

## 2. Analyse SWOT et objectifs scientifiques de l'unité

### 2.a. Points forts

L'Institut Jean Le Rond d'Alembert, comme l'a montré l'autoévaluation, possède une place importante dans chacune des trois composantes thématiques que sont la mécanique du solide et des structures, la mécanique des fluides et l'acoustique. En outre, la combinaison de ces trois aspects dans une même unité de recherche permet une synergie remarquable : par exemple, des membres de l'équipe solides et structures (MISES) publient dans Journal of Fluid Mechanics. Les équipes sont jeunes et rajeunies par les recrutements récents ce qui explique peut-être en partie l'envol des publications. Quoiqu'il en soit, la dynamique de publications montre une préoccupation et une aptitude pour la recherche au plus haut niveau. L'unité est également très bien placée en méthodes optiques pour l'analyse de la combustion.

### 2.b. Points faibles

La répartition de l'unité sur trois sites, qui reproduit en partie la division entre anciens laboratoires, est préjudiciable à une unité profonde et véritable de l'institut Jean Le Rond d'Alembert. De plus, l'éventail des thématiques est très large, ce qui rend difficile de promouvoir la visibilité de toutes les thématiques, et de dégager une synthèse et une répartition réfléchie des moyens. Ces points faibles seront améliorés (retour de l'équipe LAM sur le site Jussieu prévu en mars 2015) ou peuvent être une richesse (diversité de thématiques).

### 2.c. Opportunités

L'Institut peut se placer, avec les sciences mécaniques, au centre de l'ingénierie, dans laquelle les points durs, les verrous, sont souvent liés à la mécanique des milieux continus et à sa modélisation, domaine dans lequel notre expertise peut s'exprimer pleinement. Le génie des procédés, le génie pétrolier, le génie nucléaire, la robotique sont tous tributaires de problèmes mathématiquement et techniquement très difficiles dont la résolution passe par une analyse théorique et physique qui constitue l'essence même de la mécanique.

L'unité possède un fort pouvoir d'attraction sur les collègues étrangers, et nos liens avec le monde académique international sont nombreux et de très haut niveau.

Le développement de l'ingénierie pour la santé est une opportunité historique pour le laboratoire, déjà bien placé par ses axes biomécaniques.

### 2.d. Risques

Il nous faut constamment assurer un flux d'étudiants venant de l'extérieur. En effet les élites sont formées en France majoritairement en dehors des universités. Le phénomène s'est aggravé récemment en L3 universitaire où le tiers supérieur des promotions disparaît. Pour assurer un recrutement de niveau suffisant en thèse, il est nécessaire de faire revenir des étudiants des écoles au niveau M2 et de recruter des étudiants étrangers. A un niveau plus global, la perception des sciences de l'ingénieur par les autorités et les tutelles est fluctuante, le département sciences pour l'ingénieur du CNRS en ayant fait l'expérience. Nous devons nous assurer d'un soutien fort des industriels en cas de retrait des pouvoirs publics, et en même temps vivre dans une situation où la base industrielle nationale se réduit quelque.

Toute poursuite de l'évolution défavorable des facteurs énumérés ci dessus constitue un risque.

### 3. Mise en œuvre du projet

#### 3.a. Stratégie

La stratégie du laboratoire est de placer la mécanique, en tant qu'expression à la fois de la physique classique et des mathématiques appliquées, au centre des sciences pour l'ingénieur. Les sciences de l'ingénieur étant elles-mêmes au centre des préoccupations de la société du futur, en termes d'énergie, de transports, de sécurité, de sciences pour la santé, les mots clés pouvant se superposer ici sans grandes limites. Il ne s'agit pas choisir un secteur applicatif plutôt qu'un autre, même si certains ont eu une importance historique pour l'Institut, mais d'être disponible sur de nombreux fronts technologiques. Il est utile de replacer ici le diagramme des thématiques par équipe :

	FCIH	FRT	LAM	MISES	MPIA
Granulaire	x				
Turbulence, interactions		x			
Combustion, dépollution		x			
Méthodes expérimentales et métrologie		x	x		
Méthodes numériques, quantification des incertitudes		x			
Perception et cognition			x		
Techniques audio			x		
Matériaux				x	
Rupture				x	
Structures				x	
Imagerie acoustique					x
Axe transverse IFS : Elastocapillarité, Aéroélasticité	x	x		x	
Structures actives				x	x
Axe transverse Aéroacoustique		x			x
Gouttes, bulles, cavitation, écoulements multiphasiques	x	x			x
Instruments de musique	x		x	x	x
Environnement, écoulements naturels	x	x	x	x	x
Axe transverse biomécanique	x	x	x	x	x

L'accent par rapport au diagramme présenté dans le bilan est mis sur les axes transverses, dont le projet est aussi présenté dans ce document. Le prochain quinquennal verra ainsi un soutien plus marqué aux activités de ces axes transverses. Ces axes sont le garant d'un renouvellement thématique qui sera bénéfique à la dynamique de l'Institut. Ils devront être soutenus explicitement par la politique de gestion des moyens de l'Institut.

Un équilibre que le futur quinquennal devra préserver est celui entre une aptitude historique de l'unité à la modélisation, à l'analyse théorique et asymptotique des problèmes, et les capacités nouvellement acquises en sciences expérimentales et en mécanique numérique. Au cours des dix dernières années, les sciences expérimentales et la mécanique numérique ont gagné en importance (recrutements de P. Sagaut et développement des cluster successifs en numérique, développement du pôle expérimental Jussieu qui atteint maintenant six chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieur de recherche à partir de zéro au début du quinquennal courant : A. Antkowiak, G.-J. Michon, L. Ponson, S. Protière, Th. Séon, R. Wunenburger). Des recrutements de très bon niveau orientés vers des aspects théoriques et modélisation seraient certainement opportuns dans cette perspective.

Un autre équilibre est celui entre les sciences mécaniques et l'humain, qui ne peut être négligé dans les sciences de l'ingénieur lorsque les objets techniques sont en contact avec leurs créateurs.

L'équipe LAM a entamé une réflexion importante sur ce sujet.

### 3.b. Collaborations

Les collaborations que nous souhaitons développer sont trop nombreuses pour être aisément développées ici, on se référera aux projets par équipe et aux ANR multi-laboratoires (18 dans le tableau résultats) pour les énumérer. On peut citer cependant des projets particulièrement significatifs :

- La fédération francilienne de mécanique des matériaux (F2M )
- Les initiatives nationales en combustion comme INCA
- Le GDRI Catalyse (directeur P. Da Costa, d'Alembert)
- Le GDR « Ruissellement et films liquides cisailés ».
- Le GDR MePhy en projet.
- Le GDR EGRIN en projet
- Le GDR Propulsion Plasmas (directeur M. Dudeck, d'Alembert)

L'institut poursuivra une politique proactive en matière de professeurs invités et de chercheurs invités, en encourageant la venue de chercheurs étrangers au delà des postes de professeurs invités disponibles sur ses ressources propres.

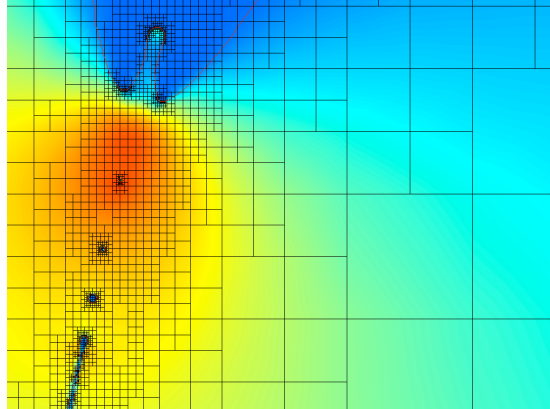
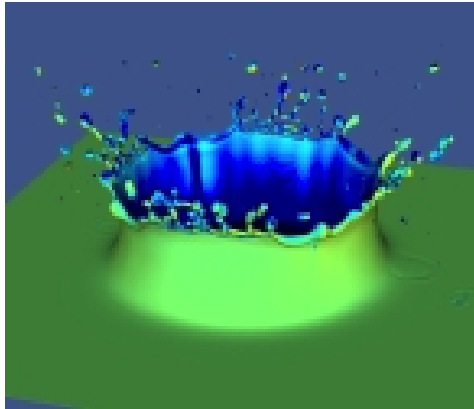
## **B. PROJET PAR ÉQUIPES et par AXES TRANSVERSES**

# I. Équipe FCIH : Fluides complexes et instabilités hydrodynamiques

## 1. Présentation générale du projet

### 1.1. Positionnement des thématiques : continuité et projection dans le futur

Comme rappelé dans le bilan, la feuille de route du quadriennal a été tenue, marquant ainsi la cohérence de l'équipe.



*Gauche : splash sur interface liquide, droite : simulation par Gerris, zoom montrant l'émergence du splash et illustrant la puissance du maillage adaptatif (P. Ray).*

Les axes correspondants à nos projets futurs sont :

- 1) Gouttes et bulles
- 2) Interactions fluide-solides
- 3) Comportements asymptotiques, stabilité d'écoulements, dynamique de la vorticité
- 4) Milieux complexes et écoulements en milieux naturels
- 5) Outils et méthodes numériques

La partie « gouttes et bulles » est une activité historique forte et renommée qui continue à s'enrichir, de même pour l'axe « stabilité vorticité ». L'axe « Biomécanique » du pr c dent quadriennal a été renommé « interactions fluide-solides » car il s'est enrichi et continuera à s'enrichir d'autres applications liées notamment à l' lastocapillarit . « Milieux complexes et écoulements en milieux Naturels » est fortement axé sur les « granulaires » mais aussi sur la « microfluidique », deux activités dont les champs d'application sont prometteurs. L'axe « Outils et Méthodes Numériques » est plus pour marquer notre questionnement sur les méthodes numériques et la part grandissante de l'utilisation de Gerris dans les différents axes. Cantonné aux gouttes auparavant, le code Gerris s'est invité avec bonheur dans toutes les autres parties pendant ces cinq ans et s'annonce comme l'outil idéal de simulation permettant de véritables « expériences numériques ».

### 1.2. L'activité expérimentale portée par FCIH

De même, l'activé expérimentale a émergé durant ces cinq ans, c'est une grande réalisation de l'équipe FCIH. Partie de zéro et du plan PPF Gatignol-Josserand, la salle Savart s'est matérialisée par le recrutement de A. Antkowiak en 2007 qui s'est investi pour lui donner vie. Les recrutements de S. Protière en 2009, le recrutement d'un professeur cette année (R. Wunenburger) et d'un CR CNRS (Th. S on) montrent sa vitalité.

La reconnaissance qu'elle a eu par ces recrutements mais aussi par des prix à des conférences et encore par l'attraction qu'elle présente pour les jeunes stagiaires montre que cette salle expérimentale et d'autres qui ont vu le jour dans son sillage à l'Institut vont jouer un rôle important

dans les prochaines années.

L'UPMC, outre l'attractivité du quartier latin, est la plus grande université d'Europe, elle est proche de nombreuses Ecoles d'Ingénieurs: c'est un vivier d'étudiants potentiels, justement, cette salle a permis à des étudiants qui ne connaissaient pas la Mécanique de s'y intéresser, nous donnant l'opportunité de constituer un vivier de doctorants des meilleurs masters. Cet effort va continuer d'autant plus que nous envisageons d'adosser les futurs Travaux Pratiques de Jussieu en Mécanique des Fluides à cette salle. Il y aura ainsi une plus grande continuité entre la Recherche et l'Enseignement et des étudiants de tous les niveaux seront ainsi touchés.

Cette activité expérimentale est donc appelée, comme *Gerris* l'a fait, à fédérer le groupe et à enrichir les interactions en interne mais aussi et à enrichir les interactions avec les autres équipes.

### 1.3. Collaborations

En effet, les membres sont encouragés à collaborer avec les autres équipes pour faire vivre la cohésion de l'Institut et ont de nombreuses relations parisiennes, nationales et internationales. En plus des anciennes collaborations qui continuent et du lien privilégié avec la Nouvelle Zélande, de nouvelles collaborations viennent de démarrer (par exemple avec Robert Deegan de Ann Arbour sur l'impact ou avec Jeremy C. Philips School of Geoscience Univ Bristol, Howard Stone et Pedro Reis du MIT, R. Armentano d'Argentine en biomécanique et d'autres encore).

### 1.4. Activité contractuelle

Le groupe FCIH se caractérise par un niveau de contrats suffisant pour les besoins actuels expérimentaux. Ces contrats sont à la fois industriels (partenariat avec des entreprises) et publics (ANR...). Cet équilibre est à préserver et nous continuerons à le maintenir, le coût faible des expériences proposées fait que l'activité expérimentale peut ne pas peser sur les crédits récurrents.

## 2. Projets d'équipe

L'équipe se différencie par l'alliance Mathématique / Mécanique / Physique et par l'alliance expérience/ théorie/ simulation pour la modélisation de phénomènes intéressants. Nous voulons préserver notre identité et nos projets sont inscrits dans ce cadre.

### 2.1. Gouttes bulles

L'activité poursuit sur son expertise reconnue internationalement. Le Splash reste un objet d'étude de première importance. Pour cette activité, le rôle de l'air est à examiner plus clairement et va faire l'objet d'investigations. L'importance du substrat est aussi clairement à prendre en compte, et outre ces applications de type chambre à combustion, les aspects d'érosion des sols seront examinés en cas d'impact sur un milieu granulaire. L'influence des effets de changement de phase (aspect numérique) est de première importance en génie nucléaire.

L'atomisation continue d'être un enjeu en combustion, les récents travaux sur la vague autosemblable offrent un large éventail de possibilités pour l'étude de la création des gouttelettes lors de l'atomisation: l'interaction entre la vague liquide et les tourbillons qui se détachent dans le gaz donne lieu à des résonances qui forcent la vague à une fréquence définie correspondant à des lâchers de gouttes. De plus, la présence d'un tourbillon suggère une explication des angles très élevés pour les éjections.

Comme indiqué, l'atomisation d'un jet est fondamentale en combustion, mais d'autres formes de créations de gouttelettes existent, et, bien que paraissant anodines, les projections liquides (observées à la surface des boissons gazeuses, les embruns océaniques, les éclaboussures d'eau en ébullition) jouent souvent un rôle clé dans divers phénomènes. Par exemple, dans les équilibres gazeux entre l'océan et l'atmosphère, dans les processus de fabrication verriers ou en métallurgiques ou encore pour la diffusion des arômes du champagne, malgré cette grande variété d'applications, ces projections liquides sont encore bien mal comprises et leur présence apparaît souvent comme erratique et aléatoire. Il est envisagé d'en faire une étude globale (en caractérisant les hauteurs, vitesses, volumes, statistiques d'apparition) depuis leur genèse jusqu'à leur disparition.

Le recrutement récent d'un professeur sachant manier les interfaces eau air avec l'acoustique offrent d'intéressante perspectives de manipulations d'interfaces. Son expertise expérimentale sera bénéfique et des collaborations avec MPIA seront possibles.

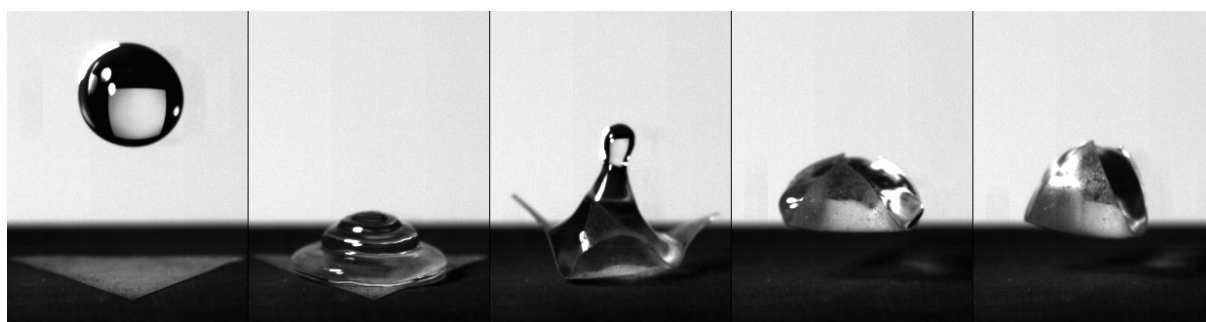
Les idées et les problèmes théoriques ne manquent pas, du point de vue appliqué, des applications de type « génie des procédés » pourraient même être examinés en collaboration avec FRT.



Jet liquide se formant dans une bulle après détachement.

