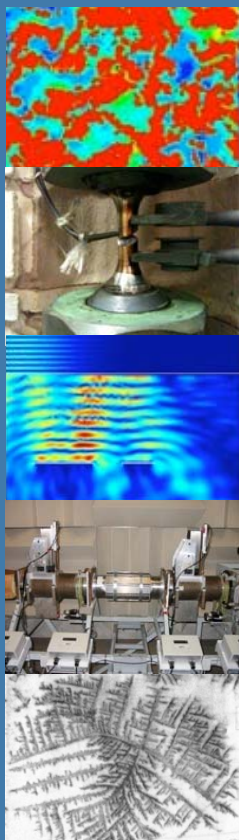


# Rapport d'activités du Laboratoire Roberval

2006 - 2010

Campagne d'évaluation  
2012 - 2015

## Partie II – Projet scientifique



*Unité de  
Recherche en  
Mécanique*

*UMR 6253*

# SOMMAIRE

<b>1. AUTO-ANALYSE</b> .....	<b>1</b>
1.1 Points forts .....	1
1.2 Points faibles .....	3
1.3 Opportunités .....	4
1.4 Risques .....	5
<b>2 .PROJET ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE L'UNITÉ</b> .....	<b>6</b>
2.1 Axe en émergence : Maîtrise des aspects stochastiques .....	7
2.2 Axe en émergence : Matériaux composites .....	8
2.3 Axe en émergence : Systèmes intégrés .....	10
2.3.1 Développement de systèmes mécatroniques compacts .....	10
2.3.2 Ingénierie de systèmes : méthodes et outils .....	12
2.3.3 Synthèse .....	13
<b>3. LES PERSPECTIVES DÉTAILLÉES DES ÉQUIPES</b> .....	<b>14</b>
3.1 Perspectives du thème Mécanique Numérique .....	14
3.2 Perspectives du thème Acoustique et Vibrations .....	17
3.3 Perspectives du thème Matériaux et Surfaces .....	21
3.3.1 Morphologie et mécanique des surfaces et interfaces .....	21
3.3.2 Endommagement et dégradation des surfaces et interfaces ...	25
<b>4. MISE EN ŒUVRE</b> .....	<b>28</b>
4.1 Les moyens humains .....	28
4.2 La politique d'animation de l'Unité .....	28
4.3 Le schéma de financement du projet présenté .....	29
4.4 Organisation fonctionnelle du projet présenté.....	29
4.5 Hygiène et sécurité .....	30

# Campagne d'évaluation vague B 2012-2015

## Unité de recherche : Laboratoire Roberval

### Partie II : Projet scientifique

#### 1 AUTO-ANALYSE

##### 1.1 POINTS FORTS (ÉLÉMENTS INTERNES QUI VONT AIDER AU CHOIX ET À LA RÉALISATION DU PROJET)

###### **SUR LE PLAN DE LA GESTION ET DU MANAGEMENT :**

Le Laboratoire Roberval (Laboratoire de Recherche en Mécanique, Matériaux et Acoustique, UMR 6253) regroupe les enseignants chercheurs des deux départements de l'Université de Technologie de Compiègne : Génie Mécanique et Génie des Systèmes Mécaniques. La proximité de la culture scientifique des deux départements, la complémentarité des domaines de recherche et le partage des enseignements rendent ce regroupement naturel.

La cohésion de l'ensemble est assurée par l'émergence des structures transversales de recherche, impliquant à des degrés variables les trois équipes du Laboratoire. La vie collective est régulée par des séances fréquentes du Conseil du Laboratoire comprenant des représentations équilibrées des trois thèmes dont les délibérations sont largement diffusées. L'animation scientifique se fait également à la fois au niveau des thèmes et au niveau du Laboratoire, notamment par le biais du séminaire hebdomadaire.

Le prélèvement de 10% sur les rentrées contractuelles permet au Laboratoire de mener une politique d'affectation de moyens, décidée de manière collective en Conseil de Laboratoire. Les investissements mi-lourds sont réalisés au rythme annuel, de manière cyclique pour assurer le niveau d'équipement convenable des trois thèmes. Tout en laissant un degré d'autonomie important aux équipes, la politique du Laboratoire vise à encourager la transversalité, notamment par la mise en commun de gros équipements. A titre d'exemple, les investissements importants dans les moyens de calcul intensif (plus de 300 K€) ont entraîné une dynamique d'ensemble, et certains responsables de projets affectent dorénavant spontanément au centre de calcul leur part de budget consacré à l'informatique. Cette dynamique va au delà du Laboratoire et a permis de recruter un informaticien (IE CNRS) pour la maintenance des moyens communs, à 50% avec l'unité de recherche en biomécanique.

La politique de recrutement vise à attirer les futurs leaders scientifiques, toutefois elle doit être établie en concertation avec les deux départements, notamment en tenant compte des besoins en enseignement, pas toujours compatibles avec les axes de recherche traditionnels du Laboratoire. L'émergence de nouveaux axes prospectifs vise entre autres à concilier cette exigence avec le souci d'éviter une dispersion thématique. Les recrutements extérieurs sont privilégiés au niveau des maîtres de conférences, le recrutement des professeurs est partagé entre la promotion et le recrutement externe. Le Laboratoire réussit pour l'instant à renouveler les départs, en renforçant des compétences inter thèmes.

