieu, dans un premier temps, à la thèse de Vanessa BOHE (soutenue en décembre 2003). Ce travail a eu pour but d'apporter des solutions concrètes, dans une démarche associant étroitement l'expérience et les outils numériques. C'est ainsi qu'ont été menées une revue des matériaux utilisés, la réalisation de tests sur des échantillons de tissus, des mesures de viscoélasticité avec balayages en température, etc... Lors de sorties en mer, des mesures de déformation des voiles ont pu être corrélées aux efforts mesurés par des capteurs. Ces données expérimentales ont été comparées à des résultats de calcul, visant à aboutir à une modélisation aussi fiable que possible de ces phénomènes.

Simultanément, des recherches à caractère plus théorique ont été entreprises dans le cadre de la thèse de doctorat de Mirela SPALATELU-LAZAR. L'objet de l'étude a été la grand-voile, modélisée par une membrane flexible soumise, sous l'action du vent, à de grands déplacements et petites déformations. Le problème mathématique non linéaire associé a

été formulé et son a-dimensionalisation a mis en évidence la présence d'un petit paramètre (rapport pression exercée/coefficients d'élasticité des matériaux utilisés). Une étude asymptotique a permis d'établir l'existence d'une solution pour les petites valeurs de ce paramètre et la mise en place d'une résolution numérique (sous MATLAB) par une méthode itérative de type Newton-Raphson modifiée a été effectuée.

Le problème d'optimisation posé concerne la déformation dans le sens transverse de la voile, associée à un facteur coût. Les paramètres de conception sont ceux qui entrent dans la fabrication de la voile. Traditionnellement, la présence de zones à fortes contraintes conduit le maître voilier à découper la voile en panneaux, chacun d'eux étant constitué d'un tissu formé de fibres longues, d'orientation constante. Plus récemment, de nouvelles techniques permettent l'arrangement des fibres, ajustant orientation et proportion, sur un seul tissu. De plus, pour renforcer la voile aux points critiques, la proportion des fibres dans la matrice peut être modulée. Ceci nous a conduit à choisir comme paramètres de conception l'orientation et le taux de fibres en chaque point de la voile.

L'algorithme d'optimisation choisi (d'ordre zéro) converge vite et fournit des résultats en très bonne cohérence avec l'expérience.

### c.3.c - *Optimisation et dimensionnement au flambage de coques composites raidies*

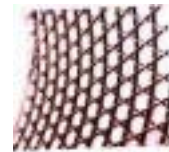
Une première étude concerne les structures en forme de treillis (ou « lattice structures ») qui constituent une alternative avantageuse aux structures métalliques classiques. Réalisées souvent en matériaux composites, elles offrent par rapport à ces dernières des caractéristiques très intéressantes: grande rigidité pour un poids faible, grande aptitude à réaliser des formes données, bonne adaptation des propriétés mécaniques aux besoins, bonne aptitude à supporter des environnements divers.....

Deux thèses (E. PROIA et A. NOUREDINE) ont été soutenues dans l'équipe fin 2004 et des résultats très significatifs ont été obtenus concernant la modélisation et l'optimisation au flambage d'une telle structure.

FIGURE 5-15 ??? Légende

On a successivement obtenu

- - le comportement de treillis composites dans lesquels les nervures de section rectangulaire comportent une partie inférieure qui joue le rôle d'actuateur et permettent de commander la déformation de la structure, plaque ou coque équivalente ;
  - - les lois de comportement qui gouvernent de telles structures, et qui font intervenir des tenseurs de contraintes non symétriques.
- Des comportements particuliers avec deux et trois séries de nervures sont explicités : on vérifie en particulier que trois séries de nervures à soixante degrés (figure ci-contre) conduisent à un comportement global isotrope ;





- - la détermination des modes de flambage local et global d'un cylindre creux, fermé à ses extrémités, dont la surface latérale est constituée d'un treillis renforcé par une peau composite, et soumis à une pression hydrostatique ;
- - le problème de l'optimisation de la masse d'une telle structure vis-à-vis du flambage, par utilisation de la méthode MMA (Method of Moving Asymptotes) introduite par SVANBERG en 1998.

Une deuxième étude est consacrée à l'étude d'un tronçon de fuselage d'avion de type AIRBUS dans l'objectif d'optimiser sa conception vis-à-vis des risques de flambage globaux et locaux. La structure est constituée d'un tronçon de cylindre circulaire renforcé de membrures circulaires et longitudinales dont les caractéristiques mécaniques font partie des variables d'optimisation, ainsi que les caractéristiques du stratifié constituant le fuselage sous divers chargements simples tels que flexion pure, torsion, ou chargements plus complexes combinant flexion et torsion. Elle est menée dans le cadre de la thèse de Doctorat de M. OLIVIER-MAILHE. en collaboration avec AIRBUS

Une analyse statique linéaire et une étude de flambage ont été menées puis les résultats obtenus ont été exploités pour déterminer la fiabilité de la conception de ces cylindres en prenant en compte une certaine dispersion des paramètres de conception : différents types d'empilement, épaisseur totale, position des renforts, chargement, caractéristiques matériaux. Les critères de dimensionnement retenus pour l'analyse de fiabilité sont des critères métiers usuels dans le dimensionnement des structures aéronautiques : charge limite de flambage, réparabilité et tolérance aux dommages pris en compte par l'intermédiaire d'une déformation maximale admissible sur chaque pli. L'approximation de la charge critique par la méthode des surfaces de réponse permet une étude statistique qui aboutit à la détermination de la probabilité de défaillance.

Actuellement, l'analyse est reprise en tenant compte des ouvertures indispensables du fuselage : hublots et portes. Afin de rendre cette recherche facilement exploitable par l'industrie, les développements logiciels sont conduits avec le code SAMCEF.

#### **C. 4 - Conception optimale de structures composites stratifiées avec prise en compte de contraintes de faisabilité**

*F. Léné,  
A. Vincenti,  
B. Desmorat*

Dans le cadre de la conception de pièces composites stratifiées, la principale difficulté réside dans le passage entre le problème de conception du stratifié au niveau local (c'est-à-dire avec des paramètres d'optimisation définis par couche) et l'optimisation de la structure au niveau global (c'est-à-dire avec des paramètres définis en chaque point de la surface moyenne de la plaque ou de la coque considérée). Ce passage repose sur le choix d'une représentation appropriée des équations exprimant le comportement d'un composite stratifié.

Le projet de recherche, qui est mené avec les thèses CIFRE de Cédric Julien et Ali Jibawy en collaboration avec l'entreprise SEGULA Aerospace, vise le développement d'une

méthodologie et d'outils numériques pour la conception de structures composites stratifiées constituées de plaques ou coques, renforcées par des fibres longues d'orientation variable dans chaque couche de la stratification.

La démarche intègre la prise en compte de critères globaux et locaux : au niveau de la structure dans sa globalité, le problème de conception est formulé comme l'optimisation d'un critère, tel que la minimisation de la masse ou la maximisation de la rigidité ; au niveau local, le problème de conception est la recherche de la stratification optimale point par point dans la structure. Le résultat est la définition des paramètres constitutifs du matériau multicouche à orientations variables, directement utiles à la fabrication.

La clef permettant le passage du problème d'optimisation au niveau global (structure) à celui au niveau local (stratification) est le choix de la représentation polaire pour la description du comportement des stratifiés. Cela représente un point de nouveauté important, puisque pour la première fois, l'application de la méthode polaire de représentation de l'élasticité est couplée à des méthodes d'optimisation topologiques. Ce couplage est potentiellement porteur d'avancées significatives dans le domaine de la conception des structures composites multicouches.

## C. 5 - Couplages multiphysiques dans les turboréacteurs de nouvelle génération

Dans le cadre du financement BQR 2006 de l'UPMC, des activités de recherche ont débuté sur l'interaction fluide-structure dans les aubages de soufflantes transsoniques des turboréacteurs (collaboration entre Angela Vincenti et Boris Desmorat de l'équipe MISES, et Jean-Camille Chassaing de l'équipe FRT). L'objectif est le développement d'une méthodologie de conception et optimisation aéromécanique d'aubage en tenant compte de facteurs multi-physiques dans le dimensionnement (prise en compte de la déformation de la structure sous différents types de chargements lors de son optimisation aérodynamique).

*A. Vincenti,  
B. Desmorat et  
collaborateurs*

Pour cela, une méthode directe de calcul a été développée permettant de déterminer la déformée des aubages de forme complexe sous l'effet combiné des forces centrifuges, des champs thermiques et des charges aérodynamiques en divers points de fonctionnement. Cette méthode est basée sur le couplage entre un solveur aérodynamique RANS 3-D et des outils pour les calculs non-linéaires de structure développés dans le code de calcul CASTEM.

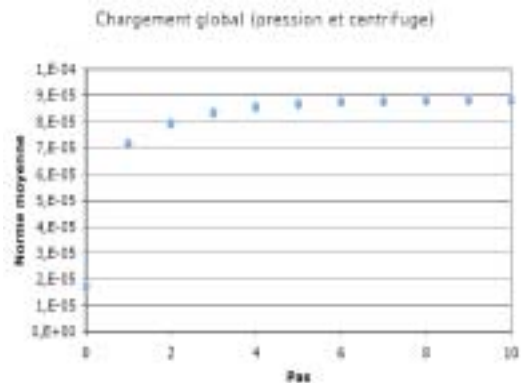
Le solveur aéromécanique ainsi mis en place peut être appliqué à la résolution de la phase inverse, c'est-à-dire le calcul de la géométrie à froid d'une soufflante à partir de la géométrie de fonctionnement, qui est la véritable phase de conception des aubages. Cette étape du processus de conception est en cours de validation par des calculs sur des configurations réelles d'aubes de soufflante.

Une extension envisagée de ces travaux est l'étude dynamique de la structure, pour permettre la prédiction des instabilités aéroélastiques telles que le flottement, et ouvrir donc la voie à la conception des aubes vis-à-vis du comportement dynamique.

Cette approche de la conception des aubes est globale au sens de l'introduction de critères structuraux à côté des objectifs de performances aérodynamiques, et elle peut conduire à l'optimisation de la forme des différentes parties de la structure jusqu'à ses composantes fondamentales que sont les matériaux de construction. En fait, l'utilisation de matériaux composites, déjà présents dans certaines parties des turboréacteurs actuels, ouvre une nouvelle voie à la construction de structures adaptatives par l'exploitation des propriétés d'anisotropie et des couplages physiques de ces matériaux.



**FIGURE 5-16** Convergence du calcul itératif inverse pour la détermination de la géométrie à froid d'une aube de soufflante à partir de la géométrie en un point de fonctionnement



## C. 6 - Nano composites et nano structures

*F. Léné,  
G. Duvaut et  
collaborateurs*

Cette thématique a été initiée dans le cadre d'une collaboration avec le professeur DZENIS (Université du Nebraska) lors de son séjour d'un mois au LM2S en tant que professeur invité par Paris 6 (juin 2004). Elle s'est vue renforcée par un accord de coopération Franco/Sud-Africain CNRS/NRF entre l'Université du Kwazulu-Natal à DURBAN (Afrique du Sud) et le LM2S, accepté en septembre 2005.

Les thématiques de recherche que nous avons abordées durant cette année de collaboration font l'objet d'un rapport qui présente une étude à caractère bibliographique, un résumé sur les propriétés des nanotubes de carbone, les méthodes de production des nanotubes et d'analyse de ces matériaux. Les difficultés de modélisation et de calcul sont discutées et laissent apparaître que contrairement aux approches utilisant la mécanique moléculaire, les modèles continus sont efficaces pour l'étude de systèmes constitués de nanotubes de carbone de grande dimension.

L'approche que nous avons entreprise utilise majoritairement la modélisation milieux continus et concerne les problèmes de vibrations et de flambage de nano structures de type poutre constituées de nanotubes de carbone de type SWNT ou MWNT (Single or Multiwall Carbon Nanotubes) qui surgissent lors de la réalisation de matériaux ou de disposi-

tifs à l'échelle nanométrique. Citons, par exemple, la pointe d'un microscope à force atomique, les nanotubes intervenant comme détecteurs de déformations.

Afin de prendre en compte les effets de taille dans ces nano structures, nous avons choisi d'utiliser des modèles d'élasticité non locale (introduits initialement par ERINGEN) de manière à être capable de prédire le comportement du nanotube en flexion et au flambage ainsi que son comportement vibratoire sous chargement axial.

Si les résultats obtenus sont encourageants et permettent de mettre en évidence des effets d'échelles, des confrontations expérimentales sont à réaliser pour valider le modèle.

### C. 7 - Propriétés amortissantes des structures comportant des éléments viscoélastiques

C'est à partir d'un problème industriel abordé antérieurement (optimiser les capacités amortissantes de tôles-sandwich acier-polymère-acier en vue d'aider à leur conception) que P. Muller s'est intéressé aux caractéristiques vibratoires des structures comportant des éléments viscoélastiques, ce qui a conduit à travailler, dans le domaine fréquentiel, sur la résolution de systèmes prenant la forme classique :

*P. Muller*

$$\left[ -\omega^2 \underline{M} + \underline{K}^*(\omega) \right] \underline{X}(\omega) = \underline{f}_0$$
 mais où  $\underline{K}^*(\omega)$  est une matrice complexe dépendant de la pulsation.

Il s'est rapidement avéré qu'un certain nombre de problèmes que l'on aurait pu croire résolus depuis longtemps n'ont été abordés que tout récemment (depuis l'an 2000), notamment grâce aux nombreuses publications de Sondipon Adhikari et al. (Université de Bristol, G.-B.).

On a donc commencé par s'intéresser aux mouvements propres d'un système masse-ressort à un degré de liberté où le comportement du ressort, viscoélastique, est représenté par un modèle rhéologique à  $2n+1$  paramètres introduisant  $n$  temps de relaxation. On a pu établir qu'un tel système comporte  $n+2$  mouvements propres : en plus des deux mouvements que l'on trouve dans un système masse-ressort-amortisseur visqueux (avec amortissement soit sous-critique soit sur-critique), on met en évidence  $n$  mouvements avec amortissement sur-critique dont les temps de décroissance « structuraux » viennent s'intercaler entre les temps de relaxation « rhéologiques ». Ceci permet de préciser les conditions pour qu'un tel système soit *lourdement amorti*, c'est-à-dire que tous ses mouvements propres aient un amortissement sur-critique.

L'étape suivante, plus ambitieuse, consiste bien sûr à aborder l'étude de systèmes à  $N$  degrés de liberté comportant  $M$  éléments viscoélastiques représentés par des modèles rhéologiques à  $2n_i+1$  paramètres ( $i=1,\dots,M$ ), afin d'en inventorier les mouvements propres en vue d'aider à la conception de systèmes lourdement amortis.

## *D - Structures élancées*

### D. 1 - Coques minces

*E. Sanchez-Palencia  
et collaborateurs*

E. Sanchez Palencia a poursuivi ses travaux sur le comportement asymptotique (épaisseur relative tendant vers zéro) des coques élastiques. L'effort principal ces derniers temps concerne la compréhension du comportement dans le cas des coques elliptiques (les deux courbures principales ont le même signe en tout point de la surface moyenne) fixées (ou encastrées) sur une partie du bord et libres sur le reste. Ce cas, connu sous le nom de « sensitif » est extrêmement singulier, car les conditions aux limites de bord libre « ne conviennent pas » au système limite (plus précisément, ne satisfont pas à la condition classique de Shapiro - Lopatinskii). Cette condition, quand elle est satisfaite, empêche la présence de solutions de l'équation ou du système sinusoidales le long du bord et exponentiellement décroissantes vers l'intérieur du domaine, avec données nulles.

En fait, le comportement asymptotique exhibe de telles oscillations, qui apparaissent petit à petit lorsque l'épaisseur relative diminue, et dont la limite est extrêmement singulière, sortant de l'espace des distributions. Pour cette raison, l'étude de ces problèmes sort du cadre habituel des équations aux dérivées partielles, et est pratiquement inconnu. L'élaboration de la théorie correspondante se fait en collaboration avec l'éminent mathématicien Y. V. Egorov (Toulouse), et avec le concours de N. Meunier, post-doc récemment nommé Maître de Conférences à Paris V. Des calculs numériques très fins sont effectués avec des méthodes de maillage adaptatif développées initialement pour le calcul d'écoulements fluides présentant des couches de choc à l'INRIA. Ces calculs sont effectués par F. Béchet (thésard à Lille) et O. Millet (professeur à La Rochelle).

### D. 2 - Rupture des tiges et plaques

*B. Audoly,  
collaboration  
S. Neukirch*

#### *D.2.a - Rupture des films minces fragiles*

Lorsqu'un film mince fragile (mais suffisamment souple pour pouvoir se courber sans rompre) est déchiré au moyen d'un outil de taille grande devant son épaisseur, on obtient de manière générique des motifs de fissure complexes : le chemin de fissure n'est pas rectiligne mais oscillant, sans pour autant être sinusoidal, la fissure décrit une forme faite d'« ailerons de requins » assemblés. En lien avec les expériences de B. Roman et P. Reis (PMMH, ESPCI), nous avons développé un modèle géométrique fondé sur l'élasticité des plaques qui rend compte des caractéristiques du chemin de fissure et notamment de l'alternance de points anguleux et d'arrondis, d'épisodes de propagation dynamique et quasi-statique.

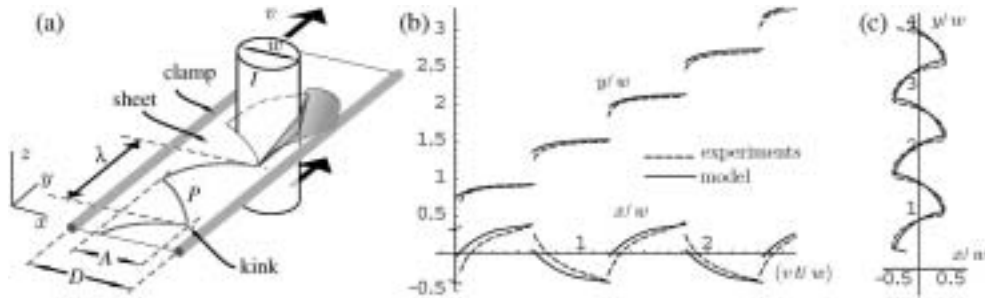


FIGURE 5-17 (a) Schéma de rupture d'un film mince fragile tenu par ses côtés longs au moyen d'un outil de taille grande devant l'épaisseur. Prédiction de notre modèle géométrique concernant (b) l'évolution de la fissure au cours du temps et (c) le chemin de fissure à l'issue de l'expérience

#### D.2.b - Rupture multiple des tiges

Nous avons étudié la rupture des tiges élastiques fléchies dans le but d'expliquer les phénomènes de rupture multiples observés dans les tiges fragiles. Nous avons montré qu'un train d'ondes de sur-courbure était émis à la suite du premier événement de rupture, et que c'était ces ondes qui déclenchaient les ruptures secondaires, menant à la fragmentation par un phénomène de cascade. Nous avons mené nous-mêmes une série d'expériences sur des spaghettis crus pour valider notre modèle.

#### D.2.c - Simulateur mécaniquement réaliste de chevelures

Le mouvement d'une chevelure est un phénomène d'une grande complexité du fait du nombre élevé de fibres mises en jeu (de l'ordre de 105) et des interactions entre fibres. La modélisation en est peu avancée, alors qu'il existe une demande importante de simulations réalistes de chevelures de la part des professionnels du secteur des loisirs numériques : dans les environnements virtuels peuplés de personnages de synthèse, la représentation et l'animation de cheveux sont essentiels si l'on souhaite générer des scènes réalistes ; dans les productions cinématographiques, les chevelures de personnages virtuels sont encore assez simplistes aujourd'hui.

Au terme d'une collaboration pluridisciplinaire (modélisation mécanique et calcul numérique, informatique graphique, science capillaire) menée en partenariat avec le projet EVA-SION (INRIA) et L'Oréal sur plusieurs années, nous avons mis au point un simulateur capable de simuler de manière réaliste le mouvement de chevelures, pour des mouvements arbitraires du personnage, et pour un type de coiffure facilement paramétrable par l'utilisateur. Ce simulateur est fondé sur l'intégration numérique des équations des tiges élastiques dues à Kirchhoff, tout en répondant aux contraintes de temps de calcul usuelles en production cinématographique. Les équations de Kirchhoff donnant lieu génériquement à des

schémas de calcul numériquement raides, nous avons dû mettre au point un schéma numérique original, fondé sur la formulation lagrangienne des équations pour les tiges élastiques.

Ce travail a fait l'objet de 2 brevets déposés par le CNRS au nom des partenaires du projet. Des demandes de financement ont été déposées pour nous permettre d'aborder l'industrialisation de ce projet.

Nous avons récemment initié une collaboration avec Columbia University (New York) afin de développer les méthodes numériques pour la simulation des tiges élastiques.



FIGURE 5-18 *Images extraites d'un film comparant le mouvement réel et la simulation d'un mouvement de tête oscillant, dans le cas de cheveux raides mi-longs*

#### D.2.d - Mécanique de l'ADN

Dans le cadre de la thèse de N. Clauvelin (co-encadrée par B. Audoly et S. Neukirch), nous avons étudié la réponse de l'ADN soumis à une torsion. Une étude mécanique des plectonèmes, structures obtenues dans les tiges élastiques pour les fortes valeurs de la torsion appliquée, nous a permis d'interpréter les courbes expérimentales de réponse d'une molécule unique, et d'en extraire les propriétés mécaniques du double brin d'ADN en solution. Pour plus de détails, nous renvoyons à la contribution de S. Neukirch (équipe MPIA) à ce rapport.

Nous travaillons actuellement à l'étude d'un autre type de structures rencontrées dans les filaments biologiques, à savoir les nœuds, dont nous cherchons à décrire le comportement élastique.

## D. 3 - Vibrations non linéaires et précontraintes: application à la modélisation des instruments de musique

### D.3.a - *Problématique*

*J. Frelat et  
collaborateurs*

En liaison avec le groupe « LAM », et en partie pour les aspects expérimentaux avec le groupe « MPIA », nous étudions les effets de précontraintes introduites dans les tables d'harmonie de certains instruments de musique sur les effets sonores. L'évolution de la fabrication des instruments de musique à table d'harmonie montre que la charge des cordes a conditionné la mise en place de techniques conduisant à mettre en précontrainte les tables, afin de supporter l'accroissement de la charge.

Habituellement, la table d'harmonie est considérée comme un simple filtre linéaire destiné à augmenter le rayonnement sonore. Le point de vue développé dans les travaux menés est de chercher à montrer, à partir de modèles assez simples, que l'introduction par les facteurs de contraintes initiales permet un fonctionnement ajustable des tables, pouvant aller jusqu'à l'apparition de distorsions harmoniques modifiant le rayonnement acoustique.

### D.3.b - *Modèles étudiés*

A partir d'un modèle à un degré de liberté (système de deux barres), nous avons pu mettre en évidence, en étudiant analytiquement les vibrations non-linéaires de ce système, quelques propriétés intéressantes. Ce type d'étude a ensuite été étendu aux vibrations d'une poutre précontrainte selon sa fibre moyenne et chargée statiquement transversalement, en utilisant une projection sur base modale (linéaire) pour laquelle les mêmes propriétés (back-bone curves et enrichissement spectral) ont été mises en évidence. Ce cas a aussi été étudié numériquement afin de valider l'approximation par projection sur base modale réduite.

Enfin, le cas d'une plaque initialement courbée et chargée transversalement (représentant approximativement le chevalet) a été étudié numériquement. En identifiant une réponse statique non-linéaire de cette plaque, la réponse vibratoire non-linéaire peut être modélisée simplement.

Validation expérimentale. Une plaque de bois a été testée dans les conditions modélisées ci-dessus. La validation du point de vue postulé initialement sera faite très prochainement grâce à une étude expérimentale du son rayonné. Cette étude sera réalisée en faisant vibrer, sous la sollicitation d'une corde, cette pseudo-table, placée dans des champs de contraintes initiales différents.

Collaboration associée. Dans le même cadre de la modélisation des instruments de musique, une collaboration est développée avec le Musée de la Musique pour modéliser une vihuela et un clavecin du XVII<sup>e</sup> siècle, en vue dans le premier cas de la conservation de l'instrument, et dans le second de la création d'un fac-similé présentant des propriétés acoustiques proches de celles de l'instrument original.



## *E - Comportement et endommagement des matériaux*

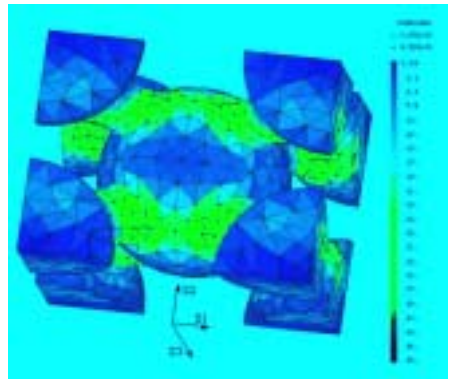
### **E. 1 - Approches multi-échelles pour le comportement et l'endommagement de milieux hétérogènes**

*A. Benhamida,  
H. Dumontet et  
collaborateurs*

Différents travaux visent à étendre le champ d'application des méthodes d'homogénéisation, qu'il s'agisse d'approches simplifiées ou bien numériques, aux comportements non-linéaires aux milieux fortement contrastés. Ces développements sont appliqués à la prédiction du comportement et de l'endommagement de matériaux composites et de géomatériaux exposés à des environnements sévères de fortes pressions (immersion en milieu marin) ou encore de très hautes ou basses températures (incendie, gel).

#### *E.1.a - Homogénéisation simplifiée itérative*

Pour prédire simplement le comportement de milieux hétérogènes présentant des phases de comportement très contrasté ou de géométrie dispersée, A. Benhamida et H. Dumontet développent avec A. Brini, R. Zouari-Trabelsi et S. Smaoui (doctorants) une approche itérative d'homogénéisation. Cette approche est basée sur des homogénéisations successives de milieux intermédiaires formés par ajouts progressifs des hétérogénéités en faible proportion. À convergence, le processus itératif conduit à un même comportement équivalent du milieu hétérogène, quelle que soit la méthode d'homogénéisation explicite adoptée à chaque étape, le taux de renforts du milieu ou encore le contraste des phases. Ce résultat permet d'unifier les prédictions des différents schémas linéaires explicites de la littérature qui concordent habituellement seulement pour des milieux peu dispersés, et permet également de corriger l'étape de localisation, donnant ainsi accès à des contraintes exploitables dans des critères locaux de rupture.



**FIGURE 5-19** Localisation des microcontraintes dans un sable injecté

Une première application de cette approche, menée dans le cadre d'une collaboration avec l'IFP et des thèses de A. Brini et R. Zouari-Trabelsi, concerne la prédiction du comportement à long terme de mousses syntactiques utilisées pour l'isolation de pipes-lines immergés. La prise en compte de la dispersion granulométrique des microballons dans le processus d'homogénéisation et de localisation permet de simuler la dégradation progres-

sive des renforts les plus fragiles sous l'effet conjoint de fortes pressions et de la corrosion par absorption d'humidité.

Une seconde application a été menée dans le cadre d'une collaboration avec I. Djeran-Maigre de l'INSA de Lyon et de la thèse de S. Smaoui consacrée à la modélisation du comportement hydromécanique de milieux poreux non-linéaires. L'approche itérative d'homogénéisation est étendue au domaine non-linéaire en procédant à des linéarisations sécantes du comportement des squelettes, et des résultats de convergence sont obtenus comme dans le cas linéaire. Cette démarche a été appliquée en élastoplasticité pour simuler des essais de compaction de milieux argileux.

Les développements actuels et à venir concernent l'introduction dans l'approche itérative d'une anisotropie, en supposant par exemple des géométries ellipsoïdales des pores ou des renforts, et sur un plan plus théorique, la justification des convergences observées dans les cas linéaire et non-linéaire.

#### E.1.b - *Homogénéisations numériques*

Des méthodes d'homogénéisation numérique sont développées parallèlement et couplées à des modèles locaux d'endommagement.

L'approche des milieux périodiques est ainsi mise en œuvre par A. Benhamida, F. Bouchelaghem et H. Vu (doctorant) pour étudier le comportement d'un sol après l'injection d'un coulis destiné à en améliorer les performances hydrauliques et mécaniques. Le sol injecté est considéré comme un matériau composite constitué de grains de sable, du coulis solidifié qui relie les grains, et de zones résiduelles (porosités) qui ne sont pas atteintes par le coulis lors de l'injection. Une non-linéarité de comportement est introduite pour le coulis sous forme d'une loi élastique endommageable de Mazars. Le frottement entre les grains de sable observé expérimentalement est traduit en construisant le comportement macroscopique du sol par superposition de deux comportements macroscopiques, l'un correspondant au milieu sans frottement, l'autre homogène issu du frottement interne du sable vierge obtenu par la loi de comportement de Mohr-Coulomb modifiée. Les problèmes d'homogénéisation associés sont résolus par linéarisation sécante classique sur une période de base. La confrontation des simulations avec l'expérience montrent une concordance qualitative mais également quantitative en terme de résistance maximale du sol injecté.

Les développements menés par A. Benhamida, H. Dumontet dans le cadre d'une collaboration avec H. Boussa et G. Mounajed du CSTB et des thèses de F. Grondin, de C. Melhem et de S. Chaib, sont également d'ordre numérique et concernent le comportement thermo-hydro-mécanique de matériaux cimentaires. L'approche micromécanique repose ici sur la génération de volumes représentatifs de la microstructure qui intègrent une répartition aléatoire des granulats et des pores conforme à une granulométrie réelle. Un modèle d'endommagement qui distingue deux paramètres d'endommagement, déviatorique et sphérique, est développé à

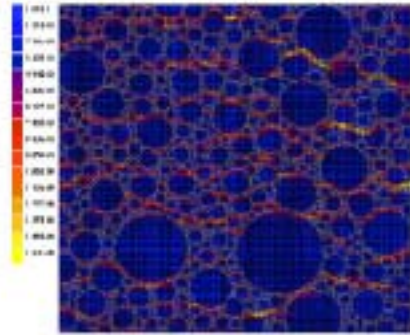


FIGURE 5-20 Localisation des flux hydrauliques dans une pâte de ciment

l'échelle microscopique pour simuler l'affaiblissement des pâtes de ciment et de bétons haute performance sous chargement couplés thermique et mécanique. L'introduction de pressions osmotique, hydraulique et hydrostatique dans les pores permet de simuler la transformation de l'eau en glace lors de la phase de gel. La localisation des flux hydrauliques et des déformations locales renseigne sur la modification du réseau poral au cours du chargement. Les développements actuels concernent l'introduction du couplage chimio-mécanique et la modélisation du mécanisme de déshydratation chimique intervenant à l'échelle de la microstructure, pouvant conduire à la dégradation du béton sous fortes températures par écaillage. Le modèle d'endommagement est par ailleurs étendu à des sollicitations alternées et appliqué à l'échelle macroscopique, cette fois pour simuler le comportement mécanique sous sollicitations sismiques de chevilles ancrées dans le béton.

## E. 2 - Endommagement et couplages multiphysiques dans les milieux hétérogènes

A. Alliche,  
F. Bouchelaghem et  
collaborateurs

L'objectif de l'axe de recherche est l'analyse et la modélisation du comportement des milieux hétérogènes soumis à diverses sollicitations mécaniques. Nous nous intéressons, par ailleurs aux effets induits par les différents couplages (mécanique, hydrique, thermique, hydraulique, physico-chimique) en utilisant une approche multi-échelles.

Nous avons développé de nombreux travaux dans ce domaine (thèses de W. OBEID, S. PASCAL, L. BUREAU, A. MALLAT (en cours)).

### E.2.a - Analyse et modélisation de l'endommagement des matériaux hétérogènes

Les milieux hétérogènes offrent des opportunités d'étude et de recherche pour de nombreuses disciplines, tant les phénomènes à appréhender sont divers et complexes.

La réponse de ces milieux aux actions extérieures dépend de la nature des différentes phases qui les composent et qui agissent aux échelles mésoscopique et microscopique, de leur caractère isotrope ou anisotrope et d'autres caractéristiques. Les matériaux à matrice cimentaire font partie de cet ensemble, et le béton constitue un matériau représentatif de ces milieux du point de vue de la structure et du comportement mécanique. Sa facilité d'élaboration, son coût et son utilisation très répandue dans les structures du génie civil font que l'on occulte souvent les phénomènes physico-chimiques et mécaniques très complexes qui régissent son comportement.

La mécanique de l'endommagement et la mécanique apportent un éclairage nouveau pour la compréhension et la prévision du comportement des milieux hétérogènes. Les lois et les règles qui en résultent alliées aux codes de calcul numériques permettent de prendre en compte les comportements locaux.

Les approches théoriques de modélisation seraient incomplètes et non validées en l'absence d'essais empiriques qui permettent caractériser les propriétés et de suivre l'évolution de la réponse de ces milieux soumis à diverses sollicitations. Nous avons dans ce cadre contribué à la conception et la mise en œuvre de techniques expérimentales complexes. La conduite des essais mécaniques classiques, bien que simple dans son principe, pose des problèmes de réalisation difficiles.

Nous avons ainsi conçu et réalisé des essais de compression-cisaillement qui permettent d'imposer des trajets de chargement biaxiaux (thèse de Serge Pascal). Ces essais permettent aussi la mesure avec une bonne précision du module de cisaillement du matériau. Ce dispositif peut aussi servir à imposer des chargements cycliques.

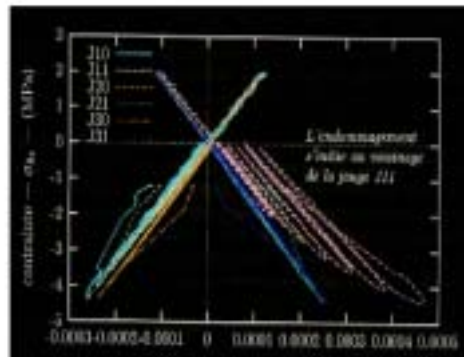


FIGURE 5-21 Essai de torsion sur un tube de composite mortier-polymère

L'essai de traction directe est le moyen le plus approprié pour identifier plusieurs caractéristiques du milieu et permettre l'identification de l'évolution de sa réponse. Dans le cas de ces matériaux, sa réalisation se heurte à des difficultés liées au caractère fragile du maté-

riau. Nous avons développé là aussi un dispositif qui permet la réalisation et l'acquisition de la courbe complète charge-déformation (thèse d'Amajad Mallat).