## 2.2. Interaction fluide-solides

Les interactions fluide-solide à petite échelle continueront à retenir toute l'attention du groupe qui a maintenant acquis l'expertise du domaine. Les interactions élasto capillaires gouvernent un monde de phénomènes inexplorés à petite échelle (déformation de feuilles sous les gouttes d'eau, fils des toiles d'araignées, interaction poil goutte, micromécanique...), la richesse de ces interactions ouvre donc de nombreuses perspectives, tant au niveau de la micro-fabrication que de la compréhension de mécanismes exploités par des organismes de très petite taille. C'est dans cette optique que l'action transverse élastocapillaire du laboratoire FCIH-MISES met en place une collaboration active avec le département de Zoologie de l'Université d'Oxford (F. Vollrath, Silk Group) afin de mieux appréhender les propriétés mécaniques encore méconnues des soies d'araignée (thèse AMN Hervé Eletto, co-direction Antkowiak-Neukirch qui démarrera fin 2012). Des collaborations avec MISES se feront pour participer à la révolution de la micro mécanique et de la micro fluidique.



origami dynamique

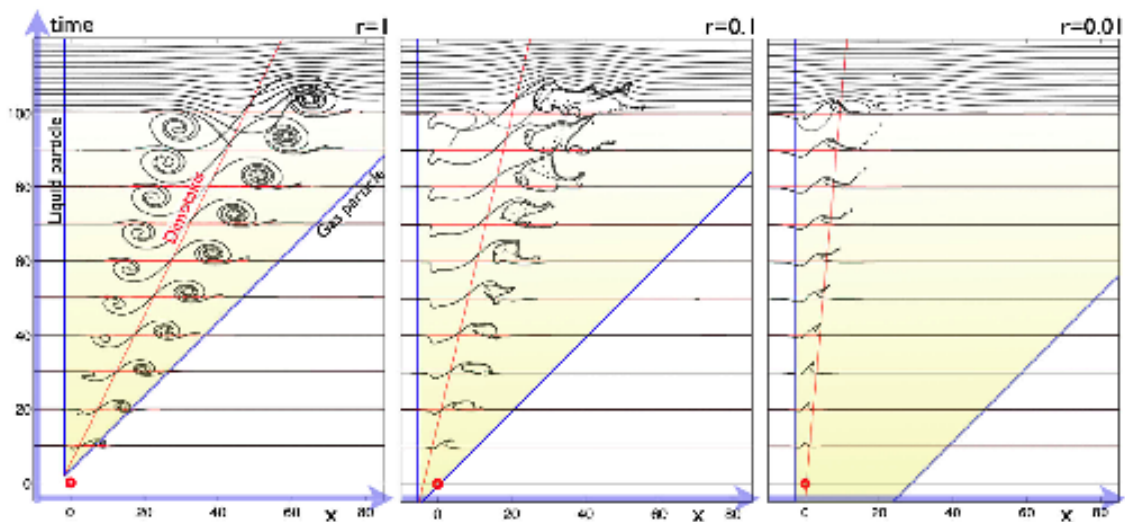
Pour la partie plus « Biomécanique », le groupe souhaite que l'activité de modélisation mécanique avec en vue des applications au vivant se fédère entre les différents groupes FCIH MISES, MPIA et FRT. Le groupe participe au projet de création d'un Département Hospitalo Universitaire alliant Mécanique et Médecine de l'UPMC, et envisage de développer le « génie Biomédical » en alliant modélisation mécanique à l'imagerie et à la pratique médicale. Les collaborations avec la



composante médicale de l'UPMC ne peuvent que croître et s'intensifier.

### 2.3. Stabilité d'écoulements, dynamique de la vorticité

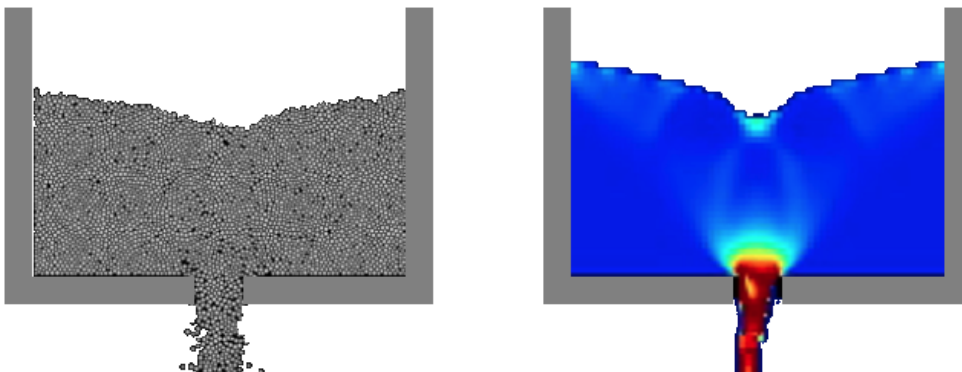
De par leur expertise du domaine (diverses approches, modes non normaux...), les membres envisagent de poursuivre l'étude de stabilité de divers modèles d'écoulement. Par exemple, la stabilité des vortex hélicoïdaux est la suite naturelle de l'activité correspondante. Les configurations d'écoulements séparés sont très instables, ils peuvent être traités par la technique de « selective frequency damping » ce qui permettra de retrouver les échelles de Triple Deck mais pourra être adapté à de nombreux autres écoulements. La génération du son par les instruments à vent continuera en collaboration avec LAM.



*Croissance comparée de la vague auto-semblable pour différents rapports de densités par Gerris.  
Cette étude vise à comprendre la création des embruns pendant les tempêtes.*

### 2.4. Milieux complexes et écoulements en milieux naturels

L'expertise discret – continu de l'équipe va permettre d'examiner des phénomènes de plus en plus compliqués. Que ce soit la microfluidique qui est un nouvel enjeu scientifique, ou pour les milieux granulaires en général. Pour la microfluidique seront entreprises, d'une part des comparaisons modèles asymptotiques de Navier-Stokes / Burnett dans des cas non isothermes à faible Mach et à Knudsen modéré et théories cinétiques, et d'autre part le suivi de fines particules dans des micro-filtres. Pour les granulaires, l'influence de l'eau est encore mal comprise, sans parler de l'influence conjuguée air-eau (  noter qu'une activité diphasique en milieux poreux fixe vient de démarrer avec la thèse de B. Lagrée.)



*Simulation de sablier discret par dynamique de contact et sablier continu par Gerris.*



Le séjour dès cette année de Lydie Staron à la Geoscience Univ Bristol pour 2 ans permettra de gagner une expertise expérimentale en granulaires et de ressourcer la sensibilité géophysique de l'équipe. De nombreux aspects des avalanches sont encore à étudier du rôle des précurseurs pour éclairer la transition solide fluide au chant des dunes. D'un point de vue milieux continus de nombreuses configurations sont à tester ainsi que le lien entre la plasticité vue du côté solide en collaboration avec MISES et la rhéologie granulaire vue du côté liquide.

L'évolution des lits granulaires sous écoulement continuera à recevoir toute notre attention pour mieux comprendre la morphogenèse des rivières, une expérience a été montée pour étudier la stabilité des berges et la formation de méandres et de cuvettes laboratoire (S. Protière collaboration avec Sylvain Courrech du Pont MSC et P-Y Lagrée, C. Josserand).

Le cas des lacs est particulier car en plus de ces phénomènes physiques, les phénomènes biologiques de populations d'algues sont étudiés dans le cadre hydrodynamique (M. Rossi). Ce volet d'écologie fait l'objet de travaux en cours avec Florence Hulot (Paris XI) et Jost Von Hardenberg (CNR Turin).

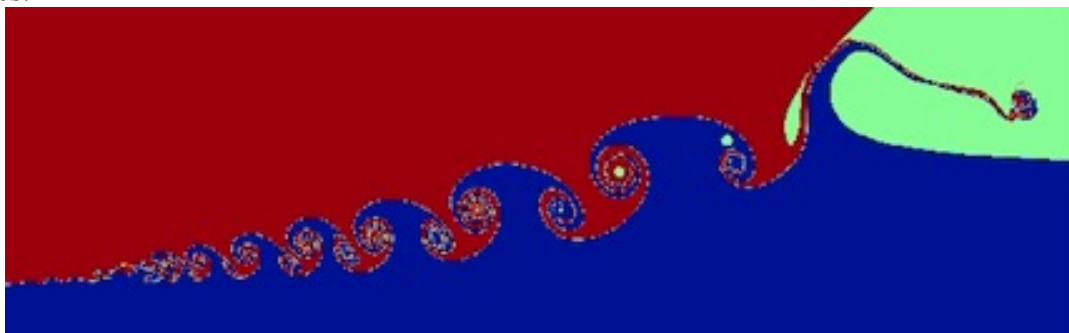
### 2.5. Outils et méthodes numériques

A côté de méthodes numériques particulières destinées aux équations modèles que nous continuerons d'élaborer pour comprendre et expliquer les phénomènes, le développement de *Gerris* sera un point à valoriser. Il s'agira de peaufiner le code de rajouter des effets (changement de phase, tension de surface dépendant de la température, interaction fluide structure...), de participer à sa dissémination et son utilisation par la communauté la plus large possible. L'idéal, bien sûr, serait le retour de Stéphane Popinet.

## 3. Conclusion

En conclusion de ce tour d'horizon, nous constatons que FCIH va tout faire pour maintenir sa position dans le domaine des gouttes & bulles, continuer d'être partie prenante de la révolution du micro (micro circulation, gaz raréfiés, élasto capillarité, granulaire) et que le groupe va tout faire pour continuer à s'intéresser aux écoulements naturels (homme et environnement). En fait, quasiment chaque activité peut élargir dans une autre ce qui montre la continuité des approches et des intérêts. Outre la modélisation, le groupe prévoit d'axer ses recherches sur des expériences légères et sur la simulation avec *Gerris*.

Le groupe présente et poursuivra des thématiques de recherche en phase avec des problématiques sociétales.



## II. Equipe FRT : Fluides Réactifs et Turbulence

### 1. Positionnement et stratégie de collaboration

Le prochain contrat quinquennal sera pour l'équipe FRT 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 et internationale. 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 (Aéroacoustique, Dépollution, Combustion, etc.). La stratégie adoptée pour relever ces défis repose à la fois sur le développement de collaborations externes à l'UPMC et sur des collaborations intergroupes ou dans la faculté d'ingénierie (Robotique) ou avec d'autres facultés de l'UPMC (Mathématiques, Chimie, Physique, etc.). L'UPMC, par sa taille et son excellence, est un lieu privilégié pour cela.

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 » à travers du développement du génie des procédés, 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 quinquennal reste sa contribution à la stabilisation des potentiels développés du site de Saint-Cyr l'Ecole (partagé avec l'équipe MPIA). Elle se doit de s'affirmer un rôle majeur (voir international) sur le thème de la combustion et de la dépollution pour les moteurs internes. Il s'agira ici de poursuivre le travail entamé depuis plusieurs années, en renforçant les liens entre recherche fondamentale et recherche appliquée. Le regroupement sur ce site de bancs d'essai dédiés à la combustion et à la dépollution, à fort potentiel tels que des bancs moteurs dédiés à la dépollution ou optique (aérodynamique et injection), des chambres à volume constant optiques (injection, calibration LIF, flamme), une machine à compression rapide optique et de nombreuses techniques de mesure (PIV, TRPIV, LIF, Dual FLIF, LDA PDA, Fils chauds...), des tests Pilotes Banc gaz synthétiques de dépollution, des Procédés de traitement de polluants, 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 forte augmentation du potentiel humain présent sur le site, ainsi que le développement d'une activité de modélisation théorique et numérique associée dans l'équipe. Les recrutements annuels ne suffiront certainement pas, et l'intégration de chercheurs venant d'autres laboratoires de l'UPMC reste une piste à étudier. Sur le plan académique, les collaborations avec d'autres laboratoires (UFR de Physique et UFR de Chimie) 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.

### 2. Projets et objectifs scientifiques

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):

- 1. Turbulence, interactions, aéroacoustique

- 2. Combustion, procédés de dépollution
- 3. Méthodes expérimentales et métrologie
- 4. Méthodes numériques

## 2.1 Turbulence, interactions, aéroacoustique

Le prochain contrat verra la poursuite des recherches thématiques sur la physique et la modélisation de la turbulence, y compris pour des cas de couplages multiphysiques.

Un premier axe concernera des travaux théoriques sur la turbulence, avec pour but de revisiter des problèmes ouverts avec des outils modernes dont l'équipe a acquis une maîtrise incontestable (quantification des incertitudes, analyse de sensibilité). Un caractère commun à ces travaux est de comprendre et mesurer les limitations des théories classiques, souvent développés dans des cadres asymptotiques idéalisés (« grands » nombre de Reynolds, ...) peu représentatifs des écoulements réels. Par exemple, l'analyse de la décroissance libre de la turbulence sera poursuivie, avec pour but d'expliquer pourquoi les prédictions théoriques sont à ce jour si éloignées des réalisations expérimentales. Les travaux récents indiquent que l'hypothèse d'auto-similarité, totale ou partielle, employée aujourd'hui dans la plupart des analyses théoriques est certainement trop restrictive. Ensuite, les travaux de notre équipe et du LMFA ont montré que les effets visqueux sont suffisamment forts dans la plupart des réalisations expérimentales connues pour masquer de vrais effets d'intermittence. La poursuite de l'analyse des effets de nombre de Reynolds finis fera l'objet de collaborations avec le LMFA et le CEA. Enfin, l'analyse des effets d'anisotropie résiduelle dans des situations généralement considérées comme isotropes sera entamées. Ces travaux seront étendus au cas du scalaire passif, avec ou sans terme source. En ce qui concerne les écoulements pariétaux, l'extension de l'identité Fukagata-Iwamoto-Kasagi au cas de la température pour l'analyse des flux de chaleur turbulents sera réalisée (une collaboration avec K. Fukagata a déjà démarré sur ce sujet). En collaboration avec l'ONERA, on poursuivra les travaux récemment entamés sur le rôle des très grandes échelles sur la production de la trainée turbulente. Cette contribution est encore aujourd'hui mal connue, et joue certainement un rôle dans la perte d'efficacité des dispositifs de réduction de trainée mis au point à nombre de Reynolds modérés (pour lesquels ces très grandes échelles sont très peu énergétiques).

Un second axe portera sur la modélisation de la turbulence, avec une forte ouverture vers des cas multiphysiques. Le démarrage en 2011 des thèses de A. Gineau (CIFRE EDF) et I. Thiagalingam (CIFRE Air Liquide) sur le thème de la modélisation de l'écoulement turbulent au sein de matrices solides complexes (faisceaux de tubes vibrants, milieux aléatoire en présence de réactions chimiques et de pertes radiatives) par des milieux poreux équivalents sont de bons exemples. Les travaux dans le cas diphasique vont prendre plus d'ampleur, suite au recrutement de D. Fuster comme CR CNRS et l'obtention d'un projet ANR avec les laboratoires TREFLE et IMFT sur ce sujet.

Dans cet axe une activité concernera la modélisation stochastique des écoulements turbulents diphasiques polydispersés dans le cadre de la simulation des grandes échelles. En particulier, le développement d'un modèle de sous-maille adapté et l'extension à phénomènes physiques plus complexes sont envisagés (un projet ANR sur cette thématique est dans la liste complémentaire 2012). Le démarrage de la thèse de F. Bianco (2010) a permis d'entamer une activité portant sur la modélisation des micro-écoulements réactifs. Ainsi, on s'est proposé de lancer un axe de recherche, mêlant enjeux théoriques, numériques (FRT Paris) et expérimentaux (FRT Jussieu), visant à l'étude de la combustion dans des micro-canaux. Cette activité est fortement poussée par le champ d'application prometteur que sont les micro-réacteurs. Aux petites dimensions, certains phénomènes négligeables au niveau macroscopique deviennent prépondérants. Dans le cas des micro-réacteurs, le nombre de Knudsen devient en particulier assez grand pour que le régime hydrodynamique ne soit pas rigoureusement respecté et les effets de parois sont particulièrement importants. Dans ce cadre, la modélisation fine des phénomènes physico-chimiques régissant la combustion apparaît comme un véritable challenge. Les travaux de thèse en cours devront apporter les premiers résultats numériques modélisant la dynamique des flammes prémélangées établies en micro-canaux, guidant

des efforts expérimentaux originaux à venir.

Les travaux sur la simulation des grandes échelles et les méthodes hybrides RANS/LES seront poursuivies, des questions ouvertes restant la mise au point de modèles de parois robustes pour les configurations en fort déséquilibre (décollement, ...) et/ou le transfert de chaleur, et les conditions aux limites turbulentes instationnaires. Outre la généralisation des méthodes récemment proposée en collaboration avec l'ONERA à des écoulements plus compliqués, leur extension pour des applications aéroacoustiques, aérothermique ou aéro-optique reste à faire, puisque aujourd'hui seul le champ de vitesse est reconstruit par ces méthodes. Un autre point sera la poursuite des efforts sur la modélisation (modèles sous-maille, modèles de parois) pour les méthodes de Boltzmann sur réseau, cela dans le cadre du second volet du projet LaBS. Les aspects thermiques font d'ores et déjà l'objet d'une collaboration avec Renault (thèse CIFRE de G. Thandavamoorthy, démarrée en 2012). Sur le thème de l'aéroacoustique (développé dans le cadre du thème transverse défini pour le prochain contrat), les travaux porteront sur l'identification des sources par résolution de problèmes inverses (retournement temporel, méthodes adjointes, antennerie virtuelle) sur des cas complexes d'intérêt industriel (portion de voilure 3D, véhicules terrestres). Le prolongement des travaux au cas du contrôle sera envisagé, sur la base des méthodes d'identification des sources développées au sein du laboratoire. Enfin, on continuera les travaux de modélisation des sources acoustiques pour les écoulements pariétaux à des nombres de Reynolds trop élevés pour être abordé par la simulation instationnaire et pour lesquels les données expérimentales sont difficiles à produire. Un exemple est la mise au point d'un modèle prédictif du bruit hydrodynamique sur une antenne sous-marine (thèse CIFRE S. Monté, Thales Underwater System). Cet objet fait 1000 m de long et 3 cm de diamètre, ce qui interdit toute simulation instationnaire ou réalisation expérimentale à échelle 1. La modélisation des sources acoustiques pose celui de la mise au point d'un modèle adapté des corrélations spatio-temporelle de vitesse dans une couche limite turbulent à très grand nombre de Reynolds en présence de forts effets de courbure transverse.