###### **PRODUCTION SCIENTIFIQUE :**

Le Laboratoire comptabilise uniquement les publications ACL parues et référencées par Web of Science (WoS) et ScienceDirect, à l'exclusion de toute autre production. Les articles parus mais pas encore référencés, se trouvent dans la liste ACLN et ACTI et peuvent changer de statut une fois référencés. Les ouvrages, chapitres d'ouvrages, revues reconnues dans le domaine, etc., entrent en revanche en compte pour l'évaluation individuelle des enseignants-chercheurs, notamment pour le critère produisant/non produisant. Pour la période 2006-septembre 2010, le taux de publication annuel moyen est de 2.52 publications ACL par ETP titulaire recherche. Cette moyenne, qui cache évidemment des disparités importantes, peut être considérée comme très bonne pour un laboratoire qui souffre d'absence de chercheurs à temps complet ; on peut noter la présence d'un seul non publiant parmi les titulaires.

## **LES MOYENS :**

La croissance des ressources contractuelles est accompagnée d'un changement d'origine des crédits. Un nombre croissant de projets sur fonds publics FUI, FEDER, ANR, etc., et un taux significatif de succès dans les appels d'offre témoigne d'une part de l'intérêt des pouvoirs publics pour soutenir nos axes de recherche et d'autre part permet de rassembler des fonds pour le développement des compétences en cohérence avec notre politique scientifique. Par exemple deux ANR « jeunes chercheurs » ont permis de soutenir la thématique de modélisation des discontinuités fortes et le développement des moyens expérimentaux aux nano échelles.

La mise en place de trois axes en émergence : « Maîtrise des aspects stochastiques en mécanique et en acoustique », « Matériaux composites » et « Systèmes intégrés en mécanique » vise à renforcer des synergies inter thème, en adéquation avec des orientations scientifiques et des investissements matériels significatifs, notamment dans le domaine des composites tissés.

## **RAYONNEMENT :**

### **Au niveau local :**

La mécanique représente 40% des forces de l'UTC en termes de personnels et d'étudiants formés. Les membres du Laboratoire sont fortement présents dans les instances de l'UTC : deux professeurs élus au Conseil d'Administration, 4 personnes (2HDR, un professeur, un maître de conférences) au Conseil Scientifique, le directeur adjoint et la responsable d'un des trois TRI (thèmes de recherche inter laboratoire) de la Fédération SHIC (Systèmes Hétérogènes en Interaction) regroupant les UMR de l'UTC, les directeurs des deux départements de mécanique et d'une spécialité du Master, les responsables des PPF. Le Laboratoire obtient en moyenne l'attribution de 3 bourses Ministère par an par l'Ecole Doctorale de l'UTC.

### **Au niveau régional :**

Le Laboratoire est bien positionné dans les deux pôles de compétitivité à vocation mondiale : iTrans et Industrie et Agro Ressources. Le Laboratoire est un partenaire privilégié de la Région Picardie, avec un nombre important de projets financés. Ces projets sont particulièrement précieux, car libres de contrainte industrielle, ils permettent de renforcer les compétences propres du Laboratoire. Les CPER « nouveaux matériaux et moyens de production pour l'aéronautique » et « intermodalités et transports innovants » ont permis d'équiper le Laboratoire en moyens lourds de mise en œuvre et de caractérisation de composites et en moyens de mesure et d'expérimentation en acoustique et en vibration.

Des relations étroites avec des centres de recherche des grands groupes situés en Picardie (Arcelor Mittal, Inergy, Valeo, Faurecia, Saint Gobain, Montupet,...) permettent de développer des partenariats stables et de longue durée. La création de l'Institut de mécatronique est un exemple de ce type de partenariat, en mettant en œuvre une collaboration avec Poclain Hydraulics, le CETIM et la Région Picardie pour financer un ensemble de chaires dont la première, sur l'hydraulique de puissance, démarre fin 2010.

### **Sur le plan national :**

Le Laboratoire est présent dans le paysage national des laboratoires de mécanique et d'acoustique. Les membres du Laboratoire sont présents dans les comités éditoriaux de revues, dans les directions éditoriales, dans les instances exécutives des associations savantes (AFM, SFA, CSMA, ...). Le Laboratoire est également représenté dans les instances nationales de la recherche : ANR, AERES, CNU, CoNRS, etc., ainsi que dans les conseils scientifiques industriels (ESI, CETIM, ...) et de pôles de compétitivité (iTrans, Systematic). Le laboratoire commun avec le CETMEF est également un moyen d'interface avec une communauté voisine qui permet de bénéficier des synergies entre la mécanique numérique et les fluides environnementaux. Un membre du Laboratoire a reçu le Prix de l'Industrie de la Société Française d'Acoustique.

### **Sur le plan international :**

Au delà des liens historiques avec les pays du Maghreb, le Laboratoire développe activement la collaboration avec la Chine. En complément de l'UTSEUS (une initiative commune de l'UTC et de l'Université de Shanghai), un Groupe Commun de Recherche a été créé avec NPU (Northwestern

Polytechnic University à Xian) avec un séminaire annuel qui a lieu alternativement à Compiègne et à Xian. Cette source de notoriété permet au Laboratoire de recevoir un flux continu de doctorants chinois, financés par le gouvernement chinois. Des échanges réguliers de professeurs et d'étudiants ont lieu avec l'université de Chiba au Japon, l'Université de Santiago du Chili, l'École des Mines de Cracovie, ISVR à Southampton, etc. Le positionnement des membres seniors dans les instances internationales reste à travailler, pour compléter leur visibilité scientifique.

## **LA POLITIQUE SCIENTIFIQUE :**

Le Laboratoire possède une identité propre bien affirmée au sein de l'UTC, en complémentarité avec les autres UMR avec lesquelles il forme une Fédération. Compte tenu de la spécificité régionale, le Laboratoire est très bien placé et est identifié comme centre de compétences en mécanique, matériaux et acoustique en Picardie. La politique scientifique consiste à concilier le rôle de partenaire « généraliste » régional avec des spécificités fortes sur le plan national, tout en se différenciant des autres laboratoires de mécanique, généralement situés dans les grandes villes universitaires. Des exemples de ce positionnement concernent la spécialisation dans la caractérisation des surfaces sous contrainte et en température des matériaux métalliques, les utilisations de l'approximation diffuse en calcul, maillage et l'optimisation, ou les travaux sur l'équation de Galbrun et le traitement de signaux en vibroacoustique.