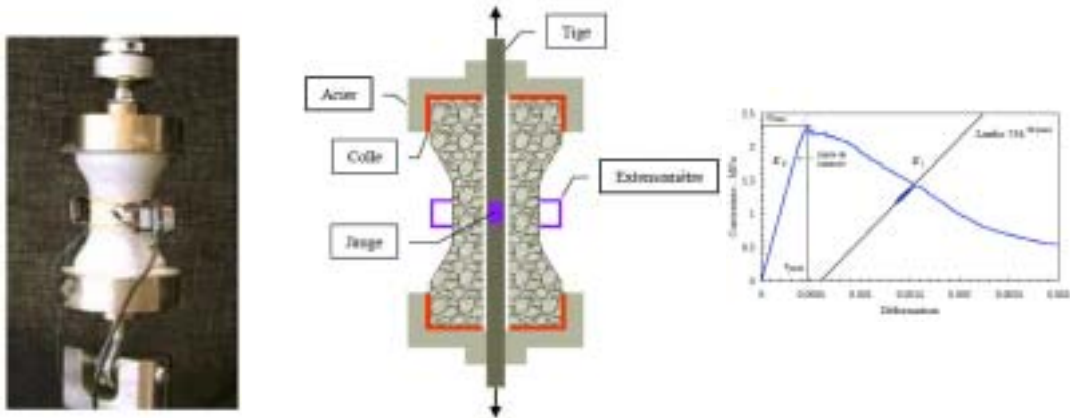


FIGURE 5-22 Légende ???

Ces différents résultats nous conduisent à une meilleure connaissance des matériaux et à la formulation de modèles théoriques adaptés aux réponses réelles du milieu. Dans ce cadre nous avons proposé un modèle d'endommagement en fatigue qui prend en compte le caractère anisotrope de l'évolution de la structure dégradée du matériau. Cette approche inspirée du modèle proposé par Halm et Dragon permet la prise en compte des micro-endommagements et leur caractère cumulatif. Les simulations issues de ce modèle sont conformes aux résultats expérimentaux obtenus en fatigue.

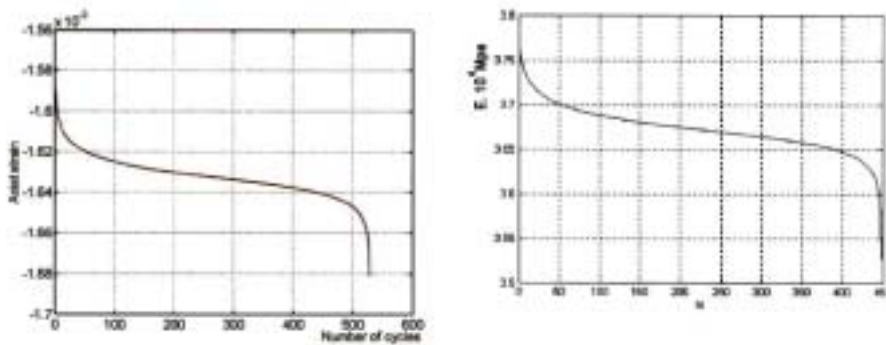


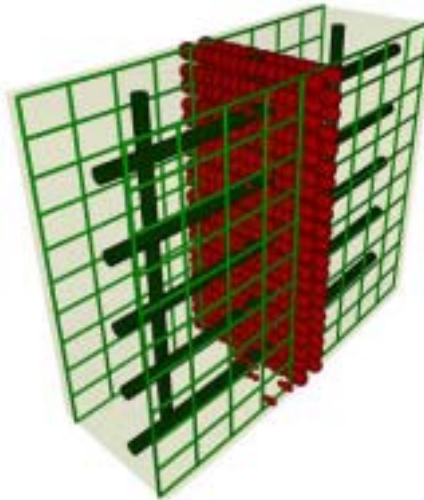
FIGURE 5-23 Evolution des déformations et du module d'élasticité en cours de fatigue

### E.2.b - *Couplages chémo-mécaniques dans les milieux poreux*

Nous avons traité il y a quelque temps (voir thèse de Wafa Obeid) de la problématique des couplages dans les milieux poreux. Les milieux à matrice cimentaire sont caractérisés par une structure contenant de nombreux pores partiellement remplis d'eau. Le squelette solide est formé de divers constituants, dont des composés de calcium comme l'ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et les CSH ( $n\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Le gradient de concentration du calcium entre le squelette et la solution interstitielle a pour conséquence une migration irréversible des ions calcium vers les pores. Ce phénomène porte le nom de lixiviation et a des conséquences sur les propriétés de résistance et sur les caractéristiques mécaniques en général. La lixiviation peut se coupler aux effets des chargements mécaniques. C'est ce type de couplage que nous proposons de modéliser en nous inspirant des travaux de Kuhl et Bangert en prenant en compte des hypothèses plus réalistes d'endommagement anisotrope, et incluant les effets de ces endommagements sur les propriétés hydriques de la structure telle que la conductivité. Nous projetons de reprendre nos approches sur le couplage thermo-hygro-mécanique en tenant compte des phénomènes de lixiviation.

## E. 3 - Endommagement anisotrope du béton

Avec P.B. Badel et V. Godard, J.B. Leblond a défini un modèle heuristique d'endommagement du béton, prenant en compte l'anisotropie de l'endommagement et la dissymétrie traction-compression. Cette définition était assujettie par EDF à un cahier des charges particulièrement contraignant, comprenant notamment l'exigence du respect du cadre des matériaux standard généralisés défini par Halphen et Nguyen. L'expérience a démontré la pertinence de cette exigence, qui a permis d'assurer la robustesse du modèle, tant sur le plan numérique que sur le plan physique. Ce modèle a été appliqué à la simulation de la ruine d'une enceinte de confinement nucléaire sous l'effet d'une pression interne excessive. Ces calculs ont fait apparaître des différences significatives entre les prédictions du modèle d'endommagement anisotrope et celles d'un modèle isotrope de référence. Ils ont ainsi démontré la possibilité et l'intérêt d'appliquer des modèles d'endommagement anisotrope, malgré leur sophistication, à l'étude de problèmes industriels complexes.



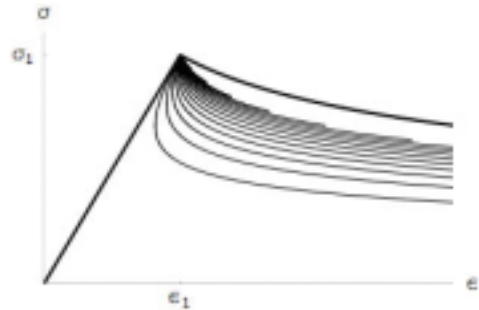
*J.B. Leblond et collaborateurs*

**FIGURE 5-24**  
*Endommagement d'une enceinte de confinement en béton armé soumise à une pression interne excessive. Seule une petite partie de l'enceinte est représentée. Les sphères rouges symbolisent l'endommagement ; leur rayon est proportionnel à ce dernier*

## E. 4 - Modèles non locaux

*J.J. Marigo et  
collaborateurs*

On étudie les propriétés qualitatives de modèles d'endommagement non locaux, la non-localité étant due à la présence d'un terme avec gradient d'endommagement dans l'énergie. À partir d'une approche variationnelle, on s'intéresse aux phénomènes de localisation, de bifurcation et d'instabilité dus au caractère adoucissant de ces lois. On étudie aussi les effets d'échelle induits par la présence inévitable d'une longueur interne dans le modèle. On étudie enfin la capacité de ces modèles à approcher des modèles de rupture.



**FIGURE 5-25** *Multiplicité des branches d'équilibre d'une barre en traction dont l'endommagement est régi par un modèle non local*

Sur le plan numérique, ces modèles d'endommagement non locaux sont utilisés comme approximation des modèles de rupture de type Griffith ou Paris. La qualité de l'approximation s'appuie sur des résultats de Gamma-convergence, établis par Ambrosio et Tortorelli, sur la fonctionnelle de Mumford-Shah, qui assurent que le minimum global de l'énergie régularisée par endommagement converge vers le minimum global du modèle de Griffith, lorsque la longueur interne introduite dans le modèle non-local tend vers 0. Ce faisant, on peut utiliser des éléments finis classiques pour approcher des sauts de déplacement. De plus, on n'a pas besoin de faire d'hypothèse a priori sur les trajets spatio-temporels de la fissuration. Cette méthode a été implémentée et testée dans de nombreuses situations.



**FIGURE 5-26** *Simulation de la fissuration transverse périodique d'un composite soumis à une traction longitudinale à l'aide d'un modèle d'endommagement non local*

---

## *F - Perspectives*

Dans ce paragraphe quelques perspectives sont esquissées. Celles ci sont purement indicatives et non-exhaustives

- En mécanique de la rupture, les recherches seront poursuivies dans diverses directions : approfondissement de l'approche énergétique de Marigo, nouvelles applications de l'approche « critère double en contrainte et énergie » de Leguillon, étude de la déformation du front de fissures 3D lors de leur coalescence, introduction des phénomènes de fatigue dans diverses études.
- En optimisation des structures, les recherches futures introduiront notamment les couplages multi-physiques et le couplage de la représentation polaire de l'élasticité (dont l'intérêt a été démontré dans le domaine des composites) et de l'optimisation.
- Pour les structures élancées, les développements concerneront notamment des résolutions numériques de problèmes de coques minces destinées à illustrer et approfondir les études théoriques de Sanchez-Palencia, et l'étude de divers problèmes de tiges élancées, avec notamment des applications à la biomécanique (schématisation de molécules d'ADN par exemple).
- Pour le comportement et l'endommagement des matériaux, les travaux, tant théoriques (application de la théorie de l'homogénéisation) qu'expérimentaux seront poursuivis avec notamment l'introduction de couplages multiphysiques de diverses natures (nombreux dans un matériau tel que le béton par exemple).





*Publications M.I.S.E.S.*

Revue à Comité de lecture

2007

1. Audoly B., Clauvelin N., & Neukirch S. (2007). Elastic knots. *Physical Review Letters*, 99(16): p.164301.
2. Badel P., Godard V., & Leblond J.B. . (2007). Application of some anisotropic damage model to the prediction of the failure of some complex industrial concrete structure *International Journal of Solids and Structures*
3. Benallal A., & Marigo J.J. (2007). Bifurcation and stability issues in gradient theories with softening *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 15: p.S283-S295.
4. Bertails F., Audoly B., Querleux B., Cani M.P., Leroy F., & Lévêque J.L. (2007). Modélisation de coiffures naturelles à partir des propriétés physiques du cheveu (à paraître). *Techniques et Sciences Informatiques*
5. Bertails F., Audoly B., Querleux B., Leroy F., Leveque J.L., & Cani M.P. (2007). Modélisation de coiffures naturelles à partir des propriétés physiques du cheveu. *Technique et science informatique*, 26: p.921-943.
6. Bouchelaghem F., Ben Hamida A., & Dumontet H. (2007). Mechanical damage behavior of an injected sand by the periodic homogenization method. *Computational Materials Science*, 38: p.473-481.
7. Bourdin B., Francfort G.A., & Marigo J.J. (2007). The variational approach to fracture (in press) *J. Elasticity*
8. Brillet-Rouxel H., Arfan E., Leguillon D., Dupeux M., Braccini M., & Orain S. (2007). Crack initiation in Cu-interconnect structures. *Microelectronic Engineering* 83: p.2297-2302.
9. Capdeville Y., & Marigo J.J. (2007). Homogenization of the wave equation for non-periodic layered media (in press). *Geophysical Journal International*.
10. Desmorat B. (2007). Structural rigidity optimization with frictionless unilateral contact. *International Journal of Solids and Structures*, 44: p.1132-1144.
11. Diaz Diaz I., & Sanchez Palencia E. (2007). On slender shells and related problems suggested by Torroja's structures (in press). *Asymptotic analysis*.
12. Duvaut G., Léné F., Adali S., & Cagdas I.U. (2007). Non local elastic modelling of statics and dynamics of nano-sized beams in an elastic medium (in press). *Composite Structures*.
13. Egorov Y.V., Meunier N., & Sanchez Palencia E. (2007). Rigorous and heuristic treatment of certain sensitive singular perturbations (in press). *J. Math. Pures Appl.*
14. Enakoutska K., Leblond J.B., & Perrin G. (2007). Numerical implementation and assessment of a phenomenological nonlocal model of ductile rupture. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 196: p.1946-1957.

15. Ferdjani H., Abdelmoula R., & Marigo J.J. (2007). Insensitivity to small defects of the rupture of materials governed by the Dugdale model (in press). *Continuum Mechanics and Thermodynamics*
16. Gauthier G., Lazarus V., & Pauchard L. (2007). Alternating crack propagation during directional drying. *Langmuir*, 23: p.4715-4718.
17. Grondin F., Dumontet H., Ben Hamida A., Mounajed G., & Boussa H. (2007). Multi-scales modelling for the behaviour of damaged concrete (in press) *Cement and Concrete Research*.
18. Henninger C., & Leguillon D. (2007). Adhesive fracture of an epoxy joint under thermal and mechanical loadings (in press). *Int. J. Thermal Stresses*.
19. Henninger C., Leguillon D., & Martin E. (2007). Crack initiation at a v-notch - Comparison between a brittle fracture criterion and the Dugdale cohesive model (in press) *C.R. Mécanique*.
20. Kettab R., Bali A., & Alliche A. (2007). Rubber-modified sand concrete for waste management *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*, 3: p.63-75.
21. Leblond J.B., & Mottet G. (2007). A theoretical approach of strain localization within thin planar bands in porous ductile materials (in press) *Compte-Rendus Mécanique*.
22. Leguillon D., Quesada D., Putot C., & Martin E. (2007). Size effects for cracks initiation at blunt notches or cavities. *Engng Fract. Mech.*, 74: p.2420-2436.
23. Léné F., Olivier-Mailhe M., Ben Chaabane S., Duvaut G., & Grihon S. (2007). An advanced methodology for optimum design of a composite stiffened cylinder (in press). *Composite Structures*
24. Mallat A., & Alliche A. (2007). Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system (in press). *Cement and Concrete Composites*
25. Meunier N., Sanchez-Hubert J., & Sanchez-Palencia E. (2007). Various kinds of sensitive singular perturbations (in press) *Annales Mathématiques Blaise Pascal*.
26. Pauchard L., Lazarus V., Abou B., Sekimoto K., Aitken G., & Lahanier C. (2007). Craquelures dans les couches picturales des peintures d'art. *Reflats de la Physique, Société Française de Physique*, 3: p.5-9.
27. Pindra N., Lazarus V., & Leblond J.B. (2007). The deformation of the front of a 3D interface crack propagating quasistatically in a medium with random fracture properties. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*
28. Ponson L., Auradou H., Pessel M., Lazarus V., & Hulin J.P. (2007). Scaling properties of glass ceramics fracture surfaces : experimental evidence of an abnormally low roughness exponent *Physical Review E*, 76: p.036108.
29. Schlosser J., Martin E., Henninger C., Boscary J., et al. (2007). CFC/Cu bond damage in actively cooled plasma facing components. *Phys Scr.*, 128: p.204-208.
30. Spalatelu M., Léné F., & Turbe N. (2007). Modelling and optimization of sails (in press). *Int. J. of Computer and Structures*
31. Vannucci P., & Vincenti A. (2007). The design of laminates with given thermal/hygral expansion coefficients : a general approach based upon the polar-genetic method *Composites and Structures*, 79: p.454-466.

32. Vu Q.H., Bouchelaghem F., & Ben Hamida A. (2007). A micromechanical numerical modelling approach for the homogenization of grouted sands (in press). *International Journal Computer Applications in Technology*

## 2006

33. Bertails F., Audoly B., Querleux B., Cani M.P., Leroy F., & Lévêque J.L. (2006). Super-helices for predicting the dynamics of natural hair. *ACM Transactions on Graphics (SIG-GRAPH)*, 25: p.1180-1187.
34. Cabrillac R., Fiorio B., Beaucour-Pellet A.L., Dumontet H., & Ortola S. (2006). Experimental study of mechanical anisotropy of aerated concrete and of adjustment parameters of introduced porosity *Construction and building Materials* 20: p.286-295.
35. Caillerie D., Raoult A., & Sanchez-Palencia E. (2006). On internal and boundary layers with unbounded energy in thin shell theory. Parabolic characteristic and non-characteristic cases *Asymptotic Analysis* 46: p.189-220.
36. Caillerie D., Raoult A., & Sanchez-Palencia E. (2006). On internal and boundary layers with unbounded energy in thin shell theory. Hyperbolic characteristic and non-characteristic cases *Asymptotic Analysis* 46: p.221-249.
37. Charlotte M., Laverne J., & Marigo J.J. (2006). Initiation of cracks with cohesive force models : a variational approach *European Journal of Mechanics - A / Solids*, 25: p.649-669.
38. Favier E., Lazarus V., & Leblond J.B. (2006). Coplanar propagation paths of 3D cracks in infinite bodies loaded in shear *International Journal of Solids and Structures* 43: p.2091-2109.
39. Favier E., Lazarus V., & Leblond J.B. (2006). Statistics of the deformation of the front of a tunnel-crack propagating in some inhomogeneous medium *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 54: p.1449-1478.
40. Ferdjani H., Abdelmoula R., & Marigo J.J. (2006). Etude de l'influence des défauts de petite taille sur le comportement à rupture avec le modèle de Dugdale *Revue Européenne de mécanique numérique*, 15: p.409-425.
41. Grondin F., Ben Hamida A., Dumontet H., & Mounajed G. (2006). Digital concrete : a multiscale approach for the concrete behaviour *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering* 6(5-6): p.325-337.
42. Jaubert A., & Marigo J.J. (2006). Justification of Paris-type fatigue laws from cohesive forces model via a variational approach. *Continuum Mechanics and Thermodynamics V*, 18: p.23-45.
43. Kachi M.S., Fouré B., Bouafia Y., & Muller P. (2006). L'effort tranchant dans la modélisation du comportement jusqu'à rupture des poutres en béton armé et précontraint *Revue Européenne de Génie Civil*, 10: p.1235-1264
44. Leguillon D., & Piat R. (2006). Fracture of porous materials - Influence of the pore size (in press) *Engng Fract. Mech.*
45. Leguillon D., Tariolle S., Martin E., Chartier T., & Besson J.L. (2006). Prediction of crack deflection in porous/dense ceramic laminates *J. Eur. Ceram. Soc.*, 26: p.343-349.
46. Marigo J.-J., & Meunier N. (2006). Hierarchy of one-dimensional models in nonlinear elasticity *J. Elasticity*, 83: p.1-28.

47. Meunier N., & Sanchez-Palencia E. (2006). Sensitive versus classical singular perturbation problems via Fourier transform. *Math. Models and Methods in Applied Science*, 16: p.1783-1816.
48. Nguyen V.H., Rémond S., Gallias J.-L., Bigas J.-P., & Muller P. (2006). Flow of Herschel-Bulkley fluids through the Marsh cone. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech.*, 139: p.128-134.
49. Ouissaden L., Lekhder A., Dumontet H., & Ben Hamida A. (2006). Transport de l'humidité dans des plaques minces stratifiées *Mécanique et Industries*, 7: p.231-239.
50. Picard D., Leguillon D., & Putot C. (2006). A method to estimate the influence of the notch-root radius on the fracture toughness of ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 26: p.1421-1427.
51. Smaoui S., Ben Hamida A., Djeran-Maigre I., & Dumontet H. (2006). Micro-macro approaches coupled to iterative process for non linear porous media *Computer Material Continua*, 4: p.153-162.
52. Yosibash Z., Priel E., & Leguillon D. (2006). A failure criterion for brittle elastic materials under mixed-mode loading. *Int. J. Fract.*, 141: p.289-310.

## 2005

53. Audoly B., & Neukirch S. (2005). Fragmentation of rods by cascading cracks : why spaghetti do not break in half *Physical Review Letters*, 95: p.095505.
54. Audoly B., & Neukirch S. (2005). Rupture des tiges en flexion *Mécanique et Industries*, 6: p.365-368.
55. Audoly B., Reis P., & Roman B. (2005). Comment on "Crack street : the cycloidal wake of a cylinder tearing through a thin sheet" *Physical Review Letters*, 94: p.129601.
56. Audoly B., Roman B., & Reis P. (2005). Cracks in brittle elastic plates : when geometry rules fracture paths. *Physical Review Letters*, 95: p.025502.
57. Ben Hamida A., Bouchelaghem F., & Dumontet H. (2005). Effective properties of a cemented or an injected granular material. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 29: p.187-208.
58. Ben Hamida A., Djeran Maigre I., Dumontet H., & Smaoui S. (2005). Clay compaction modelling by multiscale homogenization theory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining* 42: p.996-1005.
59. Ben Hassine W., Hassis H., & Ben Hamida A. (2005). An extension, flexural and warping model of soil reinforced by used tire's portions related by linear inclusion *European Journal of Mechanics A / Solids*, 24: p.630-643.
60. Cimetière A., Halm D., Marigo J.J., & Molines E. (2005). Damage standard models with a fixed convex. *Arch. Mech (Arch. Mech. Stos)*, 57: p.265-276.
61. De Souza C., & Sanchez-Palencia E. (2005). Complexification in sensitive singular perturbations and their approximation *International Journal for Multiscale Computational Engineering* 3: p.481-498.
62. Flandi L., & Leblond J.B. (2005). A new model for porous viscoplastic solids incorporating void shape effects - I : Theory. *European Journal of Mechanics A / Solids*, 24: p.537-551.

63. Flandi L., & Leblond J.B. (2005). A new model for porous viscoplastic solids incorporating void shape effects - II : Numerical validation. *European Journal of Mechanics A / Solids*, 24: p.552-571.
64. Flandi L., & Leblond J.B. (2005). Theoretical modelling and numerical study of coalescence of cavities in porous ductile viscoplastic solids *Compte-Rendus Mécanique*, 333: p.542-549.
65. Flauder P., Huin D., & Leblond J.B. (2005). Numerical simulation of internal oxidation of steels during annealing treatments. *Oxidation of Metals*, 64: p.131-167.
66. Francfort G.A., & Marigo J.J. (2005). Griffith theory of brittle fracture revisited : merits and drawbacks *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2: p.57-64.
67. Gindl W., Sretenovic A., Vincenti A., & Muller U. (2005). Direct measurement of strain distribution along a wood bond line - Part II : Effect of adhesive penetration on strain distribution. *Holzforschung* 59: p.307-310.
68. Gindl W., Sretenovic A., Vincenti A., & Muller U. (2005). Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. *Holzforschung* 59(3): p.300-306.
69. Jaubert A., & Marigo J.J. (2005). L'approche variationnelle de la fatigue : des premiers résultats *Compte-Rendus Mécanique*, 333: p.550-556.
70. Leblond J.B. (2005). Mathematical results for a model of diffusion and precipitation of chemical elements in solid matrices *Journal of Nonlinear Analysis Series B : Real World Applications*, 6: p.297-322.
71. Muller P. (2005). Are the eigensolutions of a 1-d.o.f. system with viscoelastic damping oscillating or not ? *Journal of Sound and Vibration*, 285: p.501-509.
72. Muller P. (2005). Mouvements propres d'un système à un degré de liberté avec amortissement viscoélastique. *Compte-Rendus Mécanique*, 333: p.337-342.

## 2004

73. Alliche A. (2004). Damage model for fatigue loading of concrete *International Journal of Fatigue*, 26: p.915-921.
74. Audoly B., Boudaoud A., Roman B., & Sharon E. (2004). The self-similar rippling of leaf edges and torn plastic sheets. *Europhysics News*, 35(5).
75. Badel P.B., & Leblond J.B. (2004). A note on integration schemes for the microplane model of the mechanical behavior of concrete *Communications in Numerical Methods in Engineering* 20: p.75-81.
76. Bergheau J.M., Vincent Y., Leblond J.B., & Jullien J.F. (2004). Viscoplastic behavior of steels during welding. *Science and Technology of Welding and Joining* 9: p.323-330.
77. De Souza C., & Sanchez-Palencia E. (2004). Complexification phenomenon in an example of "sensitive singular perturbation". *Compte-Rendus Mécanique*, 332: p.602-612.
78. Desmorat B., & Duvaut G. (2004). Optimization of the reinforcement of a 3D medium with thin composite plates. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, 28: p.407-415.

79. Faure F., Bergheau J.M., Leblond J.B., & Souloumiac B. (2004). New methods for numerical simulation of welding of large thin structures. *Revue Européenne des Eléments Finis*, 13: p.289-311.
80. Khadimallah A., Ben Hasine W., Hassis H., & Ben Hamida A. (2004). Formulation dissociée des poutres mixtes : optimisation et prise en compte du glissement *Revue Française de Génie Civil*, 8: p.439-455.
81. Klotz S., Hamel G., & Frelat J. (2004). New type of compact large-capacity press for neutron and X-ray scattering. *High Pressure Research*, 24: p.219-223.
82. Laverne J., & Marigo J.J. (2004). Approche globale, minima relatifs et critère d'amorçage en mécanique de la rupture *Compte-Rendus Mécanique*, 332: p.313-318.
83. Leblond J.B., & Frelat J. (2004). Crack kinking from an initially closed, ordinary or interface crack, in the presence of friction *Engineering Fracture Mechanics*, 71: p.289-307.
84. Marigo J.-J., & Madani K. (2004). The influence of the type of loading on the asymptotic behavior of slender elastic rings *J. Elasticity*, 75: p.91-124.
85. Marigo J.-J., & Truskinovsky L. (2004). Initiation and propagation of fracture in the models of Griffith and Barenblatt *Contin. Mech. Thermodyn.*, 16: p.391-409.
86. Martin E., & Leguillon D. (2004). Energetical conditions for interfacial failure in the vicinity of a matrix crack in brittle matrix composites. *Int. J. Solids Structures*, 41: p.6937-6948.
87. Pascal S., Alliche A., & Pilvin P. (2004). Mechanical behaviour of polymer modified mortars. *Materials Science and Engineering A* 380: p.1-68.
88. Siruguet K., & Leblond J.B. (2004). Effect of void locking by inclusions upon the plastic behavior of porous ductile solids - I : Theoretical modelling and numerical study of void growth *International Journal of Plasticity*, 20: p.225-254.
89. Siruguet K., & Leblond J.B. (2004). Effect of void locking by inclusions upon the plastic behavior of porous ductile solids - II : Theoretical modelling and numerical study of void coalescence. *International Journal of Plasticity*, 20: p.255-268.

## Ouvrages

90. Frelat J. (2004). *Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions* Publications de l'Université de Saint-Etienne - CNRS

## Chapitres d'ouvrages

### 2004

91. Audoly B. (2004). Geometric boundary layers in shells with mixed type. In R. Kienzler, H. Altenbach & I. Ott (Eds.), *Theories of Plates and Shells, Critical Review and New Application*. Brême: Springer-Verlag.
92. Marigo J.J. (2004). Griffith theory revisited. In Del Piero G. & Owen D.R. (Eds.), *Multiscale Modeling in Continuum Mechanics and Structured Deformations* (pp. 83-123): Springer Verlag.

2005

93. De Souza C., & Sanchez-Palencia E. (2005). Complexification phenomena in certain singular perturbation In Higuera F.J., Jimenez J. & Vega J.M. (Eds.), *Simplicity, rigor and relevance in fluid mechanics* (pp. 363-377). Barcelone, Espagne: International Center for Numerical Methods in Engineering

Colloques avec actes

2007

94. Adali S., Duvaut G., Léné F., & Cagdas I.-U. (2007). *Buckling and vibration of nanotube tip of an atomic force microscope using a non-local beam model*. Paper presented at the *International Conference on Modelling and Optimization of Structures, Processes Systems (ICMOSPS'07)*, Durban, South Africa.
95. Ahmadian M.R., Vincenti A., & Vannucci P. (2007). *Une approche générale pour la conception optimale de composites stratifiés aux états limités* Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
96. Amor H., & Marigo J.-J. (2007). *Approche variationnelle des lois de Griffith et de Paris de propagation de fissures via des modèles non-locaux d'endommagement*. Paper presented at the *8ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens.
97. Audoly B. (2007). *Thin elastic sheets torn by a blunt tool: a simple crack model based on Griffith's propagation criterion*. Paper presented at the *Analysis and Numerics for Rate-Independent Processes*, Mathematisches Forschungsinstitut, Oberwolfach.
98. Brunac J.B., Leblond J.B., Berghezan D., & Vacherand J.-M. (2007). *A fatigue law for elastomers subjected to arbitrary 3D loadings* Paper presented at the *International Congress on Fracture*, Moscou, Russie.
99. Desmorat B. (2007). *Thermo-elastic compliance optimization*. Paper presented at the *1st International Conference on Modelling and Optimization of Structures, Processes and Systems*, Durban, Afrique du Sud.
100. Desmorat B., & Desmorat R. (2007). *Topology optimization of elasto-plastic structures in damage governed low cycle fatigue*. Paper presented at the *3rd AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference*, Hawaii, Etats-Unis.
101. Duan Y., Boitout F., Leblond J.-B., & Bergheau J.-M. (2007). *Simulation numérique du soudage de grandes structures par une approche locale/globale - Définition du modèle local*. Paper presented at the *8ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, France.
102. Dumouchel P.E., & Marigo J.J. (2007). *Rupture dynamique et critère d'arrêt*. Paper presented at the *8ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, France.
103. Duvaut G., Léné F., Adali S., & Cagdas I.U. (2007). *Non local elastic modelling of statics and dynamics of nano-sized beams in an elastic medium under distributed loads* Paper presented at the *Sixth International Conference on Composite Science and Technology (ICCST/6)*, Durban, South Africa.



104. Henninger C., & Leguillon D. (2007). *Prise en compte des contraintes résiduelles dans un critère de rupture fragile*. Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
105. Henninger C., Murer S., & Leguillon D. (2007). *Rupture fragile d'une interface en présence de contraintes résiduelles*. Paper presented at the *8ème Colloque National en Calcul des structures*, Giens, France.
106. Leguillon D. (2007). *A criterion for crack nucleation at stress concentration points in brittle materials (invited lecture)*. Paper presented at the *International Congress on Fracture, Interquadrrienal Conference*, Moscou, Russie.
107. Léné F., Olivier-Mailhe M., Ben Chaabane S., Duvaut G., & S., Grihon. (2007). *A reliable methodology applied to composite fuselage pre-design*. Paper presented at the *Sixth International Conference on Composite Science and Technology (ICCST/6)*, Durban, South Africa.
108. Mamou-Mani A., Frelat J., & Besnainou C. (2007). *Effects of a static transverse load on nonlinear dynamical properties of a buckled beam: a reduced order 2 degrees of freedom model (communication invitée)*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.
109. Mamou-Mani A., Frelat J., & Besnainou C. (2007). *Piano soundboard under prestress: a numerical approach*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.
110. Melhem C., Boussa H., Mounajed G., & Dumontet H. (2007). *Modelling of the load induced thermal strain of concrete using a thermo-hygro-mechanical approach*. Paper presented at the *International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, Barcelone, Espagne.
111. Olivier-Mailhe M., Ben Chaabane S., Léné F., Duvaut G., & Grihon S. (2007). *Aide à la conception optimale d'une section de fuselage d'avion entièrement composite*. Paper presented at the *8ème Colloque National en Calcul de Structures*, Giens, France.
112. Pindra N., Lazarus V., & Leblond J.B. (2007). *Désordre du front d'une fissure semi-infinie d'interface*. Paper presented at the *Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
113. Poitou B., Martin E., Carrère N., Leguillon D., & Gatt J.-M. (2007). *Amorçage de fissure au voisinage des interfaces fibre/matrice : comparaison du critère mixte et des modèles de zone cohésive*. Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
114. Putot C., Quesada D., & Leguillon D. (2007). *Some mechanisms for the genesis of fractures in sedimentary rocks*. Paper presented at the *6th Int. Conf. on Fracture Mech. of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-6*, Catane, Italie.
115. Quesada D., Leguillon D., & Putot C. (2007). *Fracturation naturelle d'un réservoir pétrolier : Apport du prototype micromécanique cavité circulaire – Effet de taille*. Paper presented at the *8ème Colloque National en Calcul des structures*, Giens, France.
116. Quesada D., Putot C., & Leguillon D. (2007). *Contribution de la pression lithostatique à la fracturation naturelle d'un réservoir pétrolier*. Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.

117. Recho N., & Leguillon D. (2007). *Propagation of short cracks near a v-notch tip in brittle material under mixed mode loading* Paper presented at the *Int. Conference on Computational Fracture and Failure of Materials and Structures, CFRAC 2007*, Nantes, France.
118. Recho N., Li J., & Leguillon D. (2007). *V-notched specimen under mixed-mode fracture* Paper presented at the *13rd International Conference on Experimental Mechanics*, Alexandroupolis, Grèce.
119. Smaoui S., Ben Hamida A., Djeran-Maigre I., & Dumontet H. (2007). *Non linear micromechanical model for the behavior of porous media*. Paper presented at the *8th International Congress on Mechanics*, Patras, Grèce.
120. Turbe N., Spalatel-Lazar M., & Léné F. (2007). *Non linear analysis of sails and optimization*. Paper presented at the *International Conference on Modelling and Optimization of Structures, Processes and Systems (ICMOSPS'07)*, Durban, South Africa.
121. Vincenti A., Ahmadian M.R., & Vannucci P. (2007). *A general approach to optimal design of composite laminates with respect to limit states* Paper presented at the *Composites 2007, ECCOMAS Thematic Conference on Mechanical Response of Composites*, Porto, Portugal.

## 2006

122. Amor H., Abdelmoula R., & Marigo J.J. (2006 ). *Theoretical and numerical analysis of non-local damage models* Paper presented at the *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics*.
123. Amor H., & Marigo J.J. (2006 ). *A numerical method of crack propagation by fatigue based on a variational approach* Paper presented at the *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics*.
124. Brillet-Rouxel H., Arfan E., Leguillon D., Dupeux M., Braccini M., & Orain S. (2006 ). *Crack initiation in Cu-interconnect structures* Paper presented at the *Conference on Material for Advanced Metallization, MAM'2006*
125. Clauvelin N., Neukirch S., & Audoly B. (2006). *Analytical Results For The Pletonemic Response Of Supercoiled DNA*. Paper presented at the *Third International Conference on Multiscale Materials Modeling*, Freiburg, Allemagne.
126. Desmorat B. (2006 ). *The concept of homogeneous thermodynamical potentials for nonlinear structural rigidity optimization* Paper presented at the *3rd European Conference on Computational Mechanics*, Lisbonne, Portugal.
127. Duan Y., Boitout F., Deloison D., Leblond J.B., & Bergheau J.M. (2006 ). *Une approche locale/globale pour déterminer les distorsions résiduelles de soudage* Paper presented at the *Actes du Congrès Matériaux 2006*.
128. Dumouchel P.E., & Marigo J.J. (2006). *An energetical approach to a dynamic fracture problem*. Paper presented at the *Third International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics*, Hammamet, Tunisie.
129. Enakoutsas K., Leblond J.B., & Perrin G. (2006). *Assessment of a model of ductile rupture with a nonlocal evolution equation of the porosity*. Paper presented at the *9th European Mechanics of Materials Conference, Local Approach to Fracture*, Moret-sur-Loing, France.