## 2.2. Combustion et procédés de dépollution

### 2.2.1. Hydrodynamique de l'injection haute pression.

L'injection, l'atomisation et la dispersion du carburant dans la chambre de combustion est une étape essentielle générant les conditions de combustion. Une grande partie des études menées dans ce sens reposent sur un état de l'art scientifique et technique issu de l'injection Diesel et de l'injection indirecte basse pression aux connaissances encore parcellaires. Il n'y a toujours pas à ce jour de modèle général pour la description complète du processus qui conduit à la formation du spray. En effet, les instabilités à l'origine de la déstabilisation de l'écoulement liquide qui conduisent à sa fragmentation en ligaments puis en gouttelettes demeurent imparfaitement comprises. En particulier, les contraintes géométriques imposées à la conception des injecteurs (profil d'entrée des orifices de décharge, multiples inclinaisons, arêtes vives) et les régimes de fonctionnement balayés (hauts nombre de Reynolds et de Weber) favorisent la formation de poches de cavitation. La compréhension des contributions relatives de ce phénomène (local), des ondes de pression se propageant dans l'injecteur et de la turbulence propre de l'écoulement liquide sur sa déstabilisation représentent un enjeu essentiel pour l'optimisation des injecteurs.

L'étude vise une démarche intégrée d'approches fondamentales, expérimentales et numériques portant simultanément sur la structure de l'écoulement interne à l'injecteur, l'atomisation et la formation du spray des injecteurs automobiles à haute pression. L'originalité du travail consiste à concevoir une expérience modèle permettant de relier la topologie de l'écoulement de jet en sortie d'injecteur à ses conditions initiales, i.e. la structure de l'écoulement interne. Cette dernière sera analysée sur des injecteurs prototypes optiquement transparents dont les géométries internes et les états de surface seront contrôlés. La visualisation simultanée de l'écoulement interne et de la morphologie du jet liquide en proche sortie d'injecteur utilisera les méthodologies expérimentales développées au sein du laboratoire. Cette approche sera complétée par des mesures dans la phase dispersée (dual LIF / Mie, Anémométrie à Phase Doppler) afin de relier les caractéristiques du spray (distribution de tailles de gouttes) aux mécanismes de déstabilisation du jet liquide dense

précédemment identifiés.

#### 2.2.2. Combustion par auto inflammation. Interaction turbulence combustion dans un milieu stratifié

Ce projet de recherche reste dans la continuité des actions menées autour de la combustion par auto inflammation. La construction des diagrammes de combustion turbulente pourra également être enrichie. L'utilisation des champs de température LIF (existant à ce jour) dans la chambre de combustion permettra d'atteindre un calcul spatialement défini des nombres sans dimension ( $Da$ ,  $Ka$  et  $Le$ ) ainsi que des vitesses et des épaisseurs de flamme laminaire. Une représentation temporelle des diagrammes de combustion turbulente sera proposée. Ces travaux doivent compléter les recherches effectuées dans ce domaine mais dans des milieux gazeux partiellement homogènes. Les résultats expérimentaux serviront aussi de bases de données nécessaires à la confirmation expérimentale des conclusions obtenues dans le cadre de calculs DNS et LES traitant de ces problématiques de combustion en milieux hétérogène.

Enfin, nous nous sommes engagés dans un programme de recherche qui devrait permettre de proposer sur une base de moteur 2 temps (pour une application hybride à bas coût) un fonctionnement par auto-inflammation où l'hétérogénéité du mélange dans la chambre sera la clef du contrôle du processus de combustion. Ceci devrait permettre de réduire les polluants à la source avant même toute intervention du système de post-traitement, en particulier les  $NO_x$ .

#### 2.2.3. Phénomènes de transport originaux au sein des écoulements réactifs

L'étude des écoulements réactifs sur configuration académique sera étendue aux problématiques environnementales et sanitaires liées à l'émission des particules de suie. Pour ce faire, une thèse en cours (M. Kashif) se propose de caractériser sur le brûleur de l'Institut la propension à la production de suie par les combustibles liquides, de type carburants de synthèse et biocarburants. A titre d'illustration, la figure 2 propose des cartographies en fraction volumique de suie au sein d'une flamme non-prémélangée de méthane,ensemencée par des vapeurs de n-heptane et d'iso-octane, brûlant dans un écoulement d'air. Il s'agit là de reproduire la méthodologie récemment proposée par McEnally et al. (*Environmental Sci. Technol.* **45** (2011) 2498-2503) pour des combustibles liquides purs et de l'étendre aux mélanges combustibles de synthèse (ici PRF) qui pourraient contribuer à la mise en œuvre du mode de combustion HCCI. De la même manière, l'étude de l'influence d'un champ magnétique sur les flammes non-prémélangées se verra amplifiée par les travaux d'une thèse (A. Jocher) en co-tutelle avec le Pr Heinz Pitsch (RWTH Aachen) visant à caractériser la modification par effet magnétique de la propension à la production de suie par les combustibles. Le savoir-faire expérimental récemment développé à l'Institut sera ici couplé aux outils de simulation numérique largement reconnus du Pr Pitsch. L'ensemble des activités liées au brûleur académique de l'Institut contribuera ainsi aux efforts visant à la réduction de l'empreinte environnementale des systèmes de combustion, ce en particulier grâce à une configuration propice à la synergie entre expérimentateurs et modélisateurs.

Enfin, l'interaction entre particules de suie et écoulements réactifs constitue un levier en vue de la maîtrise de la propagation de flamme d'incendie. Cet état de fait est tout particulièrement avéré dans le domaine crucial pour le développement des vols spatiaux habités de longue durée qu'est la sécurité-incendie spatiale [ACLa2.69]. De fait, l'équipe FRT a intégré en 2012 le projet *Fire Safety-I*, réunissant des experts sélectionnés par les principales agences spatiales. L'objectif est ici de proposer à moyen terme des expérimentations à échelle 1 en temps et en espace de la propagation d'incendie en configuration spatiale. Le savoir-faire développé à l'Institut pour la quantification de la production de suie au sein des écoulements réactifs sera mis à profit en particulier lors de ces expérimentations, permettant par là-même la caractérisation fine des transferts radiatifs gouvernant la propagation.

#### 2.2.4. Post traitement et dépollution

Un exemple complexe développé depuis peu est celui des systèmes de post-traitements (catalytiques, etc.) pour l'amélioration de la qualité de l'air et de l'eau. Ainsi, les systèmes de post-traitements peuvent être vus comme l'assemblage d'un tube d'entrée, d'un diffuseur, d'un ou plusieurs substrat(s), d'un cône et d'un tube de sortie. Le substrat, en céramique ou métallique, est



constitué d'un ensemble de canaux (en forme de « nid d'abeille ») tapissés de métaux nobles. Le diamètre hydraulique de ces canaux, de l'ordre du millimètre, garantit une surface importante aux réactions catalytiques se développant en leur sein. Les gaz d'échappement à traiter issus des chambres de combustion sont acheminés via une tubulure à la géométrie complexe et sont distribués dans les canaux du substrat via un diffuseur au taux d'expansion très important. La distribution de l'écoulement et du champ de température à l'entrée de la zone réactionnelle peut être fortement non-uniforme. Cette mal-distribution est principalement due aux caractéristiques géométriques du diffuseur, à la résistance générée par le substrat et aux conditions d'entrée de l'écoulement dans le diffuseur (écoulement turbulent, pulsé, sans symétrie remarquable du champ de vitesse). Cette distribution inhomogène de l'écoulement à l'entrée du substrat a des conséquences dramatiques sur l'efficacité de conversion, la dégradation prématurée de certaines zones (avec un risque de transfert direct des gaz à travers le système), la génération de pertes de charges additionnelles, et engendre une mauvaise utilisation du volume et donc, un surdimensionnement des zones réactives tapissées en métaux précieux. Il est donc capital d'obtenir une prédiction aussi précise que possible de l'écoulement et du champ de température se développant en amont du système de post-traitement.

L'objectif visé par cette étude est double : 1) améliorer notre compréhension de l'écoulement turbulent, pulsé, confiné se développant dans le diffuseur ; 2) proposer des solutions compatibles avec les exigences industrielles afin d'améliorer l'efficacité de conversion des systèmes de post-traitement existants. L'approche adoptée repose sur deux volets en interaction l'un avec l'autre : 1) une étude basée sur des simulations numériques (*Gerris*) qui a été initiée en octobre 2011 par la thèse de Cansu Özhan ; 2) une étude à caractère expérimentale pour laquelle une expérience modèle sera conçue avec des conditions aux bords et initiales parfaitement contrôlées. De larges accès optiques permettront la mesure du champ de vitesse par PIV et du champ de scalaire passif par P-LIF dans le diffuseur. L'influence des conditions initiales (nombre de Reynolds et fréquences de pulsations) sur la distribution de l'écoulement à l'entrée du catalyseur sera évaluée. Une attention particulière sera portée à l'interaction entre les structures à grande échelle, quasi-organisées, instationnaires et le fond turbulent dans le diffuseur.

En complément, le savoir-faire de l'équipe FRT en « washcoating » des phases réactives et de leur dimensionnement apportera au procédé global un volet « développement durable » du fait de la faible incorporation de métaux précieux. Ce volet post-traitement sera également développé avec des études expérimentales et numériques approfondies au cœur même du matériau catalytique par l'approfondissement de la compréhension des phénomènes de vieillissement des systèmes « on road » en couplant Chimie, Chemical Engineering et Mécanique des Structures. Ce volet sera réalisé avec l'équipe MISES. Le développement de nouveaux procédés de dépollution (Plasma, Catalyse, etc.) sera bien évidemment conservé comme sous-thème prioritaire (exemple: thèse co-tutelle de MENDES A. (UPMC, IST Lisbonne) qui débute cette année). Ces nouveaux procédés pour la plupart « chimiques » nous amèneront à développer des études pluridisciplinaires autour de l'interaction « turbulence »/surface etc.

### 2.3. Méthodes expérimentales et métrologie

#### 2.3.1. Mesure de la fraction volumique de suie

Dans le cadre du projet visant à l'étude de la formation des suies au sein de flammes académiques alimentées par des combustibles alternatifs [2], la cartographie en fraction volumique de suie peut être obtenue par la technique d'absorption d'un faisceau laser. Cette technique est doré-et-déjà opérationnelle à l'Institut. La mise en œuvre d'un second faisceau doit permettre d'atteindre une seconde grandeur : la température des particules de suie. La quantification de cette grandeur est incontournable, et dans l'interprétation des cartographies en fraction volumique de suie, et dans le jeu de champs nécessaires à la validation des simulations numériques.

#### 2.3.2. Mesure du diamètre moyen de gouttes par tomographie LIF/MIE

Il est possible d'atteindre une caractérisation bidimensionnelle de la taille de gouttes (sortie d'injecteur) en utilisant de façon concomitante l'intensité de la diffusion MIE dépendant du diamètre et la fluorescence, sous certaines conditions, du volume des gouttes. Ainsi, en calculant le

ratio des deux intensités, nous pouvons remonter au diamètre moyen de Sauter (SMD). La calibration de cette estimation est particulièrement difficile et il convient de générer des gouttes de différents diamètres calibrés dans la plage qui nous intéresse (5 $\mu$ m à 100 $\mu$ m) avec la maîtrise de la densité (réflexions multiples). Ce travail a été initié dans le cadre de la thèse de R ROY et sera poursuivi dans des conditions expérimentales contrôlées et des moyens de mesure comparatifs dont il a été fait l'acquisition (Phase Doppler Anemometry).

### 2.3.3. Mesure de température par LIF

La technique de la fluorescence induite par laser (LIF) est particulièrement adaptée pour la mesure quantitative de température. Cette technique est développée depuis plusieurs années à l'institut. Elle nécessite encore un travail important sur l'amélioration de la précision de mesure. L'erreur relative de la mesure peut être améliorée par une calibration plus fine de la molécule dopante. La validation de la température moyenne mesurée par la technique LIF dans la chambre peut être également corrélée avec des mesures de températures par des sondes physiques (thermocouples). Une évolution du modèle est également possible afin de prendre en compte plus finement les différents phénomènes de relaxation mis en jeu en particulier pour l'anisole et plus généralement pour les molécules avec un groupement méthoxyl. L'optimisation du coefficient peut faire l'objet d'une étude plus détaillée et une nouvelle équation de ce coefficient peut être effectuée avec l'influence croisée de la température et de la pression. Le taux de relaxation non radiative peut être optimisé en intégrant l'effet de la température par des mesures de la durée de vie effective de fluorescence à partir de différentes températures. Le taux de redistribution intra moléculaire peut être également amélioré et une nouvelle équation peut être définie dépendant de la température, de la pression et de l'énergie de tous les niveaux vibrationnels de la molécule.

### 2.4. Méthodes numériques

Les recherches sur les méthodes numériques déterministes se situeront dans le prolongement de celles effectuées ces dernières années : schémas de haute précision pour les équation de Navier-Stokes pour l'aérodynamique instationnaire et l'aéroacoustique, conditions aux limites non-réfléchissantes, prise en compte de maillages non-structurés ou hybrides.

Les travaux sur les méthodes de Boltzmann sur réseau, dans le cadre du deuxième volet du projet LaBS, mettront l'accent sur les méthodes inverses (adjoint, retournement temporel) pour l'identification des sources acoustiques et l'analyse de sensibilité, mais également sur des technologies numériques nécessaires pour la gestion des configurations complexes : méthodes Chimere/ALE pour les solides mobiles et/ou déformables, raffinement local.

Une question de très grande importance en quantification des incertitudes (UQ) est celle de la représentation réaliste des paramètres d'entrée ou de fonctionnement de notre modèle – conditions aux limites/initiales, termes sources, termes de couplage, paramètres du modèle de turbulence, etc... La littérature sur ces aspects est peu abondante car la recherche en ce domaine a été plutôt axée sur l'étape de propagation et de quantification des incertitudes de la réponse du modèle avec la notion d'amélioration de la précision ou de l'efficacité de la méthode. On note par exemple que la quantification des paramètres d'entrée du système est souvent rudimentaire, associant de façon arbitraire une variable aléatoire à chacun des paramètres, souvent sans se soucier des probables corrélations entre ceux-ci. Cette considération est importante car la dimension effective du système stochastique dépend fortement de ces corrélations. Pour répondre à ces questions, il s'agit donc de résoudre des problèmes inverses (PI) d'identification ou de calibration de paramètres incertains de modèle à partir de mesures ou d'observations indirectes. La résolution mathématique de ces problèmes est particulièrement difficile lorsque les données proviennent de différentes sources, par exemple expériences et simulations numériques ou lorsque les données qui viennent enrichir le modèle sont trop peu nombreuses. Les IP peuvent être formulés comme de (grands) problèmes déterministes d'optimisation nonlinéaire qui minimisent la différence entre l'observable et le modèle dans une certaine norme, tout en minimisant également un terme de régularisation qui pénalise certaines propriétés des paramètres. Cependant les observations et le modèle sont souvent entachés d'erreur et cette formulation amène souvent des problèmes mal posés et instables. Il est



donc plus légitime de chercher une description statistique des paramètres qui soit cohérente avec les données.

Différentes méthodologies pour l'identification de variables ou de processus aléatoires à partir de données expérimentales peuvent être utilisées comme la méthode des moments, du maximum de vraisemblance ou d'entropie et de l'inférence Bayésienne. C'est cette dernière que nous utiliserons pour commencer car il a été récemment montré qu'elle peut efficacement se marier avec des techniques d'approximations de modèle d'UQ comme les méthodes spectrales stochastiques. En effet, ces métamodèles permettent d'accélérer l'évaluation du problème direct impliqué dans l'évaluation de la fonction de vraisemblance. Nous nous proposons, dans la continuité de nos études sur l'UQ de la dynamique des gaz compressibles de nous intéresser aux problèmes des conditions initiales incertaines et de coupler par exemple un code de propagation des incertitudes dans un système d'Euler en géométrie sphérique à des résultats expérimentaux pour essayer d'inférer sur les modes d'instabilité les plus probables de l'interface initiale dans un contexte FCI. Nous appliquerons également ces techniques d'inférence Bayésienne à la calibration de paramètres structurels de problème de flottement en aéroélasticité nonlinéaire ainsi qu'à des problèmes d'hémodynamique aortique combinant des modèles fluides-structures simplifiés et des mesures IRM pour identifier des marqueurs de rigidité propres à chaque patient.