Les trois domaines du Laboratoire : matériaux et surfaces, mécanique numérique et acoustique et vibrations nous placent dans un contexte favorable pour des collaborations croisées thématiques ou par partage des équipements. L'objectif de couplage entre l'expérimentation et le numérique est réalisé à travers les recrutements croisés, avec pour l'objectif de considérer le numérique comme une technique expérimentale parmi d'autres. Les travaux sur la corrélation d'images ainsi que la simulation intensive de la proche surface visent cet objectif en mettant en jeu les collaborations entre les leaders seniors et les jeunes chercheurs récemment recrutés.

Le Laboratoire a réussi à réduire le nombre d'axes de recherche, source d'un certain manque de lisibilité par le passé, leur nombre étant maintenant limité à deux par thème. Les nouveaux axes prospectifs, qui seront mis à l'essai au cours du quadriennal apparaissent de manière transversale, avec des thématiques et des responsables clairement identifiés. L'objectif en est de dégager des thématiques nouvelles, en phase avec l'évolution du paysage scientifique et du milieu socio-économique.

## **LES LOCAUX :**

Le laboratoire situé sur le même site de Royallieu a réussi progressivement le regroupement de la majorité des personnes au sein du même bâtiment H du Centre de Recherches : la Mécanique Numérique et les Matériaux ont été réunis au cours du quadriennal précédent, puis des adaptations récentes ont permis d'aménager des locaux pour accueillir l'Acoustique et Vibrations. Cette dynamique a besoin d'être poursuivie pour les quelques personnes qui restent relativement éloignées, le contact quotidien facilitant des synergies.

## **1.2 POINTS FAIBLES (ÉLÉMENTS INTERNES QUI VONT PÉNALISER LE PROJET) :**

### **SUR LE MANAGEMENT :**

Le point le plus faible du Laboratoire est l'absence de chercheurs CNRS. La politique d'attraction de bons candidats est historiquement insuffisante et ne fait pas partie pour l'instant de la culture du Laboratoire, contrairement aux autres UMR de la Fédération SHIC de l'UTC.

La politique de recrutement des enseignants-chercheurs basée sur la logique des deux départements impose une contrainte supplémentaire qui pèse parfois sur les orientations scientifiques. Le renforcement des compétences scientifiques est mis en balance avec les objectifs d'enseignement en dehors des thèmes traditionnels du Laboratoire.

### **LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE :**

Les nouveaux critères d'évaluation de la production scientifique pénalisent les travaux de qualité publiés dans des revues non reconnues par les instances d'évaluation. L'incitation à publier dans des revues de qualité doit être renforcée pour une meilleure reconnaissance et une visibilité mesurée par des indicateurs chiffrés.

## **LES MOYENS :**

Les moyens financiers du Laboratoire sont significatifs et les montants des contrats individuels sont de bon niveau. Toutefois, le grand nombre de contrats importants nécessite un niveau de structuration supérieur qui se heurte au manque de personnel administratif et de valorisation.

La quasi absence du Laboratoire, et plus généralement de l'UTC, dans les contrats européens résulte en partie du fort taux de succès et d'abondance de ressources nationales, mais aussi d'une certaine lassitude vis-à-vis de la lourdeur des dossiers et de la croissance des charges administratives.

Le manque de personnel administratif, l'absence de personnel de gestion et de valorisation se répercute fortement sur la réactivité du Laboratoire vis-à-vis de multiples sollicitations dont le Laboratoire fait l'objet. Le remplacement programmé du secrétariat de direction (assuré à 80% actuellement) annonce une phase de transition délicate, qui, même réussie, ne permettra pas de résoudre le problème de la gestion des ressources de l'unité.

La même remarque concerne les techniciens, dont le nombre et la pyramide des âges sont défavorables.

## **LE RAYONNEMENT :**

Sur le plan régional, le financement est menacé par la disparition de la taxe professionnelle qui réduit proportionnellement les ressources régionales.

La représentation du Laboratoire dans les instances internationales est en deçà de la visibilité scientifique de certains membres seniors.

## **LES LOCAUX :**

Ce point faible vient en contrepartie du point fort que représente le regroupement géographique de la majeure partie du Laboratoire. Le manque d'espace pour les montages expérimentaux a pour résultat l'occupation d'un certain nombre de bureaux par les expériences, limitant d'autant la qualité d'accueil des nouveaux arrivés. La croissance du nombre de personnes : nouveaux thésards, personnel contractuel recruté sur les moyens ANR par exemple, se heurte au même type de difficultés.

Le soutien des tutelles pour résoudre ce problème n'est pas encore acquis.

### **1.3 OPPORTUNITÉS (ÉLÉMENTS EXTERNES QUI VONT FAVORISER L'ÉMERGENCE DU PROJET)**

L'UTC pilote deux propositions de projet du Grand Emprunt. Une opportunité pour le développement des activités autour des matériaux issus de la filière verte, notamment des composites à renforts végétaux, se présente par le biais du projet PIVERT.

Le deuxième projet Grand Emprunt du Laboratoire piloté par l'UTC, concerne le bassin d'essais pour la navigation fluviale, en collaboration avec VNF et CETMEF et présente une opportunité pour le laboratoire commun LHN, notamment dans le recalage de modèles numériques.

Le Laboratoire est bien placé dans le nouveau paysage du CNRS, avec la création de l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes. Notre positionnement nous permet d'afficher une interdisciplinarité, qui pourra s'exprimer dans le cadre de la fédération SHIC et du Collegium UTC CNRS INSIS.