130. Enakoutsa K., Leblond J.B., & Perrin G. (2006). *Numerical assessment of a micromorphic model of ductile rupture*. Paper presented at the *3rd European Conference on Computational Mechanics*, Lisbonne, Portugal.
131. Ferdjani H., Abdelmoula R., & Marigo J.J. (2006). *Study of the influence of small size defects on the rupture behavior with the Dugdale model*. Paper presented at the *Third International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics*, Hammamet, Tunisie.
132. Grondin F., Mounajed G., Ben Hamida A., & Dumontet H. (2006). *A micro-mechanical model for the thermo-hydro-mechanical behavior of geomaterials*. Paper presented at the *First Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures*, Hammamet, Tunisie.
133. Ke Y., Beaucour A.L., Ortola S., Cabrillac R., & Dumontet H. (2006). *Influence of aggregates on mechanical behavior of lightweight concrete: experimental and characterization and modeling*. Paper presented at the *First Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures*, Hammamet, Tunisie.
134. Ke Y., Beaucour A.L., Ortola S., Dumontet H., & Cabrillac R. (2006). *Comportement mécanique des bétons de granulats légers : Etude expérimentale et modélisation*. Paper presented at the *XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Grande Motte.
135. Lazar M., Lene F., & Turbe N. (2006). *Non linear analysis of sails and simulation*. Paper presented at the *Third International Conference of Applied Mathematics (TICAM)*, Plovdiv, Bulgarie.
136. Lazarus V., Buchholz F.G., & Wiebesiek J. (2006). *Crack front twisting in three-point bending comparison between a local and a global approach*. Paper presented at the *35th Solid Mechanics Conference*, Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Pologne.
137. Leguillon D., Priel E., & Yosibash Z. (2006). *Brittle crack initiation at a V-notch under mixed mode loading*. Paper presented at the *Crack Paths 2006*, Parme, Italie.
138. Leguillon D., Quesada D., Putot C., & Martin E. (2006). *Size effects for crack initiation at blunt notches or cavities in brittle materials*. Paper presented at the *16th European Conference of Fracture, Failure analysis of nano and engineering materials and structures*, Alexandroupolis, Grèce.
139. Léné F., & Duvaut G. (2006). *Lattice structures: modelling and optimization*. Paper presented at the *Third International Conference of Applied Mathematics (TICAM)*, Plovdiv, Bulgarie.
140. Mallat A., & Alliche A. (2006). *Physical and chemical behaviour of fibber reinforced repair mortars*. Paper presented at the *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)*, Floride, Etats-Unis.
141. Mallat A., & Alliche A. (2006). *Analytical techniques for diagnosis of old concrete*. Paper presented at the *Structural Faults & Repairs*, Edinburgh, Ecosse.
142. Mamou-Mani A., Frelat J., & Besnainou C. (2006). *Vibrations non linéaires d'une poutre flambée précontrainte*. Paper presented at the *VIIIème Congrès Français d'Acoustique*, Tours.
143. Martin E., Poitou B., & Leguillon D. (2006). *Initiation of fracture mechanisms at the fibre/matrix interface*. Paper presented at the *16th European Conference of Fracture, Failure analysis of nano and engineering materials and structures*, Alexandroupolis, Grèce.

144. Martin E., Schlosser J., Marceau T., Leguillon D., & Henninger C. (2006). *Modélisation de l'endommagement de l'interface Composite/Cuivre au sein des composants à hauts flux pour la fusion contrôlée*. Paper presented at the *Colloque Matériaux 2006*, Dijon.
145. Muller P. (2006). *Eigenmotions of a one degree of freedom viscoelastically damped system*. Paper presented at the *Eight International Conference on Computational Structures Technology*, Las Palmas de Gran Canaria, Espagne.
146. Muller P. (2006). *Sur la nature des mouvements propres d'un système à un degré de liberté avec amortissement viscoélastique*. Paper presented at the *Quinzième Colloque National « Vibrations, Chocs et Bruit »*, Lyon, France.
147. Olivier-Mailhe M., Ben Chaabane S., Lene F., Duvaut G., & Grihon S. (2006). *Probabilistic analysis of a fully composite stiffened cylinder*. Paper presented at the *Third European Conference on Computational Mechanics-Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering*, Lisbonne, Portugal.
148. Olivier-Mailhe M., Ben Chaabane S., Lene F., Duvaut G., & Grihon S. (2006). *Reliability and optimization of a fully composite stiffened cylinder*. Paper presented at the *8th International Conference on Computational Structures Technology*, Las Palmas, Espagne.
149. Piat R., Leguillon D., Yosibash Z., & Schnack E. (2006). *A numerical study of crack propagation in a porous brittle CVI-infiltrated carbon felt*. Paper presented at the *7th World Congress on Computational Mechanics*, Los Angeles, Etats-Unis.
150. Poitou B., Martin E., & Leguillon D. (2006). *Effects of residual thermal stresses on the initiation of fracture mechanisms at the fibre/matrix interface*. Paper presented at the *12th European Conference on Composite materials (ECCM12)*, Biarritz.
151. Reis P.M., Roman B., & Audoly B. (2006). *Oscillating fracture paths in thin elastic sheets: when geometry rules the fracture path*. Paper presented at the *16th European Conference on Fracture*, Alexandroupolis, Grèce.
152. Sanchez-Palencia E. (2006). *Rigidification effect of slight folding in slender plates*. Paper presented at the *Multiscale Problems and Asymptotic Analysis*, Gakkotosho.
153. Schlosser J., Martin E., Henninger C., Boscary J., et al. (2006). *CFC/Cu Bond Damage in Actively Cooled Plasma Facing*. Paper presented at the *11th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications*, Greifswald, Allemagne.
154. Smaoui S., Ben Hamida A., Djeran-Maigre I., & Dumontet H. (2006). *Modélisation du comportement hydromécanique de milieux argileux par une approche micromécanique itérative*. Paper presented at the *colloque Transfert 2006, Propriétés de transfert des géomatériaux*, Lille.
155. Smaoui S., Ben Hamida A., Djeran-Maigre I., & Dumontet H. (2006). *A homogenization iterative process for nonlinear materials applied to compacted clays*. Paper presented at the *European Conference on Computational Solid and Structural Mechanics ECOMAS 2006 - III*, Lisbonne.
156. Spalatelu M., Léné F., & Turbe N. (2006). *Modelling and optimization of sails*. Paper presented at the *Third European Conference on Computational Mechanics-Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering*, Lisbonne, Portugal.

157. Vincenti A., & Vannucci P. (2006). *Optimal design of smart composite laminates by the polar method and the genetic algorithm BIANCA*. Paper presented at the *3rd ECCM, European Conference on Computational Mechanics, Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering*, Lisbonne, Portugal.
158. Vu Q.H., Ben Hamida A., & Bouchelaghem F. (2006). *A nonlinear homogenization method for the periodic media: Application on the grouted sands*. Paper presented at the *International Conference on Nonlinear Analysis and Engineering Mechanics Today*, Hochiminh City, Vietnam.
159. Vu Q.H., Bouchelaghem F., & Ben Hamida A. (2006). *Mechanical behaviour of grouted sands by a numerical homogenization approach*. Paper presented at the *First Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures*, Hammamet, Tunisie.
160. Zouari R., Ben Hamida A., & Dumontet H. (2006). *A micromechanical modelling for prediction of behavior and damage of polydisperse syntactic foam*. Paper presented at the *Composites Testing and Model Identification CompTest 2006*, Porto, Portugal.
161. Zouari R., Ben Hamida A., & Dumontet H. (2006). *Behavior and local fields of polydispersed materials by a micromechanical iterative process*. Paper presented at the *6th European Solid Mechanics Conference ESMC2006*, Budapest, Hongrie.

## 2005

162. Audoly B., & Neukirch S. (2005). *Rupture des tiges en flexion*. Paper presented at the *17ème Congrès Français de Mécanique*, Troyes, France.
163. Audoly B., Reis P.M., & Roman B. (2005). *Oscillating fracture paths in thin brittle sheets : when geometry rules the fracture path*. Paper presented at the *Proceedings of the 11th International Conference on Fracture* Turin, Italie.
164. Badel P., Godard V., & Leblond J.B. (2005). *A new model for anisotropic damage in concrete and its application to the prediction of failure of some containment vessel*. Paper presented at the *Proceedings of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Pékin, Chine.
165. Ben Hamida A., Dumontet H., Lekhder A., & Ouissaden L. (2005). *Comportement diffusif de mousses synthétiques*. Paper presented at the *Actes du 7ème Congrès Marocain de Mécanique*, Casablanca, Maroc.
166. Ben Hamida A., & Ghorbel E. (2005). *Prédiction de la tenue mécanique de pièces en polypropylène soudées par diode laser*. Paper presented at the *Actes du 7ème Congrès Marocain de Mécanique*, Casablanca, Maroc.
167. Bertails F., Audoly B., Querleux B., Leroy F., Leveque J.L., & Cani M.P. (2005). *Predicting natural hair shapes by solving the statics of flexible rod*. Paper presented at the *Eurographics (short papers)*, Dublin, Irlande.
168. Bohe V., Desmorat B., Léné F., & Davies P. (2005). *Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des voiles*. Paper presented at the *14èmes Journées Nationales des Composites*, Compiègne, France.
169. Braccini M., Dupeux M., & Leguillon D. (2005). *Initiation of failure in a single lap joint*. Paper presented at the *Int. Conf. on Fracture ICF XI*, Turin, Italie

170. Carrère N., Martin E., Leguillon D., & Huchette C. (2005). *Amorçage de la décohésion interfaciale : comparaison d'un critère mixte et d'un modèle de zone cohésive*. Paper presented at the *14èmes Journées Nationales sur les Composites, JNC 14* Compiègne, France.
171. Charlotte M., Debruyne G., Dumouchel P.E., & Marigo J.J. (2005). *Analyse du décollement d'un film élastique en régime dynamique : exploration analytique et numérique*. Paper presented at the *7ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, France.
172. Cherti-Tazi O., Leguillon D., & Martin E. (2005). *Branchement d'une fissure hors d'une interface dans un stratifié céramique*. Paper presented at the *14èmes Journées Nationales sur les Composites, JNC 14*, Compiègne, France.
173. Desmorat B., & Frelat J. (2005). *Compliance optimization with frictionless unilateral contact*. Paper presented at the *6th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Rio de Janeiro, Brésil.
174. Desmorat B., Spalatel M., Bohe V., Lene F., & Canepa R. (2005). *Optimisation de forme des sous-domaines d'une structure élastique. Application aux voiles de bateaux*. Paper presented at the *7ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, France.
175. Duvaut G., Olivier-Mailhe M., Benchaabane S., & Léné F. (2005). *Optimization and reliability of a barrel in relation to buckling* Paper presented at the *International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences, ICCES'05* (?), Inde.
176. Enakoutsas K., Leblond J.B., & Audoly B. (2005). *Influence of continuous nucleation of secondary voids upon growth and coalescence of cavities in porous ductile metals*. Paper presented at the *Proceedings of the 11th International Conference on Fracture*, Turin, Italie.
177. Favier E., Lazarus V., & Leblond J.B. (2005). *Disorder of the front of a tensile tunnel-crack propagating in some inhomogeneous medium* Paper presented at the *Proceedings of the 11th International Conference on Fracture*.
178. Jaubert A., & Marigo J.J. (2005). *Décollement par fatigue d'un film mince en flexion : une approche variationnelle*. Paper presented at the *7ème Colloque National en Calcul des Structures*.
179. Jaubert A., & Marigo J.J. (2005). *A variational approach to fatigue debonding* Paper presented at the *Proceedings of the 11th International Conference on Fracture*.
180. Jaubert A., & Marigo J.J. (2005). *Décollement d'un film mince en fatigue : une approche variationnelle*. Paper presented at the *Actes du Congrès Français de Mécanique*.
181. Leguillon D. (2005). *A general purpose fracture criterion for crack initiation at corners in brittle materials and structures*. Paper presented at the *4th International Conference on Fracture and Damage Mechanics*.
182. Leguillon D., Martin E., & Cherti Tazi O. (2005). *Prediction of crack deflection and kinking in ceramic laminates* Paper presented at the *IUTAM Conference on Multiscale Modelling of Damage and Fracture Processing in Composite Materials*
183. Leguillon D., Martin E., & Tariolle S. (2005). *Crack deflection in ceramic laminates* Paper presented at the *Int. Conf. on Fracture ICF XI*.
184. Léné F., Turbe N., & Duvaut G. (2005). *Topological Optimization applied to Composite Structures* Paper presented at the *Proceedings of ICCM15*.
185. Martin E., & Leguillon D. (2005). *A criterion for interfacial debonding in the vicinity of a matrix crack*. Paper presented at the *Int. Conf. on Fracture ICF XI*.

186. Olivier-Mailhé M., Benchaabane S., Léné F., Grihon S., & Duvaut G. (2005). *Aspect fiabiliste et conception de fuselage en matériaux composites* Paper presented at the 17ème Congrès Français de Mécanique, CFM'05
187. Olivier-Mailhé M., Benchaabane S., Léné F., Grihon S., & Duvaut G. (2005 ). *Dimensionnement fiabiliste d'un cylindre composite raidi* Paper presented at the 7ème Colloque National en Calcul de Structures
188. Picard D., Putot C., & Leguillon D. (2005). *Développement des fractures géologiques sous l'effet de la contrainte lithostatique*. Paper presented at the 7ème Colloque National en Calcul des Structures
189. Smaoui S., Ben Hamida A., Djeran-Maigre I., & Dumontet H. (2005). *Homogenization modelling coupled to an iterative process of experimentally compacted fine-grained sediments*. Paper presented at the ALERT 2005, Proceedings of the Workshop Geomaterials
190. Smaoui S., Chalou F., Ben Hamida A., Djeran-Maigre I., & Dumontet H. (2005). *Modélisation du comportement poroélastique des argiles par approches multi-échelles* Paper presented at the Actes du 17ème Congrès Français de Mécanique, CMF05
191. Spalatelu M., Léné F., & Turbe N. (2005 ). *Calcul et optimisation des voiles de bateaux* Paper presented at the 17ème Congrès Français de Mécanique
192. Trabelsi R., Ben Hamida A., & Dumontet H. (2005). *Modélisation micromécanique de mous- ses syntactiques immergées*. Paper presented at the Actes du 7ème Congrès Marocain de Mécanique
193. Vincenti A., & Vannucci P. (2005 ). *Annullare i coefficienti di dilatazione termica dei laminati in composito : ottimizzazione con il metodo polare-genetico, XXVI AIMETA*. Paper presented at the XXVI AIMETA, Conferenza dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata.

## 2004

194. Bouchelaghem F., Ben Hamida A., & Dumontet H. . (2004). *Mechanical behavior of an injected sand* Paper presented at the Proceedings of the International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2004/ICCMSE, (?), Grèce.
195. Bouchelaghem F., Ben Hamida A., & Dumontet H. (2004). *A study of the mechanical behaviour of an injected sand by a numerical homogenization approach*. Paper presented at the Lecture Series on Computer and Computational Sciences I, Boston, Etats-Unis.
196. Brunac J.B., Huin D., & Leblond J.B. (2004). *Theoretical modelling and numerical simulation of diffusion and precipitation of chemical elements in metallic matrices* Paper presented at the Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Modeling and Simulation of Materials Acireale, Italie.
197. Faure F., Bergheau J.M., & Leblond J.B. (2004). *Simulating welding with shell elements* Paper presented at the Proceedings of the 2nd International Conference on Thermal Process Modelling and Computer Simulation
198. Favier E., Lazarus V., & Leblond J.B. (2004). *Numerical simulation of propagation of 3D cracks in infinite bodies loaded in tension or shear*. Paper presented at the Proceedings of the 6th World Congress on Computational Mechanics, Pékin, Chine.

199. Flandi L., & Leblond J.B. (2004). *A new model for porous viscoplastic solids incorporating void shape effects* Paper presented at the *Proceedings of the 4th International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences*, Madère, Portugal.
200. Fulland M., & Lazarus V. (2004). *Numerical simulations of crack front twisting under consideration of local mode II and / or global mode III effects* Paper presented at the *Computational Mechanics, Proceedings of the 6th World Congress on Computational Mechanics in conjunction with the 2nd Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics* Pékin, Chine.
201. Gindl W., Sretenovic A., Vincenti A., & Muller U. (2004). *Micromechanics of adhesive bonds in wood*. Paper presented at the *Proceedings of Sustain Life Secure Survival II*, Prague, République Tchèque.
202. Grondin F., Dumontet H., Ben Hamida A., & Mounajed G. (2004). *Approche multi-échelles et multi-physiques du comportement du béton par simulation numérique* Paper presented at the *Actes des 21èmes Rencontres de Génie Civil*, Marne-la-Vallée, France.
203. Grondin F., Dumontet H., Ben Hamida A., Mounajed G., & Boussa H. (2004). *The homogenized behavior of a concrete* Paper presented at the *Proceedings of the 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (?)*, Pologne.
204. Jaubert A., & Marigo J.J. (2004). *A variational approach to the debonding of a thin film by fatigue* Paper presented at the *Proceedings of the International Workshop on "Mesomechanics: Fundamentals and Applications"*, Tomsk, Russie.
205. Laverne J., & Marigo J.J. (2004). *A cohesive zone model with Barenblatt surface energy : theoretical considerations and numerical simulations* Paper presented at the *Proceedings of ICF 15: Advanced Fracture Mechanics for Life and Safety Assessments*, Stockholm, Suède.
206. Leguillon D. (2004). *Failure analysis of a resin encapsulant under thermal loading using singular elastic fields* Paper presented at the *World Congress for Comp. Mech. WCCM VI*, Pékin, Chine.
207. Marigo J.-J. (2004). *A variational approach to propagation of cracks by fatigue* Paper presented at the *Proceedings of the Workshop "Thermodynamische Materialtheorien"* Oberwolfach, Allemagne.
208. Picard D., Putot C., & Leguillon D. (2004). *A model for joint propagation across layer interfaces* Paper presented at the *66th Conference of the Eur. Assoc. of Geoscientists and Engineers (EAGE)*, Paris, France.
209. Picard D., Putot C., & Leguillon D. (2004). *Joint propagation in relatively undeformed bedded sedimentary rock through compression failure mechanisms* Paper presented at the *9th European Conference on Mathematics of Oil Recovery ECMOR IX* Cannes, France.
210. Putot C., Picard D., Leguillon D., & Daniel J.M. (2004). *Joint propagation in bedded sedimentary rock through compression failure mechanisms* Paper presented at the *Euro-Conf. On Rock Physics and Geomechanics*, Potsdam, Allemagne.
211. Trabelsi R., Ben Hamida A., & Dumontet H. (2004). *Comportement micromécanique d'une mousse polydisperse par une approche itérative* Paper presented at the *MECAMAT*, Aussois, France.



212. Vincent Y., Bergheau J.M., Leblond J.B., & Jullien J.F. (2004). *An experimental mock-up for the study of steel behaviour at high temperature during phase transformation*. Paper presented at the *Proceedings of the 2nd International Conference on Thermal Process Modelling and Computer Simulation*

Colloques sans actes

2007

213. Amor H., & Marigo J.J. (2007). *Méthode numérique pour la simulation de propagation de fissures par fatigue* Paper presented at the *Congrès national de Mathématiques Appliquées et Industrielles SMAI*. Praz-sur-Arly
214. Marigo J.J. (2007). *The effective behavior of a fiber bridged crack*. Paper presented at the *Colloque en l'honneur de E. Sanchez-Palencia*. Pierre et Marie Curie, Paris
215. Marigo J.J. (2007). *An energetic approach to a dynamic fracture problem*. Paper presented at the *International Conference on Thermo-Mechanical Modeling of Solids*. Ecole Polytechnique, Palaiseau

2006

216. Duvaut G., & Léné F. (2006). *Optimisation de structures composites : application aux voiles de bateaux*. Paper presented at the *Journée à la mémoire de Claude DO*. Montpellier
217. Leguillon D. (2006). *Asymptotic model of size effects in fracture* Paper presented at the *Workshop Applications of asymptotic analysis*. Oberwolfach, Allemagne
218. Leguillon D., & Piat R. (2006). *A model for crack growth in porous materials*. Paper presented at the *19th Workshop on Composite Forschung in der Mechanik*. Bad Herrenalb, Allemagne
219. Leguillon D., & Yosibash Z. (2006). *A brittle fracture criterion under mixed mode loading*. Paper presented at the *Workshop Challenges in Computational Mechanics*. Cachan
220. Marigo J.J. (2006). *Cohesive force models and yield stress criterion in fracture mechanics*. Paper presented at the *Dipartimento di Ingegneria Strutturale*. Pise, Italie
221. Marigo J.J. (2006). *Cohesive force models and Paris fatigue laws in fracture mechanics*. Paper presented at the *conférence de Ferrara*. Ferrara, Italie
222. Poitou A., Martin E., Leguillon D., & Gatt J.M. (2006). *Modélisation des mécanismes de rupture à l'interface fibre/matrice dans les composites à matrice céramique* Paper presented at the *MECAMAT*. Aussois

2005

223. Braccini M., Arfan E., Leguillon D., Dupeux M., & Brillet H. (2005). *Rôle des singularités dans l'initiation de fissures aux interfaces solide/solide*. Paper presented at the *Colloque J2IM Joints Intergranulaires et d'Interphases dans les Matériaux*. Les Issambres
224. Desmorat B. (2005). *Optimisation de forme avec contact unilatéral en OpenFEM-Scilab* Paper presented at the *Journée Gamni Freefem++ et Openfem*. Paris, France

225. Mamou-Mani A., Frelat J., & Besnainou C. (2005). *A modelization of the downbearing of the soundboards through a simplified system in nonlinear dynamics* Paper presented at the *12th International Congress on Sounds and Vibrations*. Lisbonne, Portugal
226. Marigo J.J. (2005). *Comment l'approche variationnelle basée sur des bons choix d'énergie permet de rendre compte à la fois de l'amorçage et de la fissuration. En quoi se distingue-t-elle des approches zones cohésives "classiques" tout en restant proche de celles-ci ?* . Paper presented at the *Journée "Amorçage et fissuration. Modélisation par la mécanique de la rupture ou les zones cohésives ?"*, MECAMAT Paris
227. Marigo J.J. (2005). *Approche variationnelle de la fatigue : de Griffith à Paris via Barenblatt* Paper presented at the *Journée "Avancées récentes en modélisation de la fatigue"*, MECAMAT Poitiers
228. Marigo J.J. (2005). *The criteria of crack initiation associated to Barenblatt surface energy* Paper presented at the *The Rational Modeling of Materials and Structures*. Reggio di Calabria, Italie
229. Muller P. (2005). *Optimisation des capacités amortissantes de tôles-sandwich acier-polymère-acier*. Paper presented at the *Accord-programme CMEP 04 MDU 626*. Tizi-Ouzou, Algérie
230. Muller P. (2005). *Dimensionnement en torsion*. Paper presented at the *Accord-programme CMEP 04 MDU 626*. Bejaia, Algérie
231. Putot C., Leguillon D., Daniel J.M., & Picard D. (2005). *Mechanical Interpretation of Fracture Patterns : Role of Inter Bedding in Jointing and Fracture Swarms Morphology*. Paper presented at the *journées techniques SAID, AFTP, SGF*. Paris
232. Schlosser J., Martin E., Quesada D., Leguillon D., et al. (2005). *Damage in carbon fibre composite armours of actively cooled plasma facing components* Paper presented at the *European Congress on Advanced Materials and Processing Euromat 2005*. Prague
233. Vincenti A., & Vannucci P. (2005). *Tailoring Expansion Coefficients of Laminates : A New General Optimal Approach Based upon the Polar-Genetic Method*. Paper presented at the *6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, WCSM06*. Rio de Janeiro, Brésil

## 2004

234. Ben Hamida A., & Dumontet H. (2004). *Modélisation micromécanique du comportement et de l'endommagement des mousses*. Paper presented at the *Journée CNES-CCT6-Matériaux : Matériaux émergents et nanotechnologies, quelles applications pour le spatial ?* CNES, TOULOUSE
235. Braccini M., Laurencin J, Dupeux M., & Leguillon D. (2004). *Amorçage et propagation d'une fissure à un interface acier inoxydable /résine époxyde*. Paper presented at the *1ères Journées de la fédération française des matériaux*. Limoges
236. Francfort G.A., & Marigo J.J. (2004). *Incremental minimization principles in fracture and damage mechanics*. Paper presented at the *21th ICTAM*. Varsovie
237. Leguillon D., Martin E., & Tariolle S. (2004). *Etude des déviations et des branchements de fissures dans les céramiques stratifiées*. Paper presented at the *Journées Annuelles du Groupe Français de la Céramique*. Pessac

238. Marigo J.J. (2004). *A justification of phenomenological fatigue laws by a variational approach*. Paper presented at the *Modelli Matematici per la Scienza dei Materiali, Programma di Ricerca Cofinanzato*. Ferrare, Italie
239. Marigo J.J. (2004). *A variational approach to fatigue*. Paper presented at the *Workshop on Analysis of Rate Independent Processes*. Villetaneuse
240. Marigo J.J. (2004). *Les approches énergétiques en Mécanique de la Rupture*. Paper presented at the *GDR Ultrasons, CNRS*. Rocquencourt
241. Nourredine A., Léné F., & Duvaut G. (2004). *Optimisation au flambage de treillis composites*. Paper presented at the *Colloque JET 2004*. Marrakech
242. Sanchez-Palencia E. (2004). *Complexification phenomena in a class of singular perturbations and applications to shells*. Paper presented at the *International Conference on Differential Equation and Related Topics*. Moscou
243. Sanchez-Palencia E. (2004). *Complexification phenomena in a type of singular perturbation*. Paper presented at the *4èmes Journées Singulières*. Pont-à-Mousson

## Thèses

244. Brini A. (2004). *Contribution à l'étude du phénomène de vieillissement des mousses syntactiques immergées*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
245. Flandi L. (2004). *Rupture ductile des matériaux viscoplastiques poreux avec effets de forme des cavités*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
246. Faure F. (2004). *Nouvelles méthodes pour la simulation numérique du soudage des structures élan-cées*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie
247. Ben Hamida A. (2005). *Approche micromécanique du comportement de milieux hétérogènes dans leur environnement*. Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Pierre et Marie Curie
248. Bohe V. (2005). *Comportement mécanique des tissus à voiles*. Thèse de Doctorat Université Pierre et Marie Curie.
249. Cherti-Tazi O. (2005). *Comportement à la rupture d'un multicouche formé de matériaux fragiles*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
250. Favier E. (2005). *Déformation du front de fissures planes au cours de leur propagation*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
251. Godard V. (2005). *Modélisation de l'endommagement anisotrope du béton avec prise en compte de l'effet unilatéral : application à la simulation des enceintes de confinement nucléaires*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
252. Grondin F. (2005). *Approche stochastique multi-échelles pour la détermination par simulation numérique du comportement thermo-hydro-mécanique des milieux poreux et hétérogènes*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
253. Huchette C. (2005). *Analyse multiéchelle des interactions entre fissurations intralaminaires et interlaminaires dans les matériaux composites stratifiés ; influence sur les performances résiduelles*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

254. Picard D. (2005). *Modèle de représentation mécanique de la formation des fractures d'un réservoir pétrolier* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
255. Zibouche K. (2005). *Simulation numérique des problèmes d'interactions fluide/structure appliqués au domaine du bâtiment et génie civil* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
256. Brunac J.B. (2006). *Modélisation numérique du comportement en fatigue des élastomères chargés en noir de carbone* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
257. Trabelsi R. (2006). *Approche itérative d'homogénéisation pour le comportement de composites polydispersés : application à l'endommagement des mousses syntactiques immergées* Thèse de Doctorat Université Pierre et Marie Curie
258. Henninger C. (2007). *Etude des trajets de fissures dans les céramiques stratifiées* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
259. Enakoutsa K. (2007). *Modèles non-locaux en rupture ductile des métaux*. Doctorat, Pierre et Marie Curie.
260. Smaoui S. (2007). *Modélisation micromécanique du comportement de milieux poreux non linéaires - application aux argiles compactées* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

## Rapports de contrats

261. Henninger C., & Leguillon D. (2005). *Collaboration CEA/CNRS sur la fusion : les matériaux face au plasma*
262. Trabelsi R., Ben Hamida A., Dumontet H., & Pradel F. (2005). *Influence de la dispersion granulométrique d'une mousse syntactique sur les contraintes locales*, Rapport IFP-27 930.
263. Adali S., Léné F., Duvaut G., & Wuite J. (2006). *Properties and modelling of carbon nanotubes and nanocomposites* School of Mechanical Engineering Report, University of Kwazulu-Natal, Durban, South Africa
264. Ben Hamida A., & Dumontet H. (2006). *Modélisation de la rupture structurelle de mousses syntactiques immergées*, Rapport IFREMER, RED/MES 2004, 2 20216370.
265. Murer S., & Leguillon D. (2006). *Projet ANR CIEL, programme PAN-H*

## Brevets

### 2005

266. Frelat J., Hamel G., & Klotz S. (2005). Dispositif de gorge ondulée pour le logement de joints O-ring sur un piston. France Patent No. BR40611/CR/FT. UPMC.

### 2007

267. Audoly B., Bertails F., Cani M.P., Lévêque J.L., & Querleux B. (2007). Cheveux virtuels dynamiques. France Patent No. PCT/IB2007/052432. CNRS.
268. Lévêque J.L., Audoly B., Querleux B., & Leroy Y. (2007). A method and a system for generating a synthesized image of a hair. France Patent No. 11/723,307. L'Oréal & CNRS.

Autres

269. Pauchard L., Lazarus V., Atou B., Sikimoto K., Aitken G., & Lahanier C. (2007). Craquelures dans les couches picturales des peintures d'art. *Reflets de la Physique* 3, 5-9.



**M.P.I.A.**

**Modélisation - Propagation - Imagerie  
Acoustique**

---

# Modélisation - Propagation - Imagerie Acoustique

## *Chercheurs permanents*

CERVENKA Pierre	Directeur de Recherches CNRS
CHALLANDE Pascal	Professeur UPMC
COHEN-TENOUDJI Frédéric	Professeur Université Paris 7
COLLET Bernard	Professeur UPMC
COULOUVRAT François	Directeur de Recherches CNRS
DESTRADE Michel	Chargé de Recherches CNRS
FRIKHA Slaheddine	Maître de Conférences UPMC
LE MOYNE Sylvie	Maître de Conférences ISMP
MARCHAL Jacques	Maître de Conférences UPMC
MARCHIANO Regis	Maître de Conférences UPMC
MARTIN Vincent	Directeur de Recherches CNRS
MAUGIN Gérard	Directeur de Recherches CNRS
OLLIVIER François	Maître de Conférences UPMC
POUGET Joël	Directeur de Recherches CNRS
ROUSSEAU Martine	Chargé de Recherches CNRS

## *Émérites*

ALAIS Pierre	Professeur UPMC
HENNION Pierre-Yves	Professeur UPMC

*Effectifs au 31 Décembre 2007*

# *Modélisation - Propagation - Imagerie - Acoustique*

---

## *A - Introduction*

L'équipe MPIA constitue un pôle de compétences dans le domaine de la modélisation, de la simulation et de l'exploitation de la propagation en vue de la caractérisation et de l'imagerie des milieux complexes. Son évidente synergie est obtenue par le regroupement d'un fort potentiel humain (plus de 15 chercheurs et enseignants-chercheurs permanents, moyenne d'âge 46 ans) composé de théoriciens analystes ou spécialistes des simulations numériques et des expérimentateurs. Sa capacité à traiter une large gamme de problèmes concernant la propagation des ondes dans un cadre tant théorique qu'applicatif, qui s'appuie sur des moyens expérimentaux importants (capacité de développement de systèmes de détection acoustique, bassins d'expérimentation, ...), doit lui permettre d'acquérir une visibilité aux niveaux national et international, notamment européen. Celle-ci est déjà amorcée par la longue tradition de collaboration que ses membres entretiennent avec des laboratoires de l'UPMC (Institut des Nano-Sciences de Paris, ...) et des partenaires nationaux ou internationaux (académiques, instituts de recherches, industries), et par sa forte implication dans les projets européens (INTAS, PCRDT réussis).

Un effort de modélisation est nécessaire quant à la variété des supports de propagation envisagés (milieux plus ou moins solides, souvent anisotropes et hétérogènes), qui présentent des couplages multi-physiques (matériaux aux propriétés mécaniques et électromagnétiques couplées, milieux poreux, biomatériaux, structures quasi-1D ou quasi-2D). La propagation considérée est soit linéaire, soit faiblement non linéaire (les outils de l'analyse linéaire peuvent encore être exploités), soit fortement non



linéaire (des outils mathématiques originaux sont nécessaires - comme dans les études de chocs, d'ondes solitaires et de solitons ou de phénomènes d'instabilité). L'acoustique physique avec la propagation ultrasonore dans les solides ou les sédiments (acoustique sous-marine) et les méthodes de contrôle non-destructif pour la caractérisation des matériaux restent des objectifs très importants en raison de leurs intérêts sociaux-économiques. Les ondes de surface, le comportement dynamique de structures multicouches et l'étude de la stabilité de microsystemes multiphysiques apportent leur contribution aux futures micro- et nano-technologies innovantes. Le cas des ondes fortement non linéaires requiert l'utilisation de méthodes originales. L'utilisation des résultats théoriques et numériques qui en découlent fournit un lien précieux avec l'industrie aéronautique en aéroacoustique, mais aussi la possibilité de développement de nouvelles techniques expérimentales, domaine où l'équipe a déjà démontré son fort potentiel et ses succès en imagerie acoustique. L'émission paramétrique, l'holographie acoustique et la tomographie acoustique illustrent parfaitement cette richesse qui interférera nécessairement avec les recherches d'aspect plus théorique (ondes élastiques, aéroacoustique, etc.) au cours des années à venir. D'ores et déjà, les réflexions fondatrices de l'équipe MPIA ont permis d'associer les différents sujets selon les quatre grands thèmes complémentaires détaillés ci-après.