Un autre aspect proche de l'UQ et qu'il est nécessaire d'incorporer dans ces approches est celui de l'assimilation de données (AD). L'AD a été extensivement utilisé pour des applications atmosphérique et océanique ainsi que pour les géosciences, technologie marine, prédictions météo, hydrologie,... et combine les données d'observation avec les principes dynamiques gouvernant le système observé. Plusieurs approches sont possibles : théorie du contrôle, modélisation statistique des erreurs et algorithmes d'assimilation variationnelle, méthodes de minimisation directes et théorie de l'estimation, filtrage de Kalman d'ensemble et réduit,... Des études théoriques portant sur la comparaison et le couplage entre l'UQ et l'AD seront menées pour bien comprendre les recouvrements, similarités et différences des différentes approches (certains travaux ont déjà été menés sur l'adaptation du chaos polynomial au filtrage de Kalman). Par la suite on se propose d'appliquer ces concepts au traitement des effets des incertitudes introduites lors du passage des équations complètes de l'écoulement, i.e. les équations de Navier-Stokes (NS) à des équations simplifiées telles que les équations de NS en moyenne de Reynolds (formulation RANS) par le biais du modèle de turbulence utilisé pour fermer le système. En effet, plusieurs modèles de turbulence sont disponibles en fonction du type d'écoulement considéré mais leur efficacité et précision n'est pas universelle et nécessite de plus la calibration d'un certain nombre de paramètres de fermeture propre à chaque modèle. Donc en plus de l'incertitude liée au choix du modèle, le choix des paramètres de celui-ci est déterminant et ils sont en général ajustés en se basant sur des cas génériques plus simples pour lesquels le chercheur détient des résultats expérimentaux servant de références.

Par la suite, on se propose également de considérer des approches multi-échelles (pour des écoulements cisailés par exemple) en combinant des simulations à grandes échelles (LES) avec des simulations directes (DNS) plus locale et permettant d'étudier les flux turbulents résultants de conditions de grandes échelles. Les simulations DNS moins nombreuses seront par exemple considérées comme des « observations » servant à l'assimilation de données pour le calage des simulations LES. Enfin toutes ces techniques pourront aisément être portées et déclinées par la suite vers des applications à fortes implications expérimentales en combustion et en dépollution menées sur le site de Saint-Cyr.

### III. Équipe LAM : Lutheries – Perspectives

#### 1. Présentation générale du projet

Le prochain quinquennal va être, pour l'équipe, l'occasion d'une réorganisation profonde liée à plusieurs facteurs, en particulier :

- le retour sur le campus de Jussieu, prévu en 2015, permettra de développer plus encore nos interactions avec les équipes de l'institut et les autres laboratoires présents sur le campus ;
- l'émergence de nouvelles thématiques de recherche, notamment l'interaction musicien-instrument et les nouvelles lutheries ;
- l'importance de repenser notre positionnement scientifique au sein de l'UPMC et de l'Institut, en particulier du fait de l'arrivée de l'IRCAM dans le paysage universitaire ;
- la nécessité de faire face à un important renouvellement démographique lié à des départs en retraites simultanés d'agents du CNRS et du ministère de la culture.

Ainsi, une partie de nos activités va devoir être repensée :

- les recherches concernant les supports de conservation de l'information ;
- celles relatives aux dispositifs d'enregistrement et de reproduction du son ;
- les travaux pluridisciplinaires liés aux compétences en psycho-linguistique du groupe LCPE.

Si, depuis 50 ans, le LAM constitue un des acteurs essentiels de l'acoustique musicale, reconnu internationalement pour l'originalité de son approche, il doit donc aujourd'hui, avec l'Institut Jean le Rond d'Alembert, relever des défis majeurs.

Pour y faire face, l'équipe dispose de plusieurs atouts :

- un ancrage fort dans le milieu musical, par ses liens avec les facteurs d'instruments, musiciens, musicologues, pédagogues, etc. ;
- une expertise pluridisciplinaire (mécanique et acoustique, traitement du signal, cognition...) ;
- une politique de partenariat active, même si l'on doit la développer encore, en particulier dans les domaines où des compétences complémentaires externes sont nécessaires ;
- notre appartenance au PRES Sorbonne Universités, qui devrait conforter l'interdisciplinarité nécessaire à notre activité scientifique, notamment avec nos collègues musicologues (Paris-Sorbonne), cognitivistes (Université de Technologie de Compiègne), ethnomusicologues et bioacousticiens (Muséum National d'Histoire Naturelle).

C'est en essayant de prendre en compte les contraintes externes et les dynamiques internes que nous avons rédigé le présent projet d'activités, tout en veillant à préserver ce qui a fait jusqu'à présent l'originalité de notre démarche. Parmi les changements les plus significatifs par rapport à la présentation de nos activités passées, il convient de noter que le chapitre « perception » a disparu. Cette modification ne signifie aucunement que la thématique n'est plus présente dans nos activités, bien au contraire. En effet, deux facteurs expliquent cette nouvelle présentation :

- la nécessité de prendre en compte l'humain change un peu de nature, avec une place accrue accordée au jeu instrumental ;
- le caractère transversal de cette prise en compte, qui irrigue dorénavant une grande partie de nos travaux.

Dans la mesure du possible, nous appuyons notre prospective sur les éléments les plus certains dont nous disposons à ce jour : contrats, thèses qui débutent, collaborations et partenariats existants. Notons enfin que les travaux résumés dans le présent document ne sont, faute de place, qu'un échantillonnage limité des projets en cours et ne présentent aucun caractère d'exhaustivité.

## 2. Instruments de musique et voix chantée

Nous avons pris le parti de présenter les projets relevant de cet axe thématique en essayant de les rattacher aux problématiques en développement au sein de l'équipe. Si ce découpage est quelque peu arbitraire car les thématiques ne sont pas exclusives (la plupart des recherches ressortissent de plusieurs d'entre elles), il permet néanmoins, nous l'espérons, de rendre plus lisibles les objectifs scientifiques visés ainsi que les moyens et partenariats qu'ils nécessitent. La majeure partie des travaux consacrés aux instruments et à la voix chantée concerne la compréhension fine de leur fonctionnement, d'un point de vue mécanique et acoustique. Cependant les recherches s'inscrivent souvent dans une problématique qui va au delà de la compréhension des phénomènes physiques pour s'intéresser à des questions qualitatives, plus difficiles à appréhender scientifiquement. Dans les années passées, un effort a été fait pour mieux comprendre l'influence des « détails » de facture qui sont l'objet d'un soin particulier des facteurs, dans leur souci de développer des instruments de qualité. Les projets actuels visent à compléter cette approche par le point de vue des instrumentistes : leur expertise permet, en adéquation avec les approches de lutherie, d'orienter les études vers les paramètres les plus importants du point de vue de l'utilisation musicale des instruments.

### 2.1. Interaction musicien-instrument

*objectifs : prise en compte de l'humain dans la production sonore*

Il s'agit essentiellement d'affiner la compréhension que nous avons du fonctionnement des instruments de musique afin de développer des modèles susceptibles de rendre compte de la finesse du contrôle expert des musiciens instrumentistes. De manière complémentaire, cette compréhension se développera et pourra être validée grâce à la mise en place de systèmes de contrôle (modèles virtuels ou robot) qui puissent exciter les instruments de manière à la fois répétable, contrôlable et réaliste du point de vue de la technique de jeu instrumentale.

Enfin, dans le domaine de la synthèse sonore, les études qui se sont développées dans les dernières années montrent aussi l'importance du contrôle dans la qualité du son produit, justifiant aussi l'intérêt des études sur l'interaction musicien – instrument dans le contexte des nouvelles lutheries.

Ces orientations se déclinent selon les diverses familles instrumentales étudiées au sein de l'équipe : d'une part les instruments à sons entretenus, et plus particulièrement les instruments à vent de la famille des flûtes, d'autre part les instruments à cordes libres. Afin d'illustrer cet axe d'étude, les paragraphes ci-dessous décrivent deux projets de thèse qui démarrent à l'automne 2012.

#### 2.1.1. Technique de jeu et production du son dans les instruments de musique à sons entretenus : application aux flûtes

Le son produit par les instruments de musique joués en sons entretenus peut être vu comme l'image sonore des différents contrôles (souffle, archet, doigts...) exercés par l'instrumentiste. Ce dernier développe, au cours d'un long apprentissage, un contrôle expert de la production du son, sorte de transformation de l'intention musicale en paramètres adaptés au fonctionnement acoustique de l'instrument. L'objectif est de mettre à profit cette expertise des instrumentistes pour développer notre compréhension de la production du son dans les flûtes.

Le travail prendra appui sur les connaissances accumulées au sein de l'équipe depuis de nombreuses années pour interpréter les observations faites sur des instrumentistes, dans des conditions variées de facture instrumentale et de contexte musical. Les retombées de ces travaux sont attendues dans les domaines de la modélisation des sources acoustiques, de la modélisation physique des instruments de musique, de la synthèse sonore et de son contrôle. Enfin, des retombées en facture instrumentale et en pédagogie de la musique sont aussi possibles.

*Cette recherche fait l'objet d'une thèse en partenariat avec le CIRMMT (Université McGill).*

### 2.1.2. Étude du jeu du musicien par la reproduction robotisée du geste : cas des instruments à cordes libres

Le son produit par un instrument de musique est déterminé à la fois par les caractéristiques mécaniques propres de l'instrument et par le jeu de l'instrumentiste. Jusqu'à présent, le fonctionnement mécanique des instruments à cordes a été au centre de la plupart des travaux et, comparativement, peu d'études se sont intéressées à la manière dont ils sont mis en vibration, en particulier lors du contact direct avec le doigt du musicien. Le travail de recherche a pour objectif l'étude du jeu instrumental avec l'aide d'une plateforme robotisée et instrumentée (guitare, harpe et piano). Après une première phase d'analyse du geste expert du musicien, nous le reproduirons grâce au développement d'une plateforme robotique dédiée. Elle nous permettra d'étudier de façon répétable et paramétrable les instruments en condition de jeu et aidera à l'élaboration de modèles qui seront utiles en facture instrumentale et en pédagogie musicale.

*Cette recherche fait l'objet d'une thèse en partenariat avec l'ISIR.*

### 2.1.3. Étude de l'interaction entre l'instrumentiste et son instrument de musique. Application à la jouabilité des violons

Alors que la manière dont l'interaction archet/corde/colophane peut affecter certains aspects de la jouabilité est connue, aucune étude n'a été réalisée pour savoir si cela correspondait vraiment à la notion de jouabilité utilisée par les musiciens, associée à une perception auditive aussi bien que tactile et gestuelle. Par ailleurs, la jouabilité n'est certainement pas une caractéristique intrinsèque à un instrument. Son évaluation dépend en particulier de la différence entre l'instrument testé et le propre instrument du musicien, la capacité d'adaptation de ce musicien ainsi que son expertise. Elle peut dépendre aussi de la salle et du contexte musical.

Le travail consistera donc autant à mettre en place l'acquisition de données pertinentes pour le musicien (capture du geste, prise de son, ...) que de réduire et synthétiser toutes ces données pour en extraire de l'information pertinente pour le fonctionnement de l'instrument, afin de pouvoir ensuite étudier l'effet des différentes variables (expertise, adaptation, contexte musical, ...). Cette étude s'inscrira dans une dynamique de recherche en collaboration entre luthiers, musiciens et scientifiques, et pourra être élargie à d'autres instruments. Le concept de jouabilité est en effet récurrent chez les musiciens et les facteurs d'instruments, puisque les possibilités de contrôle offertes aux instrumentistes doivent être maximales, ou du moins optimisées. Une connaissance des techniques de jeu, de la capacité d'adaptation des instrumentistes et de leur interaction fine avec leur instrument aura donc des retombées au niveau lutherie en plus d'améliorer notre compréhension du fonctionnement des instruments de musique.

### 2.1.4. Étude portant sur les mouvements « ancillaires » du musicien

Cette recherche porte sur les mouvements « ancillaires » (qui ne participent pas directement à la production du son) du musicien, par exemple ceux qui contribuent à la stabilisation du tempo, et leur évolution en fonction de la famille d'instruments considérée (oscillations forcées ou libres). En pratique, nous envisageons d'étudier dans un premier temps les gestes des musiciens d'un point de vue expérimental dans le but de mettre en avant les spécificités et les paramètres de contrôle qu'utilise l'instrumentiste en situation de jeu. Les résultats seront validés par le biais de musiciens virtuels animés contrôlant une synthèse sonore.

*Cette recherche s'inscrit dans un projet post-doctoral en collaboration avec le Dept. Of Speech, Music and Hearing du Royal Institute of Technology (Stockholm).*

### 2.1.5. Corrélations entre propriétés perceptives et propriétés acoustiques. Application au cas du violon.

Alors que les scientifiques se sont beaucoup intéressés à comprendre les propriétés acoustiques et vibratoires d'un certain nombre d'instruments de musique, afin de les corrélérer aux propriétés perceptives, ces corrélations ont le plus majoritairement été cherchées « unilatéralement », à savoir en s'intéressant presque exclusivement à l'instrument, et en oubliant l'instrumentiste.

Les propriétés perceptives sont donc souvent grossières, et la description de la qualité des

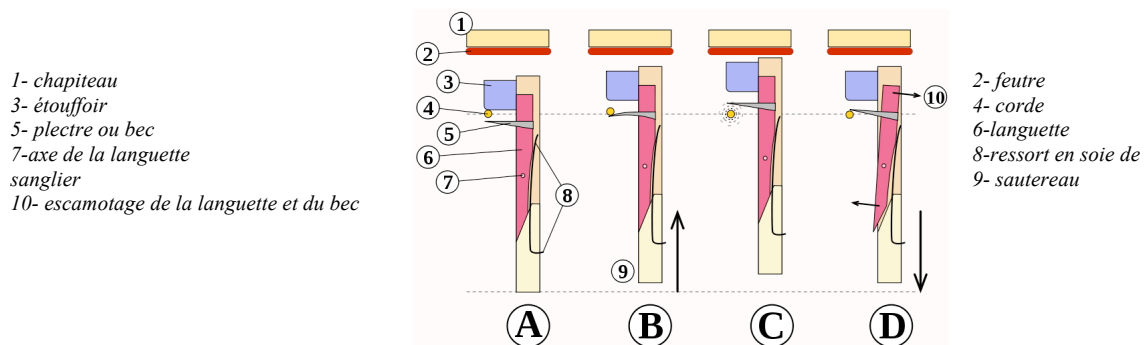
instruments étudiés reste limitée à « bonne » ou « mauvaise ». Ceci est certainement une des raisons principales, dans le cas du violon tout du moins, pour lesquelles ces corrélations sont restées vaines. Des travaux ont donc été entrepris pour pallier cette lacune et vont être continues dans les prochaines années. L'accent est mis sur une meilleure compréhension de la perception multimodale (principalement audition et toucher) dans le jeu du violon afin de mieux comprendre l'évaluation de la qualité par les violonistes. Une meilleure connaissance des critères d'évaluation devrait en effet nous ouvrir de nouvelles pistes pour chercher des corrélations dans le domaine mécanique.

## 2.2. Instruments et patrimoine

**objectifs :** étude d'instruments à des fins patrimoniales (conservation, restauration, etc.)

### 2.2.1. Étude du plectre ou bec du clavecin : application à l'harmonisation

Le pincement d'une corde de clavecin se fait par l'intermédiaire d'un bec (ou plectre). Cette interaction est ajustée en fonction d'un choix sonore et de toucher par le facteur en modifiant, notamment, la géométrie du bec. Cette étape s'appelle l'harmonisation. L'idée de la recherche est de mieux comprendre cette harmonisation et notamment son évolution en fonction des matériaux du bec ancien et moderne (plume de corbeau, cuir, *delrin*) et des modifications sonores qu'elles engendrent, en vue de la réalisation de fac-similés de bec ancien.



#### Fonctionnement du sautereau

A : touche au repos, l'étouffoir repose sur la corde et l'empêche de vibrer - B : enfoncement de la touche : le sautereau s'élève contre la corde et fléchit - C : le sautereau lâche la corde qui se met à vibrer (émission du son), le sautereau vient en butée contre le chapiteau - D : la touche relâchée, le sautereau redescend par son poids, la languette s'escamote par rotation vers l'arrière au passage de la corde, l'étouffoir reviendra arrêter la vibration de la corde. Cette étude fera l'objet d'une collaboration avec le Musée de la musique.

### 2.2.2. Étude d'un diffuseur dit « métallique » pour Ondes Martenot

L'Onde Martenot, inventée en 1928, a donné lieu à un important répertoire musical et continue d'être enseignée et jouée. L'instrument, un synthétiseur analogique, est complété par des diffuseurs particuliers dont l'un d'eux, dit « métallique » est un gong excité par le signal amplifié issu de l'onde. Ce diffuseur est intéressant pour les sonorités particulières qu'il permet, liées au contrôle subtil des non-linéarités du gong et à son rayonnement spatial vivant et complexe. Malheureusement, peu d'exemplaires ont été produits et, du fait des technologies utilisées à l'époque, ils n'ont pas bien vieilli. Après avoir étudié en détail le fonctionnement de modèles de référence, il s'agit maintenant de réaliser un modèle mettant en œuvre des technologies modernes, fiables, et plus faciles à contrôler que les modèles anciens.

Ce travail se fait en collaboration avec de nombreux « ondistes », ainsi qu'avec Jean-Louis Martenot, le fils de l'inventeur et la société Eowave qui en assurera la commercialisation.