L'Institut de Mécatronique présente une opportunité de renforcement et de pérennisation des liens avec le tissu industriel à travers la création des chaires dont la première vient d'être pourvue.

## **1.4 RISQUES (ÉLÉMENTS DE NATURE À CONTRARIER LA RÉALISATION DU PROJET)**

### **RISQUES INTERNES :**

L'objectif des activités de transfert est la création du lien entre les besoins du milieu socio-économique et la recherche en amont, résultant d'un positionnement scientifique original. De ce point de vue, l'abondance de moyens liés à ces besoins présente à la fois une opportunité, mais aussi un risque pour la qualité scientifique des travaux, en particulier en termes de pilotage. Le Laboratoire doit être vigilant sur le rendement des travaux contractuels en termes de production scientifique qui est le seul garant de son attractivité et de sa pérennité.

L'affichage des axes émergents correspond clairement à la volonté affirmée de la maîtrise des facteurs de risque, différenciés pour les trois projets. L'axe « Matériaux Composites », lié à des investissements lourds et des activités de transfert technologique, nécessite un suivi rigoureux et une réévaluation de risque constante. En revanche, on peut considérer que le risque est faible pour l'axe « Maîtrise des aspects stochastiques en mécanique et en acoustique ». En ce qui concerne « Systèmes Intégrés en Mécanique », nous nous trouvons confrontés à une thématique émergente qui correspond à un pari sur le futur. Sa réussite dépendra entre autres de la reconnaissance de la thématique par la communauté mécanicienne, y compris en termes des supports de publication : revues, colloques.

L'accroissement du rôle des départements dans le pilotage de l'UTC ne facilite pas la gestion du personnel et des locaux du Laboratoire, qui n'est pas seul maître dans la définition des profils des nouveaux enseignants-chercheurs.

La politique de recrutement des enseignants chercheurs contractuels, qui a été bénéfique et source d'originalité lors de la création de l'UTC, se trouve pénalisée par la banalisation du statut et les contraintes des sponsors quand il s'agit de chaires.

### **RISQUES EXTERNES :**

La charge administrative croissante liée aux évolutions structurelles : modes de financement, autonomie des universités, présente une perte de temps pour la recherche et par conséquent un risque majeur pour la qualité des travaux scientifiques et pour la pérennité même du Laboratoire à plus long terme.

Le risque de non renouvellement des départs en retraite des enseignants chercheurs et des ITA-IATOS pèse fortement sur le développement de l'unité et son bon fonctionnement.

La stabilité des sources de financement externes publics dont le Laboratoire a largement bénéficié au cours du quadriennal actuel n'est pas garantie. Les centres de recherche industriels localisés en Picardie ne sont pas à l'abri de délocalisation, malgré le soutien de la Région. Les thématiques des appels d'offre peuvent aussi évoluer vers des thèmes où le Laboratoire aura du mal à se positionner. Le Laboratoire doit rester vigilant, pour ne pas devenir dépendant des équipements lourds qu'il ne saurait gérer en cas de désaffectation possible des partenaires.

## 2 PROJET ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE L'UNITÉ

Les activités de recherche du Laboratoire Roberval portent sur le développement de compétences expérimentales, théoriques et numériques multidisciplinaires mises en jeu lors de la conception de structures, d'éléments de machines ou de systèmes mécaniques associant des fluides et des solides. Le but des travaux de recherche est d'améliorer les connaissances sur le comportement des matériaux et des structures ou sur leur élaboration, de développer des modèles et outils pour l'aide à la conception de structures et machines, et de capitaliser une culture technique sur les méthodologies d'analyse, de conception et de fabrication. Ces recherches s'appuient sur les domaines de la science des matériaux, de la mécanique non-linéaire des solides, des fluides et des systèmes couplés, de l'acoustique, des techniques de mise en forme et d'usinage, des méthodes de mesures expérimentales et de la modélisation numérique. Plusieurs échelles d'étude d'un système mécanique sont considérées : celle du matériau constitutif, celle de la structure ou système, et celle du procédé de fabrication.

Les évolutions thématiques du Laboratoire tiennent compte des choix scientifiques, matérialisés par les recrutements qui permettent d'apporter de nouvelles compétences. D'autres activités ne sont pas maintenues, suite aux départs de personnes. A titre d'exemple, en Matériaux et Surfaces, la corrosion ne sera plus soutenue par l'unité que sur l'aspect haute température, tandis que les recherches associées aux relations morphologie de surface – propriétés mécaniques seront renforcées. Ce renforcement pourra se faire à la fois par les recrutements et par les acquisitions de matériel mi-lourd de caractérisation de surfaces (rugosimètre laser). L'analyse fine des relations de la morphologie de surfaces avec les caractéristiques d'adhérence et de tribologie, voire d'endommagement sera poursuivie grâce à une interaction forte entre les matériaux et le numérique.

L'objectif général du Laboratoire étant affirmé, l'organisation en trois thèmes (équipes) sera maintenue, avec une déclinaison affinée en deux sous-thèmes pour les thèmes 1 et 3 :

- thème 1 : Mécanique Numérique (MEN), responsable Alain RASSINEUX
  - sous-thème 1 : Modélisation de lois de comportement et identification (MLCI), responsable Delphine BRANCHERIE
  - sous-thème 2 : Contrôle et robustesse des simulations (CRS), responsable Pierre Villon
- thème 2 : Acoustique et Vibrations (AVI), responsable Mabrouk Ben TAHAR
- thème 3 : Matériaux et Surfaces, responsable Maxence BIGERELLE
  - sous thème 1 : Mécanique et Morphologie des Surfaces et Interfaces (M2SI), responsable Maxence BIGERELLE
  - sous-thème 2 : Mécanique et Mécanismes de la Dégradation (M2D). Jérôme FAVERGEON

Pour structurer les collaborations existantes et pour accueillir des nouvelles orientations, le Laboratoire propose trois axes émergents dont le développement fera l'objet du prochain quadriennal. Ces axes servent également à encadrer et rendre visible les liens entre les trois thèmes. Ces axes sont créés à titre expérimental et correspondent à des activités dont le degré de maturité est variable et dont la pérennité fera l'objet d'un suivi tout au long du quadriennal. Un responsable est clairement identifié pour chaque axe.