Du point de vue linéaire, l'élasticité et ses généralisations directes incluant des effets multiphysiques conduisent à la notion d'ultrasons et de vibrations avec leurs nombreuses applications (Thème 1). La propagation non linéaire, utile et exploitable, ou bien présentant des effets indésirables (Thème 2), offre une richesse extraordinaire. Elle combine, dans sa modélisation et sa mise en œuvre, de manière cohérente et couplée, une grande variété de phénomènes :

- la propagation dans les milieux fluides, solides ou multiphasiques (nuages, suspensions) ;
- les interactions non linéaires faibles (émission paramétrique, génération harmonique, autodémodulation) ou fortes (solitons, ondes de choc) ;
- les couplages d'ondes (dans les solides et structures élastiques, modes guidés dans les fluides) ;
- les différents phénomènes d'absorption (viscosité, relaxations, effets thermiques) en volume ou aux interfaces (parois absorbantes, milieux polydispersés) ;
- la diffraction (émetteurs de tailles finies, caustiques, champs localisés spatialement)
- la diffusion (simple ou multiple) de tailles différentes relativement à la longueur d'onde,
- la réfraction en milieu stratifié (comme l'atmosphère ou l'océan),
- les hétérogénéités (turbulence de la couche limite planétaire, milieux biologiques).

L'acoustique sous-marine (Thème 3), sujet traditionnel de l'équipe garde son actualité et exploite des applications pacifiques tout en fournissant des méthodes efficaces à l'acoustique aérienne. L'aspect expérimental est ici prépondérant avec une mise en œuvre nécessitant des coopérations extérieures importantes.

Enfin, le Thème 4, concernant certains problèmes de biomécanique et biophysique fait appel à l'élasticité non linéaire, avec la propagation correspondante dans des domaines aussi passionnants que ceux de la mécanique de la peau ou l'évolution dynamique de certaines plantes.

En résumé, les recherches de l'équipe concernent les problèmes d'acoustique physique, ondes et vibrations. On ne peut mieux les définir à cet instant que par les lieux de publication privilégiés des articles correspondants (*J. Acoust. Soc. Am.*, *J. Sound Vib.*, *Ultrasonics*, *Wave Motion*, *Phys. Rev.*, *J. Appl. Phys.*, etc.). Basées sur des sciences maintenant bien établies (ex : thermomécanique des milieux continus), elles penchent irrésistiblement vers une vision à plus fine échelle et suscitent une extension des domaines d'application avec un avenir dès lors extrêmement ouvert. Seules certaines des actions sont décrites en détail.

## *B - Propagation linéaire, ultrasons et vibrations : théorie et expérimentation*

L'élasticité est l'exemple même d'une théorie phénoménologique performante. Les ondes de surface, les ondes de bord et autres modes guidés ainsi que l'étude des vibrations et des champs rayonnés sont une véritable source d'information pour la caractérisation et le contrôle. Les secteurs concernés sont variés comme en témoigne la suite.

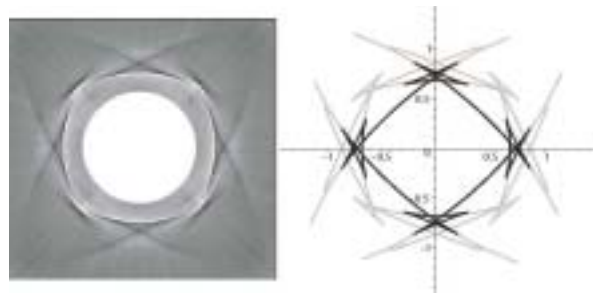
### **B. 1 - Ondes de surface en élasticité linéaire**

*B. Collet,  
M. Destrade,  
G.A. Maugin,  
M. Rousseau*

La recherche de l'équation de la vitesse d'une onde élastique de surface (une équation dont la vitesse est la seule inconnue) a occupé de nombreux chercheurs pendant plusieurs décennies. La réussite la plus aboutie dans ce domaine est la mise au point du formalisme intégral de Barnett et Lothe (1985), qui s'appuie sur les travaux pionniers de Stroh (1962), et qui permet d'obtenir un algorithme robuste pour la détermination numérique de la vitesse.

Une autre approche consiste à rechercher l'équation de la vitesse sous forme polynomiale grâce à un processus de rationalisation qui certes, génère des racines supplémentaires qu'il faut savoir trier, mais qui a aussi ses avantages. En particulier, le polynôme permet de tracer les surfaces des lenteurs d'un cristal anisotrope et reconstituer les motifs des fronts d'ondes exactement (Figure 1).

**FIGURE 6-1** *Fronts d'onde sur la surface d'un cristal de cuivre. Comparaison entre résultats expérimentaux par impact laser (Huet & Deschamps, 2004) et prédictions issues de l'équation de la vitesse polynomiale, montrant en noir les fronts de l'onde de Rayleigh homogène et en gris, les fronts dus à l'onde de fuite, et, près des cornes, aux interférences des ondes inhomogènes*



Pour l'onde piézo-acoustique de surface de Bleustein-Gulyaev (polarisation horizontale transverse), l'équation de Christoffel se factorise entièrement pour la symétrie 6mm (et l'équation de la vitesse correspondante est linéaire en  $\rho v^2$ ), alors que pour les symétries 4(bar), 4(bar)2m, 4(bar)3m, 23, c'est une quartique. Étonnamment, on trouve que dans ce dernier cas, l'équation de la vitesse pour des conditions aux limites métallisées est une *quadratique* en  $\rho v^2$ . Pour une surface non métallisée, on trouve une sextique en  $\rho v^2$ . Une fois la vitesse trouvée, la description complète des champs en découle (Figure 6-2).

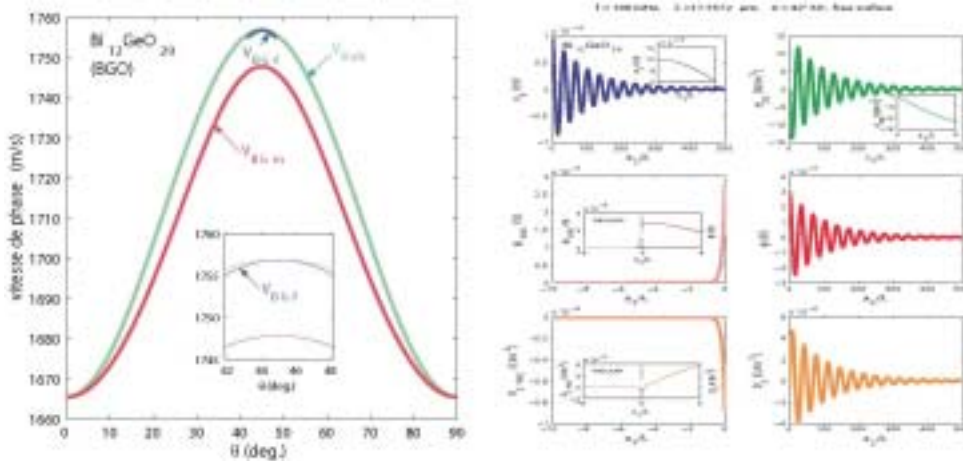


FIGURE 6-2 Onde de Bleustein-Gulyaev pour l'oxyde de bismuth germanium. La Figure de gauche représente la variation de la vitesse avec l'angle de coupe. Celle de droite montre les variations des champs (déplacement transverse, contrainte de cisaillement, potentiel électrique, induction électrique) avec la profondeur, lorsque la surface est non métallisée et l'angle de coupe est  $42^{\circ}30'$ .

On peut aussi trouver des résultats explicites pour les ondes piézo-acoustiques de surface à deux composantes et pour les ondes transverses horizontales dans les structures couche/substrat (ondes de Love).

### B. 2 - Ondes de bord

Ces ondes se propagent de façon harmonique le long de l'arête d'une plaque fine (théorie de Love-Kirchhoff) et leur amplitude décroît rapidement avec la distance normale à l'arête. Elles ont été découvertes de manière théorique et numérique il y a plus de 40 ans, et de nombreuses observations expérimentales sont venues confirmer l'existence de modes de vibration et de propagation localisés dans des plaques et disques de faible épaisseur. Ce n'est que récemment qu'on est passé au stade des applications, en utilisant la piézoélectricité. Ainsi on peut construire un moteur piézo linéaire ou rotatif de très petite taille sur ce principe. Peut-être d'autres instruments suivront, répétant ainsi les avancées technologiques dues aux ondes de surface.

B. Collet,  
M. Destrade

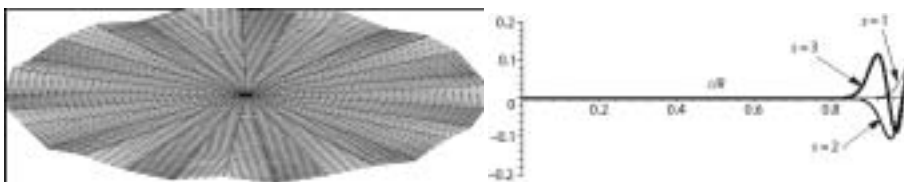


FIGURE 6-3 On peut imaginer que la frappe d'une cymbale sur son arête génère des ondes de bord qui vont se propager de manière localisée près du pourtour. Pour une plaque isotrope on peut résoudre le problème analytiquement et dessiner les différents modes de propagation.

### B. 3 - Guides d'ondes piézoélectriques ou piezo-semiconducteurs

B. Collet,  
G.A. Maugin

Les nano-fils, les nano-poutres, les nano-courroies, les nano-anneaux, les nano-ressorts, ... piezo-semiconducteurs seront très prochainement les éléments de base des futurs systèmes nano-électro-mécaniques (NEMS), comme : générateurs, actionneurs, résonateurs, filtres, capteurs.

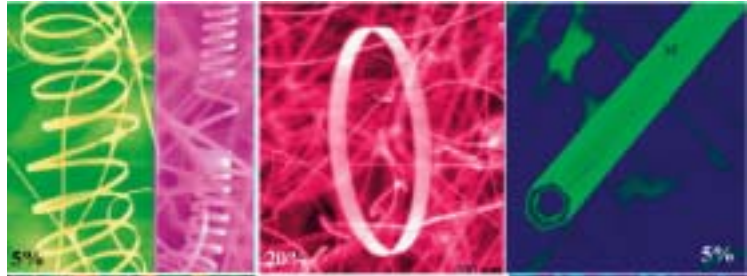


FIGURE 6-4 (d'après Z. L. Wang et al., 2005)

Ces minuscules structures de quelques dizaines de nanomètres à quelques micromètres de dimensions transversales restent délicates à caractériser finement. Des approches théoriques complétées par des simulations sont d'excellents moyens pour comprendre et optimiser leurs propriétés, en particulier en ce qui concerne les réponses acousto-électroniques et acousto-optiques. Elles doivent aussi permettre d'orienter les expériences, choisir les dimensions et les matériaux des spécimens à tester, ... La modélisation du comportement de ses structures est ici abordée via les outils de la mécanique des milieux continus en interaction avec les champs concernés. Des travaux en cours concernant la propagation de modes guidés sont menés en collaboration avec Institut d'Electronique, de Microélectronique, et de Nanotechnologie de Lille (IEMN).

Autres travaux : . A. Étude des propriétés générales de la propagation élastique ou électromagnétique dans les structures finement feuilletées, exploitant la formulation de Stroh [en collaboration avec V.I. Alshits (Moscou) et M. Deschamps (Bordeaux)] ;

B. Établissement des propriétés effectives de matériaux adaptatifs (ex : piézoélectriques ou électrostrictifs) en vue d'applications dynamiques [en collaboration avec les équipes de R. Rodriguez-Ramos (Cuba), F.D.R. Sabina (Mexico) et H. Berger (Magdeburg)]

### B. 4 - Adhésion : microstructure et contrôle par ultrasons

M. Rousseau

Le processus d'adhésion est un phénomène physico-chimique complexe qui intervient dans de nombreux procédés industriels, notamment le collage structural. Si l'intérêt de ces procédés n'est plus à démontrer, la caractérisation et le contrôle prévisionnel sont nécessaires pour des raisons de durabilité et de sécurité. L'étude de l'adhésion et du collage structural (métal/adhésif/métal) est fondamentalement pluridisciplinaire (physico-chimie, mécanique de la rupture et de l'endommagement, caractérisation et contrôle par thermographie infrarouge, holographie, ultrasons) et multi approches (analytique, numérique, expérimentale). Aussi au cours de ces années, avons nous travaillé dans un environnement riche en collaborations et en financements (ACI financée par le MENRT, Post-doc financé par la

Fondation EADS, collaborations avec l'ONERA, l'Université de Versailles et l'Université du Havre, l'ESPCI, l'INSP).

Dans ce contexte, notre contribution s'est concrétisée par la construction de modèles mécaniques (comportement de l'adhésif et conditions d'interface métal/adhésif) susceptibles de décrire des effets de microstructure (prétraitements de surface, défauts cohésif ou adhésif, vieillissement thermique) et la validation d'outils de caractérisation ultrasonore (fréquences de coupure et modes propres guidés - de type ondes de Lamb pour des structures planes - résultant de l'écriture des conditions d'interface).

Concernant la prise en compte de défauts, les modèles « ressort » ou « masse/ressort » couramment utilisés sont valables en régime statique. En introduisant la longueur d'onde comme grandeur caractéristique, il est possible de proposer des modèles dynamiques plus fins capables de dissocier les effets cohésifs des effets adhésifs.

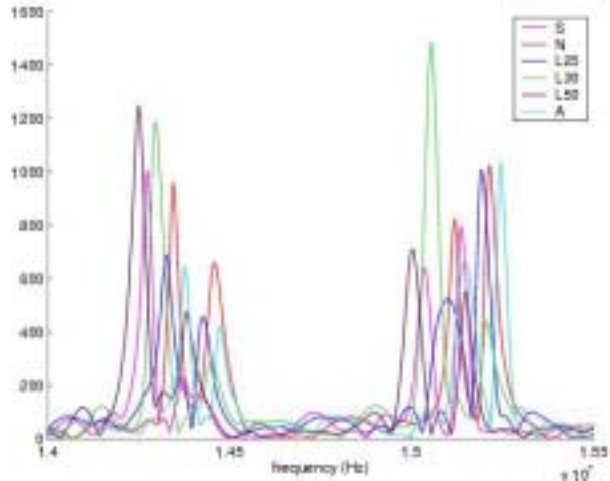
1. *Le modèle rhéologique cohésif* consiste à remplacer la couche de colle par une distribution surfacique de ressorts longitudinaux et transversaux avec masse. Il en résulte un choix de comportement et de conditions d'interface. L'étude analytique et numérique de la propagation des modes propres ultrasonores guidés montre l'influence de ce choix sur la position des fréquences de coupure des modes. La comparaison théorie/expériences, effectuée sur des échantillons de fabrication industrielle montrent des écarts interprétés en terme d'endommagement global de l'adhésif (défaut cohésif) dont la valeur est d'autant plus faible que la longueur d'onde utilisée est fine. Dans la pratique, les défauts cohésifs sont des bulles d'air ou des zones moins réticulées.

2. *Le modèle rhéologique adhésif* consiste à conserver la couche de colle et à décrire le contact au niveau des deux interfaces métal/adhésif par une distribution surfacique de ressorts longitudinaux et transversaux. Une démarche analogue à la précédente permet d'interpréter les écarts théorie/expériences en termes d'endommagement local aux interfaces (défaut adhésif). Dans la pratique, les défauts adhésifs sont des zones de délaminage.

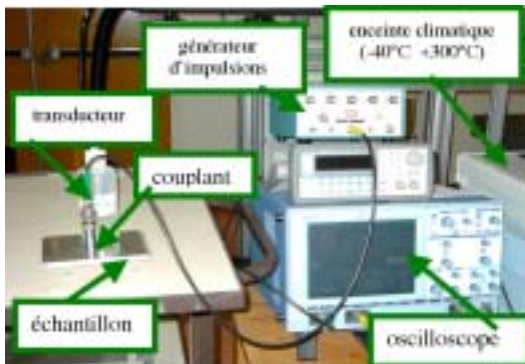
Le rôle des prétraitements de surface des métaux sur la tenue des collages structuraux est connu et exploité par les industriels sans réel support scientifique. Les plus couramment utilisés sont les prétraitements mécaniques (sablage, rainurage), chimiques (acide ou base), thermiques. Leur rôle est de favoriser l'ancrage et/ou le mouillage de l'adhésif sur le métal. L'ancrage est assuré par la création d'une rugosité optimale et le mouillage par la maximisation de l'énergie de surface du métal et la minimisation de l'énergie d'interface métal/adhésif. Pour chacun des deux effets, nous avons élaboré un modèle mécanique et étudié son influence sur les modes propres guidés dans la structure collée.

Concernant le mouillage, il est évalué par la valeur de l'énergie libre de surface. Pour introduire ce paramètre, on modélise les interfaces métal/adhésif par des milieux continus 2D. Le tenseur surfacique des contraintes faisant intervenir l'énergie libre de surface, les conditions d'interface métal/adhésif dépendent de ce paramètre. L'énergie de surface n'influe pas sur les fréquences de coupure (incidence normale donc courbure nulle). C'est sur le comportement de l'onde de Rayleigh que nous pouvons estimer sa valeur.

**FIGURE 6-5** Résultats expérimentaux : Structure plane Al 2024 T3/DGEBA/Al 2024 T3  
*État naturel du Al 2024 T3 : prétraité thermiquement (T3) avant la commercialisation pour le secteur aéronautique. Fréquences de coupure en fonction des différents prétraitements de surface et ordre d'efficacité observé : A/N/ L25/L30/S/L50. Le prétraitement A (acide 5mn) optimise le niveau moyen de rugosité du métal et peut donc augmenter les performances du Al 2024 T3*



Concernant les rugosités, nous avons construit deux modèles rhéologiques. L'un est adapté à la prise en compte de rugosités aléatoires, l'autre plus sophistiqué peut être utilisé pour des rainurages, dont on connaît le profil exact. Cette approche nous a permis d'expliquer la classification expérimentale des différents prétraitements. L'ordre d'apparition des fréquences de coupure (voir figure ci-dessus) est inverse à l'ordre d'efficacité des prétraitements (A acide, N naturel, S solvant, L25, 30, 50 lessive (base) 25mn, 30mn, 50mn).



**FIGURE 6-6**

Le vieillissement thermique est réalisé par cycles successifs, en utilisant une enceinte thermique. Les échantillons sont testés (voir photo, Figure 6) à température ambiante et après chaque cycle, par une technique d'émission/réception en contact, et ce pour une large gamme de fréquence (1 à 25 MHz).

Chaque cycle de vieillissement au froid (67h à -40°C) montre, une légère dégradation des interfaces sensible aux ultrasons dès le premier cycle.

Au cours du premier cycle de vieillissement au chaud (67h à 70°C), les mesures ultrasonores indiquent une augmentation du module de Young de l'adhésif correspondant à sa réticulation complète. Aux cycles suivants, on observe une dégradation progressive des interfaces. Ces différents résultats sont parfaitement expliqués par le modèle rhéologique adhésif avec une estimation tout à fait correcte.

## B. 5 - Suivi de la prise de bétons fluides par ultrasons

Les bétons fluides sont appréciés dans l'industrie pour leur facilité de mise en œuvre et la possibilité d'obtenir des surfaces horizontales bien planes (coulage de dalles). La vibration de ces bétons n'est guère possible car elle entraîne la ségrégation des gros granulats. La composition de ces bétons est complexe. Le milieu comporte plusieurs classes de granulométrie et requiert l'addition d'agents fluidifiants et d'agents de viscosité. Une faible variation de la proportion d'un des constituants peut entraîner l'instabilité rhéologique du milieu. Nous avons entrepris une étude systématique de la qualité et de la robustesse d'une formulation en faisant varier systématiquement la proportion d'eau, la quantité de fluidifiant et celle du viscosant en suivant la prise du béton par ultrasons.

*F. Cohen-Tenoudji*

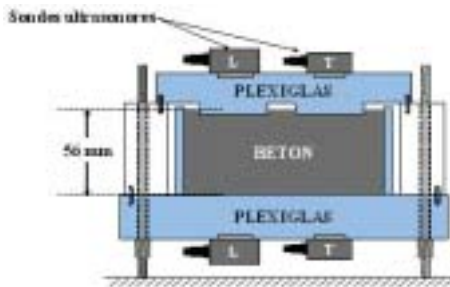


FIGURE 6-7

Le béton est placé dans une cellule de plexiglas. Deux paires de transducteurs ultrasonores sensibles aux ondes longitudinales et transverses sont placées selon des axes verticaux sur les parois de la cellule. On mesure les coefficients de réflexion des ondes sur les interfaces plexi-béton par le dessus et par le dessous, et les signaux transmis dans la cellule sont enregistrés (Figure 7 ci-contre)

Un excès d'eau entraîne le ressuage du béton. La présence d'une lame d'eau à la surface supérieure modifie le coefficient de réflexion des ondes longitudinales à l'interface supérieure. On peut en déduire l'épaisseur de la lame d'eau et sa variation au cours du temps. On peut voir Figure 8. la différence sur les coefficients de réflexion (obtenus par analyse de Fourier) dans le cas d'un excès d'eau à différentes fréquences.

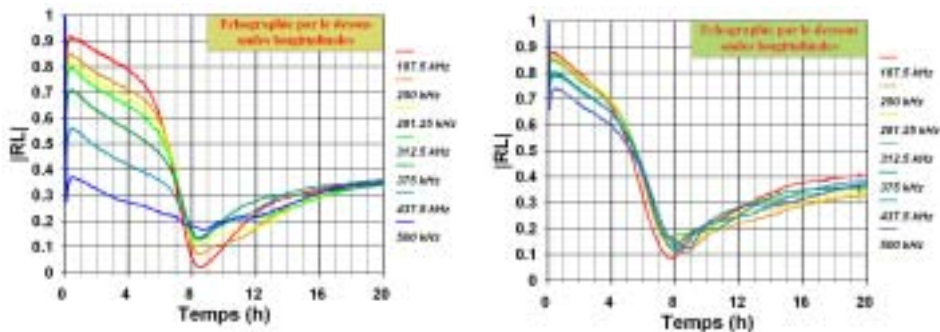


FIGURE 6-8

Nous avons étudié en outre la variation au cours de la prise de l'atténuation des ondes ultrasonores transmises dans le béton. Nous interprétons l'atténuation comme étant due à la diffusion des ondes par les plus gros granulats présents dans le milieu ( $D = 12$  mm). Nous considérons l'ensemble des constituants de tailles inférieures : sable+ciment+particules



fines de filler clincker + eau comme un milieu effectif dans lequel sont placés les gros granulats (Figure 9). Ce modèle simple rend bien compte des différents régimes d'atténuation observés au cours de la prise : diffusion Rayleigh en basse fréquence (atténuation en  $f^4$  ), régime stochastique aux fréquences intermédiaires (atténuation en  $f^2$  ). Nous observons la transition du régime propagatif au régime diffusif prévue par Sornette.

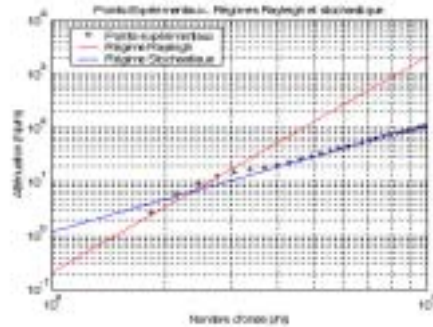
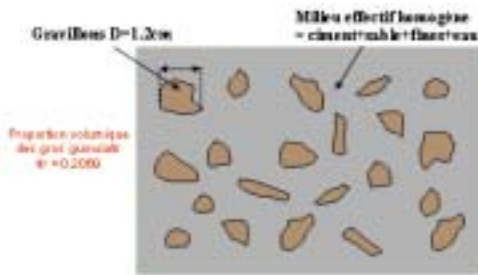


FIGURE 6-9 Béton = milieu effectif homogène + hétérogénéité

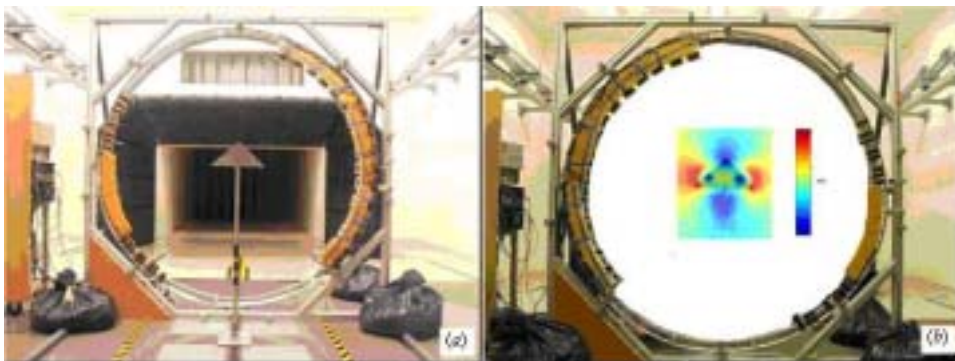
FIGURE 6-10 Comparaison de l'atténuation expérimentale (formulation FCJ + 40% fluidifiant) avec les courbes d'atténuation théoriques du régime de Rayleigh (bas nombres d'onde) et du régime stochastique (nombres d'onde intermédiaires).

## B. 6 - Tomographie ultrasonore d'écoulements fluides

M. Cohen-Tenoudji,  
F. Ollivier

En collaboration avec la société VisioSon créée en 2006 à la suite de notre réussite au Concours OSEO-ANVAR pour l'aide à la création d'entreprises innovantes en 2005, nous avons poursuivi le développement de scanners pour la tomographie des écoulements et des champs de température dans l'air. Les performances du scanner circulaire à 16 émetteurs à étincelle - 16 récepteurs capacitifs multiplexés sont améliorées. La résolution des images est évaluée à 1 cm sur un champ de 2 m<sup>2</sup>. Ce scanner a été mis en œuvre en soufflerie (réduction 2/5) (Figure 6-11a.) pour étudier les tourbillons de sillage d'une aile delta. Les résultats sont présentés Figures 6-11b et 6-12.

FIGURE 6-11  
(a) Scanner circulaire en soufflerie pour l'étude des tourbillons de sillage d'une aile delta  
(b) Image en fausses couleurs du module de la vitesse des écoulements dans le plan du scanner.



Nous développons actuellement une nouvelle déclinaison du scanner avec une géométrie en U dans lequel les 32 émetteurs et les 32 récepteurs sont alignés linéairement (figure 12). Un enregistrement des temps de vol par des compteurs permettra de diminuer le flot de données transmises à l'ordinateur et de diminuer le temps pour l'enregistrement d'une image.

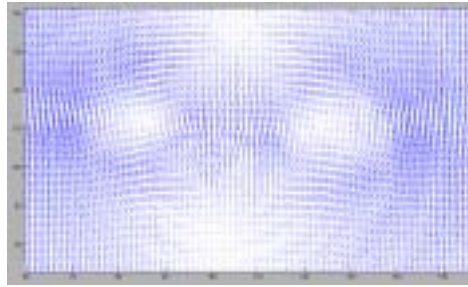


FIGURE 6-12 *Image des vitesses dans les deux vortex contrarotatifs dans le sillage de l'aile.*



FIGURE 6-13 *Scanner en U placé en sortie d'un convecteur d'air pour l'étude de la turbulence dans une rotation solide du flux d'air.*

## B. 7 - Mécanique des matériaux adaptatifs

L'objectif scientifique majeur de cette opération de recherche est de mettre au point un outil de modélisation performant de structures piézoélectriques multicouches associant plusieurs hypothèses et approximations sur la distribution des champs électromécaniques et de valider les modèles ainsi proposés par des études expérimentales. Les objectifs techniques visés concernent (i) le contrôle passif de vibrations par des actionneurs piézoélectriques distribués, (ii) le contrôle du rayonnement acoustique transmis par une structure élastique (plaque) et l'actionnement d'une structure bistable (poutre flambée) afin de concevoir des surfaces tactiles ou d'opérer un contrôle de forme.

*J. Pouget,  
A. Fernandes,  
C. Maurini,  
F. Ollivier*

### B.7.a - *Modélisation de composites piézoélectriques pour le contrôle passif de vibrations par des actionneurs distribués*

Ce travail effectué dans le cadre d'une collaboration internationale avec l'Université de Rome 1 « La Sapienza », Italie vise la modélisation et l'analyse de structures mécaniques équipées d'actionneurs piézoélectriques en vue du contrôle de vibrations. Dans une première étape, un modèle de poutre piézoélectrique multicouches incluant l'influence de la distribution des champs électromécaniques 3D sur le modèle 1D est analysé et conduit à un modèle de poutre piézoélectrique d'Euler-Bernoulli amélioré. Une formulation variation-

nelle mixte tenant compte des hypothèses sur la distribution des champs dans la section à l'aide de multiplicateurs de Lagrange permet de déduire les équations du mouvement aussi que les lois constitutives du présent modèle de poutre. Dans une deuxième étape, et sur la base du modèle de poutre piézoélectrique, des études numériques et expérimentales de l'analyse modale d'une poutre élastique équipée d'actionneurs piézoélectriques conduit à une méthode d'identification du modèle proposé. Les résultats analytiques et expérimentaux ainsi obtenus sont exploités pour l'optimisation du contrôle passif de vibrations par un circuit électrique résistif-inductif connecté aux éléments piézoélectriques. Les performances d'un tel système sont mises en évidence expérimentalement, en particulier, la possibilité d'un contrôle multimodal.

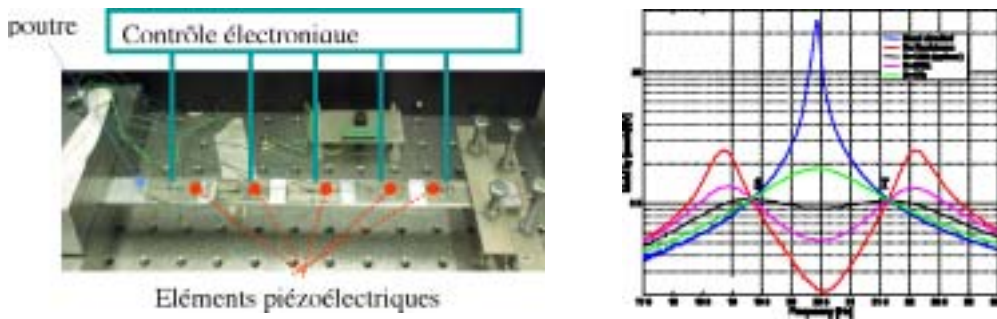


FIGURE 6-14 Montage expérimental pour le contrôle de vibrations par des actionneurs piézoélectriques et réponse spectrale selon le circuit électrique de contrôle.

### B.7.b - Contrôle du rayonnement acoustique d'une structure déformable

FIGURE 6-15 Montage expérimental pour le contrôle du rayonnement acoustique : plaque d'aluminium équipée de 8 actionneurs piézoélectriques connectés aux circuits électriques passifs.



Le contrôle du bruit engendré et transmis par des structures mécaniques est une extension naturelle du contrôle de vibrations, des applications importantes pour l'industrie automobile, ferroviaire et aéronautique en découlent. Dans ce cadre nous nous proposons l'étude numérique et expérimentale de systèmes de contrôle passif par des circuits électriques distribués (thèse de G. Rosi). Dans un tel système on utilise plusieurs éléments piézoélectriques distribués sur la structure mécanique (par exemple une cloison, une portière de voiture, etc.). Chaque élément piézoélectrique est utilisé à la fois comme capteur et actionneur et ces éléments sont interconnectés à un réseau de contrôle qui se comporte comme un système dynamique dissipatif du second ordre. Cet axe de recherche est une bonne extension à des cas plus complexes du contrôle multimodal développé pour des structures simples, comme les poutres. L'optimisation du contrôle se fait dans le cadre de couplage fluide-structure. Ainsi, l'objectif visé est la réduction de la puissance sonore engendrée ou transmise par la structure mécanique. Les avantages de la technique proposée sont la possibilité du contrôle sur une large bande de fréquences et la

stabilité intrinsèque de la loi de contrôle. La phase de validation expérimentale est effectuée sur le site de Saint-Cyr-l'École pour ce qui est de la mesure des champs acoustiques (collaboration avec F. Ollivier).

### B.7.c - *Actionneurs électroactifs, non-linéarités géométriques et structures bistables*

La puissance d'actionnement réduite et les petites déformations engendrées sont les limites principales à l'utilisation des matériaux piézoélectriques dans le contrôle de forme de structures mécaniques. En l'attente de futurs développements en sciences des matériaux, on cherche des solutions pour engendrer de grands déplacements au moyen de petites déformations et de faibles énergies d'actionnement.

Une possibilité est de mettre à profit les effets non linéaires du type géométrique présents dans des structures minces en grands déplacements et en grandes rotations soumises à des précontraintes. Notamment, une structure non-linéaire multi-stable possède plusieurs états d'équilibre stables à des niveaux énergétiques similaires. Une poutre élastique soumise à une charge axiale supérieure à la charge critique de flambement en est un exemple typique. Si une telle structure est équipée de matériaux actifs, alors nous sommes capables, par simple actionnement (pilotage par un potentiel électrique dans le cas d'actionneurs piézoélectriques ou d'un gradient de température pour des alliages à mémoire de forme), de faire basculer la structure d'un état d'équilibre à l'autre au prix d'une faible énergie. Alors, des déplacements intéressants avec de petites déformations induites pourront être produits. En outre, le système restera dans la configuration déformée stable après relâchement des actions appliquées. Ce concept est exploité pour la conception de microsystèmes électromécaniques (micro-switches, micro-miroirs, micro-pompes, surfaces tactiles).