## 2.3. Facture instrumentale et musicologie

**objectifs :** paramètres de facture, organologie et liens avec la musicologie

### 2.3.1. Influence des éléments de lutherie de la guitare électrique

La guitare électrique est un instrument électro-acoustique dont le son provient de la captation par un « microphone » de la vibration des cordes. Ces vibrations peuvent être influencées par leurs



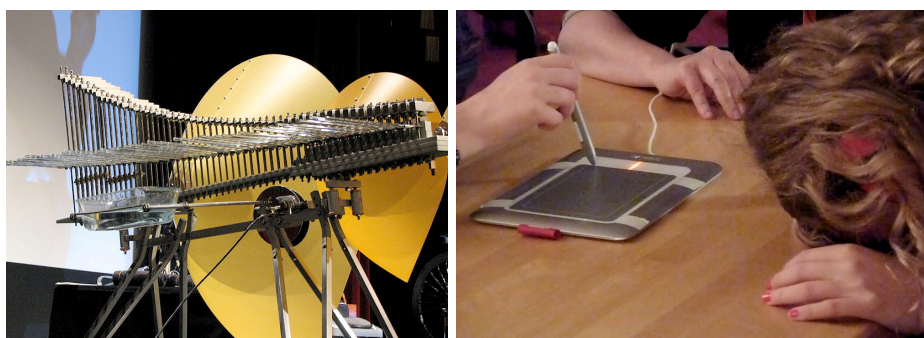
conditions aux limites et donc par les éléments de lutherie (matériau, forme, assemblage...). L'idée est de quantifier ces influences pour tenter d'interpréter les choix faits par les luthiers dans leur fabrication et les préférences des guitaristes. Pour cette étude, les apprentis luthiers et l'équipe enseignante de l'ITEMM conçoivent et fabriquent des guitares spécifiques, tout en restant fidèle aux choix organologiques historiques. Ces instruments sont alors analysés aussi bien de manière vibratoire que perceptive (avec des musiciens professionnels).

*Cette étude fait l'objet d'une collaboration avec le CICM (Université Paris 8) et l'ITEMM.*

### 2.3.2. Étude du Cristal Baschet

Instrument purement acoustique, le cristal Baschet est un instrument inventé dans les années 50 d'une grande complexité mécanique. Il s'agit de tiges de verres frottées avec les doigts, reliées par un « collecteur » métallique à des diffuseurs acoustiques (membranes précontraintes). Cet instrument n'a jamais fait l'objet d'une étude mécanique et acoustique exhaustive.

*Cette recherche est menée en partenariat avec le LAUM, le CICM (Université Paris 8), et fera l'objet d'une bourse CIFRE financée par la société qui a repris la fabrication du cristal Baschet.*



*A gauche : Cristal Baschet (modèle de concert) – A droite : Table sono-tactile (au Panthéon)*

## 2.4. Nouvelles lutherie

**objectifs :** lutherie électronique et numériques

### 2.4.1. Nouvelles lutherie et handicap

Les nouvelles technologies ont fait évoluer la notion d'instrument de musique. Elles permettent d'imaginer de nouvelles formes d'interaction adaptées aux différentes situations personnelles et collectives rencontrées (handicap, enseignement général ou spécialisé), rendant ainsi accessible à tous des formes nouvelles de pratique et d'enseignement musical. L'objectif du projet PANAM, retenu pour un financement ANR (2012-2015) est de développer des instruments numériques ainsi qu'une bibliothèque virtuelle de ressources pour une pédagogie artistique musicale basée sur des pratiques collectives. Ce programme a pour objectif la réalisation d'outils matériels et logiciels et de contenus pédagogiques innovants en direction des enseignants et formateurs. Il cible trois réseaux principaux : l'enseignement général (Éducation Nationale), les écoles de musique et les établissements spécialisés dans le handicap. Pour répondre à ces objectifs, il s'agit donc, à partir de la Méta-Mallette existante (qui servira de plateforme logicielle et se verra largement transformée), de développer un ensemble d'instruments virtuels ainsi qu'un corpus de situations pédagogiques et artistiques répondant aux besoins spécifiques liés au handicap, et nécessitant pour cela un cahier des charges particulier. Il s'agit encore une fois d'un projet particulièrement pluridisciplinaire puisqu'il s'appuie sur des compétences très variées : acoustique (modélisation d'instruments), électronique, informatique, électro-acoustique, musique, didactique...

*En plus des partenaires directement impliqués dans le projet (Puce Muse, Paris 8, Art & Fact, Eowave), il est important de signaler qu'une part décisive du programme se fera en relation avec plusieurs établissements à vocation pédagogique et plus précisément dans deux établissements spécialisés dans les situations de handicap : l'Institut National des Jeunes Sourds INJS (Paris) et le lycée EREA Toulouse Lautrec (Vaucresson) qui accueille des handicapés moteurs, en particulier*

*myopathes.*

#### 2.4.2 Réalisation d'une touche d'expression

Si la synthèse sonore a fait de gros progrès ces dernières années, la question du contrôle expressif de la synthèse reste d'actualité. En effet, la richesse de l'interaction musicien-instrument est fondamentale pour obtenir des résultats satisfaisants aux yeux des musiciens. La touche d'expression, inspirée par celle qui équipe l'Onde Martenot, se veut un dispositif extrêmement malléable permettant à l'instrumentiste de contrôler avec une grande précision les sons de synthèse.

*Ce travail fait l'objet d'une étude de brevetabilité en cours.*

### 3. Techniques audio

#### 3.1. Analyse des signaux musicaux

##### 3.1.1. Transcription automatique de la cithare marovany, instrument utilisé à Madagascar.

La transcription de la musique consiste à identifier puis reporter sur une partition les différentes notes d'un morceau musical. La recherche s'appliquera principalement à un instrument : la cithare marovany. On privilégiera les représentations temps-fréquence / temps-échelle pour caractériser les cordes jouées et donner une première transcription, et on s'intéressera notamment à décrire l'attaque des notes (aspect transitoire des câbles) dont on sait que cette information est essentielle pour caractériser les instruments de musique. On se focalisera également sur les caractéristiques invariantes des signaux pour s'affranchir des diversités dues aux différentes façons de jouer par exemple. L'identification des notes, par des méthodes de classification récentes (*bags of words*, *random forests*, *sparse learning*, *SVM*) sera validée par des informations a priori, comme la reconnaissance et la localisation de leitmotiv et le rythme.

*Ce travail fait l'objet d'une thèse en partenariat avec l'EHESS.*

#### 3.2. Archives sonores

Certains laboratoires de recherche, dans des disciplines aussi diverses que l'anthropologie, l'ethnomusicologie, la linguistique... et l'acoustique, doivent gérer des fonds sonores importants. Dans ces disciplines, les chercheurs sont confrontés à la « manipulation » d'un matériau de recherche particulier parce que temporel : le document sonore. Ils sont concernés par la question de l'accès, de l'indexation, de la gestion, ainsi que de la conservation et la diffusion de leurs collections d'archives sonores. Ainsi est né le projet TELEMETA, qui s'inscrivait dans la continuité d'une réflexion entreprise en 2007 pour l'accès aux données sonores de la Recherche. En effet, aucune application n'existant en « open source » sur le marché, le **CREM-LESC**, le **LAM** et la Phonothèque de la **MMSH** d'Aix-en Provence ont étudié la conception d'un outil innovant et collaboratif qui répond à des besoins « métier » (liés à la temporalité du document), tout en étant adapté à des exigences du secteur de la recherche. Avec le soutien financier du TGE ADONIS du CNRS, et du Ministère de la Culture, la plateforme TELEMETA a été mise en ligne en mai 2011 : <http://archives.crem-cnrs.fr>. Il faut noter à ce propos, que l'outil Telemeta a été sélectionné comme projet pilote en 2010 par le TGE Adonis. Forts de cette expérience et de l'intérêt suscité par cet outil, nous avons élaboré le projet DIADEMS, qui a été retenu pour un financement ANR (2012-2015). Il permettra d'étendre les collaborations existantes à de nouveaux partenaires, dont l'IRIT (Toulouse) et le LaBRI (Bordeaux) et de développer de nouveaux outils d'analyse répondants aux besoins des différentes communautés scientifiques travaillant sur le son et devant gérer des corpus sonores et des bases de données complexes.

### 4. Acoustique des salles

*(JD Polack)*

A la suite de la thèse de Fábio Leão Figueiredo, qui a permis, entre autres, de recueillir des mesures acoustiques dans 14 salles de la région parisienne, vides et occupées, une évaluation complète de ce corpus unique va pouvoir être effectuée. Cette évaluation sera surtout subjective,



mais un travail complémentaires sur les indices acoustiques est envisagé. Le corpus sera ponctuellement complété par la mesure de quelques salles, notamment des théâtres antiques. Elle se fera dans le cadre d'une thèse qui débute en 2012 (JP Espitia).

A plus long terme, il est souhaité de démarrer une thèse sur l'application de l'équation de transport de Boltzmann en acoustique des salles, dans le but de vérifier les équations de conservation de l'énergie et dépasser la théorie de Sabine qui atteint rapidement ses limites dans de nombreux cas (salles couplées, salles allongées, forte absorption inégalement répartie, etc.).

## 5. partenariats à poursuivre et/ou développer

Si l'équipe entretient des collaborations fructueuses avec d'autres équipes de l'institut, collaborations qui devraient se renforcer encore dans les années à venir, notre positionnement scientifique nécessite de développer aussi nos partenariats extérieurs. Sans vouloir être exhaustifs, on peut évoquer les partenaires avec lesquels des liens privilégiés ont été tissés, notamment par le biais d'accords de consortium liés à des projets :

### **Ingénierie**

- le CIRMMT – McGill (geste musical, perception)
- le LIMSI (voix chantée, acoustique des salles, lutherie informatique)
- le LAUM (acoustique)
- le LVA (vibro-acoustique)
- l'ISIR (robotique pour la modélisation des interactions mécaniques musicien-instrument)
- INCAS3 (environnements sonores, applications musicales des capteurs « intelligents »)

### **Facture instrumentale**

- l'ITEMM et le CNFA d'Eschau (facture instrumentale)
- le Musée de la musique (organologie)
- Violin Society of America

### **Perception – Cognition - Ergonomie**

- Le Laboratoire de psychologie de la perception : UMR 8158 – Université Paris Descartes et l'équipe Audition de l'ENS (psychologie de la perception)
- l'équipe COSTECH - UTC (énaction)
- l'équipe HEUDIASYC - UTC (ingénierie des interfaces)

### **Musique - Musicologie**

- le CICM : Université Paris 8 (musicologie du XXe siècle, nouvelles technologies)
- les laboratoires OMF et PLM : Université Paris 4-Sorbonne (musicologie)
- le CREM : Université Paris Ouest Nanterre-La Défense
- le CNSMDP (musique, techniques audio)

## IV. Équipe MISES : Mécanique et Ingénierie des Solides et Structures

### 1. Analyse stratégique

À titre de rappel, l'équipe est structurée en trois thèmes : micromécanique, rupture, structures. Le nombre important des arrivées (Brenner, Dartois, Dascalu, Kondo, Ponson) et départs (Lazarus, Léné, Marigo, Muller, Sanchez-Palencia, Vannucci) de ces quatre dernières années a modifié l'architecture de l'équipe et a déplacé sensiblement son centre de gravité (départs principalement sur le thème 'Structures' et arrivées exclusivement sur les thèmes 'Micromécanique' et 'Rupture'). Il faudra veiller à préserver l'équilibre entre les sous-thèmes, notamment en privilégiant certaines thématiques dans les recrutements. Pendant le prochain quinquennal, le départ de Joël Frelat ainsi que le déficit de ces dernières années fait que le ou les prochains recrutements se feront probablement dans le thème 'Structures'. De plus le départ prévu de Dominique Leguillon, après celui de J.-J. Marigo (2009), fait qu'un poste de Professeur en Mécanique de la Rupture peut s'avérer aussi nécessaire à moyen terme.

Le travail d'un théoricien se fait parfois seul, parfois en binôme avec un étudiant ou un collègue. Néanmoins les membres de l'équipe MISES ont de nombreuses collaborations nationales et internationales (voir une liste dans le Rapport). Au niveau intra-MISES, les interactions entre les thèmes sont maintenant variées et vont se faire plus nombreuses une fois les nouveaux arrivants 'installés'. En particulier, des demandes de financement impliquant des membres de différents sous-thèmes ont récemment été obtenues (L. Ponson, C. Dascalu, A. Vincenti). Au niveau de l'institut d'Alembert les collaborations avec l'équipe FCIH vont continuer (par exemple démarrage d'une thèse co-encadrée par A. Antkowiak et S. Neukirch et d'une autre thèse par B. Audoly et A. Antkowiak), ainsi que celles avec l'axe 'Dynamique et Structures' de l'équipe MPIA (collaboration sur les plaques actionnées piezo-électriquement, systèmes bistables).

Même si les liens avec les partenaires industriels sont nombreux et pérennes, le positionnement des recherches est clairement amont. Les outils utilisés sont d'une grande variété : théoriques (méthodes asymptotiques, homogénéisation), numériques (éléments finis, cheminement numérique, méthodes empruntées aux mathématiques et à l'informatique graphique), et maintenant expérimentaux (traction multi-axiale, imagerie rapide). La place, en moyens humains et en mètres carrés, des activités expérimentales est néanmoins encore faible. La volonté est de laisser une grande liberté de choix des sujets aux membres de l'équipe, liberté qui est pour nous source d'originalité des recherches et des méthodes.

Les interactions avec les domaines scientifiques connexes (mathématiques appliquées, physique de la matière molle, physique des matériaux) se font plus fortes et devraient probablement s'amplifier : participation au GDR MéPhy, organisation de rencontres AUM/SFP, projet de parcours de 2ème année de master à l'interface mécanique-physique. Le désir d'un rapprochement de la mécanique de solides avec la physique de la matière condensée se fait sentir et devrait se concrétiser par exemple par des créations d'unités d'enseignement de mécanique des milieux continus en cursus de physique et de mathématiques et d'unités d'enseignement de physique statistique en cursus de mécanique. À terme des recrutements aux interfaces math-méca et méca-phys pourraient être envisagés.

L'autonomie des universités a initié une modification profonde du paysage de la mécanique française. Ainsi certains de nos liens avec des laboratoires et départements d'enseignement franciliens se relâchent et d'autres se créent ou se resserrent. Il est par exemple prévu une désassociation de l'ENS-Cachan au niveau de l'orientation 'Mécanique des Solides' du M1, ainsi qu'au niveau des Parcours M2 MAGIS et TACS (portés par l'ENS-Cachan et l'ENSAM). Volonté est de voir cette réorganisation comme une opportunité plutôt que comme une menace : les recrutements récents dans l'équipe MISES, celui qui sera effectué en 2013, et la participation plus importante des chercheurs CNRS à l'enseignement font que l'équipe peut maintenant développer une offre d'enseignement complète en Mécanique des Solides. De plus la réorganisation au niveau

du M1 peut permettre de proposer une orientation couplée avec la Mécanique des Fluides, fruit de la synergie des membres FCIH et MISES. Au niveau du M2 un parcours Mécanique-Physique est à l'étude avec l'ESPCI, ainsi qu'un parcours Solides-Fluides (sans création d'UE, par simple assemblage d'UE existantes) avec les membres de l'équipe FCIH. Enfin un parcours M2 en anglais pourrait être envisagé. D'autre part la désassociation de l'ENS-Cachan devrait avoir pour conséquence le retour sur le site Jussieu d'enseignants-chercheurs venant renforcer nos thématiques aussi bien en recherche qu'en enseignement (génie civil, mécanique rapide).

## 2. Projet et objectifs scientifiques

### 2.1. Micromécanique

Les perspectives des recherches menées sur la description du comportement de matériaux hétérogènes comportent des développements théoriques ainsi que leur mise en œuvre numérique. Elles s'appuient notamment sur des approches d'homogénéisation non-linéaire et d'analyse limite pour la description de la plasticité, des approches non-locales de l'endommagement et des outils d'homogénéisation numérique pour les milieux périodiques. La prise en compte de couplages multi-physiques (hydro-mécaniques et électro-mécaniques notamment) est également une thématique que nous souhaitons poursuivre au cours des prochaines années.

#### 2.1.1. Rupture ductile de matériaux poreux

Les travaux récents au sein de l'équipe ont abouti à la proposition de critères étendant le critère de Gurson (anisotropie de comportement de la matrice d'une part et de la forme des cavités d'autre part). Ces différents développements théoriques seront mis en œuvre et confrontés pour la description de la rupture ductile de métaux poreux (Thèse de L. Morin co-encadrée par D. Kondo et J.-B. Leblond). Ces travaux reposent sur l'analyse limite et les techniques d'homogénéisation non linéaire.

Dans ce cadre, des développements pour l'homogénéisation de matériaux polycristallins élastoviscoplastiques sont également effectués (R. Brenner et D. Kondo). Ils visent à obtenir une formulation incrémentale qui tient compte des fluctuations des champs mécaniques pour la description du régime transitoire de comportement de polycristaux. Dans le contexte de métaux poreux, ils pourront être mis à profit pour la description du comportement anisotrope de la matrice polycristalline. Enfin, une autre voie de recherche actuellement explorée porte sur l'effet de porosités de taille nanométrique sur la rupture ductile.