Axe en émergence 1 : Maîtrise des aspects stochastiques en mécanique et en acoustique (MAS), responsable Jérôme ANTONI

Axe en émergence 2 : Matériaux Composites (MAC), responsable Zoheir ABOURA

Axe en émergence 3 : Systèmes Intégrés en Mécanique (SIM), responsable Benoît EYNARD

Les pages suivantes sont consacrées à la description des axes émergents, avant de passer à la description détaillée des perspectives des trois équipes (thèmes). Les personnes à l'origine de chacun des axes sont citées, les listes de participants étant vouées à évoluer.



## 2.1 AXE EN ÉMERGENCE : MAÎTRISE DES ASPECTS STOCHASTIQUES EN MÉCANIQUE ET EN ACOUSTIQUE

Participants (permanents) : Jérôme ANTONI (E2), Maxence BIGERELLE (E3), Salima BOUVIER (E3), Jean-Daniel CHAZOT (E2), Pierre FEISSEL (E1), Pascal LARDEUR (E1),

Responsable : Jérôme ANTONI (E2)

La proposition de cette action horizontale émerge du recensement de besoins communs concernant la maîtrise des aspects stochastiques dans les trois thèmes verticaux du laboratoire. La caractérisation de matériaux acoustiques, la reconstruction et la séparation de sources, le traitement statistique des signaux vibratoires, la caractérisation et la modélisation stochastiques des propriétés tribologiques des matériaux et des surfaces, la prise en compte des incertitudes dans les modèles numériques, la prise en compte des erreurs stochastiques en mesure de champ par méthodes indirectes, sont autant d'exemples de sujets de recherche qui ont pour point commun l'adoption, explicite ou implicite, d'une démarche stochastique.

L'idée de créer un groupe de travail destiné à rassembler les membres du laboratoire concernés par la problématique stochastique émerge donc naturellement, l'objectif étant de fédérer les efforts dans une direction commune, d'échanger les expériences et les compétences (expérimentales et théoriques) des uns et des autres, et par là même de constituer une force de soutien aux trois thèmes verticaux du laboratoire. La participation de mathématiciens du Laboratoire de Mathématiques Appliquées de Compiègne est par ailleurs fortement souhaitée. Il est attendu de cette synergie de groupe d'aider à la propulsion des sujets de recherche cités ci-dessus, mais aussi de faire émerger de nouvelles thématiques de recherches originales en tant que telles. Les principaux sujets d'intérêt identifiés sont :

- la modélisation et la simulation de l'aléatoire dans les lois de comportement,
- l'identification probabiliste des (lois de) comportements et des modèles paramétriques,
- la quantification des sources d'aléa dans les prédictions numériques,
- la reconstruction de champ (déplacement, contraintes, acoustique) par mesures indirectes,
- la planification et l'optimisation d'expériences.

Ces sujets recouvrent tous les sens sémantiques de la notion d'aléatoire, c'est-à-dire :

- les phénomènes fondamentalement stochastiques dans leur nature physique,
- les incertitudes liées à la méconnaissance des (lois de) comportements et/ou de leurs paramètres,
- les incertitudes liées à l'insuffisance des modèles analytiques ou numériques,
- les variabilités naturelles engendrées par l'hypersensibilité à certains paramètres.

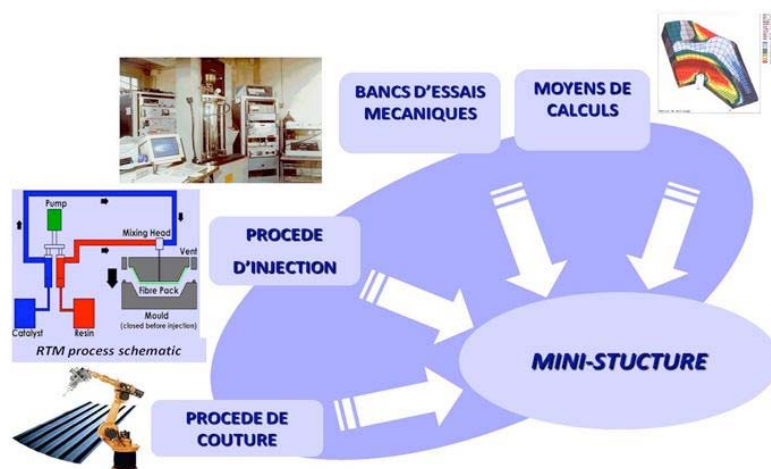
Les approches envisagées feront un large recours aux méthodes de calcul intensives que permettent les puissances informatiques actuelles et sur lesquels plusieurs participants du groupe de travail ont déjà une expertise confirmée, en particulier les méthodes de rééchantillonnage aléatoire, d'approximation stochastique, de simulation et d'estimation par Chaînes de Markov Monte Carlo, les méthodes bayésiennes variationnelles, empiriques et approchées qui considèrent les paramètres d'intérêt comme des variables aléatoires.