Une des problématiques liées à l'utilisation des structures bistables est le contrôle de stabilité. Dans l'exemple de la poutre en post-flambement avec un seul paramètre d'actionnement, nous ne sommes pas capables de contrôler avec continuité la forme de la structure. Quand l'instabilité est amorcée, le système bascule (presque) instantanément vers une nouvelle configuration d'équilibre stable par le phénomène du claquage (snap-through). Cela reste une limitation pour les applications qui demandent un contrôle continu de la forme de la structure, comme dans des surfaces actives pour l'optique (miroirs adaptatifs) ou les «morphing wings».

Dans des travaux en cours, nous avons montré que, dans le cas d'une poutre flambée, si nous disposons de plusieurs paramètres d'actionnement, nous sommes capables non seulement de produire de grands déplacements à l'aide de faibles énergies d'actionnement, mais aussi de contrôler la stabilité de la structure. Nous pourrions, par exemple, passer d'une configuration stable à l'autre de la poutre flambée en passant par des configurations d'équilibre stables, évitant ainsi le phénomène du claquage. Pour une poutre composite piézoélectrique en appuis simples, deux voltages de contrôle sont nécessaires.

Cette étude se complète par une validation numérique par éléments finis sur le modèle totalement non linéaire. L'étape numérique est indispensable afin de dimensionner un prototype de démonstration qui servira pour la phase d'identification du modèle.

Parallèlement à cette étude et en collaboration avec le LIST du CEA, un travail de recherche sur l'actionnement de structures bistables constituées d'une poutre flambée encastrée-encastrée (thèse BDI de P. Cazottes) a fourni les résultats suivants : (i) construction d'un modèle réduit sur les 2 premiers modes de flambage, (ii) actionnement par une force décalée et (iii) validation expérimentale de la réponse force-déplacement de la structure.

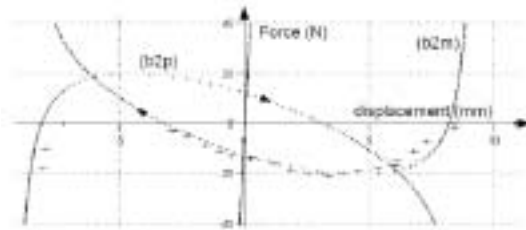
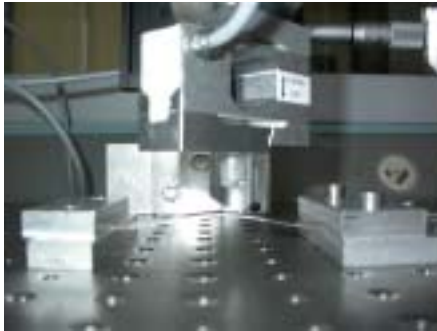


FIGURE 6-16 Montage expérimental pour la détermination de la réponse force-déplacement selon la position de la force d'actionnement et comparaison modèle-essais.

Ce travail se poursuit par l'étude d'un système d'actionnement distribué à l'aide de couches actives ; plusieurs solutions sont envisagées : (i) alliage à mémoire de forme (AMF), (ii) couches piézoélectriques et (iii) polymères électroactifs. La conception d'un prototype est programmée.

Les extensions naturelles et prometteuses des modèles de poutres bistables sont en général les structures composites minces. Une première étude s'intéressera à une plaque composite multicouche, où le procédé d'assemblage à haute température de couches orthotropes cause des précontraintes d'origine thermiques et la présence de différentes positions d'équilibre stables. Une telle structure est intéressante pour les applications en aéronautique adaptative. Le but est de développer des méthodes pour combiner les effets non-linéaires et les possibilités offertes par un actionnement multiparamétrique afin (i) d'obtenir des structures capables de déformations et déplacements importants et (ii) de contrôler avec continuité la configuration de ces structures en évitant des phénomènes d'instabilité.

## B. 8 - Vibrations et imagerie du champ proche

V. Martin,  
F. Ollivier,  
S. Le Moigne

L'expérience acquise sur le site de Saint-Cyr dans le domaine de l'antennerie en acoustique sous-marine (voir plus ci-après) est transférée depuis une dizaine d'années aux problèmes large bande de l'acoustique audible. Les recherches concernent principalement le développement et l'optimisation de techniques expérimentales pour l'imagerie et la caractérisation des sources de bruit. Il s'agit aussi bien de développements technologiques pour concevoir

et construire les instruments, que de mise en œuvre et d'optimisation de techniques de traitement du signal et d'imagerie. Ces techniques de diagnostic passif sont fondées sur des méthodes inverses, partant de la mesure du champ acoustique pour remonter aux sources de bruit. On distingue les mesures en champ proche auxquelles sont appliquées des techniques d'holographie, et les mesures en champ lointain qui font appel à des techniques d'antennerie différentes.

### B.8.a - *Imagerie acoustique de champ proche*

En holographie acoustique de champ proche, le champ des vitesses normales à la surface d'une structure vibrante est reconstruit par méthode inverse à partir de la mesure du champ de pression à proximité de cette surface.

L'originalité des travaux réside d'une part dans les moyens de capture du champ acoustique développés par l'équipe (120 microphones sur une matrice rectangulaire et système d'acquisition synchrone), et d'autre part dans les applications à des sources vibratoires large bande non-stationnaires. Une technique d'analyse modale par impact (IPNAH : Impulse Planar Nearfield Acoustic Holography) montrant des avantages par rapport aux méthodes traditionnelles a ainsi été développée : mesure large bande sans contact, temps de mesure réduit.



FIGURE 6-17 *Montage expérimental test de l'IPNAH*

Cette méthode agit dans le domaine des nombres d'onde et bénéficie du traitement des composantes évanescentes mesurables seulement en champ proche. Elle utilise un algorithme de transformée de Fourier spatiale rapide qui limite actuellement son application à la reconstruction de structures planes.

La méthode a été éprouvée dans le cadre de partenariats très diversifiés, tant par les domaines d'application que par la nature des partenaires : industriel (évaluation de nouveaux capteurs Pression-Vitesse, contrat PSA), universitaires (influence de précontraintes et de modification structurelles sur le comportement modal de tables d'harmonies, LAM ; contrôle actif par actionneurs piézoélectriques, MPIA), institutionnel (analyse modale et étude du rayonnement acoustique d'un clavecin du 17<sup>ème</sup> siècle, Musée de la Musique).

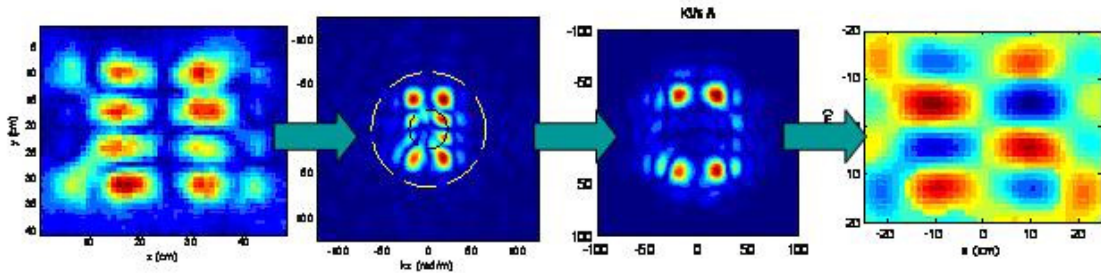


FIGURE 6-18 Quatre étapes de traitement des champs harmoniques par holographie plane. L'exemple présenté est celui d'une plaque mince de 40 x 50 cm. La composante harmonique traitée est à 1186 Hz. De l'espace réel, le champ est transformé dans le domaine des nombres d'onde où sont filtrées les hautes fréquences spatiales. L'étape suivante consiste en l'application d'une fonction de Green inverse pour rétro-propager le champ dans le plan de la source. La dernière étape ramène dans l'espace réel, où l'on observe la déformée opérationnelle de la plaque.

Les faibles amplitudes des ondes évanescentes et la forte sensibilité des méthodes inverses au bruit des mesures expliquent l'importance du conditionnement des données, et notamment leur filtrage. Dans cette perspective, des techniques d'analyse statistique en composantes principales de champs large bande sont en cours d'investigation. Elles ont pour objet l'optimisation du filtrage des champs harmoniques, sans discrimination de leurs composantes relativement au nombre d'onde. Ce travail devrait aussi être transposé au traitement des mesures en champ lointain.

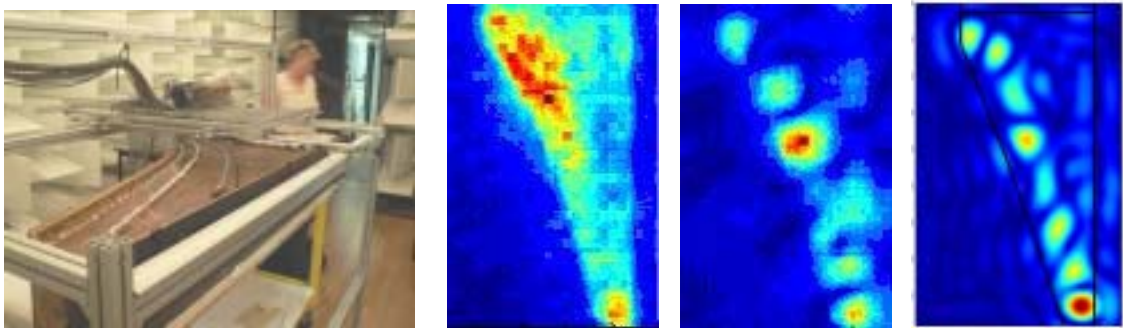


FIGURE 6-19 Analyse par IPNAH de la table d'harmonie d'un clavecin du XVIIe siècle. (a) Dispositif expérimental. (b) Niveau efficace du champ brut. (c) Amplitude de la contribution à 485 Hz. (d) Déformée opérationnelle à 485 Hz

### B.8.b - Imagerie acoustique de champ lointain

L'imagerie de sources de bruit éventuellement mobiles et instationnaires implique la modélisation, la construction et la mise en œuvre d'antennes acoustiques large bande à grand nombre de microphones. Ainsi, des développements technologiques ont été réalisés depuis

deux ans dans le cadre du projet PREDIT « REBECA », dont l'un des objectifs est l'identification des sources du rayonnement acoustique extérieur des automobiles.

Une antenne de 120 microphones et 4 m de diamètre a été construite après optimisation de la position des capteurs. Ayant fixé des objectifs sur les diagrammes de rayonnement, cette optimisation a été obtenue en utilisant des techniques d'algorithmes génétiques.

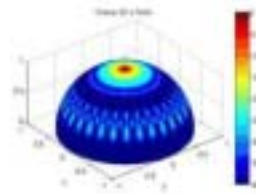


FIGURE 6-20 Diagramme de rayonnement en champ lointain à 1 kHz de l'antenne REBECA

En Novembre 2006, une campagne de mesures s'est tenue dans la chambre semi-anéchoïque du CEVAA (partenaire du projet). Les champs acoustiques émis par le roulement du train avant d'une automobile à différentes vitesses stabilisées ou en accélération (de 30 à 130 km/h) ont été enregistrés, en champ proche avec l'antenne holographique, et en champ lointain avec l'antenne REBECA.



FIGURE 6-21 Expérience d'imagerie du bruit de roulement – Chambre Anéchoïque du CEVAA – Rouen – novembre 2006.

Autres travaux : . Dans le cadre d'un Contrat EPFL avec Rieter-Winterthur-Suisse et la CTI-Berne-Suisse, la question est posée de l'amélioration de la méthode des rayons. Une greffe partielle de la méthode intégrale sur la méthode des rayons a été tentée avec un succès mitigé. Sur le plan purement scientifique, la greffe est montrée rationnellement et il n'est pas exclu que d'autres situations que celles envisagées ne sachent pas mieux profiter du procédé original.

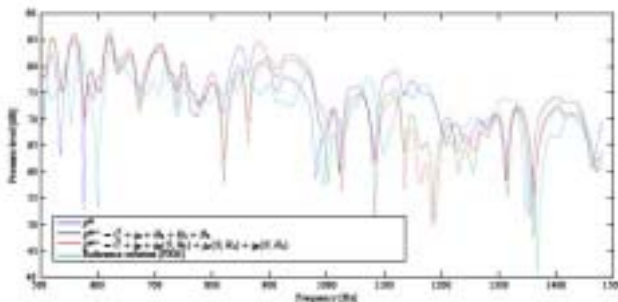


FIGURE 6-22 La greffe de la méthode intégrale sur la méthode des sources images n'apporte pas d'amélioration significative au stade de notre étude; en effet la solution avec greffe en rouge diffère bien de la solution purement spéculaire en bleu marine, mais ne se rapproche pas de façon significative de la courbe de référence en bleu ciel.



## B. 9 - Transferts solidiens et rayonnement acoustique (Contrat d'encadrement de recherche avec le Centre d'Etudes des Vibrations et de l'Acoustique Automobile - Rouen)

Vincent Martin

De longue date, le monde des transports a utilisé la modélisation numérique et la sous-structuration pour déduire le comportement de pièces couplées à partir du comportement des pièces isolées. Par exemple, les ailes et le fuselage d'un avion sont étudiés numériquement avant de prédire leur comportement après assemblage. Cette même philosophie appliquée aux études expérimentales pose des problèmes de métrologie. Pour ne citer qu'un exemple, l'acoustique connaît bien cette question lors de l'assemblage de guides d'ondes sur des cavités à plusieurs ports. Le monde de l'automobile avec ses contraintes actuelles de confort acoustique et vibratoire doit aussi passer par là pour prédire le comportement vibratoire de sous-systèmes sur véhicules à partir de la connaissance de leur comportement sur des bancs de mesure, ayant en vue le rayonnement acoustique des sous-systèmes en service.

Le problème direct consiste à déterminer les efforts dus à un sous-système et entrants dans la structure d'accueil qu'est le véhicule, à partir des efforts entrants sur un banc de mesure. Au-delà du formalisme maintenant relativement bien maîtrisé en régime linéaire, les mesures des efforts et d'impédances sont délicates.

Fort de la description directe, comment passe-t-on d'une contrainte sur la structure d'accueil à une contrainte sur la mesure au banc ? Cette question se traduit par le passage de normes (mathématiques) dont on n'a pu déduire que des conditions suffisantes à satisfaire sur banc, avec le corollaire sur l'éventuel surdimensionnement des sous-systèmes.

Enfin, si les contraintes sur banc ne sont pas satisfaites, comment peut-on jouer sur les interfaces, la plupart du temps des raideurs, pour aller dans le bon sens. Dans l'état actuel de l'étude, on ne dispose que de propriétés (là aussi issues de conditions seulement suffisantes) sur les raideurs et non de valeurs.

La problématique dans son ensemble est maintenant bien cernée à l'aide de formulations mathématiques, mais les conditions suffisantes dont on a parlé ne donneront probablement pas de méthodologies rationnelles pour satisfaire les contraintes. On pense donc analyser une configuration expérimentale et, à défaut de prédire à coup sûr un bon comportement en service, tout du moins peut-on espérer identifier les écueils à éviter.

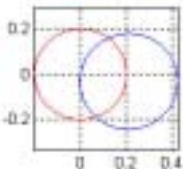


FIGURE 6-23 Dans le champ complexe, dans la configuration d'un système à 2 fois 1 degré de liberté, l'effort entrant dans la structure d'accueil à une fréquence donnée, parcourt un cercle lorsque la raideur de l'interface varie (courbe bleue). En présence d'une contrainte sur le module de cet effort (en rouge) les raideurs admissibles sont telles que l'effort entrant se situe sur l'arc de cercle bleu inclus dans le cercle rouge. Cette image géométrique bien pratique ne s'étend pas, hélas, au cas d'un système à 2 fois  $n$  degrés de liberté.

## B. 10 - Qualification de méthodes

### B.10.a - *Holographie acoustique de champ proche (Programme PREDIT « Rebeca » (Vincent Martin) - Réduction du bruit Extérieur dans la Conception Automobile - financé par l'ADEME)*

La pression mesurée sur une antenne de microphones située parallèlement et proche d'une source plane permet de reconstituer la vitesse vibratoire de l'objet rayonnant. En fait, la reconstruction se fait sans connaître précisément les conditions sur la partie complémentaire de la source dans le plan source. Est-ce sans conséquence ?

Dans le programme Rebeca, le bruit de roulement constitue, pour le moment, le centre d'intérêt. En supposant que l'holographie de champ proche donne des renseignements (ce qui n'est pas du tout évident en pratique), que pourra-t-on garantir sur la vitesse vibratoire du flanc face à l'antenne, suite à un traitement holographique acoustique ?

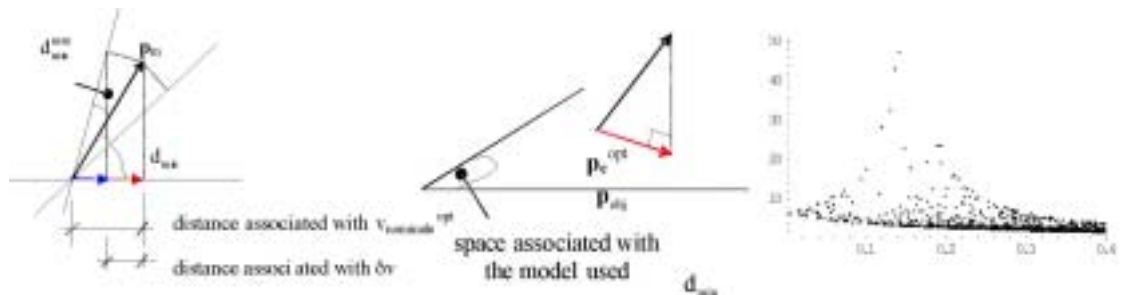


FIGURE 6-24 *Vecteur objectif et plan modèle : cône d'incertitude et nuage de l'aptitude à atteindre l'objectif en fonction de l'ouverture du cône. C'est à partir de ce nuage de points que l'on espère identifier le modèle tout autant que la vitesse vibratoire de la source plane.*

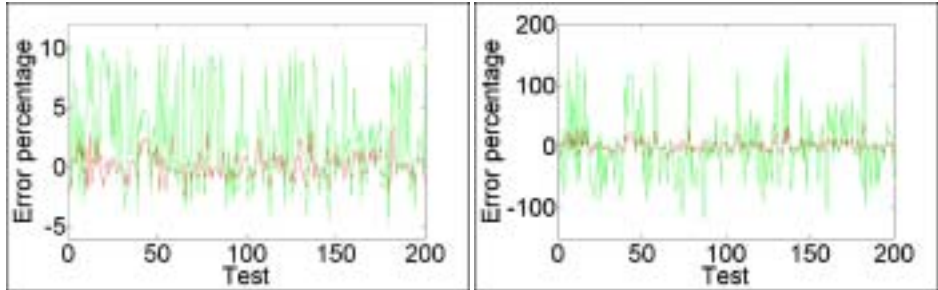
Le problème direct qui passe de la vitesse vibratoire du pneumatique à la pression sur l'antenne montre qu'une admittance localisée sur la partie complémentaire du plan source et sur le flanc avant peut révéler la charge acoustique passive à l'arrière du plan source ainsi que la vitesse vibratoire de la jante de roulement et du flanc arrière. L'écriture de problèmes équivalents résulte de concepts analytiques en 1D. La mise en oeuvre numérique à l'aide de la formulation intégrale a montré qu'une erreur de 100% sur la vitesse vibratoire identifiée était tout à fait possible !

Le travail en cours est donc d'identifier l'admittance en jeu, c'est-à-dire le modèle, tout autant que la vitesse vibratoire du flanc avant. On reprend le travail publié en 2005 (Congrès sur les Nouvelles Méthodes de Mesures), lui-même issu d'une réflexion sur le contrôle acoustique actif. L'image géométrique consiste à considérer l'objectif - ici l'hologramme - comme un vecteur et le modèle comme un plan. Si l'objectif est dans le plan du modèle, il est « engendré » et donc accessible, sinon, faire au mieux c'est projeter le vecteur sur le plan. Identifier le modèle réside dans la « rotation » du plan pour s'approcher du vecteur.

**B.10.b - *Autres travaux***

*V. Martin*

Stabilité de l'identification des nombres d'ondes (longitudinales) complexes dans des échantillons homogènes (collaboration informelle avec l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique de Nantes-St-Nazaire). Dans ce sujet, la démarche expérimentale, conduite à Nantes-St-Nazaire, est excessivement délicate et les publications contemporaines (de 2006) montrent une absence de maturité qui justifie la recherche.



**FIGURE 6-25** *Pourcentage d'erreur sur la partie réelle (à gauche) et sur la partie imaginaire (à droite) du nombre d'onde obtenu avec des signaux qui ont subi un bruit aléatoire (vert : méthode non-; rouge : méthodes non convexe+ convexe).*

## *C - Propagation non linéaire: Théorie et expérimentation*

### C. 1 - Introduction

*F. Coulouvrat,  
J. Marchal,  
R. Marchiano,  
G. A. Maugin*

La thématique est centrée sur l'ensemble des phénomènes liés à la propagation non linéaire des ondes mécaniques dans les milieux fluides et solides. Elle combine les approches par la modélisation thermomécanique, analytique et asymptotique, la simulation numérique et l'expérimentation.

Suivant les ordres de grandeur respectifs des différents effets comparés aux grandeurs ondulatoires classiques (fréquence et longueur d'onde), les approximations adéquates permettent de réduire les équations de bilan de la mécanique à des équations modèles de taille plus réduite adaptées à la simulation numérique. Celle-ci nécessite la plupart du temps le développement et l'utilisation d'algorithmes spécifiques innovants et performants.

L'approche expérimentale (synthèse de champs, mesures en cuve ou en bassin) permet de valider les modèles et, réciproquement, alimente le champ des investigations théoriques.

Les applications sont nombreuses. Elles concernent aussi bien l'aéroacoustique (bang sonique, bruit « BSN » des moteurs), les ultrasons, l'acoustique sous-marine que la propagation d'ondes élastiques dans les solides. On peut citer par exemple la caractérisation des couches minces fondée sur la propagation d'ondes de type solitons, la prévision de l'impact environnemental du bruit des avions, des techniques innovantes d'imagerie ultrasonore utilisant les propriétés de stabilité des "vortex acoustiques", la caractérisation des suspensions de nanoparticules, la détection d'objets enfouis dans les sédiments marins, l'évaluation et l'optimisation d'émetteurs à forte puissance, l'imagerie harmonique pour la détection de pollutions marines.

Les travaux de la thématique sont réalisés avec différents partenaires extérieurs : académiques (Institut des NanoSciences de Paris, UPMC/CNRS, notamment J.L. Thomas, et Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée, UPMC/CNRS) ; centres de recherche (ONERA, DLR) ; institutionnels (IFREMER, DGA-GESMA) et industriels (Airbus, Dassault-Aviation, Fondation d'Entreprise EADS). La collaboration avec l'INSP a fait notamment l'objet d'un soutien BQR de la part de l'UPMC en 2007. Une part des activités est réalisée dans le cadre de programmes de recherche européens (SOBER 2001-2004, HISAC 2005-2009, ATTLAS 2006-2009).

Le large spectre de compétences des membres de l'équipe dans le domaine du non-linéaire offre des perspectives d'études en simulation numérique de l'émission paramétrique, synthèse expérimentale de champs complexes, mesures de propagation (dispersion et absorption) ou encore en milieux hétérogènes avec écoulements. Ces études se feront évidemment en interaction forte avec les autres thématiques de l'équipe MPIA, notamment la caractérisation des matériaux et structures et l'imagerie acoustique. Une part

importante des activités s'effectue également en commun avec d'autres équipes de l'Institut : FCIH (ultrasons dans les suspensions concentrées de nano-particules) et FRT (propagation aérienne dans la couche limite planétaire).

## C. 2 - Forces motrices et propagation de singularités

G.A. Maugin

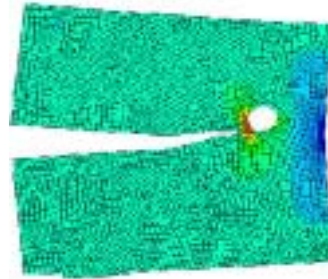
Le problème le plus connu dans ce domaine est celui de la propagation des ondes de choc. Cependant, en mécanique des matériaux la notion d'ensemble singulier de points donne naissance à celle de défauts. Ceux-ci peuvent être ponctuels, linéaires, surfaciques ou distribués en volume. Les défauts ponctuels (vides/vacancies, petites inclusions/foreign atoms), les lignes de dislocation (autour desquelles le déplacement élastique subit une discontinuité selon le contour parcouru), les lignes de disclinaisons (autour desquelles c'est une rotation qui subit une discontinuité), les fissures, les surfaces de transition de phase, les ondes de choc, et les phénomènes répartis comme la plasticité, l'endommagement et la croissance (des tissus mous par exemple) sont de tels «défauts». Ceux-ci peuvent évoluer ou se propager. A différentes échelles, la propagation ou l'extension de ces défauts est associée à (ou causée par) des forces motrices qui ne sont pas de nature newtonienne mais sont le résultat de l'environnement (réponse du matériau aux chargements extérieurs : tractions, forces de volume), et se manifestent usuellement par une dissipation (souvent appelée « taux de restitution de l'énergie »).

La théorie des forces matérielles et des forces configurationnelles développée en grande partie par les signataires (récompensée par le Prix Max Planck 2001) produit le cadre général et formel pour le calcul des forces motrices en question et, par application d'un critère de progression, pour l'évolution future des défauts correspondants. Les ingrédients principaux de cette approche thermomécanique sont le tenseur matériel des contraintes d'Eshelby et la projection canonique des équations du mouvement ou d'équilibre, sur la variété matérielle elle-même, lieu naturel des défauts structuraux. Simultanément, les conditions mathématiques de l'obtention des forces motrices requièrent la connaissance du degré de singularité des champs mécaniques suivant le type de matériau considéré et le type d'ensemble singulier. Ceci a dicté les recherches entreprises dans un passé récent et oriente celles des années à venir, soit :

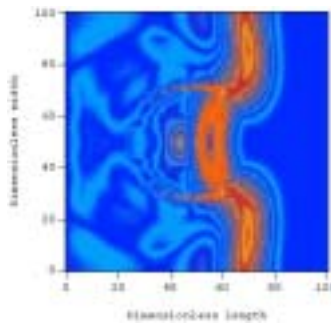
*le perfectionnement de la théorie générale*: construction des équations canoniques de conservation (en énergie et quantité de mouvement) pour la thermomécanique des milieux continus en général et pour de larges classes de comportement matériel ;

*l'obtention des forces motrices* agissant irréversiblement sur des dislocations, disclinaisons, fissures, et étude géométrique de la variété matérielle ainsi perturbée [travaux poursuivis en collaboration avec M. Epstein, Calgary] ;

la mise en évidence numérique de la propagation des défauts en application de la théorie, ce qui a conduit à l'introduction de nouvelles considérations dans les différents schémas numériques : éléments finis [avec R. Mueller, Darmstadt], différences finies [avec C.I. Christov, Louisiana, USA], volumes finis [avec A. Berezovski, Estonie]. En particulier, l'application aux éléments finis a résulté en une quantité de travaux (Allemagne, Suède, USA et France) visant à améliorer les schémas par élimination des forces motrices parasites créées par un « mauvais » positionnement des nœuds. De spectaculaires simulations de la propagation des fissures en ont résulté (Figure 6-26 avec R. Mueller). L'application des mêmes principes à la propagation des fronts de transition de phases dans les solides thermoélastiques anisotropes a conduit à la mise au point de nouveaux schémas numériques en volumes finis avec sélection thermodynamique. Cette sélection est une



**FIGURE 6-26** Simulation dynamique incrémentale (sans échelle de temps) de l'attraction d'une fissure par un trou (d'après R. Mueller et G.A. Maugin); extension de la fissure par la force motrice (force configurationnelle) d'après une loi cinétique très simplifiée.



**FIGURE 6-27** Simulation numérique de la transformation de phase induite par contrainte (onde de choc appliquée sur la face gauche; vue instantanée du champ d'une composante des contraintes après interaction avec l'inclusion circulaire (autre phase que la matrice): méthode perfectionnée de volumes finis + admissibilité thermodynamique + automate cellulaire « continu » (choix de la phase par la cellule de calcul; d'après A. Berezovski et G.A. Maugin).

sorte d'automate cellulaire continu décidant de la phase atteinte par chaque cellule de calcul au cours de la propagation des fronts (propagation induite et animée par contraintes et causée, par exemple, par une onde de choc, Figure 6-27). Le schéma obtenu, très efficace, s'applique évidemment à la propagation en milieux inhomogènes, contenant des inclusions, etc. (Une courte monographie sera publiée sur le sujet en 2007-2008).

La recherche des ordres de singularité (en particulier pour les dislocations) pour de nombreux milieux complexes (micropolaires, micromorphiques, à gradients, à forte non localité) [avec M. Lazar, Darmstadt], établissement de la géométrie appropriée de la variété matérielle pour des défauts distribués et des forces motrices correspondantes (ex : force de Peach-Koehler) ;

Le passage de la paramétrisation d'espace-temps  $(X, t)$  à celui des ondes  $(K, \omega)$  pour la propagation non linéaire ;

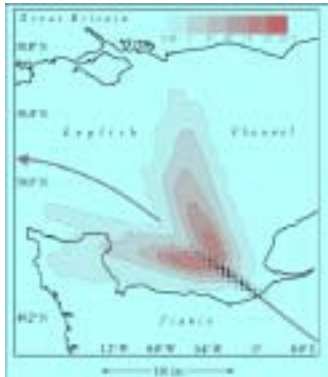
Un ouvrage général concernant les forces configurationnelles en mécanique et physique est en préparation.

### C. 3 - Aéroacoustique

F. Coulouvrat  
R. Marchiano

#### C.3.a - Bang sonique

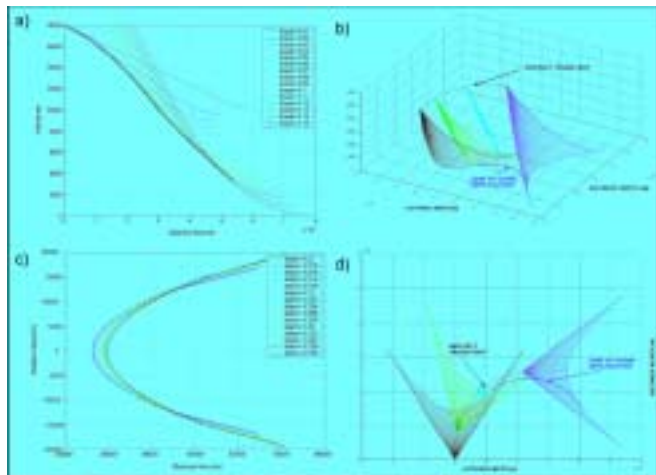
**FIGURE 6-28** Carte de probabilité d'impact au sol du bang sonique focalisé (superboom) pour une accélération sur la route Paris->New York. Simulation numérique.



La modélisation et la simulation numérique de la détonation balistique, ou bang sonique, des avions supersoniques, constituent une activité durable (depuis 1995) et continue (contractuellement jusqu'en 2009 au moins) en collaboration étroite avec des partenaires industriels (Airbus, Dassault) dans le cadre de projets européens (SOBER, HISAC, ATTLAS). Elle a donné lieu au développement d'un logiciel dédié de simulation, qui a fait l'objet d'une opération de valorisation (cession de droits 2004). Un exemple est donné ci-contre par l'étude de l'impact géographique du superbang (bang focalisé résultant de l'accélération transsonique de l'avion). La figure 6-28 montre,

après analyse statistique des calculs en utilisant une base de données météorologiques (ECMWF, année 1993), la probabilité d'impact géographique du superbang au sol pour un avion opérant suivant des procédures de vol de type Concorde. Cette étude a été réalisée en collaboration avec le Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Allemagne).

**FIGURE 6-29** Tracé des rayons et localisation des caustiques (en haut à 3D, en bas projection au sol) pour un avion manoeuvrant : à gauche en accélération-à droite en virage.



Les activités se poursuivent actuellement dans le cadre de la thèse de F. Dagrau (contrat Dassault-Aviation) sur la simulation numérique, le raccord entre les codes de propagation acoustique (champ lointain) et la CFD Euler 3D supersonique (champ proche) et une nouvelle méthode d'estimation du champ focalisé basée sur l'approximation parabolique (Figure 6-29).

Par ailleurs, la thèse de L. Ganjehi a permis de simuler expérimentalement à l'échelle du laboratoire (en cuve à eau à l'INSP) l'interaction onde de choc / hétérogénéité. On a pu visualiser ainsi pour la 1ère fois expérimentalement (Figure 6-30) le phénomène de repliement du front d'onde (« wavefront folding ») proposé en 1971 (Pierce) pour expliquer la variabilité du bang sonique en milieu turbulent et l'augmentation du temps de montée (lié à une décroissance de la gêne dans la perception extérieure). Les simulations numériques permettent de quantifier l'influence des non-linéarités et de mettre en évidence les limitations de l'approximation parabolique usuellement utilisée. Le post-doctorat de A. Loubeau (docteur de Penn State University – USA) a pour but d'intégrer l'absorption atmosphérique à haute altitude dans la prévision du bang notamment pour des configurations futuristes à grande vitesse (Mach 3 ou 6). Enfin, la thèse de M. Baudoin a permis d'estimer l'absorption (significative) du bang sonique par les nuages qui couvrent plus de 50% de la surface du globe terrestre.

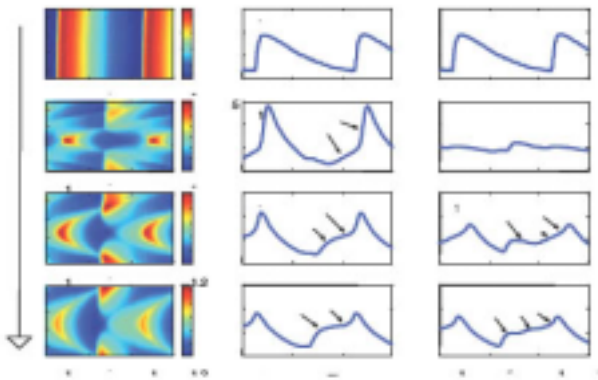


FIGURE 6-30 Visualisation du repliement de front d'onde (à gauche) et de formes temporelles d'ondes de choc diffractées par une hétérogénéité semi-circulaire sur l'axe de celle-ci (au centre) et hors l'axe de celle-ci (à droite).