#### 2.1.2. Homogénéisation et couplages multi-physiques

Ces travaux portent sur description de la relation entre la microstructure et les propriétés effectives de matériaux hétérogènes en tenant compte de couplages entre des propriétés physiques à l'échelle de la loi constitutive. Différents types de couplages sont abordés au sein de l'équipe : électroélasticité pour les composites fonctionnels (matériaux piézoélectriques, par exemple), poroélasticité, poroplasticité, couplages chémo-mécanique dans les bétons, géomatériaux, etc. Cette thématique est donc commune à de nombreux chercheurs au sein de l'équipe (A. Allische, R. Brenner, D. Kondo, H. Dumontet, A. Benhamida, S. Dartois, collaboration avec F. Bouchlaghem). Par ailleurs, des collaborations sont envisagées avec l'équipe MPIA sur les questions relatives à la piézoélectricité. Parmi les travaux envisagés, on peut citer l'étude du rôle des fluctuations de champs sur la réponse non-linéaire qui prolongera les travaux sur l'homogénéisation non linéaire de comportements non couplés. Ces études tireront également parti de développements pour l'homogénéisation numérique (approche FFT) de comportements couplés qui seront étendus aux comportements non linéaires.

#### 2.1.3. Un sous thème fédérateur au confluent de la micromécanique et de la mécanique de la rupture : Endommagement par microfissuration dans les matériaux quasi-fragiles

Les recherches porteront sur le développement de modèles d'endommagement à gradient avec une approche fondée sur les développements asymptotiques. Elles envisageront la description de microstructures évolutives en fissuration et permettront d'étendre les résultats obtenus pour des modèles locaux (Thèse de D. T. Le encadrée par C. Dascalu). La propagation dynamique de

microfissures fera également l'objet d'études dans l'optique de l'obtention de lois d'évolution de l'endommagement. En particulier, la façon dont le transfert d'énergie élastique se fait vers la pointe de fissure demeure très peu comprise, bien que cette question soit fondamentale pour prévoir l'énergie de rupture totale d'un matériau (qui peut atteindre plusieurs dizaines jusqu'à plusieurs milliers de fois l'énergie de surface selon les matériaux). Une des clés pour progresser dans ce domaine est la description détaillée des mécanismes de rupture dans la zone d'endommagement localisée en pointe de fissure. Pour un grand nombre de matériaux (bétons, céramiques, bois...), c'est dans cette zone que nucléent, croissent puis coalescent un grand nombre de microfissures. Un des projets de l'équipe, faisant appel aux compétences disponibles dans les thèmes « Micromécanique » et « Rupture », est d'aboutir à une description quantitative de ce mécanisme de microfissuration pour mieux comprendre son rôle sur le comportement des fissures, mais également prévoir le comportement mécanique (tout au long du chargement, jusqu'à la transition vers la rupture) des matériaux multifissurés. Plus précisément, les approches complémentaires développées à l'Institut issues (i) de la mécanique théorique (méthodes d'homogénéisation de milieux endommagés, D. Kondo et C. Dascalu) et (ii) de la physique théorique des phénomènes critiques (permettant la description de la réponse collective des microfissures, L. Ponson), (iii) supportées par des méthodes numériques de pointe (approche variationnelle de la rupture, C. Maurini, méthodes des éléments de frontières, thèse de L. Konaté démarrant en Octobre 2012) permettront l'élaboration de nouveaux modèles utiles aussi bien en ingénierie mécanique, qu'en calcul de structures en génie civil et en géophysique (collaboration avec H. Bhat, IPGP, projet Emergence-UPMC).

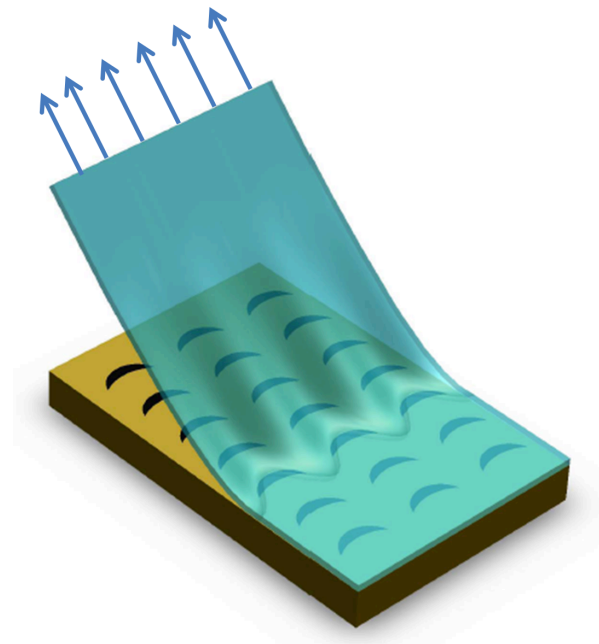
## 2.2. Rupture

L'activité rupture a connu l'arrivée de trois nouveaux membres entre septembre 2010 et septembre 2011, qui ouvre de nouvelles perspectives pour les recherches à l'Institut sur ce thème. D'une part, comme précédemment évoqué, l'arrivée des professeurs D. Kondo et C. Dascalu apporte une expertise de haut niveau sur les mécanismes de microfissuration et d'endommagement dans les matériaux quasi-fragiles, ainsi que leur description par des méthodes de changement d'échelle et d'homogénéisation. D'autre part, Laurent Ponson, recruté récemment comme Chargé de Recherche, apporte son expertise sur les méthodes issues de la physique en mécanique de la rupture, ainsi que sa bonne maîtrise des outils de la mécanique de la rupture expérimentale. Ces arrivées venant compléter les approches plus traditionnelles en mécanique de la rupture fragile développées par Jean-Baptiste Leblond et Dominique Leguillon, ainsi que les outils numériques de pointe développés dans le cadre de la reformulation variationnelle de la mécanique de la rupture par C. Maurini, l'activité « Rupture » est dorénavant portée par un groupe fortement pluridisciplinaire (mécanique des milieux continus, physique statistique, mathématiques appliquées), possédant une large palette d'outils théoriques, numériques et, dans une moindre mesure, expérimentaux permettant d'aborder les problématiques liées à la rupture et l'endommagement des matériaux sous de multiples points de vue complémentaires. Notons finalement que ces arrivées ont créé des liens nouveaux entre les différents chercheurs travaillant sur ce thème à l'Institut d'Alembert, ouvrant de réelles perspectives de mises en commun de ces expertises pour aborder les défis importants de la mécanique de la rupture moderne. En plus des liens fédérateurs entre endommagement et rupture, déjà mentionnés, On peut notamment isoler deux champs d'investigation déjà dynamiques à l'Institut et prometteurs pour les années à venir, dont celui sur la rupture par microfissuration, déjà décrit dans la partie précédente.

### 2.2.1. Étendre la mécanique de la rupture aux matériaux hétérogènes

La mécanique de la rupture classique décrit les matériaux par un milieu élastique modèle. Or, prévoir le comportement à rupture des matériaux réels (vitesse de fissuration, ténacité) passe par la compréhension du rôle de la microstructure et des hétérogénéités des matériaux sur le comportement des fissures. Pour relier les propriétés microscopiques des matériaux à leur propriétés de rupture macroscopiques, il faut (i) prévoir l'effet des perturbations géométriques du front (induites par les hétérogénéités) sur le champ local de contrainte en pointe de fissure, puis (ii) en

déduire l'évolution de la fissure dans des champs locaux de ténacité ou de module élastique hétérogènes. Pour aborder efficacement ces problèmes, nous mettrons en œuvre des techniques de la mécanique de la rupture théorique, des concepts issus de la physique statistique des interfaces en milieu désordonné ainsi que des méthodes numériques adaptées. Cette complémentarité offrira la possibilité d'aborder des problèmes ambitieux comme la prédiction des propriétés effectives de rupture de matériaux fragiles avec des contrastes forts de résistance à l'échelle microscopique (thèse en cours de M. Vasoya, co-encadrée par L. Ponson, J.-B. Leblond et V. Lazarus), avec de rapides variations de leur module élastique (D. Leguillon) ou des propriétés de rupture fortement anisotropes (L. Ponson). Ces recherches seront soutenues (i) par les approches numériques développées par C. Maurini d'une part et (ii) les expériences sur des systèmes hétérogènes fragiles modèles (adhésifs texturés) montées récemment à l'Institut par L. Ponson, voir Fig. M1. A terme, ces recherches permettront de concevoir de nouveaux systèmes ou matériaux composites avec des microstructures optimisées (collaboration avec A. Vincenti, MISES) afin de leur procurer des propriétés de rupture nouvelles et plus performantes.

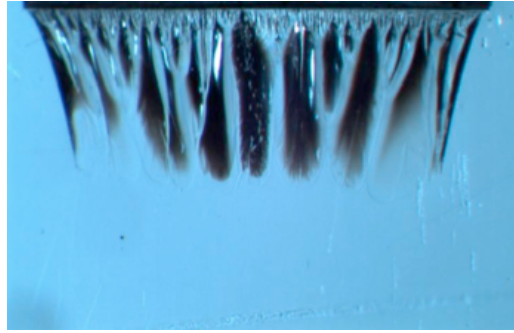


*Figure 1 : Expérience de décollement d'un adhésif à partir d'un substrat hétérogène*

### *2.2.2. Aspects tridimensionnels de la mécanique de la rupture*

Notre compréhension du comportement des fissures sous chargement mixte (Mode I, II et III, voir Fig. M2) reste encore très incomplète. Dans ce contexte comprendre la fragmentation des fronts de fissure, du fait du rôle important des non-linéarités et des aspects 3D complexes qui entrent en jeu, est un défi important que compte relever le groupe MISES, aussi bien au cours de la phase d'initiation des facettes (D. Leguillon) que de leur croissance au cours de la propagation (J.-B. Leblond). Les approches numériques seront indispensables pour aborder cette question (C. Maurini). En filigrane, se pose la question du critère de propagation des fissures en mécanique de la rupture 3D, impliquant ou non le facteur d'intensité des contraintes local en mode III. Notons que d'autres aspects tridimensionnels de la mécanique de la rupture en lien avec la trajectoire des fissures et la morphologie des surfaces de rupture des matériaux hétérogènes fragiles et quasi-fragiles (L. Ponson) sont actuellement en plein développement au sein du groupe.





*Figure 2: Faciès de rupture obtenu par mode mixte I et III: la morphologie et l'évolution de telles facettes restent encore largement incomprises*

### 2.3. Structures

Au cours des dernières années, le thème 'Structures' n'a pas bénéficié de la même dynamique de recrutement que les deux autres thèmes (absence de recrutement depuis C. Maurini il y a cinq ans, et départ de P. Vannucci, F. Léné, P. Muller, E. Sanchez-Palencia). Afin de maintenir un équilibre entre les thèmes, il semble opportun que le thème 'Structures' soit prioritaire dans le ou les prochains recrutements.

L'investissement de l'équipe dans le projet de parcours mécanique-physique en partenariat avec l'ESPCI représente une opportunité importante pour le thème, permettant d'établir des liens entre le style de recherche et l'enseignement. Par ailleurs, les membres de l'équipe sont impliqués dans une réflexion visant à monter un parcours international de master sur la modélisation et le calcul de structures.

Nous poursuivrons l'effort déjà initié, consistant à combiner les concepts issus de la théorie des structures minces élastiques à des domaines scientifiques connexes. Nous nous intéresserons aux déformations des solides très déformables sous l'effet de forces capillaires, sujet qui nécessite des approches à l'interface entre la mécanique des solides et des fluides : mécanique des « gouttes solides » obtenues par la déformation de gels très mous ( $E \sim 10\text{Pa}$ ) sous l'effet de la tension de surface, phénomènes d'instabilités de claquage induites par la présence d'un fluide mouillant, instabilités de plaques et coques induites par le mouillage sur une surface courbe.

Nous nous intéresserons également à des structures régies par des lois de comportement non standard, problématique qui ouvre de nombreuses perspectives : conception et optimisation des composites avec couplages multi-physiques, avec anisotropie élastique ou utilisant des alliages à mémoire de forme, dans le but de contrôler la forme ou la fonction des structures multistables ; extension des travaux sur la dynamique des fils au cas viscoélastique ; modèles de coques visqueuses avec forces actives pour la mécanique de la division cellulaire ; prise en compte de fluctuations thermiques pour la mécanique du brin d'ADN.

Nous allons aussi poursuivre les travaux en optimisation topologique de structures homogènes et composites avec prise en compte de modèles et conditions de chargement plus évoluées (ex. plaques sandwich, chargements combinés membrane-flexion), de critères d'endommagement et de rupture. Dans le cadre de structures homogènes tridimensionnelles, une étude couplant optimisation topologique et analyse limite sera développée.

La mise au point d'outils numériques sera poursuivie. Le calcul numérique joue un rôle fédérateur au sein du thème 'Structures', et est mis en œuvre de plus en plus souvent en complément des approches analytiques développées dans le thème, voire au sein de MISES. L'outil numérique est au centre de deux sujets que nous comptons poursuivre, en complément des approches analytiques : la problématique du contrôle de forme dans les coques, et la compréhension de la structure des singularités de plaques élastiques (points de cônes et plis). Nous poursuivons également le développement d'une librairie générique d'optimisation applicable aux problèmes de structures.

## V. Equipe MPIA – Modélisation, Propagation et Imagerie Acoustique

### 1. Positionnement et stratégie de collaboration

#### 1.1. Positionnement scientifique: l'Acoustique au sein de la Mécanique

L'équipe « Modélisation, Propagation, Imagerie, Acoustique » (MPIA), comme rappelé dans la partie « bilan », a pour thématique de recherche principale la modélisation, la simulation et l'expérience en Acoustique Physique et Dynamique des Structures. L'équipe s'inscrit naturellement au cœur des thématiques scientifiques portées par l'Institut Jean Le Rond d'Alembert, associant simultanément l'Acoustique et la Mécanique. L'Acoustique Physique (au sens large, incluant la Dynamique et les Ondes) est au centre des préoccupations de l'équipe, couvrant toute la gamme de fréquences (des infrasons aux ultrasons), et tous les milieux : océan, atmosphère, solides complexes, milieux biologiques. En revanche, l'équipe MPIA n'aborde pas l'aspect « perception humaine » des signaux acoustiques, aspect traité par l'équipe LAM. La richesse des activités acoustiques de l'équipe résulte également de leurs connections fortes avec la Mécanique des Fluides et des Solides, à la fois au sein de l'équipe, et au sein de l'Institut. Ainsi, l'axe « Aéroacoustique » est fortement connecté avec la Mécanique des fluides turbulents, soit comme milieu de propagation (météorologie par exemple), soit comme source acoustique. La collaboration avec l'équipe FRT est donc forte, et cet axe constitue par ailleurs une activité transverse de l'Institut. L'axe « Imagerie », à forte teneur expérimentale, interagit lui avec les modélisateurs en dynamique des structures, soit au sein de l'axe du même nom de l'équipe MPIA (développement expérimental pour l'étude des structures bistables), soit au sein de l'équipe MISES (comparaisons mesures holographiques / modélisation éléments finis sur le clavecin Couchet). Des perspectives de recherche communes avec l'axe « Aéroacoustique » sont en cours de développement. L'axe « Dynamique des Structures », intègre naturellement la modélisation en Mécanique des Solides. La spécificité de cet axe par rapport à l'équipe MISES est d'intégrer les couplages multiphysiques (acoustique évidemment, mais aussi électromagnétique), mais des collaborations existent entre les deux équipes. Enfin l'axe « Biomécanique » développe lui aussi des modélisations thermomécaniques avancées de la croissance des tissus mous, et étudie leur interaction avec les champs acoustiques. Les interactions au sein de d'Alembert existent là aussi, notamment pour les milieux à bulles et les agents de contraste (équipes FRT et FCIH).

#### 1.2. Consolider les points forts

L'équipe restera évidemment positionnée sur ses 3 points forts: la modélisation avancée en mécanique et acoustique, le calcul numérique intensif et enfin l'activité expérimentale en imagerie aérienne et sous-marine. La modélisation constituera toujours un point majeur de l'équipe. Le défi principal sera de consolider l'axe « Biomécanique » qui vient d'intégrer quatre nouveaux entrants (dont 2 CR et 1 MCF). La crédibilité et la visibilité de celui-ci sont d'ores et déjà bien engagées, avec les succès récents aux appels à projets (1 Emergence UPMC, 1 ANR, 2 Plans Cancer dont 1 porté par d'Alembert), 3 nouvelles thèses (dont 2 bourses ED) et 1 post-doctorat financés dès l'année 2012-2013. Concernant le calcul intensif, celui-ci est en plein essor avec le développement de l'axe « Aéroacoustique », le recrutement d'un « numéricien » dans l'axe « Biomécanique » et les stratégies de développement de codes performants orientées vers le calcul parallèle ou le calcul sur cartes GPU, notamment dans le but de passer aux problèmes 3D « réalistes ». Enfin, le volet Expérimental sera renforcé. Les avancées récentes de l'axe « Imagerie » seront synthétisées par des études couplant celles-ci (représentation parcimonieuse, projet Mégamicros, exploitation de la caméra d'imagerie sous-marine). Les interactions avec l'axe « Dynamique des Structures » seront amplifiées et de nouvelles avec l'axe « Aéroacoustique » sont envisagées. Un projet de chambre anéchoïque ou semi-anéchoïque sur le site de St Cyr (dans le cadre de la rénovation du bâtiment 11) a été déposé en ce sens par l'UFR d'Ingénierie.