## 2.2 AXE EN ÉMERGENCE : MATÉRIAUX COMPOSITES

Participants (permanents) : Zoheir ABOURA (E3), Jerome ANTONI (E2), Fahmi BEDOUI (E3), Malk BENZEGGAGH (E3), Delphine BRANCHERIE (E1), Jean Daniel CHAZOT (E2), Jerome FAVERGEON (E3), Pierre FEISSEL (E1), Hocine KEBIR (E1), Kamel KHELLIL (E3), Alain RASSINEUX (E1)

Responsable : Zoheir ABOURA (E3)

Cet axe transversal a pour objectif l'étude, la conception et la réalisation de mini structures composites (figure 1). Il fédère les activités de recherche et de transfert technologique autour des matériaux et structures composites à renfort 3D et des composites « verts », notamment les structures sandwich cousues avec une âme 100% bio-sourcée. Il permet d'associer diverses compétences (mise en œuvre, expérimentation et modélisation) afin d'acquérir un savoir et un savoir faire dans la réalisation de pièces structurales.



Réalisation de mini-structures composites cousues

L'axe s'articule autour de trois volets fortement interdépendants : la mise en œuvre, la caractérisation au sens large du terme et la modélisation.

### Mise en œuvre

La mise en œuvre qui sera privilégiée au sein du laboratoire est l'infusion et l'injection par voies liquides (RFI et RTM). Ces techniques très prometteuses permettent la réalisation de pièces composites de bonnes performances à des coûts nettement moindres que la technique par autoclave. Ainsi, la mesure expérimentale des perméabilités des renforts 3D dans les trois directions constitue un enjeu important si l'on souhaite alimenter des modèles de remplissages de moules. Cette action constitue l'une des priorités futures de cet axe. Avec l'acquisition d'un banc de perméabilité au sein du laboratoire dans le cadre d'un CPER, des études seront menées afin d'appréhender l'effet des paramètres de coutures, par exemple, sur la perméabilité du tissu. Cette recherche sera menée conjointement entre le thème 3 et le thème 1 puisqu'elle doit être associée à la modélisation de l'écoulement de la résine en présence de fibres (couplage fluide structure). Ce volet de la mise en œuvre abordera également la maîtrise de l'assemblage des préformes et leur renforcement dans la troisième direction par robotisation. Des compétences en robotiques devront être recherchées soit en interne à l'UTC (laboratoire LEC), soit régionale (ESIEE Amiens).

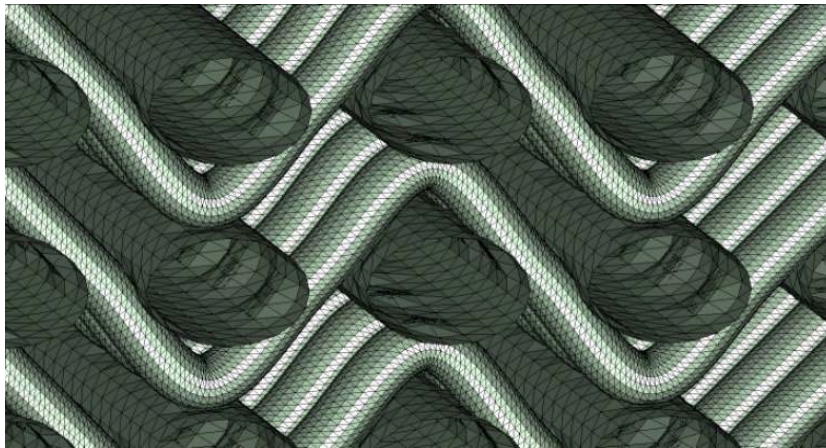
### Caractérisation

Le terme caractérisation intègre la caractérisation mécanique en étroite accord avec les développements du thème 3, mais également acoustique et vibratoire du thème 2, les structures composites développées devant être multifonctionnelles. La détermination de l'élasticité à l'échelle de la structure pourra être faite en utilisant le vibromètre laser 3D du Laboratoire, s'appuyant sur les

méthodes inverses de recalage. Cette technique permettra d'analyser les effets d'échelles en comparaison avec les résultats issus des essais mécaniques sur éprouvettes. La caractérisation du comportement acoustique de ce type de structures se fera également en étroite accord entre le thème 2 et le thème 3.

### **Modélisation**

La complexité des architectures de renforcement 3D sèches se trouve encore plus perturbée lors de sa mise en place dans le moule avant injection. La structure composite finale sera en conséquence éloignée d'une représentation théorique parfaite, avec une influence tant sur l'élasticité que sur les sites d'initiation des endommagements. Les travaux sur la modélisation par éléments finis en cours sur la modélisation du Volume Élémentaire Représentatif (VER) d'un Interlocks montrent leurs limites. Il est essentiel de développer des méthodes originales de discrétisation de la géométrie, adaptées à la complexité des architectures de cette nouvelle génération de matériaux composites. Cette action sera menée conjointement entre le thème 1 et le thème 3.



*Maillage avec contact sans interpénétration*

## 2.3 AXE EN ÉMERGENCE : SYSTÈMES INTÉGRÉS EN MÉCANIQUE

Participants (permanents) : Magali BOSCH-MAUCHAND (E1), Nassim BOUDAOU (E1), Sébastien CASTRIC (E1), Zohra CHERFI (E1), Emmanuel DORÉ (E3), Benoit EYNARD (E1), Anne GUÉNAND (E1), Frédéric LAMARQUE (E3), Laurent PETIT (E3), Christine PRELLE (E3), Nadège TROUSSIER (E1)

Responsable : Benoît EYNARD (E1)

La notion de système intégré recouvre plusieurs assomptions allant du simple produit mécanique au système de production (ce point dépendant fortement du background scientifique de chacun). Nous focalisons tout particulièrement sur les systèmes mécatroniques compacts qui constituent un objet d'étude privilégié. Cet objet revêt un caractère d'originalité fort en regard des préoccupations de la communauté scientifique travaillant dans le domaine de la conception mécanique. Il s'agit aussi d'un sujet clairement fédérateur pour les membres qui s'impliqueront dans l'axe en émergence, pour apporter leurs compétences en ingénierie intégrée, conception robuste, ou encore en méthodes expérimentales pour la conception de systèmes compacts de mesure et d'actionnement.