### c.3.b - Bruit des moteurs

Une nouvelle activité a démarré (2007, thèse CIFRE Airbus de R. Fernando), visant à mieux comprendre et à simuler le phénomène du « BSN » (« Buzz Saw Noise »), bruit fréquentiel intense (160 à 170 dB SPL au niveau de la soufflante) se produisant lorsque la rotation des extrémités de pales d'une soufflante de moteur d'avion devient supersonique au moment du décollage (Figure 6-31). Un modèle modal de propagation non linéaire d'ondes de choc en conduit à parois traitées avec écoulement uniforme est en cours de développement afin de remplacer un modèle assez empirique.

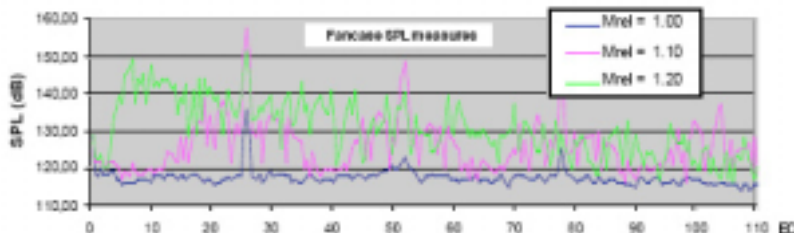


FIGURE 6-31 Spectre de BSN en fonction du nombre de Mach (figure Airbus).



### C.3.c - Propagation aérienne

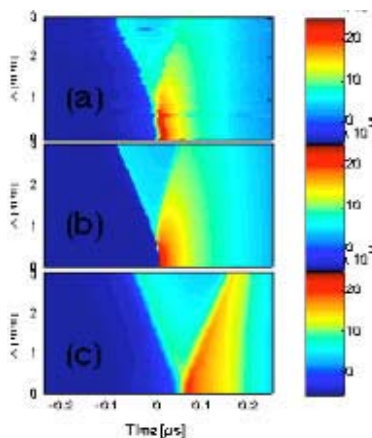
Une nouvelle méthode de simulation numérique, visant à combiner approximations paraboliques (standard ou grand angle), méthode de suivi des fronts d'onde (« fast marching method » Sethian) et non-linéarités est en cours de développement dans le cadre de la thèse de Ch. Rollet (Bourse Fondation d'Entreprise EADS) afin d'offrir une alternative efficace et performante à haute fréquence aux méthodes de simulation actuelles, notamment en non linéaire. Des calculs de propagation acoustique dans la couche limite planétaire, elle-même simulée par LES par l'équipe FRT, sont prévues (thèse de A. Dipankar).

Outre le bang sonique, des applications aux infrasons géophysiques (explosions volcaniques ou entrée de météorites dans la haute atmosphère) sont envisagées en collaboration avec le CEA et l'Ecole Centrale de Lyon au sein du groupe de travail (pour l'instant informel) Modélisation de la Propagation Atmosphérique (MOPA).

### C.3.d - Réflexion nonlinéaire d'une onde de choc acoustique

L'interaction, particulièrement complexe, d'une onde de choc avec une paroi est étudiée depuis les travaux pionniers de Mach et de von Neumann. Toutefois, le problème n'avait jamais été étudié du point de vue acoustique, pour des nombres de Mach très proches de 1 (de l'ordre de 1.001) comme ceux que l'on rencontre en acoustique sonore (bang) ou ultrasonore (génie biomédical). Une modélisation combinée avec des simulations numériques avancées a permis de démontrer que la réflexion d'ondes de choc acoustiques a lieu suivant des mécanismes similaires à ceux qui sont observés pour des ondes de choc aérodynamiques.

Dans le cas d'une onde de choc pure, on distingue 5 régimes différents de réflexion, dont un jamais décrit. Pour des signaux plus réalistes (ondes en N, chocs périodiques), la situation est encore plus complexe, et l'on retrouve toute la typologie connue en aérodynamique.

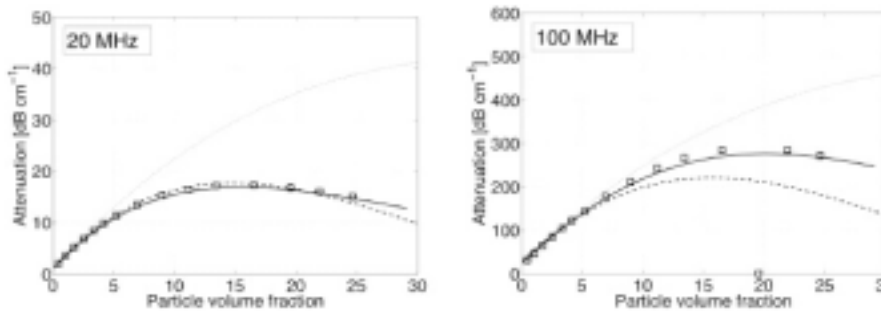


Ces résultats, confirmés par des expériences réalisées en cuve à eau à l'Institut des NanoSciences de Paris (Figure 30), ont été obtenus dans le cadre du travail S. Baskar (docteur de l'Indian Institute of Sciences, Bangalore, Inde), allocataire post-doctoral Ministère (2004-2006).

**FIGURE 6-32** Réflexion de Von Neumann d'une onde de choc acoustique sur une paroi parfaitement rigide : l'onde incidente (angle d'incidence  $5^\circ$ ) et réfléchie fusionnent au-dessus de la paroi (a) résultats expérimentaux, (b) simulation numérique non linéaire et (c) simulation numérique linéaire (on n'observe pas le phénomène de réflexion de Von Neumann dans ce cas).

### c.3.e - Propagation dans les suspensions de nano-particules rigides

L'essentiel de la thèse de M. Baudoin porte sur la propagation acoustique linéaire et non linéaire dans les suspensions de particules de taille nanométriques (de l'ordre de 10 à 100 nm) lorsque la longueur d'onde acoustique (ici typiquement des fréquences de l'ordre de 1 à 100 MHz) est très grande devant la taille des particules. Dans le cas concentré, un modèle original « self-consistent » de milieu effectif a été établi, généralisant les travaux de Buyevich au cas de l'acoustique. Dans un premier temps, les interactions multiples entre particules ont été prises en compte (en collaboration avec D. Lhuillier de l'équipe FCIH). Dans un second temps, l'influence des corrélations de positions entre particules (par recouvrement des couches limites) a pu être intégrée au milieu effectif self-consistent, via l'introduction d'une zone d'exclusion de fluide pur, calculée d'après des modèles issus de la physique statistique. Ces corrélations permettent notamment d'expliquer le maximum d'absorption en fonction de la concentration, et de retrouver les données expérimentales (Hipp et al.) sans paramètre ajustable (Figure 6-33).



**FIGURE 6-33**  
Absorption ultrasonore en fonction de la concentration de suspensions de nano-particules de silice. En pointillé : modèle effectif self-consistent. En solide : modèle effectif self-consistent avec corrélations de position. Carrés : expériences.

Dans le cas dilué, des expériences ont été réalisées par M. Baudoin à l'INSP sur des suspensions de nano-particules de silice dans l'éthanol issues du Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée. Des ondes de choc ont été synthétisées et transmises à travers l'échantillon, et l'absorption comparée à celle d'une solution témoin sans particules. Les premières comparaisons montrent qu'il est possible de mesurer acoustiquement le rayon des particules (35 et 65 nm déterminé par ailleurs par microscopie électronique) avec une précision de 10 % au moins. Il est envisagé de développer la méthode afin de mettre au point un dispositif de suivi des caractéristiques physiques (taille, concentration) des suspensions en temps réel, in situ, non invasif et utilisable en milieu optiquement opaque.

### c.3.f - Propagation de vortex acoustiques non linéaires

L'étude des singularités du champ ondulatoire, champ d'étude très fécond en optique, a été entreprise dans le cadre de l'acoustique non linéaire. Une attention particulière a été portée aux ondes ayant un front d'onde hélicoïdal ou « vortex acoustiques » (équivalent des « vortex optiques » en acoustique). Les vortex acoustiques ont des propriétés remarquables,

par exemple de stabilité, notamment dans le cadre de l'acoustique non linéaire. L'émission paramétrique de vortex est à ce titre un bon exemple.

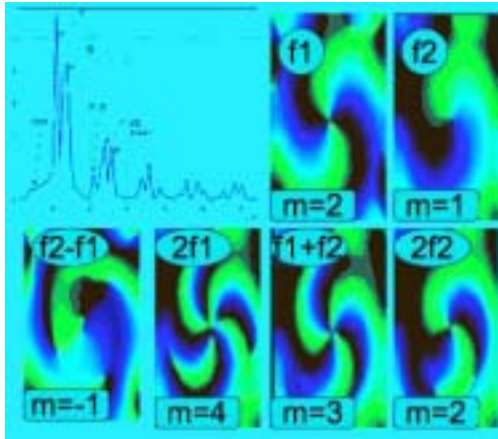


FIGURE 6-34 *Effet paramétrique pour les vortex acoustiques. Le champ initial est composé d'un vortex de charge +2 à  $f_1$  et d'un vortex de charge +1 à  $f_2$ . Après propagation non linéaire, l'effet paramétriqueduit les fréquences combinaisons linéaires des fréquences primaires (cf le spectre). La charge topologique associée à chaque fréquence résulte de la combinaison linéaire des charges topologiques associées aux fréquences primaires (par exemple sur  $f_2-f_1$  on observe que la charge et  $m_2-m_1=1-2=-1$ ).*

L'émission paramétrique est l'effet qui consiste à partir de deux fréquences primaires  $f_1$  et  $f_2$  à générer toutes les combinaisons linéaires de ces deux fréquences ( $f_2-f_1$ ,  $f_2+f_1$ ,  $2f_2$ ,  $2f_1$ ...). Il a été observé que la charge topologique (nombre de sauts que fait la phase sur un contour fermé englobant le centre du vortex) suivait les mêmes opérations que les fréquences primaires. Cet effet, intrinsèquement non linéaire, permet de faire de « l'arithmétique avec les vortex » puisqu'il est possible de créer des vortex de charge quelconque à partir des vortex présents aux fréquences  $f_1$  et  $f_2$  (cf Figure 6-34, où cette propriété est utilisée pour fabriquer un vortex de charge négative). Cette propriété est très prometteuse aussi bien pour transporter de l'information que comme méthode de synthèse. Divers outils ont été mis au point dans le cadre de ces études. Une expérience réalisée à l'INSP et basée sur l'utilisation de réseaux de transducteurs multivoies permet de synthétiser des vortex acoustiques ultrasonores.

D'autre part, une simulation numérique tridimensionnelle permettant de simuler la propagation non linéaire dans les milieux homogènes et faiblement hétérogènes a été développée pour étudier la dynamique de ces objets particuliers. Ces propriétés laissent entrevoir des applications dans des domaines divers comme l'imagerie ultrasonore ou la caractérisation des matériaux mais aussi dans le domaine aéronautique. En effet, les champs acoustiques émis par les réacteurs d'avion présentent de fortes analogies avec ce type d'ondes (cf. le bruit des moteurs dans la partie aéroacoustique).

**C.3.g - Autres travaux**

i. *Propagation d'ondes solitaires et solitoniques* en dimension deux pour des systèmes physiques issus de la mécanique des structures (ex : plaques) ou de la mécanique des milieux à microstructure [avec A.V. Porubov, St Petersburg] ; *G.A. Maugin*

ii. *Identification inverse des paramètres de la microstructure* de matériaux solides (ex : cristaux polaires) à l'aide de la propagation non linéaire [avec l'équipe de A.I. Potapov, Nizhny-Novgorod]

iii. *Nouveaux développements : influence de la rhéonomie* (dépendance par rapport au temps des propriétés matérielles) sur les effets non linéaires de propagation dans le but de décrire la dynamique à courte échelle des futurs matériaux « dynamiques » (artificiels). Dans ce cas, les propriétés d'inhomogénéités spatio-temporelles interagissent avec la dynamique, ces matériaux étant « composites » à la fois dans l'espace et le temps.

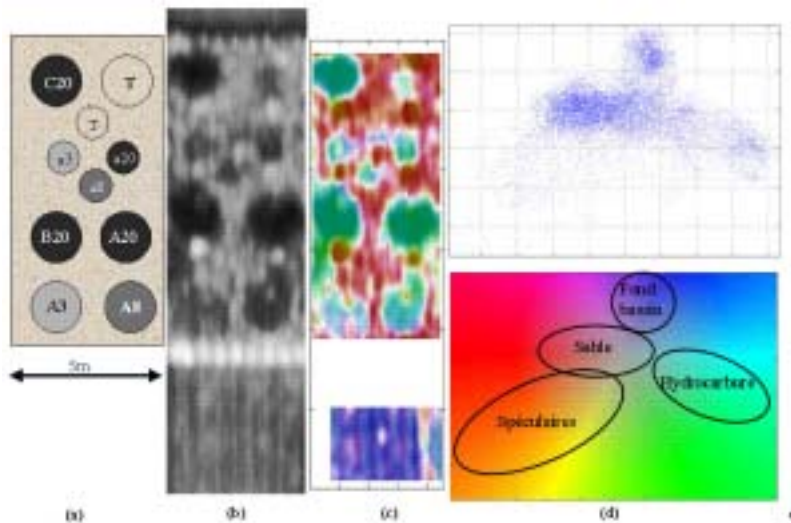
## D - Acoustique sous-marine

P. Cervenka,  
J. Marchal

### D. 1 - Caractérisation des fonds marins

Les techniques de caractérisation des fonds marins suscitent un intérêt croissant de par leurs applications potentielles dans de nombreux domaines, par exemple en géologie (surveillance des bassins locaux), dans l'industrie (installation et suivi de structures immergées), ou l'environnement (surveillance des zones côtières). L'instrumentation acoustique classiquement utilisée pour l'observation des fonds marins produit des images de l'intensité rétrodiffusée et la cartographie du relief. Avec ces systèmes, chaque portion du fond est vue selon un seul angle d'incidence. Ainsi manque une information essentielle à la caractérisation de la nature du sol, à savoir la dépendance angulaire de l'index de cible. Un concept original de sonar frontal a été étudié et validé avec un prototype dans le cadre du projet européen COSMOS (Cervenka et al.), coordonné par l'équipe. Cette solution est fondée sur la diversité spatiale de l'acquisition : une zone donnée du fond est vue au cours des tirs successifs selon un grand nombre d'angles d'incidence. Nous avons aussi participé avec le prototype au programme EXCAPI (Expérimentation de capteurs acoustiques pour repérer le pétrole immergé), soutenu par le ministère de la recherche via le réseau RITMER (Réseau de recherche et d'innovation technologique sur les pollutions accidentelles et leurs conséquences écologiques), coordonné par le CEDRE (Centre de documentation de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux). L'objectif de ce projet était l'évaluation de la capacité de plusieurs instruments d'observation à détecter des flaques d'hydrocarbures lourds coulées sur le fond marin (Parthiot et al). Les réponses angulaires de rétrodiffusion de telles flaques disposées sur fond sableux ont été enregistrées, puis exploitées avec des techniques d'analyse multidimensionnelle (Figure 33). Les travaux de thèse en cours (S. Haniotis) s'inscrivent dans cette recherche d'éléments classifiant avec ce type de données.

FIGURE 6-35 *Analyse en composantes principales des réponses angulaires de rétrodiffusion de taches d'hydrocarbure sur fond de sable.*  
*a) Disposition des cibles ;*  
*b) Image de rétrodiffusion ;*  
*c) Cartographie de l'analyse ;*  
*d) Projection des mesures sur les deux premiers vecteurs propres et codage associé à la cartographie.*



## D. 2 - Imagerie multi-harmonique

*P. Cervenka,  
J Marchal*

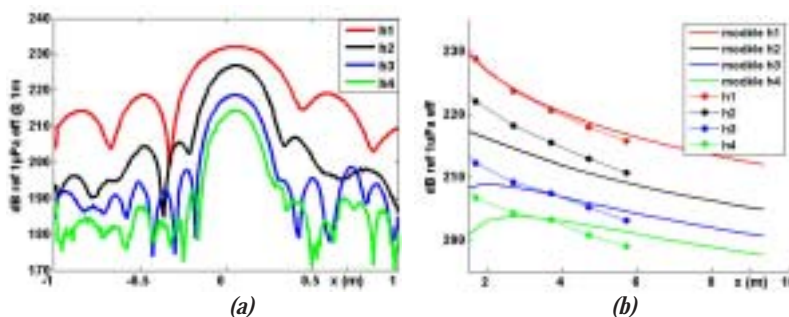
Le projet EXCAPI a montré que chaque instrument travaillant sur une bande limitée de fréquence apporte une information complémentaire. Ainsi, l'approche multi-fréquentielle permet non seulement de détecter les flaques d'hydrocarbure, mais aussi d'estimer leur épaisseur.

L'approche multi-capteurs a encore été la clé de la récente campagne d'exploration CALIMERO, où plusieurs systèmes présentant des caractéristiques spatio-temporelles différentes ont été mis en œuvre sur les mêmes zones. Une telle campagne met aussi en évidence la difficulté de fusionner de telles données obtenues dans ces conditions. Nous proposons un élément de réponse à ce problème, au travers un thème émergent de l'équipe. Il s'agit de transposer et étendre au domaine sous-marin le principe de l'imagerie harmonique déjà utilisé dans le domaine médical : lorsqu'une source est excitée à une fréquence fondamentale à fort niveau, la non-linéarité de la propagation provoque l'apparition d'un rayonnement aux fréquences multiples. La source est unique, aussi bien dans l'espace que le temps. Les faisceaux multi-harmoniques sont donc parfaitement corrélés, de telle sorte que les échos enregistrés aux différentes fréquences sont calés pour une exploitation directe.

Dans un premier temps, nous étudions en collaboration avec l'IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) la faisabilité d'un tel outil multi-fréquentiel. Deux applications sont envisagées : la caractérisation de la sub-surface par rétrodiffusion à moyenne fréquence (incidence oblique), et le sondage sédimentaire à basse fréquence (pénétration en incidence verticale). Sur le plan technologique, la mise en œuvre peut s'appuyer sur l'état de l'art, mais les limites et conditions de fonctionnement d'émetteurs ad hoc doivent être étudiées (par exemple, amplificateurs de plusieurs dizaines de kW, et l'adaptation d'impédance à l'antenne dans ces conditions). Sur le plan théorique, certains outils de modélisation de rayonnement à fort niveau existent, mais doivent être adaptés aux géométries de faisceaux très ouverts (F. Coulouvrat).



**FIGURE 6-36**  
*bassin  
d'expérimentation  
automatisé  
12 x 6 x 3 m<sup>3</sup>*



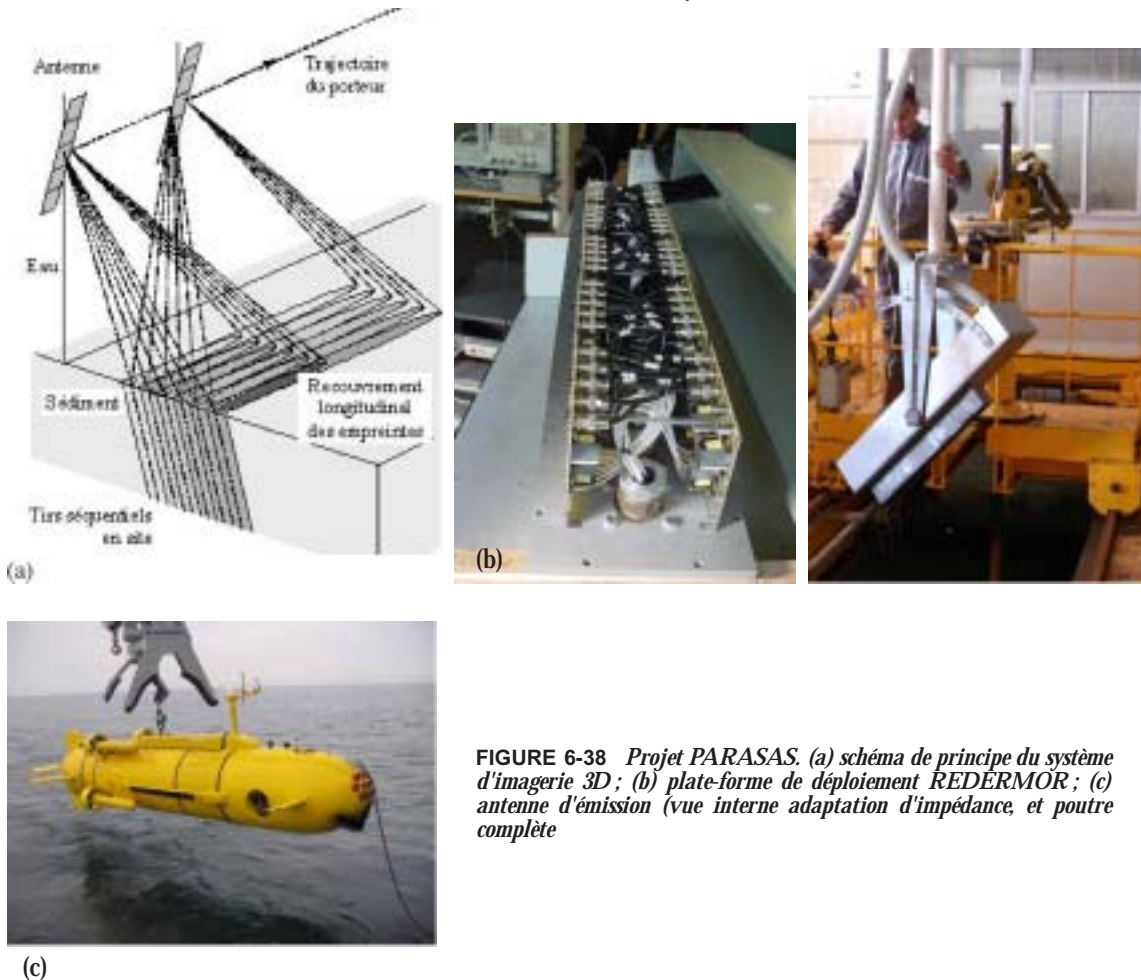
**FIGURE 6-37** (a) Diagrammes de directivité des 4 premières harmoniques relevés à 1,2 m. Antenne d'émission : 100 kHz –  $\varnothing=12$  cm. Amplificateur : 20 kW; (b) Décroissance des niveaux sur l'axe des 4 premières harmoniques – comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions d'un modèle de propagation non linéaire pseudo-1D, mais tenant compte de la divergence.

### D. 3 - Détection d'objets enfouis

*P. Cervenka*

La détection d'objets enfouis dans les sédiments se heurte à des difficultés essentiellement liées à l'absorption et la réverbération dans le milieu sédimentaire. Ces contraintes conduisent à rechercher des solutions associant basse fréquence et directivité. Dans ce contexte, l'utilisation de l'émission paramétrique peut fournir une solution pertinente : son principe est fondé sur la génération d'un faisceau basse fréquence directif, à partir d'une antenne de taille réduite, en exploitant la non-linéarité de la propagation.

Nous étudions depuis plusieurs années en partenariat avec le GESMA (Groupe d'études sous-marines de l'Atlantique) un concept original de détecteur-classifieur de mines (Figure 35a). Il associe la directivité en site d'un émetteur paramétrique multi-faisceaux, à la haute résolution en azimut de l'antennerie à synthèse d'ouverture (thèse de M. Amate).



**FIGURE 6-38** *Projet PARASAS. (a) schéma de principe du système d'imagerie 3D; (b) plate-forme de déploiement REDERMOR; (c) antenne d'émission (vue interne adaptation d'impédance, et poutre complète*

Les modèles théoriques développés ont conduit à la création d'un logiciel spécifique (calcul en régime saturé, champs lointain et proche). Les travaux en cours concernent un concept associant la directivité paramétrique à la synthèse cohérente d'ouverture. Un prototype d'émetteur a été réalisé au laboratoire (Figure 6-38). Plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées en bassin ( $80 \times 10 \times 8 \text{ m}^3$ ) et les résultats confrontés avec les prévisions théoriques (Figures 6-39 et 6-40). Des fluctuations de rendement qu'un modèle 1D original laissait prévoir ont été observées expérimentalement. Cette antenne, associée à une chaîne de réception / acquisition, doit être montée sur un véhicule sous-marin autonome (Figure 6-38c). Ces moyens seront utilisés pour étudier les problèmes associés à la cartographie tridimensionnelle de la sub-surface. Ce sujet est au cœur d'un nouveau Programme d'Etudes Amonts auquel nous sommes encore associés par une collaboration avec Thales.

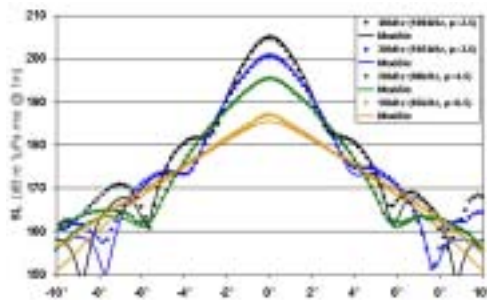


FIGURE 6-39 Diagrammes paramétriques en site à 20 m. Comparaison mesures – modèle.

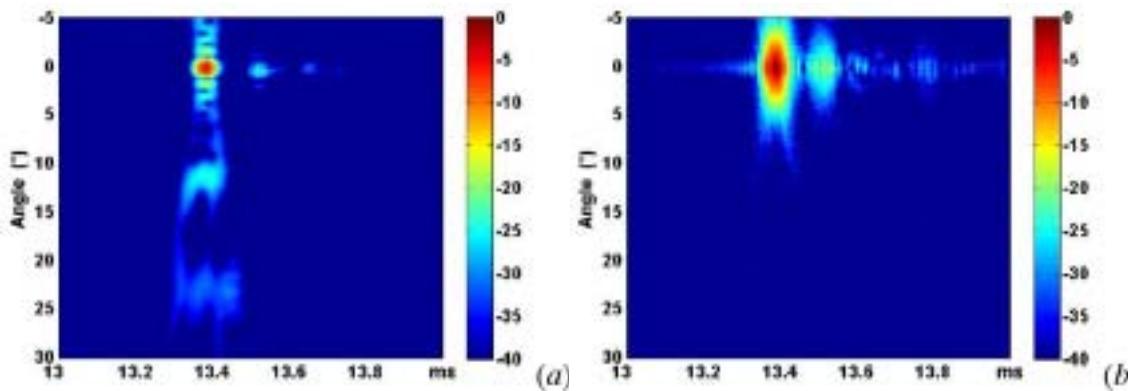


FIGURE 6-40 Enregistrement à 20 m de l'émetteur d'un signal Ricker 100 kHz / 20 kHz focalisé. (a) champ primaire HF; (b) champ auto-démodulé.



## *E - Problèmes de bio-mécanique et bio-physique*

### E. 1 - Bio-mécanique non linéaire de la peau

*M. Destradé,  
G.A. Maugin*

La peau constitue le meilleur rempart du corps humain contre les agressions externes. Lors d'une attaque à l'arme blanche, elle se distend et est soumise à de grandes déformations. Cependant, une fois qu'elle est perforée, le tissu sous-jacent offre très peu de résistance et l'arme peut alors s'enfoncer aisément. Ceci rend difficile l'évaluation quantitative de la violence d'un coup et ultimement peut avoir des conséquences judiciaires cruciales.



**FIGURE 6-41** *Langer (1891) a noté que la peau du corps humain est soumise à des tensions non uniformes et a souligné l'importance des lignes de tension (qui portent désormais son nom) pour la chirurgie. Si on aligne la coupe chirurgicale avec ces lignes, on obtient des cicatrices fines (césariennes, appendicites, etc.); sinon on obtient une cicatrice froncée. À l'aide d'un dispositif de tractions bi-axiales, on tente de simuler ces tensions par anisotropie induite, dans des spécimens de polyuréthane.*



On doit donc tenter de modéliser le comportement mécanique de la peau (grâce à la théorie de l'élasticité non-linéaire anisotrope), de mettre au point des protocoles expérimentaux réalistes et reproductibles (Figure 6-41), en vue de simulations numériques en Eléments Finis. Ces travaux sont en cours, en étroite collaboration avec l'Institut Médico-Légal de la République d'Irlande.

### E. 2 - Propriétés mécaniques de la paroi artérielle

*P. Challande*

Cette activité est menée en collaboration avec P. Lacolley directeur de l'unité U684 (INSERM, Université Henri Poincaré de Nancy). Le point de départ de ce travail est la mise en évidence que l'augmentation de la rigidité des troncs artériels, appréciée notamment par la vitesse de l'onde de pouls (onde initiée par le cœur se propageant dans la paroi artérielle) était un facteur de risque cardio-vasculaire indépendant des autres risques plus classiques comme l'hypertension.

L'objectif des recherches est une meilleure connaissance des phénomènes intervenant dans les propriétés mécaniques de la paroi des troncs artériels et en particulier la détermination

des composants cellulaires et moléculaires responsables de ces propriétés. L'ensemble des approches mécaniques est couplé à des analyses de biologie cellulaire et moléculaire réalisées au sein de l'U684 ou en coopération.

D'une part, on utilise des modèles animaux : souches de rats spécifiques (par exemple, spontanément hypertendus) ; souris transgéniques présentant un déficit spécifique d'un composant de la paroi vasculaire ou surexprimant une protéine de régulation ; traitements pharmacologiques... On a adapté des modèles classiques de mécanique des milieux continus aux matériaux étudiés *in vivo* pour obtenir des caractéristiques intrinsèques des matériaux constitutifs de la paroi à partir des grandeurs accessibles expérimentalement qui sont peu nombreuses, ce qui la limite la possibilité de complexifier le modèle. Une autre difficulté provient du fait que les tissus biologiques sont des matériaux actifs (soumis à des stimuli nerveux et/ou hormonaux) dont l'état de référence n'est pas parfaitement défini.

D'autre part, on travaille sur des échantillons *ex vivo*. On a participé à la conception et à la mise au point d'un banc d'études *in vitro* permettant de quantifier la résistance mécanique des artères en fonction de leurs différents constituants, paramètre relié aux pathologies de type anévrysmal. On travaille actuellement à la conception d'un banc d'essais mécaniques sur des cultures cellulaires pour préciser l'importance relative de différentes protéines dans l'élasticité et la cohésion. L'avantage de cette dernière approche est un meilleur contrôle de l'ensemble des paramètres de l'expérience et donc une meilleure identification des composants pertinents dans notre problématique.

### E. 3 - Tige élastiques, applications à quelques objets biologiques

L'équilibre et la dynamique des tiges élastiques sont régis par les équations de Kirchhoff. Ces équations différentielles ordinaires (équilibre) ou aux dérivées partielles (dynamique) permettent une analyse assez précise des formes et structures d'équilibre d'objets de taille et de nature très différentes comme une poutre de soutien dans le plancher d'une habitation ou comme un filament biologique. Les études menées ici consistent à trouver les configurations d'équilibre de ces tiges, en présence de torsion et d'auto-contact, satisfaisant des conditions de bords données.

S. Neukirch

#### E.3.a - *Plantes grimpantes*

Les plantes volubiles sont des plantes qui s'enroulent autour d'un support pour croître. La plante doit être capable, pour atteindre la lumière, d'entourer des supports de tailles variées. Pour une espèce donnée, la plante va être capable de croître autour de supports cylindriques de rayon différents. Une question, mentionnée par Charles Darwin dans son livre sur les plantes grimpantes, est de

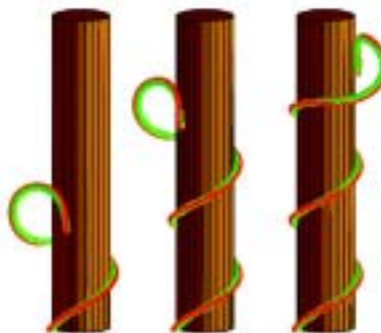


FIGURE 6-42  
Configurations  
d'équilibre d'une tige  
élastique  
(naturellement  
courbe) autour d'un  
support cylindrique

savoir s'il y a un rayon maximal pour le support cylindrique, au dessus duquel la plante ne peut plus s'enrouler. En collaboration avec A. Goriely du département de mathématique de l'université d'Arizona à Tucson nous avons proposé un modèle élastique de tige à courbure naturelle qui met en évidence une instabilité si le rayon du support cylindre est plus de trois fois plus grand que le rayon de courbure naturel de la plante.

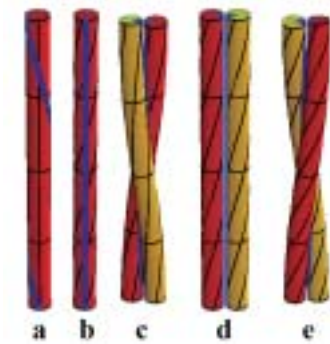


FIGURE 6-43 Configurations géométriques de tiges. Les enroulements c, d et e sont tels que la ligne bleue est cachée à l'intérieur de la structure.

### E.3.b - Chiralité de protéines fibreuses

Les protéines fibreuses sont une classe de protéines distincte des protéines globulaires dans le sens où leur structure est plus simple : elles s'organisent longitudinalement. Deux exemples types de protéines fibreuses sont la kératine, que l'on retrouve notamment dans les cheveux, les ongles, et le collagène, que l'on retrouve dans les tendons et les os. Une protéine est une longue molécule composée d'une suite d'acide aminés : c'est la structure primaire. Cette longue molécule va adopter une configuration géométrique 3D (qui dépend de la séquence) : c'est la structure secondaire. Une structure secondaire très fréquente est l'hélice alpha : les acides aminés se placent le long d'une hélice. Dans une protéine, les hélices alpha s'organisent en fonction des interactions entre molécules. Dans la kératine deux hélices alpha vont s'enrouler l'une autour de l'autre pour former un dimère. L'hélice alpha est de chiralité droite et les dimères de kératine sont de chiralité gauche. L'explication classique pour décrire la structure (et donc la chiralité) de ce super-enroulement et qu'il permet à la protéine de cacher certains acides aminés du solvant. En collaboration avec A. Goriely et A. Hausrath du département de biochimie de l'université d'Arizona, nous avons montré que l'explication classique géométrique n'était pas suffisante et qu'il fallait en plus considérer l'équilibre élastique des hélices alpha constituant le dimère. Notre modèle explique aussi la structure et la chiralité de la triple hélice du tropo-collagène, premier étage de la structure multi-niveaux des fibres de collagène.