### 1.3. Renforcer le potentiel humain

Ces objectifs seront portés bien évidemment par les personnels permanents de l'équipe, chercheurs et enseignants-chercheurs. Il conviendra d'inciter plus fortement nos collègues MCF et CR à co-encadrer des thèses et à passer rapidement leur HDR (1 seule HDR actuellement parmi les « rangs B »), afin de renforcer le potentiel d'encadrement de l'équipe et de leur assurer les meilleures opportunités d'évolution de carrière. L'équipe souffre d'un fort sous-effectif en terme de professeurs, avec 2 PR seulement au sein de MPIA. Un recrutement d'un troisième semble impératif. Du point de vue des thématiques, la priorité va à ce jour vers les axes « Imagerie » et « Aéroacoustique » qui n'ont pas bénéficié de recrutements récents et qui portent les activités expérimentales et numériques, particulièrement « chronophages », de l'équipe. Il convient également de noter l'importance du Master Sciences de l'Ingénieur, Spécialité Acoustique (en partenariat avec l'Université Paris Diderot) pour la visibilité de l'équipe auprès des étudiants, notamment futurs doctorants. En deuxième année, il accueille un effectif de 15 à 25 étudiants environ et l'investissement des membres de l'équipe dans ce Master, déjà très important, devra être poursuivi.

### 1.4. Développer les collaborations

Au niveau de l'Université Pierre et Marie Curie, l'équipe MPIA est déjà très fortement impliquée dans des collaborations actives et fructueuses avec plusieurs laboratoires de l'UPMC. Rappelons pour mémoire (cf partie bilan): IJLL, INSP, LIP, LPS, STMS. Cette recherche de collaborations « fructueuses et au plus près » est bien évidemment à poursuivre et nous l'espérons à amplifier. Les autres collaborations en dehors du périmètre UPMC, y compris au niveau international, seront bien entendu également encouragées. Dans tous les cas, ces coopérations visent, dans des projets de recherche de plus en plus fréquemment pluri-disciplinaires où l'Ingénierie est l'architecte de l'intégration des diverses disciplines, à acquérir les éléments qui ne sont pas de la spécialité de l'équipe ou de d'Alembert. Citons ainsi l'analyse mathématique, l'accès aux très grands moyens de calcul (TERA-100 du CEA-DAM via le projet de LRC), les données en biologie ou en géosciences, les dispositifs expérimentaux innovants non disponibles à d'Alembert, des liens forts avec l'applicatif dans le secteur de l'ingénierie pour la santé. Notons sur ce point qu'au-delà des collaborations déjà en cours sur la vectorisation des médicaments ou la croissance des tissus mous, des contacts sont établis avec l'Institut de la Vision et avec l'IHU A-ICM (Institut de Neurosciences Translationnelles). Remarquons enfin que la diversité des sources de financement actuelles de l'équipe (ANR, FUI, divers appels à projets, industrie, Europe, international) est une bonne garantie du maintien, voire espérons-le, de l'augmentation de celles-ci dans le futur.

### 1.5. Accroître la visibilité

Le positionnement de la thématique « Acoustique » au sein d'un Institut de Mécanique, comprenant à la fois Mécanique des Fluides et des Solides, est un atout majeur, permettant d'irriguer de manière croisée les différentes disciplines. Cette synergie positionne avec succès l'acoustique en interaction avec toutes les branches de la mécanique, aussi bien fluide que solide. Ainsi, par sa taille, sa productivité scientifique, son caractère généraliste (acoustique, ondes et dynamique dans les fluides et les solides, des infrasons aux ultrasons), l'équipe MPIA au sein de l'Institut Jean Le Rond d'Alembert est clairement un acteur majeur de la recherche en France. Au niveau régional, nous collaborons fréquemment avec les autres laboratoires d'acoustique de la région parisienne, avec une orientation forte vers la modélisation et la simulation numérique qui garantit notre spécificité. Par ailleurs, l'activité expérimentale clairement ciblée vers l'imagerie aérienne et sous-marine fait là aussi de MPIA un interlocuteur unique dans le paysage régional. Au niveau national, il est à noter que d'Alembert était jusqu'à très récemment la seule unité à adopter ce positionnement original, intégrant sur la durée les 3 composantes fluides + solides + acoustique. La création récente des Instituts Pprime à Poitiers et I2M à Bordeaux, ou du Labex Celya à Lyon, conduira on l'espère à renforcer les synergies entre acoustique et mécanique au sens large au niveau national. L'Institut Jean Le Rond d'Alembert et l'équipe MPIA devront continuer à jouer un rôle leader en ce sens.

## 2. Présentation détaillée des projets scientifiques par axes

### 2.1. Projets de l'axe « Aéroacoustique »

Le projet de l'axe « Aéroacoustique » est intégralement décrit dans le projet de l'opération transverse « Aéroacoustique » et n'est pas reproduit ici.

### 2.2. Projets de l'axe « Imagerie »

#### 2.2.1. Imagerie acoustique aérienne

L'équipe développe actuellement un système acoustique de réseau fondé sur une nouvelle technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) de microphones (ceux-ci intègrent les circuits de conditionnement et transmettent directement un signal numérique). Cette configuration permet d'envisager la gestion simultanée de quelques milliers de capteurs avec une distribution spatiale sans contrainte, éventuellement très étendue et pouvant s'adapter à des scénarios acoustiques très divers. Ce développement à forte valorisation industrielle (contribution de d'Alembert au projet Equipex vague 2 « Audible », non sélectionné - demande déposée de financement du projet ANR-émergence 'Mégamicros') permettra d'accroître très significativement les performances des techniques classiques de diagnostic en imagerie acoustique aérienne. Les applications en cours concernent l'analyse et l'identification de sources, la mesure exhaustive de caractéristiques en acoustique des salles (suite du projet ANR ECHANGE, exploitation des méthodes parcimonieuses). De nouvelles applications sont envisagées, telles l'imagerie synthétique de sources mobiles large bande ou l'imagerie d'écoulements aéroacoustiques. Le traitement de très grands flux de données, faisant appel aux techniques les plus récentes de programmation massivement parallèle, constituera un sujet à part entière.

L'holographie acoustique de champ proche bénéficiera aussi de ces nouveaux développements technologiques. Elle continuera à être exploitée et adaptée, notamment dans le cadre de la collaboration avec le laboratoire du Musée de la Musique. Le suivi vibro-acoustique d'instruments anciens et l'étude de fac-similés sont utiles aussi bien dans une perspective de conservation, que pour analyser le savoir-faire des luthiers et facteurs d'instruments. Deux pistes complémentaires doivent être développées : l'analyse modale expérimentale de structure par exploitation du champ acoustique impulsif, et l'holographie en temps réel.

#### 2.2.2. Imagerie acoustique sous-marine

Dans le domaine de la propagation non linéaire, le développement d'un code de calcul de rayonnement tri-dimensionnel suffisamment général pour prendre en compte des géométries originales d'antenne et des signaux transmis large bande doit être mis en place (lien avec la suite du FUI Paramills). Ce développement pourra se faire à partir d'outils numériques d'ores et déjà développés par l'équipe pour des applications en Aéroacoustique (code Flhoward par exemple). D'autre part, le résultat du dépouillement en cours des enregistrements visant à caractériser les sédiments au moyen d'une source non linéaire multifréquentielle (Acoustics 2012-ECUA) va orienter le contenu de la prochaine collaboration avec l'IFREMER sur ce thème.

La suite de l'ANR-ECHANGE concerne aussi la caméra d'imagerie sous-marine tridimensionnelle, visant à réduire le nombre de capteurs ou l'échantillonnage temporel des enregistrements. Le dispositif expérimental va être aussi exploité pour étudier des méthodes adaptatives de formation de voie (amélioration de la résolution et du contraste), ce qui n'a encore été jamais entrepris dans le contexte de l'acoustique sous marine 3D.

Une collaboration de recherche pourra éventuellement s'établir (demande de CRCT de J. Marchal en ce sens) entre l'IFREMER, l'ENSTA-Bretagne et l'équipe MPIA sur le thème de l'imagerie large bande.

#### 2.2.3. Problèmes Inverses

Les difficultés actuelles concernent le problème de l'adaptation du modèle à partir d'un objectif erroné, la démonstration de la dépendance entre la fonction coût, la quantité de régularisation, et la qualité sur la commande des sources ou sur la vitesse vibratoire du corps sonore en jeu, et enfin la quantification de la qualité des images acquises par inversion acoustique. Une première

collaboration avec le CNAM-Paris (M. Melon) est en cours, et la collaboration soutenue avec P. Arruda (Université de Campinas - Brésil) sera poursuivie. Un post-doctorant brésilien (P. Zavala) a déjà pu mettre en évidence par nos méthodes qu'un flux d'air sur un obstacle rigide conduisait à des sources majoritairement dipolaires, plutôt que monopolaires.

### 2.3. Projets de l'axe « Dynamique et Structures »

#### 2.3.1. Couplage de structures

Les études sur le couplage de structures seront poursuivies (avec M. H. Moulet, LAUM), portant sur une modélisation numérique élémentaire de trois structures couplées (un moteur d'avion accroché à une aile qui transmet ses vibrations au fuselage par exemple). Un dispositif expérimental « académique » sera réalisé pour tenter de maîtriser les incertitudes des paramètres d'interfaçage.

#### 2.3.2. Mécanismes bistables : processus d'actionnement statique et dynamique

Nous continuerons à explorer la dynamique de la poutre flambée afin de mettre en évidence un basculement par ondes acoustiques. Le processus dynamique de basculement ne pourra être réellement abordé que dans le cadre non linéaire. Conjointement, nous entreprendrons la validation de nos résultats par des essais expérimentaux. Dans ce but, nous avons conçu un banc d'essais pour (i) l'identification des modes propres de vibration de la poutre flambée et (ii) la mise en évidence du basculement par ondes acoustiques. Le banc d'essais sera instrumenté pour observer les scénarios de basculement grâce à l'utilisation d'une caméra rapide et d'un vélocimètre laser. Cette opération de recherche se prolongera vers l'étude de l'actionnement par éléments piézoélectriques distribués de manière optimisée. A l'appui de notre modélisation, des essais expérimentaux viendront conforter la faisabilité d'un tel processus de basculement du système bistable.

Une des motivations technologiques de l'étude de mécanismes bistables réside dans l'amélioration de l'ergonomie des interfaces homme-machine. Dans le domaine des interfaces tactiles, nous cherchons non seulement à déterminer la position d'un doigt sur une surface prédéterminée, mais également à produire un retour sensoriel confirmant l'activation de l'interface. Nous cherchons, en outre, à produire un retour haptique et plus particulièrement « vibro-tactile » localisé. Cette fonctionnalité se justifie d'une part parce qu'elle permet de matérialiser des boutons virtuels sur la surface et d'interagir avec une surface sans avoir besoin de la regarder. Pour certaines activités, la charge cognitive s'en trouve ainsi réduite. Ces systèmes peuvent être judicieusement exploités pour les surfaces tactiles du type matrice de Braille. Dans ce contexte, nous projetons des collaborations avec l'Institut de la Vision pour le développement d'interface Braille, et avec l'équipe des Interfaces Sensorielles du Laboratoire des Systèmes et Technologies (LIST) du CEA (Fontenay-aux-Roses) ou l'ISIR (UPMC) pour les applications aux micro-systèmes.

#### 2.3.3. Ondes guidées et vibrations en milieux piézoélectriques

Un phénomène observé expérimentalement dans certains cristaux ferroélectriques, aux applications prometteuses, est une polarisation induite significative via une déformation inhomogène. Ces observations nécessitent une modélisation fine en vue de la détermination des paramètres fondamentaux et de leur ordre de grandeur (collaboration avec FEMTO-ST).

#### 2.3.4. Structures et Forces configurationnelles

L'étude de la propagation d'ondes élastiques dans des matériaux non homogènes en espace et/ou en temps sera poursuivie. Les équations de bilan sont écrites sur la configuration matérielle, les notions de pseudo-momentum et de tenseur d'Eshelby sont introduites, les forces configurationnelles (ou termes source) contenant explicitement les variations matérielles. Deux axes originaux se dessinent.

1. La réalisation d'un matériau dynamique élémentaire (en collaboration avec l'équipe LAM, par exemple une barre 1-D à variation rapide en espace - par le biais de la masse linéique - et en temps - par le biais du module d'Young) et la validation expérimentale des effets de focalisation démontrés précédemment. La notion de dualité ondes - quasi-particules sera étendue à ce type de matériaux.

2. Cette approche duale ondes - quasi-particules sera appliquée à l'évaluation non destructive de matériaux ou de structures (MEMS, structures phononiques) en réflexion / transmission.

### 2.3.5. Structures fractales et ondes

En se basant sur une approche du « champ auto-similaire » telle que celle proposée ces dernières années pour des problèmes d'élasticité auto-similaire et de diffusion anormale en une dimension d'espace, on envisage d'aborder plusieurs problèmes physiques dont les lois constitutives sont auto-similaires et à plusieurs dimensions spatiales. Cela permettra d'aborder des problèmes d'interactions entre champ électromagnétique et matériaux aussi bien que de modéliser des champs couplés par exemple en électro-élasticité. Cette approche donne d'ores et déjà la loi de Coulomb en milieux auto-similaires et doit donc permettre de déduire toute une gamme de lois électrodynamiques en milieux auto-similaires.

### 2.3.6. Contrôle de santé

Les perspectives en contrôle de santé se focalisent sur la modélisation et l'utilisation de matériaux composites intelligents dans une boucle de contrôle afin de répondre à des problématiques de type industriel (cartes électroniques embarquées soumises à de forts niveaux vibratoires, structures composites présentant des défauts de délaminage...).

### 2.3.7. Structures actives et instruments de musique « intelligents »

L'un des projets (démarrage prévu début septembre 2012) concerne l'application des stratégies de contrôle actif (modélisation et utilisation des structures actives) aux instruments de musique en collaboration avec Adrien Mamou-Mani (STMS), dans le cadre d'une ANR « retour post-doc ».

### 2.3.8. Modélisation thermomécanique de polymères ioniques électro-actifs

Nous envisageons de nous intéresser à une nouvelle classe de matériaux électro-actifs : les polymères électro-actifs. Une ébauche de modélisation a été réalisée (en collaboration avec l'UVSQ), toutefois, nous envisageons de renforcer notre étude sur différents aspects. Le matériau est assimilé à un milieu poreux élastique (chaînes de polymères) saturé par une solution ionique (solvant + cations). La modélisation proposée s'appuie sur un processus de moyenne des bilans thermomécaniques de chaque composant. Nous en déduisons la loi rhéologique pour l'expression du tenseur des contraintes. Ce résultat est complété par (i) l'équation de Nernst-Planck généralisée et (ii) la loi de Darcy améliorée mettant clairement le phénomène d'osmose attendu (mouvement de transport lié au champ électrique appliqué). Les coefficients phénoménologiques sont exprimés à l'aide des paramètres physiques des composants (concentration, diffusion de masse, charges électriques, etc...). Les applications visées se situent essentiellement dans le domaine de l'actionnement et des systèmes de récupération d'énergie.

## 2.4. Projets de l'axe « Biomécanique »

### 2.4.1. Croissance, stabilité et morphogenèse des tissus mous

La modélisation de la plaque de croissance dans les os longs doit être améliorée par l'exploitation de modèles complexes tenant compte de la microstructure de la plaque (réarrangements structuraux, prolifération et évolution des cellules de cartilage). Par ailleurs, d'une manière générale, la modélisation thermo-mécanique du couplage entre croissance volumétrique et croissance surfacique d'une part, et l'évolution configurationnelle de la croissance tangentielle d'autre part, doit être formulée. Des applications exemplaires concernent l'apparition d'excroissances en kératine (par exemple, les cornes de rhinocéros et d'antilopes) et le développement de la coquille de coquillages de différents types (nautilaire, etc...) (en coopération avec L. Preziosi, Turin). Par L'étude des caractéristiques de croissance et de remodelage dans les systèmes biologiques se poursuivra avec le développement des modèles mathématiques multi-échelles intégrant un couplage fluide-structure. En particulier, on s'intéressera à la phase vasculaire des tumeurs solides, où la forte hétérogénéité des propriétés de transport microscopiques dans les vaisseaux tumoraux affecte fortement la capacité de pénétration des traitements anti-cancérigènes (en coopération avec D. Ambrosi, Milan et A. Quarteroni, EPFL Lausanne). Ce projet pourra s'articuler également avec les développements de l'équipe sur la vectorisation de ces traitements par agents de contraste ultrasonores nanométriques (voir ci-dessous).

#### *2.4.2. Ondes de choc dans les tissus mous*

Le comportement général des ondes de choc élastiques dans les solides mous, et en particulier les tissus biologiques, sera étudié par des approches théoriques et expérimentales. Les ondes de cisaillement dans ces milieux ont la particularité d'avoir une vitesse de propagation très lente comparée aux ondes de compression ou aux métaux (inférieure de trois ordres de grandeur), ce qui conduit à des nombres de Mach très élevés, d'ordre un. Des techniques ultrasonores (en collaboration avec J.-L. Gennisson, Institut Langevin) et optiques (caméra rapide de la plateforme d'imagerie de d'Alembert) sont en cours d'élaboration pour mesurer les déplacements dans ces milieux et pour générer des images à haute cadence de la propagation des ondes. Des modèles théoriques et numériques (différences finies, volumes finis, Galerkin Discontinuu) de propagation du choc dans des géométries complexes (boîte crânienne) seront développés. Combinés avec les expériences, ils seront utilisés afin de déterminer les paramètres non linéaires. Des applications à la prédiction de lésions cérébrales résultant de traumatismes crâniens sont envisagées. Diffusion multiple, du linéaire vers le non linéaire

Le couplage fort non linéaire / diffusion multiple va s'amplifier par le biais du Projet DiAMAN (ANR Blanc 2011, avec Institut Langevin et MSC, Univ-Paris 7). L'objectif est d'étudier la propagation non-linéaire des ondes ultrasonores en régime de diffusion multiple dans un gel incluant des bulles, la non-linéarité étant introduite par la dynamique des bulles. En régime faiblement non linéaire (génération des harmoniques), on définira un paramètre de non-linéarité adapté. En régime fortement non-linéaire (ondes de choc), on simulera numériquement la propagation. On s'intéressera notamment à déterminer comment les non-linéarités agissent sur la cohérence du signal propagé. Les applications sont orientées vers la propagation dans les tissus mous et l'imagerie médicale (cavitation).