Les actions à développer dans ce cadre et les perspectives à terme devraient permettre de proposer :

- des méthodes de développement des systèmes mécatroniques compacts et de mettre en œuvre des technologies innovantes (sans contact, effets multi-physiques, matériaux actifs) pour prototyper et expérimenter des fonctions avancées, des capteurs et des actionneurs à intégrer dans des systèmes complexes de toutes dimensions (échelles macro / méso / micro). Ce domaine trouve naturellement des interactions avec le thème 1 dans l'étude des effets multi-physiques dans ces systèmes et avec le thème 3 en matière de développement de capteurs et actionneurs compacts et de haute précision pour la caractérisation de surfaces de matériaux, ou encore, en amont, au travers de la caractérisation thermique et/ou mécanique des éléments actifs (alliage à mémoire de forme par exemple) ou constitutifs des systèmes développés.
- des modèles pour la définition de méthodes et outils d'ingénierie de systèmes s'intéressant à l'intégration entre expertises métiers (plus particulièrement entre les phases allant de la conception à la fabrication), à l'interopérabilité des systèmes et aux applications d'aide à la conception produit-process, à la robustesse et à l'évaluation des performances techniques mais aussi de qualité perçue ou encore environnementales. Ce domaine interagit avec les travaux développés par le thème 1 en matière de robustesse des simulations et d'intégration CAO-Calcul ou encore par le thème 3 concernant l'intégration d'un choix optimal des matériaux en conception.

### 2.3.1 Développement de systèmes mécatroniques compacts (SMC)

La conception de systèmes mécatroniques compacts repose principalement sur les thématiques scientifiques suivantes dès lors qu'il s'agit de les miniaturiser :

- les technologies à distance, en plein essor depuis quelques années, aussi bien sur le plan de l'alimentation de systèmes de mesure que de l'échange des données mesurées. Dans le cas des systèmes mécatroniques compacts, les puissances nécessaires aux micro-actionneurs permettent d'envisager des solutions sans fil également pour l'actionnement.
- la miniaturisation des technologies de mesure ou d'actionnement, qui requiert des connaissances dans le domaine du choix des matériaux et de caractérisations fines des propriétés des surfaces, interfaces et volumiques. A l'échelle microscopique, les lois physiques utilisées en conception mécanique demeurent incomplètes car n'intégrant nullement les effets de couplage multi-physiques et les propriétés spécifiques des matériaux à cette échelle. L'apport de l'expérience de l'analyse de surface à la micro et nano échelle présente en thème 3 s'avère indispensable pour la compréhension du comportement cinématique des systèmes.
- le couplage de fonctions incluant éventuellement plusieurs physiques pour palier le manque d'espace utilisable dans le système. On parle dans ce cas de système couplé « capteur-actionneurs ».

La problématique est donc de développer des nouveaux concepts, tant sur le plan des dispositifs d'actionnement que des systèmes de mesure pour permettre une intégration aisée et maîtrisée dans des systèmes mécatroniques hôtes, de taille macroscopique ou réduite (dimensions mésoscopiques et microscopiques dans ce dernier cas).

### **Positionnement scientifique**

Au plan national parmi les principaux laboratoires s'intéressant à la mécatronique, le laboratoire SYMME (Université de Savoie) traite les méthodologies de conception, développement et production de systèmes mécatroniques, avec pour buts la maîtrise des matériaux et l'introduction de l'intelligence dans des systèmes mécaniques, pour en améliorer les potentialités et/ou les performances. Le département Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques du laboratoire FEMTO-ST s'intéresse plutôt à des applications de micromanipulation et de micro-assemblage automatisé, à la commande des systèmes à l'échelle microscopique, qui pose des problèmes spécifiques et à l'ingénierie système, en vue de la modélisation et du pilotage des activités de conception de systèmes mécatroniques. Enfin, l'institut XLIM (Université de Limoges) a des activités reconnues autant sur des composants de type roulement intelligents à forte compacité que sur les lois de commande adaptées aux spécificités des systèmes mécatroniques.

Les établissements tutelles de ces laboratoires, ainsi que l'UTC (pour le Laboratoire Roberval) ont créé une organisation franco-Japonaise (IOREM : International Organization for Research and Education in Mechatronics) avec 6 établissements japonais reconnus pour leurs compétences en mécatronique, principalement dans le domaine de la robotique afin de confronter leurs approches. A moyen terme, cette organisation a pour objectif de s'étendre en Asie et en Europe, particulièrement vers l'Allemagne développant particulièrement le concept d' « adaptronik » relatif aux systèmes adaptatifs.

Les travaux du sous-axe "Développement de systèmes mécatroniques compacts" portant sur les capteurs de dimensions réduites [ACL-2010-27, ACL-2010-28, ACL-2008-21, ACL-2006-36] et les actionneurs analogiques ou numériques compacts [ACL-2010-47, ACL-2010-36, ACL-2009-14, ACL-2006-41] se placent comme des alternatives ou des apports complémentaires aux travaux précédemment cités. Ils s'inscrivent tout naturellement dans les communautés scientifiques comme le GDR MACS au plan national et IEEE, ASME et JSPE pour la dimension internationale.