### E.3.c - Flambage capillaire : une tige élastique défléchie par la tension de surface

La tension de surface est souvent négligeable lorsqu'on étudie des structures de tailles macroscopiques, néanmoins à des échelles plus petites ces forces peuvent devenir prépon-

dérantes. Ainsi les effets capillaires peuvent plier et coller des structures micro-mécaniques comme les MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) lors de leur phase de fabrication : après la réticulation complète de la résine, l'évaporation du solvant génère des ménisques qui peuvent courber et faire s'effondrer ces micro-structures. Des phénomènes similaires sont rencontrés pour les forêts de nanotubes de carbones : l'évaporation du solvant crée des formes en 'teepee'. Ainsi les forces capillaires exercées sur une structure élastique élan-cée peuvent être suffisantes pour déformer cette structure et ces effets capillaires devien-nent prépondérants à petite échelle. En collaboration avec B. Roman et J. Bico du laboratoire de mécanique physique de l'école supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris, nous avons étudié expérimentalement un système modèle macroscopi-que où interagissent élasticité et capillarité : une tige immergée est amenée au contact d'une surface liquide. En parallèle une étude théorique (équations de Kirchhoff pour les tiges et des méthodes de cheminement numérique) de ce système modèle macroscopique a été menée. Malgré son apparente simplicité le système se révèle avoir un comportement riche avec notamment des effets d'hystéréses.

#### E. 4 - Autres travaux :

- a. Petits signaux superposés à des déformations finies et stabilité élastique et magnétoélas-tique en vue de la biomécanique (thèse de M. Ottenio) ;
- b. Etude de la propagation non linéaire de la croissance dans les tissus mous [avec M. Eps-tein, Calgary ; J. Casey, Berkeley ; L. Sharipova, St Petersburg]

Faits marquants :

- Exploitation du Prix Max Planck (2002-2006)
- Collaborations avec l'IFREMER, l'ONERA, le CEA, la DGA, le GESMA, AIRBUS, EADS, l'EPFL, ADEME.
- Thèses en co-tutelle avec l'Université de Glasgow (M. Ottenio) et l'Université de Rome « La Sapienza » (C. Maurini et G. Rosi).
- F. Coulouvrat apporte son expertise au niveau international dans le cadre du CAEP (Committee on Aviation Environment Protection - Working Group I : Noise) de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI dépendant de l'ONU).
- V. Martin a publié un ouvrage intitulé «Eléments d'acoustique générale», 2007.

## *F - Perspectives*

Avec son fort potentiel en personnel de recherche, son large spectre d'intérêts scientifiques, ses montages expérimentaux existants et ses collaborations ou interactions fructueuses, l'Equipe MPIA peut envisager des perspectives innovantes ou en prolongement d'actions déjà entamées – les expériences, en particulier, impliquent une continuité justifiée par l'énergie et les dépenses déjà consacrées à leur montage. La liste qui suit se veut donc précise, exploratoire, et bien sûr non exhaustive.

Du point de vue théorique, on note :

- une orientation générale des études dynamiques avec un intérêt porté aux petites échelles (« vers » la nanomécanique) et aux multiples formes d'hétérogénéités matérielles (ordonnées, désordonnées, fractales – avec la venue de T. Michelitsch) et un développement des études de diffusion (avec la venue de J.-M. Conoir),
- l'étude des modes de propagation guidés dans les MEMS (B. Collet et collaborateurs) et plus de travaux sur l'établissement des propriétés effectives de matériaux adaptatifs composites,
- des efforts de modélisation de structures adaptatives multi-couches, utiles en contrôle des structures (J. Pouget, A. Fernandes), de structures assemblées et collées (M. Rousseau), des matériaux biologiques où la mesure par ondes ultrasonores est décisive (M. Destrade, G.A. Maugin). D'une manière plus générale, la construction d'une véritable théorie de thermomécanique des milieux continus de la croissance et du vieillissement, et des « inhomogénéités temporelles » avec l'introduction de matériaux « dynamiques » aux propriétés inhomogènes en espace et en temps (aux petites échelles), d'où un défi pour les études de propagation (G.A. Maugin).
- application de la méthode de simulation numérique développée pour la propagation aérienne aux cas de la géophysique (F. Coulouvrat, R. Marchiano).

Du point de vue mixte théorie-expérience :

- application de la méthode de synthèse des ondes dans les milieux complexes à la spectroscopie in situ des suspensions,
- combinaison des effets non linéaires et d'un actionnement multiparamétrique (P. Cervenka)
- l'identification inverse de paramètres de la microstructure de matériaux complexes à l'aide de la propagation non linéaire,
- extension de l'imagerie multi-harmonique au domaine sous-marin (P. Cervenka- IFREMER)
- conception d'une base d'essais mécaniques sur des cultures cellulaires (P.Challande-INSERM)

Du point de vue transfert des connaissances et des techniques :

- développement des mesures ultrasonores par tomographie (F. Cohen-Tenoudji)
- développement des techniques holographiques pour mesures en champ proche (V. Martin, S. Le Moyne, F. Ollivier),
- évolution de la capacité d'instruments d'observation à la détection des plaques d'hydrocarbures lourds (P. Cervenka et al).

Note : Les travaux concernant les structures quasi-1D ou 2D dans les biomatériaux seront désormais poursuivis dans le cadre de l'Equipe MISES (S. Neukirch).



## *Publications M.P.I.A.*

Revues à Comité de lecture

2007

1. Baskar S., Coulouvrat F., & Marchiano R. (2007). Nonlinear reflection of grazing acoustical shock waves : unsteady transition from Neumann to Mach to Snell-Descartes reflections *Journal of Fluid Mechanics*, 575: p.27-55.
2. Baudoin M., Thomas J.L., Coulouvrat F., & Lhuillier D. (2007). An extended coupled phase theory for the sound propagation in polydisperse concentrated suspensions of rigid particles *Journal of the Acoustical Society of America*, 121: p.3386-3397.
3. Berezovski A., & Maugin G.A. (2007). On the propagation velocity of a straight brittle crack. *Int. J. Fracture* 143: p.135-142.
4. Berezovski A., & Maugin G.A. (2007). Introduction to the thermomechanics of configurational forces (in press). *Att. Accad. Pelor.Pericolanti. Messina Fiz. Mat. Nat.*
5. Christov C.I., Maugin G.A., & Porubov A.V. (2007). On Boussinesq's Paradigm in nonlinear wave propagation *C.R. Acad. Sci. Paris Mécanique*, 335(Invited Contribution to Special Issue on J.V. Boussinesq): p.521-535.
6. De Pascalis R., Destrade M., & Saccomandi G. (2007). The stress field in a pulled cork and some subtle points in the semi-inverse method of nonlinear elasticity *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 463: p.2945-2959.
7. Destrade M. (2007). Seismic Rayleigh waves on an exponentially graded, orthotropic half-space *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 463: p.495-502.
8. Destrade M., Gaeta G., & Saccomandi G. (2007). Weierstrass's criterion and compact solitary waves. *Physical Review E*, 75: p.047601.
9. Destrade M., & Saccomandi G. (2007). Creep, recovery and waves in a nonlinear fiber-reinforced viscoelastic solid (in press). *SIAM Journal on Applied Mathematics*
10. Destrade M., & Saccomandi G. (2007). Nonlinear transverse waves in deformed dispersive solids (in press). *Wave Motion*(Special Issue).
11. Gilchirst M.D., Keenan S., Curtis M., Cassidy M., Byrne G., & Destrade M. (2007). Mechanics of stabbing : Biaxial measurement of knife stab penetration of skin simulant. *Forensic Science International*
12. Kovriguine D.A., Maugin G.A., & Potapov A.I. (2007). Multiwave nonlinear couplings in elastic structures. *Mathematical Problems in Engineering* Vol. 2006 p.Article ID-76041.
13. Lazar M., & Maugin G.A. (2007). On the Eshelby tensor and incompatibility conditions (in press, available on line). *Philosophical Magazine*.
14. Louis H., Kakou A., Regnault V., Labat C., et al. (2007). Role of  $\alpha 1\beta 1$  integrin in arterial stiffness and angiotensin-induced arterial wall hypertrophy in mice *Am J Physiol Heart Circ Physiol.*, 293: p.597-604.



15. Maugin G.A. (2007). Nonlinear Kinematic-wave mechanics of elastic solids *Wave Motion*, 44: p.472-481.
16. Maurini C., Pouget J., & Vidoli S. (2007). Distributed piezoelectric actuation of a bistable buckled beam. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 24: p.837-853.
17. Mercier N., El Hadri K., Osborne-Pellegrin M., Nehme J., et al. (2007). Modifications of arterial phenotype in response to amine oxidase inhibition by semicarbazide *Hypertension*, 50: p.234-241.
18. Neukirch S., Roman B., De Gaudemaris B., & Bico J. (2007). Elasto-capillary interactions : Piercing an interface with an elastic rod. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55: p.1213-1235.
19. Ottenio M., Destrade M., & Ogden R.W. (2007). Acoustic waves at the interface of a prestressed incompressible elastic solid and a viscous fluid. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 42: p.310-320.
20. Ottenio M., Destrade M., & Ogden R.W. (2007). Incremental magnetoelastic deformations, with applications to surface instability *Journal of Elasticity*, 90: p.19-42.
21. Porfiri M., Maurini C., & Pouget J. (2007). Identification of electromechanical modal parameters of linear piezoelectric structures. *Smart Materials and Structures*, 16: p.323-331.
22. Porfiri M., Maurini C., & Pouget J. (2007). Experimental identification of the electromechanical modal properties of a linear piezoelectric structure. *Smart Materials and Structures*, 16: p.323-331.
23. Porubov A.V., & Maugin G.A. (2007). Improved description of longitudinal strain solitary waves (in press, available on line) *J. Sound Vibrations*.
24. Vlasie V., Rousseau M., & Terrien N. (2007). Effect of the microstructure of pretreated aluminium joints AA2024 T3 on the ultrasonic evaluation of the adhesion *NDT and E International* 40: p.419-427.
25. Zhang V.Y., Dubus B., Collet B., & Destrade M. (2007). Piezoacoustic wave spectra using improved surface impedance matrix : Application to high impedance-contrast layered plates. *Journal of the Acoustical Society of America*.

## 2006

26. Berger B., Kari S., Gabert U., Rodriguez-Ramos R., Sabina F.R., & Maugin G.A. (2006). Unit cell models of piezoelectric fiber composites for numerical and analytical calculation of effective Properties. *Smart Materials and Structures*, 15: p.451-458.
27. Boulanger P., Destrade M., & Hayes M. (2006). Inhomogeneous "longitudinal" circularly-polarized plane waves in anisotropic elastic crystals. *Acta Acustica united with Acustica*, 92: p.247-255.
28. Collet B., & Destrade M. (2006). Piezoelectric Love waves on rotated Y-cut mm<sup>2</sup> substrates *IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics, Freq. Control*, 53: p.2132-2139.
29. Collet B., Destrade M., & Maugin G.A. (2006). Bleustein-Gulyaev waves in some functionally graded materials. *Europ. J. Mechanics A/Solids*, 25: p.695-706.

30. De Billy M. (2006). On the low vibration modes observed in a sphere submitted to a tangential contact force. *Ultrasonics* 43: p.127-132.
31. Destrade M., & Fu Y. (2006). The speed of interfacial waves polarized in a symmetry plane. *International Journal of Engineering Science*, 44: p.26-36.
32. Destrade M., & Saccomandi G. (2006). Solitary and compact-like shear waves in the bulk of solids *Physical Review E*, 73: p.065604.
33. Fernandes A., & Pouget J. (2006). Structural response of composite plates equipped with piezoelectric actuators. *Computers and Structures*, 84: p.1459-1470.
34. Fernandes A., & Pouget J. (2006). Structural control of composite plates using piezoelectric actuators. *Computer and Structures*, 84: p.1459-1470.
35. Goriely A., Destrade M., & Ben Amar M. (2006). Instabilities in elastomers and soft tissues. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 59: p.615-630.
36. Goriely A., & Neukirch S. (2006). The mechanics of climbing and attachment in twining plants. *Physics Review Letters*, 97: p.184302.
37. Labat C., Sa Cunha R., Challande P., Safar M., & Lacolley P. (2006). Respective contribution of age, mean arterial pressure and body weight on central arterial distensibility in SHR *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 290: p.1534-1539.
38. Lazar M., & Maugin G.A. (2006). A note on line of forces in gradient elasticity *Mechanics Research Communications*, 33/5: p.674-680.
39. Lazar M., & Maugin G.A. (2006). Dislocations in gradient elasticity revisited *Proc Roy. Soc London A*, 462: p.3465-3480.
40. Lazar M., Maugin G.A., & Aifantis E.C. (2006). On a theory of nonlocal elasticity of bi-Helmholtz type and some applications *International Journal of Solids and Structures*, 43: p.1404-1421.
41. Lazar M., Maugin G.A., & Aifantis E.C. (2006). Dislocations in second strain gradient elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 43: p.1787-1817.
42. Martin V., & Guignard T. (2006). Image-source method and truncation of a series expansion of the integral solution, case of an angular sector in two dimensions *Journal of the Acoustical Society of America*, 120: p.597-610.
43. Maugin G.A. (2006). On canonical equations of continuum thermomechanics. *Mechanics Research Communications*, 33: p.705-710.
44. Maugin G.A. (2006). On the thermomechanics of continua with diffusion and/or weak nonlocality *Arch Applied Mechanics*, 75: p.723-738.
45. Maurini C., Porfiri M., & Pouget J. (2006). Numerical and experimental methods for modal analysis of stepped piezoelectric beams. *Journal of Sound and Vibration*, 298: p.918-933.
46. Maurini C., Pouget J., & Dell'Isola F. (2006). Extension of the Euler-Bernoulli model of piezoelectric laminates to include 3D effects via a mixed approach. *Computers and Structures*, 84: p.1438-1458.

47. Mercier N., Osborne-Pellegrin M., El Hadri K., Kakou A., et al. (2006). Carotid arterial stiffness, elastic fibre network and vasoreactivity in semicarbazide-sensitive amine-oxidase null mouse *Cardiovasc. Res.*, 72: p.349-357.
48. Pavlov I.S., Potapov A.I., & Maugin G.A. (2006). A 2D granular medium with rotating particles. *International Journal of Solids and Structures*, 43: p.6194-6207.
49. Porubov A.V., & Maugin G.A. (2006). Propagation of localized longitudinal strain waves in a plate in presence of cubic nonlinearity. *Physical Review E*, 74: p.046617-046611-046618.
50. Vannucci P., & Pouget J. (2006). Laminates with given piezoelectric expansion coefficients. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 13: p.419-427.
51. Vlasie V., De Barros S., Rousseau M., Champaney L., Dufflo H., & Morvan B. (2006). Ultrasonic rheological model of cohesive and adhesive zones in aluminium joints : validation by mechanical tests *Archives of Applied Mechanics*, 75 (4-5): p.220-234.
52. Vlasie V., De Barros S., Rousseau M., Champaney L., Dufflo H., & Morvan B. (2006). Mechanical and acoustical study of a structural bond : comparison theory/numerical simulations/experiment *European Journal of Mechanics A/Solids*, 25: p.464-482.
53. Vlasie V., & Rousseau M. (2006). Effect of the surface free energy on the behaviour of the surface and guided waves. *Ultrasonics*, 45: p.188-195.

## 2005

- 54.
55. Alshits V.I., & Maugin G.A. (2005). Dynamic of multilayers : elastic waves in an anisotropic graded or stratified plate *Wave Motion*, 41/4: p.357-394.
56. Berezovski A., & Maugin G.A. (2005). Stress-induced phase transition front propagation in thermoelastic solids. *European Journal of Mechanics - A / Solids* 24: p.1-21.
57. Berezovski A., & Maugin G.A. (2005). On the velocity of moving phase boundaries in solids. *Acta Mechanica*, 179: p.187-196.
58. Blumrich R., Coulouvrat F., & Heimann D. (2005). Meteorologically induced variability of sonic boom characteristics of supersonic aircraft in cruising flight. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118: p.707-722.
59. Blumrich R., Coulouvrat F., & Heimann D. (2005). Variability of focused sonic booms from accelerating supersonic aircraft in consideration of meteorological effects *Journal of the Acoustical Society of America*, 118: p.696-706.
60. Collet B., & Destrade M. (2005). Explicit secular equations for piezoacoustic waves : Rayleigh modes. *Journal of Applied Physics*, 98: p.054903.
61. Destrade M. (2005). Stoneley waves and interface stability for Bell materials in compression : comparison with rubber *Mathematics and Mechanics of Solids*, 10: p.227-246.
62. Destrade M. (2005). On interface waves in misoriented pre-stressed incompressible elastic solids. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 70: p.3-14.
63. Destrade M., & Hayes M. (2005). Inhomogeneous "longitudinal" plane waves in a deformed elastic material *Journal of Elasticity*, 75: p.147-165.

64. Destrade M., & Ogden R.W. (2005). Surface waves in a stretched and sheared incompressible elastic material. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 40: p.241-253.
65. Destrade M., Ottenio M., Pichugin A.V., & Rogerson G.A. (2005). Non-principal surface waves in deformed incompressible materials. *International Journal of Engineering Science*, 42: p.1092-1106.
66. Destrade M., & Saccomandi G. (2005). On finite amplitude elastic waves propagating in compressible solids. *Physical Review E*, 72: p.016620.
67. Goss V.G.A., Van Der Heijden G.H.M., Thompson J.M.T., & Neukirch S. (2005). Experiments on snap buckling, hysteresis and loop formation in twisted rods *Experimental Mechanics*, 45: p.101-111.
68. Grekova E.F., & Maugin G.A. (2005). Modelling of elastic magnetic crystals by means of multi-spin micromorphic media. *International Journal of Engineering Science*, 43: p.494-519.
69. Guinovart-Diaz R., Rodriguez-Ramos R., Bravo-Castillero J., Sabina F.J., & Maugin G.A. (2005). Closed-form thermoelastic moduli of a periodic three-phase fiber-reinforced composite *Journal Thermal Stresses*, 28: p.1067-1093.
70. Guinovart-Diaz R., Rodriguez-Ramos R., Bravo-Castillero J., Sabina F.J., Otero-Hernandez J.A., & Maugin G.A. (2005). A recursive asymptotic homogenization method for multi-phase fibrous elastic composites. *Mechanics of Materials*, 37: p.1119-1131.
71. Hladky-Hennion A.C., Allan G., & De Billy M. (2005). Localized modes in a one-dimensional diatomic chain of coupled spheres. *J Appl. Phys.*, 98: p.054909.
72. Imatani S., Hatada K., & Maugin G.A. (2005). Finite element analysis of crack problems for strain gradient material model. *Philosophical Magazine*, 85: p.4245-4256.
73. Lazar M., & Maugin G.A. (2005). Nonsingular stress and strain fields of dislocations and disclinations in first strain gradient elasticity *International Journal of Engineering Science*, 43: p.1157-1184.
74. Lazar M., Maugin G.A., & Aifantis E.C. (2005). On dislocations in a special class of generalized elasticity *Physica status solidi*, 242: p.2365-2390.
75. Marchiano R., Coulouvrat F., & Thomas J.L. (2005). Nonlinear focusing of acoustic shock waves at a caustic cusp. *Journal of the Acoustical Society of America*, 117: p.566-577.
76. Marchiano R., & Thomas J.L. (2005). Synthesis and analysis of linear and nonlinear acoustical vortices *Physical Review E*, 71: p.066616.
77. Nehme J., Lacolley P., Labat C., Challande P., et al. (2005). Spirinolactone improves carotid artery fibrosis and distensibility in rat post-ischaemic heart failure. *J. Mol Cell Cardiol.*, 39: p.511-519.
78. Porubov A.V., & Maugin G.A. (2005). Longitudinal strain solitary waves in presence of cubic nonlinearity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 40: p.1041-1048.
79. Porubov A.V., Maugin G.A., Gursky V.V., & Krzhizhanovskaya V.V. (2005). On some localized waves described by the extended KdV equation. *Compte-Rendus Mécanique (Acad. Sci. Paris)*, 333: p.528-533.
80. Potapov A.I., Maugin G.A., & Trimarco C. (2005). Wave momentum and radiation stresses in elastic solids. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 10: p.441-460.

81. Pouget J. (2005). Nonlinear lattice model : Complex dynamics, pattern formation and chaos aspect *Philosophical Magazine*, 85: p.4067-4094.
82. Predoi M.V., & Rousseau M. (2005). Lamb waves propagation in elastic plane layers with a joint strip. *Ultrasonics* 43: p.551-559.
83. Rendon Garrido P.L., & Coulouvrat F. (2005). Reflection of caustics and focused sonic booms. *Wave Motion* 42: p.211-225.
84. Vlasie V., & Rousseau M. (2005). Non destructive test of structural bonds by guided ultrasonic waves : effect of a surface pre-treatment or a localized defect. *American Journal of Applied Sciences* 2/3: p.739-745.

## 2004

85. Albaladejo P., Challande P., Kakou A., Benetos A., et al. (2004). Selective reduction of heart rate by ivabradine : effect on the visco-elastic arterial properties in rats *J. Hypertens*, 22: p.1739-1745.
86. Berezovski A., & Maugin G.A. (2004). On the thermodynamic conditions at moving phase-transition fronts in thermoelastic solids *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 29: p.37-51.
87. Cervenka P., & Marchal J. (2004). Imaging with a new multi-look front-scan sonar system. *Acta Acoustica*, 90: p.38-48.
88. Collet B. (2004). Recursive surface impedance matrix methods for ultrasonic wave propagation in piezoelectric multilayers. *Ultrasonics* 42: p.189-197.
89. Collet B., & Destrade M. (2004). Explicit secular equations for piezoacoustic surface waves : Shear-horizontal modes *Journal of the Acoustical Society of America*, 116: p.3432-3442.
90. Courtois T., & Martin V. (2004). Spectral quality of acoustic predictions obtained by the ray-method in coupled damped cavities *Journal of Sound and Vibration* 270: p.259-278.
91. De Barros S., Gama A.L., Rousseau M., & Collet B. (2004). Characterization of bounded plates with Lamb and SH waves using a quasi-static approximation. *Latin American Journal of Solids and Structures* 1: p.379-399.
92. De Billy M. (2004). Power spectrum of shear waves in finite one-dimensional granular medium. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116: p.713-716.
93. De Billy M., & Hladky-Hennion A.C. (2004). On the splitting of aspherical structure submitted to an acoustical polarized excitation *Ultrasonics* 43: p.27-34.
94. Dell'Isola F., Maurini C., & Porfiri M. (2004). Passive damping of beam vibrations through distributed electric networks and piezoelectric transducers : prototype design and experimental validation *Smart Materials and Structures* 13: p.299-308.
95. Destrade M. (2004). Surface acoustic waves in rotating orthorhombic crystals *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 460: p.653-665.
96. Destrade M. (2004). Explicit secular equation for Scholte waves over a monoclinic crystal *Journal of Sound and Vibration*, 273: p.409-414.

97. Destrade M. (2004). Rayleigh waves in anisotropic crystals rotating about the normal to a symmetry plane. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 71: p.516-520.
98. Destrade M., & Saccomandi G. (2004). Some results on finite amplitude elastic waves propagating in rotating media. *Acta Mechanica*, 173: p.19-31.
99. Destrade M., & Saccomandi G. (2004). Finite amplitude inhomogeneous waves in Mooney-Rivlin viscoelastic solids *Wave Motion*, 40: p.251-262.
100. Destrade M., & Scott N.H. (2004). Surface waves in a deformed isotropic hyperelastic material subject to an isotropic internal constraint *Wave Motion*, 40: p.347-357.
101. Fernandes A., & Pouget J. (2004). Analytical and numerical modelling of laminated composites with piezoelectric elements *J. Intelligent Material Systems and Structures* 15: p.753-761.
102. Henderson M.E., & Neukirch S. (2004). Classification of the spatial equilibria of the clamped elastica : numerical continuation of the solution set *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 14: p.1223-1239.
103. Hladky-Hennion A.C., Devos A., & De Billy M. (2004). Quantitative analysis of the vibration modes in a finite set of coupled spheres *Journal of the Acoustical Society of America*, 116: p.117-124.
104. Kalpakides V.K., & Maugin G.A. (2004). Canonical formulation and conservation laws of thermoelasticity without "dissipation". *Reports in Math. Physics* 53: p.371-391.
105. Kovalev A.S., Gerasimchuk I.V., & Maugin G.A. (2004). Nonlinear dynamics of incommensurate surface layers. *Physical Review Letters* 92: p.244101-244101-244104.
106. Lazar M., & Maugin G.A. (2004). Defects in gradient micropolar elasticity-I-screw dislocation *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 52: p.2263-2284.
107. Lazar M., & Maugin G.A. (2004). Defects in Gradient Micropolar Elasticity-II-Edge dislocation and disclinations *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 52: p.2285-2307.
108. Marchal J., & Cervenka P. (2004). Feasibility of B-San imaging in sediment by means of parametric transmission technique *Acta Acustica* 90: p.62-69.
109. Marchal J., & Cervenka P. (2004). Modeling of the parametric transmission with the spatial Fourier formalism. Optimization of a parametric antenna *Acta Acustica*, 90: p.49-61.
110. Marchal J., & Cervenka P. (2004). Analysis of the Burger's equation applied to parametric transmission : influence of the phase of the primary waves and sub-harmonics generation *Acta Acustica*, 90: p.410-418.
111. Martin V., Cummings A., & Gronier C. (2004). Discrimination of coupled structural/ acoustic modes by active control : principle and experimental results *Journal of Sound and Vibration*, 274: p.583-603.
112. Maurini C., Dell'Isola F., & Del Vecovo D. (2004). Comparison of piezoelectronics networks acting as distributed vibration absorbers. *Mechanical Systems and Signal Processing* 18: p.1243-1271
113. Maurini C., Pouget J., & Dell'Isola F. (2004). On a model of layered piezoelectric beams including transverse stress effects *Int. J. Solids Structures*, 41: p.4473-4502.

114. Meletlidou E., Pouget J., Maugin G.A., & Aifantis E.C. (2004). Invariant relations in Boussinesq type equations. *Chaos, Solitons and Fractals (J. Physics, UK)*, 22/3: p.613-625.
115. Mueller R., Gross D., & Maugin G.A. (2004). Use of material forces in adaptive finite element methods *Computational Mechanics*, 33: p.421-434.
116. Neukirch S. (2004). Extracting DNA twist rigidity from experimental supercoiling data *Physical Review Letters*, 93: p.198107.
117. Otero J.A., Calas H., Rodriguez-Ramos R., Maugin G.A., Monsivais G., & Perez-Alvarez R. (2004). Diffraction of Transverse Horizontal Waves in Fibonacci Piezoelectric Superlattices. *J. Appl. Math. Phys (ZAMP)*, 55: p.519-533.
118. Porubov A.V., Pastrone F., & Maugin G.A. (2004). Selection of two-dimensional nonlinear strain waves in microstructured media. *Compte-Rendus Mécanique (Acad. Sci. Paris)*, 332: p.513-518.
119. Rodriguez-Ramos R., Pobedria B.E., Padilla P., & Maugin G.A. (2004). Variational principles for Nonlinear Piezoelectric Materials. *Archives of Applied Mechanics*, 74: p.191-200.
120. Vlasie V., & Rousseau M. (2004). Guided modes in a plate elastic layer with gradually continuous acoustic properties *NDT and E International*, 37: p.633-644.
121. Vlasie V., & Rousseau M. (2004). Acoustical characterization of a polystyrene/polystyrene structure bonded by thermodiffusion *Acta Acustica united with Acustica*, 91: p.700-707.

## Ouvrages

2007

122. Berezovski A., Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2007). *Numerical simulation of waves and fronts in inhomogeneous solids (in press)*. Singapour: World Scientific. (224 p.)
123. Destrade M., & Saccomandi G. (2007). *Waves in Nonlinear Pre-Stressed Materials*. New-York (USA): Springer. (287 p.)
124. Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2007). *Non-equilibrium Dynamical Phenomena in Inhomogeneous Solids*. Tallinn, Estonie. (168 p.)
125. Martin V. (2007). *Eléments d'acoustique générale ; de quelques lieux communs de l'acoustique à une première maîtrise des champs sonores*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. (412 p.)

2005

126. Steinmann P., & Maugin G.A. (2005). *Mechanical of Configurational Forces, Proc. Euromech Colloquium, Kaiserslautern G., 2003* (Vol. "Advances in Mechanics and Mathematics"). Kaiserslautern (Allemagne): Kluwer-Springer. (338 p.)

## 2004

127. Goldstein R.V., & Maugin G.A. (2004). *Surface Waves in Anisotropic and Laminated Bodies and Defects Detection (Proceedings of Moscow NATO ARW 2002)* Dordrecht, Pays-Bas: Kluwer. (322 p.)
128. Kalpakides V.K., & Maugin G.A. (2004). *Configurational Mechanics, Proceedings of the Symposium ESMC5, Thessalonique, Grèce, 2003* Leyde, Pays-Bas: A.A. Balkeme Publ. (168 p.)

## Chapitres d'ouvrages

## 2007

129. Destrade M. (2007). Interface waves in pre-stressed incompressible solids In M. Destrade and G. Saccomandi (Ed.), *Waves in Nonlinear Pre-Stressed Materials* (pp. 61-100). New-York, Etats-Unis: CISM Lecture Notes 495, Springer.
130. Maugin G.A. (2007). Defects, dislocations and the general theory of material inhomogeneity. In C. Sansour (Ed.), *Generalized continua and dislocation theory : theoretical concepts, computational methods and experimental verification (Lecture Notes, Udine, 2007)* (pp. 50 pages). Vienne, Autriche: to be published by Springer.

## 2006

131. Berezovski A., Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2006). Modelling and Numerical Simulation of Non-classical Effects of Waves, including Phase Transition Fronts. In P.P. Del-santo (Ed.), *Universality of nonclassical nonlinearity : Applications to Non-destructive evaluations and ultrasonics* (pp. 203-220). New-York Springer.
132. Lacolley P., Osborne-Pellegrin M., Labat C., & Challande P. (2006). Animal models for studies of arterial stiffness. In R. O'Rourke and M. Safar Editors (Ed.), *Handbook of hypertension* (pp. 175-190): Elsevier.

## 2005

133. Maugin G.A. (2005). Theory of Nonlinear Surface Waves and Solitons. In C. Lai and K. Wilmanski (Ed.), *Surface Waves in Geomechanics (Lectures at Udine, Italie, Sept. 2004)* (pp. 325-371). Vienne, Autriche: Springer-Verlag.
134. Maugin G.A., & Kalpakides V.K. (2005). Towards a variational mechanics of dissipative continua ? In S. Seniytycz and H. Farkas (Ed.), *invited contribution to a book, chapter 9, in "Variational and Extremum Principles in Macroscopic Systems"* (pp. 187-205). Oxford, Royaume-Uni: Elsevier.



Colloques avec actes

2007

135. Baudoin M., Thomas J.L., Coulouvrat F., & Lhuillier D. (2007). *Un modèle diphasique self-consistant pour la propagation du son dans des solutions concentrées de particules rigides*. Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
136. Baudoin M., Thomas J.L., Coulouvrat F., & Lhuillier D. (2007). *A self-consistent effective medium theory for the sound propagation in concentrated suspensions of rigid particles*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.
137. Berezovski A., Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2007). *Front dynamics in inhomogeneous solids*. Paper presented at the *Euromech 478*, Tallinn, Estonie.
138. Berezovski A., Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2007). *Internal variables and scale separation in the dynamics of microstructured solids*. Paper presented at the *IUTAM Symp. On Scaling in Solid Mechanics*, Cardiff, Royaume-Uni.
139. Berezovski M., Berezovski A., Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2007). *Numerical simulation of waves and fronts in inhomogeneous solids*. Paper presented at the *10th European-Mecamat Conference on Multiphases and multicomponents materials under dynamic loading*, IPPT-PAN, Varsovie, Pologne.
140. Cazottes P., Fernandes A., Pouget J., & Hafez M. (2007). *Optimisation de mécanismes bistables : structures et actionneurs*. Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
141. Collet B. (2007). *Analysis of guided acoustic waves in piezoelectric semiconductor plates, paper n° 1361*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.
142. Coulouvrat F., Marchiano R., Ganjehi L., & Rollet C. (2007). *Numerical simulation of acoustical shock wave propagation in heterogenous and moving media*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics, conférence invitée*, Madrid, Espagne.
143. Dagrau F., Coulouvrat F., Héron N., Rogé G., & Zdenek J. (2007). *A complete process for sonic boom assessment with atmospheric and manoeuvres effects*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.
144. Destrade M., & Fu Y.B. (2007). *Waves at the edge of a cymbal*. Paper presented at the *Euromech. Coll. 481 on Recent Advances in the Theory and Application of Surface and Edge Waves*, Keele, Royaume-Uni.
145. Destrade M., Gilchrist G., & Saccomandi G. (2007). *Surface instability of skin*. Paper presented at the *Euromech. Coll. 481 on Recent Advances in the Theory and Application of Surface and Edge Waves*, Keele, Royaume-Uni.
146. Ganjehi L., Marchiano R., Coulouvrat F., & Thomas J.L. (2007). *Simulation numérique et expérimentale de la propagation des ondes non linéaires en milieu hétérogène*. Paper presented at the *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
147. Ganjehi L., Marchiano R., Coulouvrat F., & Thomas J.L. (2007). *Nonlinear propagation of shock waves through heterogeneous media*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.