#### *2.4.3. Agents de contraste nanométriques pour la thérapie*

La modélisation des nACUs se poursuivra, en enrichissant les modèles: polydispersion, compressibilité de la coque, champ rétro-diffusé, réponse harmonique faiblement non linéaire... Les effets d'agrégation près des parois, et de concentration élevée seront simulés numériquement par adaptation des codes développés pour les milieux à bulles. L'activation ultrasonore de la délivrance de médicaments sera estimée par la possibilité de porter le cœur liquide à ébullition par ultrasons focalisés de puissance. Les modèles théoriques aideront à une conception optimisée des nACUs. On intégrera les développements réalisés par ailleurs dans la modélisation de la vascularisation des tumeurs (projet NABUCCO, INSERM – plan Cancer, sélectionné en juin 2012).



## VI. Axe transverse « Aeroacoustique »

La période couverte par l'actuel contrat quinquennal a été celle de l'émergence. La période qui va s'ouvrir (2014-2018) sera celle de la stabilisation et du renforcement de cet axe transverse. Les actions engagées sont récentes et encore d'actualité. Donc la structure choisie pour le projet est la même que celle présentée dans le bilan. Dans la suite de ce document, nous présentons les principales évolutions de ces actions.

### 1. Propagation d'ondes en atmosphère turbulente

Comme cela a été souligné dans la partie bilan, un nombre important d'études sur la propagation non linéaire d'ondes acoustiques dans l'atmosphère a été réalisé en partenariat avec d'autres institutions. Dans le cadre de la propagation infrasonore, un projet de création de Laboratoire de Recherche Commun (LRC) est en cours, en partenariat avec le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA-DAM) et le Laboratoire de Mécanique de Fluide et d'Acoustique (LMFA) de l'Ecole centrale de Lyon (UMR 5509). Le but de cette action est à la fois de structurer les acteurs nationaux dans ces thématiques mais également d'apparaître comme un acteur majeur au plan international. Le cadre de ce LRC comportera (s'il est accepté par les différentes tutelles) les problématiques décrites dans la partie bilan (sources, propagation, modélisation de l'atmosphère), auxquelles viendra s'ajouter un axe prise en compte des incertitudes. De plus, l'objet d'étude ne sera pas uniquement les ondes de choc acoustiques mais plus généralement, les infrasons et les ondes de gravité. Les personnes concernées à l'institut sont principalement celles ayant déjà participé à l'action décrite dans le bilan, mais d'autres viendront également s'adjoindre au projet, notamment pour la partie incertitudes, ce qui augmentera à terme le nombre de personnel impliqué dans l'axe transverse aéroacoustique.

### 2. Localisation des sources aéroacoustiques

Les premières études numériques ont montré qu'il est possible de localiser le son produit par l'écoulement lui-même dans des configurations bi-dimensionnelles relativement simples (couche de mélange plane). D'un point de vue applicatif, il est intéressant d'étendre la méthode à des écoulements plus complexes en étendant en premier lieu la méthodologie aux configurations tri-dimensionnelles. Par ailleurs, des études plus fondamentales sont en cours et vont se poursuivre au cours du prochain contrat quinquennal comme le développement de méthodes de super résolution au sein des écoulements afin de localiser des zones d'étendue inférieure à la longueur d'onde ou encore l'adaptation d'autres méthodes classiques d'imagerie à la prise en compte d'écoulement. D'un point de vue plus général ces études s'inscrivent dans le cadre d'une volonté de développer un axe d'imagerie numérique des milieux en écoulement. Cette volonté n'est pas de se substituer aux méthodes expérimentales traditionnelles mais de les compléter astucieusement en dépassant certaines limitations qui leur sont inhérentes. On peut ainsi espérer tirer parti des informations disponibles différentes en expérience (peu de points spatiaux mais des temps longs) et en numérique (nombreux points spatiaux mais des temps d'acquisition limités). Cet axe de recherche devrait être fécond tant sur le plan fondamental que celui des applications. Des contacts avec des partenaires industriels (Dassault, ONERA) sont déjà établis. Par ailleurs, le projet LaBS devrait entrer dans une deuxième phase de développement, à l'échelle européenne.

### 3. Acoustique et interactions fluides/structures

La prise en compte des phénomènes d'interaction fluide-structure en acoustique est également un projet que nous souhaitons développer. Comme il a été souligné dans la partie bilan, les objets d'études sont variés et souvent en relation directe avec le monde industriel. Cela témoigne des enjeux sociétaux sous-jacents à cette problématique. Là aussi, l'idée est de tirer parti des synergies existant à l'institut autour de ces thèmes pour être capables soit de modéliser des situations extrêmement complexes car faisant intervenir des phénomènes compliqués couplés entre eux

(réduction du bruit automobile, compréhension du BSN, production du son dans les instruments de musique), soit de proposer des solutions innovantes et de participer aux transferts technologiques vers les entreprises (débitmétrie ultrasonore).



## VII. Axe Transverse « Interactions fluide-structure »

L'interaction fluide-structure (IFS) concerne l'étude du comportement statique ou dynamique de toute structure déformable en présence d'un fluide. Dans ce contexte, deux actions, structurées par des collaborations entre des membres de différentes équipes de l'institut, ont émergées au cours du dernier quadriennal.

D'une part, l'action « Elastocapillarité » (FCIH-MISES) s'appuie sur le développement d'activités expérimentales pour la compréhension des mécanismes d'interactions fluide-structure à très petites échelles gouvernés par les forces de tension superficielle. D'autre part, les risques d'apparition d'instabilité de flottement de structures soumises à des écoulements à haute vitesse sont étudiés dans l'action « Aéroélasticité » (FRT-MISES-MPIA) au moyen de modèles numériques d'IFS robustes.

### 1. Aéroélasticité

Par nature, toute structure profilée est susceptible de subir des sollicitations aéroélastiques importantes relatives au couplage dynamique entre les forces élastiques et l'écoulement instationnaire. Ces effets vibratoires peuvent non seulement se traduire par une dégradation des performances aérodynamiques, mais aussi, par une fatigue prématurée de la structure ou par la ruine immédiate de cette dernière. Dans le cadre du prochain contrat quinquennal, l'émergence d'une action « Aéroélasticité » au sein de l'axe thématique IFS constitue l'opportunité de développer un thème de recherche transverse pour la prédiction des risques aéroélastiques dans le cadre d'applications multi-physiques en ingénierie du vent et en aéronautique.

La mise en œuvre de cette action repose sur la synergie d'expertises présentes à l'Institut dans les domaines de la modélisation et du développement de logiciels de simulation numériques pour des problèmes de dynamique de structures composites et de leur conception optimale, de mécanique des fluides compressibles et de quantification d'incertitudes. Ce choix de stratégie scientifique doit permettre d'élargir sensiblement le périmètre applicatif d'outils d'analyse et de conception aéroélastiques optimales, tout en présentant une rupture significative avec les approches conventionnelles historiquement basées sur des environnements purement déterministes et linéarisés.

Le couplage de techniques de quantification d'incertitudes avec des codes de simulation numériques aéroélastiques contribue à l'enrichissement des modèles aéromécaniques par la connaissance d'informations statistiques sur la vitesse critique de flottement en fonction des aléas inhérents au processus de conception de la structure (propriétés mécaniques et géométriques) ou à l'écoulement [ACLa2.80, ACLa2.131, ACLb2.3]. Pour cela, les simulations aéroélastiques déterministes peuvent s'appuyer sur des représentations CFD à haute fidélité de l'écoulement instationnaire en présence de parois mobiles ([ACLa2.45, ACLa2.130], thèse CIFRE EDF, Y. Jus 2011, thèse ANR-COSI, S. Labit, 2012).

*L'optimisation aéromécanique de structures composites dans un contexte fiabiliste* est principalement limitée par le coût relatif au nombre d'appels au modèle numérique. Il est alors impératif d'avoir recours à des métamodèles stochastiques lors de la formulation du problème d'optimisation multi-objectif sous incertitudes [ACLa2.19]. Dans ce contexte, l'intégration d'un propagateur non-intrusif par collocation stochastique creuse, dans un environnement d'optimisation avancé [ACLa4.99, ACLa4.154, ACLa4.156] constitue une approche particulièrement innovante pour le traitement de problèmes de conception aéroélastique de structures composites. D'autre part, la possibilité de concevoir de manière optimale la distribution des propriétés mécaniques anisotropes dans les structures composites stratifiées (thèses CIFRE Ségula, A. Jibawy et C. Julien, 2010), ouvre la voie à l'optimisation aéroélastique des structures minces (plaques et coques) en couplant les techniques d'optimisation topologique et la représentation polaire de l'anisotropie en

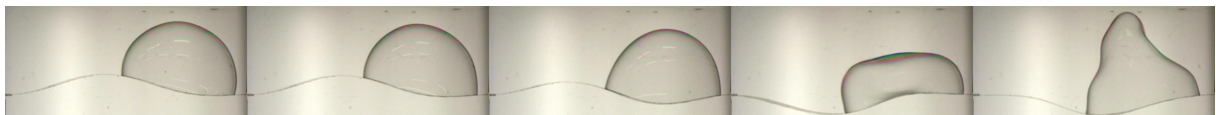
deux dimensions [ACLa4.115, ACLA4.163c].

**En dépit du fait que les matériaux piézoélectriques sont activement utilisés** pour réduire les vibrations de structures souples, la modélisation de leur comportement pour la suppression d'oscillations auto-entretenues en présence d'effets aéroélastiques non-linéaires forts (tel que l'impact d'une onde de choc sur une plaque composite) n'est pas encore correctement maîtrisée. Bien que l'objectif final de cette action réside dans la mise au point de méthodes de détection et de contrôle de l'instabilité de flottement, il sera tout d'abord nécessaire de procéder à l'intégration de modèles piézoélectriques évolués [G5.53] dans une formulation fréquentielle du problème aéroélastique afin de pouvoir dériver une méthode de positionnement optimale des patchs piézoélectriques en fonction de la nature des modes aéroélastiques coalescents. Ces études pourront notamment s'appuyer sur les travaux actuels conduits sur des problèmes de bistabilité et de contrôle de forme pour des configurations de type plaque [ACLa5.69] ou poutre ([ACLa5.49], thèses de P. Cazottes 2009 et de B. Camescasse 2012).

## 2. Élastocapillarité

Les interactions fluide-structure à échelle macroscopique sont souvent associées à des sollicitations de la part de l'inertie du fluide : vibrations de câbles, de cordes vocales, battement d'un drapeau, etc... À très petite échelle pourtant, un autre type d'interaction entre fluide et solide peut prédominer : il s'agit de l'interaction élastocapillaire. Cette fois-ci le vecteur de l'interaction est la tension de surface. Les déformations engendrées par la capillarité ont parfois des conséquences sérieuses, par exemple l'effondrement pulmonaire néonatal ou encore l'endommagement de micro-structures. La compréhension des mécanismes sous-tendant l'élastocapillarité est donc une clé pour mieux appréhender/prédire le comportement de ce type de systèmes, mais elle permet aussi à plus long terme de les exploiter à des fins de microfabrication par exemple (auto-assemblage d'objets 3D tels que micro-systèmes, micro-circuits, pixels, ou capsules pharmaceutiques).

Située à l'interface entre solide et fluide, l'élastocapillarité est une discipline qui requiert des expertises différentes et complémentaires. Pour cela, l'Institut d'Alembert a de réels atouts car il s'agit d'un laboratoire à la confluence des compétences (élasticité des structures minces, dynamique de l'impact de goutte) et des approches (développement de modèle, expériences simples, calcul numérique).



**Bistable élastocapillaire.** Une bulle de savon est déposée sur une lamelle métallique (longueur 24cm) flambée en arche haute. L'action conjuguée de la pression de Laplace et des forces de ménisque permet de faire claquer la structure pour la faire basculer en arche basse. L'intervalle entre chaque image est 80 ms. (Fargette, Neukirch & Antkowiak, en préparation)

L'action Élastocapillarité a émergé au sein de l'Institut au cours du dernier quadriennal et s'est concrétisée avant tout par un socle de collaborations entre les équipes MISES et FCIH, qui ont été catalysées par le développement d'activités expérimentales dans la salle Savart. Celles-ci ont permis notamment de mettre en évidence et de comprendre un mécanisme de sélection de forme dynamique de repliement permettant de fabriquer un micro-objet 3D en quelques millisecondes par impact de goutte d'eau à la surface d'une membrane de polymère (thèse M. Rivetti ; Antkowiak et al., 2011) ou encore la possibilité de déclencher des instabilités élastocapillaires de claquage dans des bistables ou tiges élastiques précontraintes (voir figure). Ces actions conjointes ont permis d'obtenir des éclairages originaux sur ces phénomènes de dynamique élastocapillaire en combinant expériences simples, modèles, et codes numériques innovants, c'est-à-dire en bénéficiant de la synergie entre les composantes de l'Institut.

Au cours du prochain quadriennal, ces actions poursuivront leur consolidation notamment par le biais de thèses (thèse H. Eletto 2012-2015), mais aussi de partenariats soit déjà effectifs avec l'ESPCI (collaboration Audoly-Neukirch/Bico-Roman ; étude de flambage capillaire, Neukirch et al., 2007 ; adhésion capillaire de film sur des objets courbes, Hure et Audoly, en préparation), le laboratoire EGS du MIT (collaboration Audoly-Antkowiak/Pedro Reis), le Stone Lab de Princeton University (collaboration Protière/Stone sur le mouillage de réseaux de fibres, poils ou plumes, Duprat et al, 2012), soit de partenariats en cours de réalisation (collaboration Antkowiak-Neukirch/Vollrath avec le Silk Group département de zoologie d'Oxford University sur les phénomènes élastocapillaires dans les soies d'araignée).

### 3. Bibliographie

- 1- S. Neukirch, B. Roman, B. Gaudemaris and J. Bico, « Piercing a liquid surface with an elastic rod : Buckling under capillary forces », J. Mech. Phys. Solids 55(6), 1212-1235 (2007)
- 2- A. Antkowiak, B. Audoly, C. Josserand, S. Neukirch and M. Rivetti, « Instant fabrication and selection of folded structures using drop impact », Proc. Natl Acad. Sci. USA 108(26), 10400 (2011)
- 3- B. Audoly, « Localized buckling of a floating Elastica », Phys. Rev. E 84(1) (2011).
- 4- M. Rivetti and S. Neukirch, « Instabilities in a drop-strip system: a simplified model », Proc. R. Soc. A 468, 1304-1324 (2012)
- 5- C. Duprat, S. Protière, A.Y. Beebe and H.A. Stone, « Wetting of flexible fibre arrays », Nature 482, 501-513 (2012)
- 6- J. Hure and B. Audoly, « Capillary buckling of a thin elastic film adhering on a sphere », Soumis
- 7- M. Rivetti and A. Antkowiak, « An elastic meniscus », En préparation
- 8- A. Fargette, S. Neukirch and A. Antkowiak, « Elastocapillary Snapping », En préparation

## **VIII. Axe transverse « biomécanique »**

Le projet s'articule sur le développement des activités de modélisation mécanique avec des applications au vivant en utilisant les expertises des équipes FCIH, MISES, MPIA, FRT et LAM.

Les trois principaux objectifs sur la nouvelle période sont

1. de fédérer les activités de l'Institut dans un projet commun avec une forte identité et une visibilité de l'extérieur car actuellement les collaborations entre les équipes ne sont organisées sinon qui découlent des interactions au gré des rencontres/affinités.
2. de continuer le développement des interactions entre laboratoires, en particulier avec ceux du pôle médical de l'UPMC, et là encore de manière organisée.
3. de développer nos partenariats avec des organismes œuvrant dans le domaine de la santé et du handicap (Institut de la Vision, Institut National des Jeunes Sourds, etc.).

Les outils définis pour atteindre les objectifs sont

1. la participation au nouveau GDR « Mécanique des Matériaux et de fluides biologiques » (2013-2016)
2. la participation de l'équipe LAM au projet PANAM (2012-2015), financé par l'ANR, spécifiquement consacré au handicap (handicaps moteurs et surdité)
3. le développement de nos collaborations avec l'ISIR (interaction musicien/instrument et multimodalité sensorielle, notamment par l'ajout de retour haptique)
4. la participation au projet de création d'un Département Hospitalo-Universitaire (DHU) alliant Mécanique et Médecine de l'UPMC, et
5. le développement d'une formation « génie Biomédical » basée sur les compétences de l'Institut dans l'interaction fluide-structure appliquée sur les systèmes vivants.

## **ANNEXE**

Liste des bénévoles, émérites et visiteurs de longue durée ayant rempli une fiche individuelle 2.3.