148. Héron N., Rogé G., Zdenek J., Coulouvrat F., & Dagrau F. (2007). *HISAC midterm : overview of sonic boom issues* Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics, conference invitée*, Madrid, Espagne.
149. Mamou-Mani A., Le Moynes S., Frelat J., Besnainou C., & Ollivier F. (2007). *Effect of prestresses on natural frequencies of a buckled wooden plate : a numerical and experimental investigation*. Paper presented at the *ISMA2007*, Barcelone, Espagne.
150. Martin V., & Guignard T. (2007). *Graft of the boundary integral method onto the image-source method for vehicle acoustics* Paper presented at the *ICSV14*, Cairns, Australie.
151. Martin V., & Le Bourdon T. (2007). *Acoustic holography and complementary boundary conditions* Paper presented at the *ICSV14*, Cairns, Australie.
152. Martin V., & Mapagha S. (2007). *Integration of sub-systems on vehicles* Paper presented at the *ICSV14*, Cairns, Australie.
153. Martin Vincent, Martin Vanessa, & Poullain P. (2007). *Stability of sound speed and attenuation identified in material samples* Paper presented at the *ICSV14*, Cairns, Australie.
154. Maugin G.A. (2007). *Nonlinear surface waves on solids* Paper presented at the *Survey lecture at International Conference "FPU+50" Nonlinear Waves 50 years after Fermi-Pasta-Ulam*, Rouen, France.
155. Maugin G.A. (2007). *Material space and dual canonical wave formulation : Application to Nonlinear elastic solids* Paper presented at the *Intern. Seminar "Geometry, Continua and Microstructure-7"*, Lancaster, Royaume-Uni.
156. Maugin G.A. (2007). *On inhomogeneity, growth and ageing of materials* Paper presented at the *Intern. Symp. On Defect and Material Mechanics*, Aussois.
157. Maugin G.A., & Berezovski A. (2007). *On the exploitation of Eshelby's stress in isothermal and adiabatic conditions* Paper presented at the *Euromech. 478*, Tallinn, Estonie.
158. Maurini C., Porfiri M., & Pouget J. (2007). *On the identification of modal couplings and inherent capacitances of piezoelectric structures* Paper presented at the *SPI Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, Californie, Etats-Unis.
159. Maurini C., Pouget J., & Dell'Isola F. (2007). *Poutres composites piézoélectriques : modélisation des effets 3D, validations numériques et expérimentales* Paper presented at the *8ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, France.
160. Mazeyrat J., Romain O., Garda P., Lagrée P.-Y., et al. (2007). *Abdominal Aortic Aneurysm test bench for in vitro simulation*. Paper presented at the *29th Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*.
161. Neukirch S., Roman B., De Gaudemaris B., & Bico J. (2007). *Les poils perçants : un exemple de flambage capillaire* Paper presented at the *18ème congrès français de mécanique*, Grenoble, France.
162. Porfiri M., Maurini C., & Pouget J. (2007). *Modal analysis of stepped piezoelectric beams* Paper presented at the *SPIE conference on Smart Structures and Materials 2007*, San Diego, Etats-Unis.

163. Porubov A.V., & Maugin G.A. (2007). *Cubic nonlinearity and surface solitary wave propagation*. Paper presented at the *Euromech. Coll. 481 on Recent Advances in the Theory and Application of Surface and Edge Wave*, Keele, Royaume-Uni.
164. Régnier M., Barrière C., Marchiano R., Coulouvrat F., & Royer D. (2007). *Optical measurement and numerical simulations of the self-modulated low frequency displacement*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.
165. Rodrigues Ferreira E., Boulager P., & Destrade M. (2007). *Finite amplitude Love waves in special Blatz-Ko materials* Paper presented at the *Euromech. Coll. 481 on Recent Advances in the Theory and Application of Surface and Edge Waves*, Keele, Royaume-Uni.
166. Thomas J.L., Coulouvrat F., Marchiano R., Baudoin M., & Ganjehi L. (2007). *Experimental simulation of the sonic boom at the laboratory scale*. Paper presented at the *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Espagne.
167. Zhang V.Y., Collet B., Dubus B., Destrade M., & Gryba T. (2007). *Guided wave spectra and their asymptotic behaviour in multi-layered plates made of three materials AlN-W-SiO<sub>2</sub>*. Paper presented at the *2007 International Congress on Ultrasonics*, Vienne, Autriche.

## 2006

168. Baskar S., Coulouvrat F., & Marchiano R. (2006). *Irregular reflection of acoustical shock waves and von Neumann paradox*. Paper presented at the *Innovations in Nonlinear Acoustics, AIP Conference Proceedings 838 of the 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, Penn State, Etats-Unis.
169. Baskar S., Coulouvrat F., & Marchiano R. (2006). *Réflexion non linéaire des ondes de choc acoustiques, de Snell-Descartes aux paradoxes de von Neumann*. Paper presented at the *8ème Congrès Français d'Acoustique*, Tours, France.
170. Baudoin M., Coulouvrat F., & Thomas J.L. (2006). *Absorption of sonic boom by clouds*. Paper presented at the *Innovations in Nonlinear Acoustics, AIP Conference Proceedings 838 of the 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, Penn State, Etats-Unis.
171. Baudoin M., Coulouvrat F., & Thomas J.L. (2006). *Propagation d'ondes de chocs dans des suspensions diluées* Paper presented at the *8ème Congrès Français d'Acoustique*, Tours, France.
172. Berezovski A., & Maugin G.A. (2006). *Impact-induced phase transition front propagation in a bar*. Paper presented at the *4th World Conf. On Structural Control and Monitoring*, San Diego, Etats-Unis.
173. Berezovski A., & Maugin G.A. (2006). *Numerical simulation of phase-transition front propagation in thermoelastic solids*. Paper presented at the *Numerical Mathematics and Advanced Applications (ENUMATH 2005)*.
174. Casey J., & Maugin G.A. (2006). *Volumetric growth of elastic materials and finite Volterra dislocations*. Paper presented at the *US National Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Boulder, Colorado, Etats-Unis.
175. Collet B., & Destrade M. (2006). *Onde de Love piézoélectrique*. Paper presented at the *8ème Congrès Français d'Acoustique*.

176. Coulouvrat F., Blumrich R., & Heimann D. (2006). *Meteorologically induced variability of sonic boom of a supersonic aircraft in cruising or acceleration phase*. Paper presented at the *Innovations in Nonlinear Acoustics, AIP Conference Proceedings 838 of the 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, Penn State, Etats-Unis.
177. Coulouvrat F., Marchiano R., Baskar S., & Thomas J.L. (2006). *La diffraction non linéaire des ondes de choc acoustiques*. Paper presented at the *9ème Rencontre du Non Linéaire, Mini-colloque « Ondes non linéaires : quoi de neuf ? »*, Orsay (Université de Paris-Sud), France.
178. Destrade M., & Saccomandi G. (2006). *Some remarks on bulk waves propagating in viscoelastic solids of differential type*. Paper presented at the *13th Conference on Waves and Stability of Continuous Media (WASCOM 2005)*, Singapour.
179. Fairbrother R., Abom M., Elnady T., & Ollivier F. (2006). *Linear acoustic simulation and experimental characterisation of a modular automotive Muffler*. Paper presented at the *13th International Congress on Sound and Vibrations*, Vienne, Autriche.
180. Ganjehi L., Marchiano R., Thomas J.L., & Coulouvrat F. (2006). *Numerical and experimental simulation of shock waves propagation through heterogeneous media*. Paper presented at the *Innovations in Nonlinear Acoustics, AIP Conference Proceedings 838 of the 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, Penn State, Etats-Unis.
181. Ganjehi L., Marchiano R., Thomas J.L., & Coulouvrat F. (2006). *Propagation des ondes de choc dans les milieux hétérogènes. Application au bang sonique*. Paper presented at the *8ème Congrès Français d'Acoustique*, Tours, France.
182. Guerinot J.M., Larmet E., Roux J.P., Martin V., & Le Salver R. (2006). *Transfert solidiens et intégration de composants et sous-systèmes sur véhicule : projet Transsolid Phase I*. Paper presented at the *Congrès SIA*, Le Mans, France.
183. Hladky A.C., De Billy M., & Hladky-Hennion A.C. (2006). *Mise en évidence de modes localisés dans des chaînes de billes*. Paper presented at the *Congrès CFA 2006*.
184. Marchiano R., & Thomas J.L. (2006). *Etude de la charge topologique de vortex acoustiques en régime non linéaire*. Paper presented at the *8ème Congrès Français d'Acoustique*, Tours, France.
185. Mazeyrat J., Romain O., Garda P., Flécher E., et al. (2006). *Wireless communicative stent for follow-up of abdominal aortic aneurysm*. Paper presented at the *2006 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, IEEE-BioCAS 2006, Paper 7050*, Londres, Royaume-Uni.
186. Neukirch S., & Gorieli A. (2006). *Twining Plants : How Thick Should their Support Be ?*. Paper presented at the *5th Plant Biomechanics Conference*, Stockholm, Suède.
187. Ollivier F., Pachebat M., & C., Picard. (2006). *On the use of P-U probes for measuring the transitory near acoustic field*. Paper presented at the *EURONOISE 2006*, Tampere, Finlande.
188. Porubov A.V., & Maugin G.A. (2006). *On the role of cubic nonlinearity in localization of longitudinal strain waves*. Paper presented at the *Innovations in Nonlinear Acoustics*, Melville, N.Y.
189. Porubov A.V., & Maugin G.A. (2006). *Improved description of longitudinal strain solitary waves*. Paper presented at the *Euromech. 484, Wave Mechanics and Stability of Long Flexible Structures subjected to Moving Loads and Flows*, Delft, Pays-Bas.

2005

190. Berezovski A., & Maugin G.A. (2005). *Impact-induced phase transformations in thermo-elastic materials*. Paper presented at the *NATO ARW New Trends in Phase Transformations and Their Applications to Smart Materials*, Proc. Kluwer, Dordrecht, Pays-Bas.
191. Berezovski A., & Maugin G.A. (2005). *Non-Equilibrium description and numerical simulation of phase-transition front propagation in thermoelastic solids*. Paper presented at the *Trends in Applications of Mathematics to Mechanics (Proc. STAMM04)*, Francfort, Allemagne.
192. Berezovski A., & Maugin G.A. (2005). *Thermomechanics of moving phase boundaries in solids*. Paper presented at the *International Congress of Fracture 2005*, Turin, Italie.
193. Boden H., Torregrosa A., Ollivier F., Peat K., et al. (2005). *Noise from turbo-charged diesel engine exhaust systems*. Paper presented at the *12th International Congress on Sound and Vibrations*, Lisbonne, Portugal.
194. Dell'Isola F., Maurini C., Porfiri M., & Vidoli S. (2005). *Multi-modal passive electric control of mechanical vibrations through distributed piezoelectric transducers and electric networks : results and perspectives*. Paper presented at the *XVII Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata*, Florence, Italie.
195. Destrade M. (2005). *Surface stability analysis of a predeformed Bell-constrained half-space*. Paper presented at the *2nd Canadian Conference on Nonlinear Solid Mechanics*, Vancouver, Canada.
196. Fernandes A., Vincenti A., Vannucci P., & Pouget J. (2005). *Optimal design of composites including piezoelectric active layers*. Paper presented at the *II ECCOMAS Thematic Conference On Smart Structures and Materials*, Lisbonne, Portugal.
197. Hetet A., Guyonic S., Legris M., Maussang F., et al. (2005). *Buried mines detection and classification : advanced technologies and signal processing*. Paper presented at the *Oceans'05 Europe*, Brest, France.
198. Hetet A., Guyonic S., Legris M., Maussang F., et al. (2005). *Design and experiment in low frequency synthetic aperture sonar for buried objects detection and classification in marine sediments*. Paper presented at the *Underwater Acoustic Measurements : technologies and results*, Heraklion, Grèce.
199. Imatani S., Hatada K., & Maugin G.A. (2005). *Size effect on crack analysis by strain gradient material model*. Paper presented at the *International Congress of Fracture 2005*, Turin, Italie.
200. Kodjo S., Cohen-Tenoudji F., Constantopoulos C., & Gaillas J.L. (2005). *Nouvelle technique acoustique pour la caractérisation du béton endommagé par l'alcali-reaction*. Paper presented at the *Colloque AUGC*, Grenoble, France.
201. Marchiano R., & Thomas J.L. (2005). *Theoretical and experimental studies of the topological charge of nonlinear acoustical vortices*. Paper presented at the *17th International Symposium on Nonlinear Acoustics and International Sonic Boom Forum (satellite meeting)*, Penn State, Etats-Unis.
202. Martin V. (2005). *How accurate are results obtained by holography ?* Paper presented at the *NOVEM'05 Conference*, Saint-Raphaël, France.
203. Martin V., & Guignard T. (2005). *Justification of the image sources in ray-tracing method*. Paper presented at the *12th International Congress of Sound and Vibration, ICSV12*, Lisbonne, Portugal.

204. Maugin G.A. (2005). *Present state and perspectives in Eshelbian nonlinear materials mechanics* Paper presented at the *2nd Canadian Conference on Nonlinear Solid Mechanics*, Vancouver, Canada.
205. Maurini C., Porfiri M., & Pouget J. (2005). *Modal analysis of stepped piezoelectric beams with applications to electric vibration damping* Paper presented at the *12th Intern. Congress on Sound and Vibration*, Lisbonne, Portugal.
206. Maurini C., Pouget J., & Dell'Isola F. (2005). *Corrections to the constitutive equations of piezoelectric laminated beams through a mixed variational approach* Paper presented at the *II ECCO-MAS Thematic Conference On Smart Structures and Materials*, Lisbonne, Portugal.
207. Neukirch S., & Audoly B. (2005). *Dynamique et fragmentation de tiges fragiles : Pourquoi les spaghetti cassent en trois morceaux ?* Paper presented at the *8ème rencontre du Non Linéaire*, Institut Henri Poincaré, Paris, France.
208. Porubov A.V., Mareev V.V., & Maugin G.A. (2005). *Amplification of two-dimensional strain solitary waves* Paper presented at the *RIAM Symposium n° 16ME-S1 "Physics and Mathematical Structures of Nonlinear Waves"*, Fukuoka, Japon.

## 2004

209. Berezovski A., Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2004). *Wave propagation in functionally graded materials (invited contribution)*. Paper presented at the *"Functionally Graded Materials", ICTAM'04*, Varsovie, Pologne.
210. Berezovski A., Engelbrecht J., & Maugin G.A. (2004). *Dynamics of phase boundaries in thermoelastic solids* Paper presented at the *3rd European Conference on Structural Control*, Vienne, Autriche.
211. Berezovski A., & Maugin G.A. (2004). *Stress-induced martensitic phase-transition front propagation (invited contribution)*. Paper presented at the *"Mechanics of Phase Transformation", ICTAM'04*, Varsovie, Pologne.
212. Cervenka P., & Marchal J. (2004). *Expérimentation du sonar frontal COSMOS pour la détection de pétrole immergé*. Paper presented at the *SeaTechWeek - Caractérisation in situ des fonds marins*.
213. Cohen-Tenoudji F., Dewailly V., Théron G., & Frangir J.-P. (2004). *Ultrasonic tomography for air flow visualization (contribution invitée)*. Paper presented at the *50th IEEE Symposium in Ultrasonics*, Montréal, Canada.
214. Coulouvrat F. (2004). *Numerical simulation of sonic boom*. Paper presented at the *7ème Congrès Français d'Acoustique CFA/30, Deutsche fur Akustik DAGA, Joint Congress CFA/DAGA '04* Strasbourg, France.
215. Destrade M. (2004). *Explicit secular equations for surface and interface waves in anisotropic solids* Paper presented at the *XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*.
216. Fernandes A., & Pouget J. (2004). *Analytical and numerical modelling of laminated composites with piezoelectric layers*
217. Fernandes A., & Pouget J. (2004). *Actuator and sensor modelling for laminated Piezoelectric plates* Paper presented at the *21st Int. Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM04)*, Varsovie, Pologne.

218. Fernandes A., & Pouget J. (2004). *On analytical and numerical studies of composite structures including piezoelectric elements* Paper presented at the *7th Int. Conf. on Computational Structures Technology (CST 2004)*, Lisbonne, Portugal.
219. Grekova E.F., & Maugin G.A. (2004). *Modelling of complex elastic crystals by means of micro-morphic gyrocontinua*. Paper presented at the *ICTAM'04*, Varsovie, Pologne.
220. Guignard T., & Martin V. (2004). *Tuning of Musical Glasses* Paper presented at the *7ème Congrès Français d'Acoustique*, Strasbourg, France.
221. Guignard T., Martin V., & Courtois T. (2004). *Interpolated identified reflection coefficients for acoustic ray method*. Paper presented at the *ICSV11*, Saint-Petersbourg, Russie.
222. Guinovart-Diaz R., Sabina F.J., Bravo-Castillero J., Rodriguez-Ramos R., Martinez-Rosado R., & Maugin G.A. (2004). *Effective elastic moduli of a Three-phase fiber-reinforced composite with square symmetry*. Paper presented at the *PACAM VIII '04*, La Havane, Cuba.
223. Lopez-Realpozo J.C., Rodriguez-Ramos R., Bravo-Castillero J., Guinovart-Diaz R., Gomez-Munoz J., & Maugin G.A. (2004). *Asymptotic homogenization method applied to a 1D elasto-plastic composite with non-perfect contact conditions* Paper presented at the *PACAM VIII'04*, La Havane, Cuba.
224. Marchiano R., Coulouvrat F., & Thomas J.L. (2004). *Focusing of sonic boom at caustics induced by flight manoeuvres*. Paper presented at the *7ème Congrès Français d'Acoustique CFA/30, Deutsche Jahrestagung für Akustik DAGA, Joint Congress CFA/DAGA 04*, Strasbourg, France.
225. Maugin G.A. (2004). *Canonical Momentum Equation in the Electrodynamics of Deformable Continua and Applications* Paper presented at the *PACAM VIII '04*, La Havane, Cuba.
226. Maugin G.A. (2004). *Introduction à la Mécanique des milieux continus généralisés et ses applications* Paper presented at the *Colloque National MECAMAT 2004 "Mécanismes et mécanique des matériaux et structures à longueur interne"*, Association Mecamat, Paris, France.
227. Maugin G.A. (2004). *Generalized Continuum Mechanics : Three Paths* Paper presented at the *invited contribution to Prenominated Session "Continuum Mechanics"*, *ICTAM'04*, Varsovie, Pologne.
228. Maurini C., Dell'Isola F., & Pouget J. (2004). *On models of layered piezoelectric beams for passive vibration control*. Paper presented at the *7th European Mechanics of Materials Conference, Adaptive Systems and Materials*, Fréjus, France.
229. Maurini C., Pouget J., & Dell'Isola F. (2004). *Beam models of piezoelectric laminates* Paper presented at the *7th Intern.Conference on Computational Structures Technology*, Lisbonne, Portugal.
230. Neukirch S. (2004). *Estimation de la rigidité de torsion de l'ADN*. Paper presented at the *7ème rencontre du Non Linéaire*, Institut Henri Poincaré, Paris, France.
231. Ollivier F., Alais P., & Karkaletsis A. (2004). *Fast modal analysis by means of impulse acoustical holography*. Paper presented at the *11th International Congress on Sound and Vibration*, Saint-Petersbourg, Russie.
232. Parthiot F., De Nanteuil E., Merlin F., Zerr B., et al. (2004). *Sonar detection and monitoring of sunken heavy fuel oil on the seafloor*. Paper presented at the *NOSCA, Interspill 2004*, Trondheim, Norvège.

233. Porubov A.V., Gursky V.V., Krzhizhanovskaya V.V., & Maugin G.A. (2004). *Localized Non-linear Strain Waves in Complex Dispersive-Dissipative Solids* Paper presented at the *Intern. Symp. Advanced Problems in Mechanics 2003*, Saint-Pétersbourg, Russie.
234. Quiligotti S., & Maugin G.A. (2004). *On the volumetric growth of binary solid-fluid mixtures* Paper presented at the *ICTAM'04*, Varsovie, Pologne.
235. Restuccia L., & Maugin G.A. (2004). *Pseudomomentum and material forces in ferroelectrics* Paper presented at the *Trends in Continuum Physics'04*, Poznan, Pologne.
236. Rodriguez-Ramos R., Bravo-Castillero J., Guinovart-Diaz R., Rivolta M.C., et al. (2004). *Variational bounds for three-phase elastic composites with thin intermediate phase* Paper presented at the *PACAM VIII '04*, La Havane, Cuba.
237. Vlasie V., De Barros S., Rousseau M., & Champany L. (2004). *Distinction between adhesive and cohesive defects in a structural bond*. Paper presented at the *137th Meeting of the Acoustical Society of America*, San Diego, Etats-Unis.

## Colloques sans actes

## 2007

238. Coulouvrat F. (2007). *The challenges of an acceptable sonic boom*. Paper presented at the *First CEAS European Air and Space Conference*. Berlin
239. Kodjo A.S., Rivard P., Ballivy G., Cohen Tenoudji F., & Gallias J.L. (2007). *Evaluation de l'état de bétons par technique de Résonance non linéaire*. Paper presented at the *DiagnoBéton*. Aix en Provence, France
240. Kodjo A.S., Rivard P., Cohen Tenoudji F., & Gallias J.L. (2007). *Evaluation of damages due to alkali-silica reaction with acoustic techniques. Development of a new nonlinear method*. Paper presented at the *Materials and Structures, RILES*.
241. Marchal J., & Cervenka P. (2007). *Acoustique non linéaire appliquée au domaine sous-marin*. Paper presented at the *Ecole Thématique du CNRS "Acoustique et ondes non linéaires et applications"*. Oléron
242. Maugin G.A. (2007). *From mathematical physics to mechanical engineering*. Paper presented at the *Romanian congress of mathematics*. Bucarest, Roumanie
243. Sparrow V., Coulouvrat F., & Makino Y. (2007). *Status of sonic boom knowledge*. Paper presented at the *International civil aviation organization ICAO, 7th Meeting Committee on aviation environmental protection CAEP*. Montréal

## 2005

244. Coulouvrat F. (2005). *Nonlinear waves in acoustics* Paper presented at the *FPU+50: Nonlinear waves 50 years after Fermi-Pasta-Ulam*. Rouen, France
245. Dewailly V., & Cohen Tenoudji F. (2005). *A new technique of characterization of air flow : Ultrasonic tomography in transmission*. Paper presented at the *International Congress on Noise and Vibration, NOVEM*. Saint-Raphael, France



246. Marchiano R., & Thomas J.L. (2005). *Theoretical and experimental studies of the topological charge of nonlinear acoustical vortices*. Paper presented at the *International Conference "FPU+50" nonlinear waves 50 years after Fermi-Pasta-Ulam* Rouen
247. Maugin G.A. (2005). *The notion of local structural rearrangement and its application to the mechanics of soft tissues* Paper presented at the *Keynote lecture at 25th Yugoslav Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. Novi Sad, Serbie
248. Maugin G.A. (2005). *Finite-strain elasticity and the mechanics of soft tissues*. Paper presented at the *Journées du non linéaire 2005* Paris, France
249. Maugin G.A. (2005). *Basics of the material mechanics of materials for arbitrary continua* Paper presented at the *ISASUT, intensive seminar "Non linear Waves, Generalized Continua and Complex Structures"*. Turin, Italie
250. Maugin G.A. (2005). *Eshelbian thermomechanics of continuous media with diffusion and/or weak nonlocality*. Paper presented at the *International Conference on Continuous and discrete modeling in mechanics*. Varsovie, Pologne
251. Maugin G.A. (2005). *An introduction to the thermodynamics of configurational forces*. Paper presented at the *International conference thermal theories of continua : survey and developments* Messine, Italie

## 2004

252. Maugin G.A. (2004). *Mechanics on the material manifold and applications* Paper presented at the *Keynote lecture at "2004 British Applied Mathematics Colloquium"*. Norwich, Royaume-Uni

## Thèses

## 2006

253. Guignard T. (2006). *Etudes des fondements possibles des concepts numériques utilisés dans les méthodes d'acoustique géométrique*, EPFL-CH.
254. Ottenio M. (2006). *Ondes de volume, de surface et d'interface dans des matériaux hyperélastiques pré-contraints / Bulk, surface and interface waves in pre-stressed hyperelastic materials*. co-tutelle Pierre et Marie Curie / University of Glasgow.

## Rapports de contrat

## 2007

255. Bué J., & Cohen Tenoudji F. (2007). *Rapport final de contrat sur l'étude de la rhéologie et la prise des bétons fluides*
256. Cervenka P., & Marchal J. (2007). *Projet PARASAS (Tranche n°2 - Poste n°1 : adaptation fonctionnelle de la maquette, spécification d'un programme d'essais en mer)* Marché DGA n°02 59 937.

257. Cervenka P., & Marchal J. (2007). *Projet PARASAS (Tranche n°2 - Poste n°2 : description des essais, résultats préliminaires, maquette modifiée)* Marché DGA n° 02 59 937.
258. Coulouvrat F. (2007). *Sonic boom criteria, specifications, guidelines* Report for Deliverable D1.11, contrat HISAC AIP4-CT-2005-516132 (Communauté Européenne), 40 pages + 42 pages annexes.
259. Guignard T., & Martin V. (2007). *Analyse de la méthode des rayons pour l'étude des champs sonores dans les cavités*, Projet CTI (CH), 12ème mois.
260. Le Moyne S., & Ollivier F. (2007). *Mise en oeuvre pour l'Holographie acoustique de Champ proche par l'exploitation de la mesure directe de la vitesse acoustique. Caractérisation expérimentale de sondes PU Micro Flown* Contrat PSA.
261. Maugin G.A. (2007). *Final report on "Max Planck Award 2001"*.

## 2006

262. Coulouvrat F., Ollivier S., Blanc-Benon P., & Héron N. (2006). *Review of sonic boom impacts* Report for Deliverable D1.09, contrat HISAC AIP4-CT-20056516132 (Communauté Européenne), 79 pages.
263. Destrade M., Gilchrist M., & Ottenio M. (2006). *Final Report, Indentation of a pre-stressed hyperelastic material*, International Co-operation Program, CNRS, France/Irish Research Council For Science, Engineering and Technology, Ireland
264. Destrade M., & Saccomandi G. (2006). *Final Report, Acoustics of biological soft tissues* Senior Researcher Visiting Grant, Paris, France
265. Ollivier F. (2006). *Qualification de nouveaux capteurs vibro-acoustiques - Mesures par sondes PU sur un cas test - Comparaison à la vibrométrie laser et à l'holographie*, Contrat PSA.

## 2005

266. Casey J. (Berkeley), & Maugin G.A. (2005). *Final Report France-Berkeley Fund, "Applications of Modern Concepts of Nonlinear Continuum Mechanics to Some Problems of Biomechanics"*.
267. Cervenka P., & Marchal J. (2005). *Antenne paramétrique - Tests fonctionnels. Spécification d'un programme d'essai en bassin* Marché DGA n°02 59 937.
268. Cervenka P., & Marchal J. (2005). *Antenne paramétrique - Calibration en bassin de la maquette*, Marché DGA n° 02 59 937.
269. Cervenka P., & Marchal J. (2005). *Validation de modèles théoriques en acoustique non linéaire par une expérimentation en bassin puis en mer d'une maquette d'antenne paramétrique*, Marché DGA n° 02 59 937. Rapport final.
270. Cervenka P., & Marchal J. (2005). *Expérimentation de capteurs acoustiques pour le pétrole immergé. Mise en oeuvre du sonar frontal COSMOS label RITMER (Réseau de Recherche et d'Innovation Technologique "Pollutions marines accidentelles et conséquences écologiques")*, Financement du Ministère de la Recherche n° 01 G 0815
271. Cervenka P., & Marchal J. (2005). *Projet PARASAS (Tranche n°1, Poste n°3: validation des modèles théoriques par exploitation des mesures réalisées)*, Rapport final Tranche n°1, Marché DGA n° 02 59 937.

272. Cervenka P., & Marchal J. (2005). *Faisabilité et mise en oeuvre de sonars profilers pour le contrôle de la zone de réglage d'un tunnelier (Système imageur du projet Timby)* Contrat Bouygues, Rapport final.
273. Coulouvrat F. (2005). *BANGV, the Sonic Boom Software - User's Guide, manuel utilisateur du logiciel BANGV* contrat de licence Airbus France SAS, 95 pages.
274. Coulouvrat F. (2005). *BANGV, the Sonic Boom Software - Reference Guide, manuel de référence du logiciel BANGV* contrat de licence Airbus France SAS, 371 pages.
275. Coulouvrat F. (coordinateur), Ganjevi L., Marchiano R., & Thomas J.L. (2005). *Simulation numérique et expérimentale du bang sonique : focalisation, propagation en milieu hétérogène et minimisation.*, Compte-rendu de fin d'opération de recherche financée par le Ministère de la Recherche (décisions n° 00 T 0113 01 et 00 T 0114 01), UPMC et CNRS, 100 pages
276. Destrade M., & Ottenio M. (2005). *Final Report, Ondes de volume, de surface et d'interface dans des matériaux hyperélastiques pré-contraints* International Mobility Grant, Joint Ph. D. Programme, Ministère délégué à la recherche, France
277. Le Moyne S., Lamary P., & Tanneau O. (2005). *Contribution du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux à la Commission de Validation des Progitels Vibroacoustiques CVALOR2005*

## 2004

278. Cervenka P., & Marchal J. (2004). *Validation de modèles théoriques en acoustique non linéaire par une expérimentation en bassin puis en mer d'une maquette d'antenne paramétrique - Projet PARASAS (Tranche n°1, Poste n°1 : Tests fonctionnels, spécification d'un programme d'essai en bassin). Marché DGA n° 02 59 937*
279. Cervenka P., & Marchal J. (2004). *Projet PARASAS (Tranche n° 1, Poste n°2 : calibration en bassin de la maquette). Marché DGA n° 02 59 937*
280. Coulouvrat F. (2004). *Report on validation of sonic boom numerical and experimental simulation* Report for Deliverable D16, Université Pierre et Marie Curie, contrat SOBER G4RD-CT-2000-00398, Communauté Européenne, 59 pages.
281. Destrade M., & Ottenio M. (2004). *Final Report, Bulk, surface and interface waves in prestressed hyperelastic materials*, Stevenson Exchange Scholarship, Ministère des Affaires Etrangères, France/University of Glasgow, Scotland.
282. Destrade M., Ottenio M., Fu Y.B., & Brookes D. (2004). *Final Report, Computing the speed of edge waves in generally anisotropic elastic plates*, Alliance Programme (PAI), Ministère des Affaires Etrangères, France/British Council, United Kingdom
283. Marchiano R., Coulouvrat F., & Thomas J.L. (2004). *Report on sonic boom super-focussing and comparison with experiment*, Report for Deliverable D13, Université Pierre et Marie Curie et ESPCI, contrat SOBER G4RD-CT-2000-00398 (Communauté Européenne), 46 pages
284. Maugin G.A., & Engelbrecht J. (2004). *Final report PAI "Parrot" France-Estonie "Thermomechanics of Nonlinear Wave Propagation"*. Tallinn, Estonie.
285. Ollivier F., & Le Moyne S. (2004). *Experimental characterisation of a modular muffler for various configurations and flow speeds* ARTEMIS European project.

286. Pitteri M. (coordinator), Ball J. (Oxford), Salie E.K. (Cambridge), Maugin G.A., Podio-Guidugli P. (Rome), & Mueller S. (Leipzig). (2004). *Final report European Network TMR 98-0229 "Phase Transitions in Crystalline Substances"*.

Brevets

Autres



## Liste des sigles utilisés

ACMO : agent chargé de la mise en oeuvre (de la sécurité)

AMN : Assistant Moniteur Normalien

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ANVAR : Agence Nationale de Valorisation de la Recherche

ATER : Assistant Temporaire d'Enseignement et de Recherche

BDI : Bourse de Docteur Ingénieur

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique

CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

CERT : ex- Centre d'Etudes et de Recherche de Toulouse

CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la Recherche

CNAM : Conservatoire National des Arts et Métiers

CNR : Conseil National de la Recherche (Italie)

CNRS : Centre National de la recherche Scientifique (France)

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

DGA : Direction Générale de l'Armement (France)

DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Allemagne)

DNS : (anglaise) "Direct Numerical Simulation"

DSCM : Direct Simulation Monte-Carlo (methode)  
DSTP : Direction Scientifique, Technique et du Personnel (MENRT)  
ENSTA : Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées  
FAST : Laboratoire de Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques  
GDR : Groupement de recherche (CNRS)  
HISAC : (Projet européen) High Speed Aircraft  
IATOS : Ingénieurs, Administratifs, Techniciens, Ouvriers.. (Université)  
ICP : Institut de la Communication Parlée (Grenoble)  
IFP : Institut Français du Pétrole  
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer.  
IMFT : Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse  
INRETS : Institut National de Recherche et d'Études sur les Transports  
INRIA : Institut National de Recherche en Informatique  
INSP : Institut des NanoSciences de Paris (UPMC)  
IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris  
IRCAM : Institut de Recherche et Coordination Acoustique-Musique  
ITA : Ingénieurs Techniciens et Administratifs (CNRS)  
ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor  
JPL : Jet Propulsion Laboratory (USA)  
LAM : ex- Laboratoire d'Acoustique Musicale (UPMC)  
LCTS : Laboratoire des Composites ThermoStructuraux (Bordeaux)  
LEMA : ex- Laboratoire de Mécanique des Assemblages (Univ. Versailles)  
LEMFI : ex-Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique des Fluides Internes (UPMC)  
LES : Large Eddy Simulation  
LFCT : ex-Laboratoire de Fluides Complexes et Transferts (UPMC)  
LIF : Fluorescence induite par laser  
LIMHP : Laboratoire Matériaux et Hautes Pressions  
LIMSI : Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur  
LMA : Laboratoire de Mécanique et Acoustique (Marseille)  
LMM : ex- Laboratoire de Modélisation en Mécanique (UPMC)  
LMP : ex- Laboratoire de Mécanique Physique (UPMC, Saint-Cyr)  
LMS : Laboratoire de Mécanique des Solides (Ecole Polytechnique)  
LM2S : ex-Laboratoire de Modélisation en Solides et Structures (UPMC)  
LMT : Laboratoire de Mécanique et Technologie (UPMC, ENS Cachan)  
LOA : Laboratoire d'Optique Appliquée

---

LPMMH : Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (ESPCI)  
LTPCM : Laboratoire de Thermodynamique et Physico-Chimie Métallurgique (Grenoble)  
MENRT : Ministère de l'Éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie  
MFA : Microgravité Fondamentale et Appliquée  
NASA : National Aeronautic and Space Administration(USA)  
ONERA : Office National d'Étude et de Recherche Aérospatiales  
PCRDT : Programme Cadre de Recherche Technologique (Europe)  
PIV : " Particle Image Velocimetry " (méthode)  
PNIR : Plan technologique National Implantation Régionale (CNRS)  
POD : Proper Orthogonal Decomposition (méthode)  
RANS : " Reynolds Averaged Navier-Stokes " (méthode)  
RM : Richtmyer-Meshkov (instabilité de)  
RT : Rayleigh-Taylor (instabilité)  
SNECMA : Ex- Société Nationale d'Étude et de Construction de Moteurs d'Avions  
SOBER : " Sonic Boom European Research " (Projet européen)  
UFR : Unité de formation et de recherche (universités)  
UPMC : Université Pierre et Marie Curie  
VOF : " Volume Of Fluid " (méthode)







CNRS  
CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université Pierre et Marie Curie*  
*Tour 55 - 65 5ème étage, 4 Place Jussieu - 75005 Paris*  
*Tél : 01 44 27 37 90 - <http://www.dalembert.upmc.fr>*