### **Programme de recherche**

Le développement de systèmes mécatroniques compact peut être mené suivant différentes actions de recherche :

- la conception d'actionneurs numériques permettant la limitation voire la suppression de capteurs (possibilité de pilotage précis sans techniques d'asservissement) ou d'éléments de connectiques entravant la cinématique,
- l'utilisation des techniques de micro-fabrication (notamment du silicium) pour aboutir à des systèmes de mesure ou d'actionnement entièrement micro-fabriqués ou hybrides,
- la conception de systèmes intégrés « capteurs-actionneurs », notamment par l'utilisation d'éléments de l'actionneur dans le principe de mesure,
- l'utilisation de la modélisation multi-physiques pour l'aide à la conception de ces systèmes ou l'aide au contrôle de leurs performances.

Deux familles de composants seront particulièrement étudiées dans le cadre de ce sous-axe « Développement de systèmes mécatroniques compacts » :

- les capteurs, principalement dédiés à la mesure dimensionnelle sans contact le long d'une dimension (mesure par fibres optiques et assemblage linéique d'éléments coniques réfléchissants) dans le plan (mesure par fibres optiques et miroirs en réseaux échelle) et à trois dimensions (système de mesure par stéréovision active et projection de lumière structurée),
- les actionneurs robustes, autant analogiques que numériques. Dans le cas où les actionneurs sont numériques les principes d'accumulation de pas ou d'association de structures bistables post-flambées seront privilégiés. Outre la génération du mouvement par interaction de champs bobines / aimants permanents, commune aux deux principes d'actionnement, l'utilisation de matériaux actifs en addition aux structures bistables en post flambement sera étudiée pour la conception d'actionneurs numériques. Ce dernier point trouve naturellement une interaction avec les actions de recherche en robustesse développées en thème 1.

### 2.3.2 Ingénierie de systèmes : méthodes et outils (ISMO)

En contexte industriel, la conception et la fabrication nécessitent de spécifier, modéliser, évaluer les composantes pluri-technologiques et multi-physiques des produits et des systèmes. Pour cela, des expertises variées sont nécessaires et doivent s'articuler pour permettre de converger sur la définition du produit et de son processus de production. Si des outils statistiques existent pour aider à l'évaluation des performances d'un produit, il reste complexe d'intégrer les approches robustes dans la conception du couple produit-processus. Ceci est d'autant plus critique quand il est envisagé de prendre en considération la valeur esthétique et environnementale des produits manufacturés, où l'on doit considérer non plus la dimension technique du produit, mais également son interaction avec l'homme et la société. L'ensemble de ces contraintes nous renvoie aux bases de la théorie et de la modélisation des systèmes complexes afin d'appréhender la globalité de la problématique.

Ces travaux se positionnent à la convergence scientifique du génie mécanique, du génie industriel, ainsi que des sciences et technologies de l'information et de la communication. Ils s'intègrent dans les développements de recherche soutenus par l'Association Française de Mécanique (AFM), le réseau national AIP-Priméca ou encore le GDR MACS sur les problématiques de conception intégrée et d'ingénierie robuste. Ils se positionnent aussi dans le cadre des actions européennes sur les sciences et techniques de production comme *ManuFUTURE* ou mondiales IMS2020 - *Intelligent Manufacturing Systems* - et dans les thématiques de sociétés savantes internationales telles que l'ASME, le CIRP, la Design Society ou encore l'IFIP TC5.

#### PLM et intégration

Dans ce domaine, les travaux s'inscrivent dans des démarches de conception intégrée [DO-2006-2] et modélisation des données produits pour la collaboration en conception. Ce problème d'interface peut alors être abordé en proposant des standards d'échange CAO et PLM [ACL-2009-44], pour développer des modèles de données partagées et des processus de gestion de la collaboration et de l'intégration des métiers [ACL-2009-6, ACLN-2010-13].

#### Conception robuste

Les modèles et méthodes de conception robuste tels que proposés par Taguchi permettent de garantir les performances d'un système quelles que soient les variabilités subies en terme de tolérance ou d'environnement. Ils s'intègrent dans des démarches d'analyse (permettant d'évaluer les performances une fois le produit défini) plus que dans des démarches de synthèse (permettant de proposer des solutions techniques connaissant les performances à obtenir) pourtant fortement mobilisées en amont des processus de conception.

#### Valeurs technologique, esthétique et environnementale des produits

Lorsque l'on considère un objet ou un produit, il est d'usage d'évoquer ses aspects fonctionnels, formels, structurels ou matériels et désormais environnementaux qui constituent les aspects immédiats du produit, ses dimensions objectives. Les modalités d'identification de la part subjective du produit (exigences et besoins) constituent l'un des challenges auxquels sont confrontés les concepteurs. Or, le constat est souvent fait que ces besoins sont projetés ou « imaginés » et non issus d'un réel processus d'analyse accordant une place centrale aux véritables destinataires du résultat de la conception i.e. les utilisateurs finaux.

#### Programme de recherche

Le développement de méthodes et outils pour les systèmes intégrés est envisagé par le biais des actions suivantes :

- modèles de données et de processus pour intégrer des expertises multi-physiques dans les systèmes. Nous consoliderons les résultats existants en matière d'intégration dans le champ des expertises classiques du génie mécanique (conception-simulation, conception-industrialisation, conception-fabrication [OS-2010-1]). En regard de notre objet d'étude fédérateur sur les systèmes intégrés, nous focaliserons sur la contribution d'une approche PLM à l'intégration des métiers mécanique, électronique et informatique [ACTI-2010-53].
- conception robuste de systèmes par l'enrichissement des méthodes d'identification de modèles nécessaires à la mise en œuvre de l'ingénierie robuste, basé sur l'exploitation à la fois de modèles physiques et statistiques. Nous nous intéresserons à développer des modèles et méthodes de conception robuste plus adaptés aux démarches de synthèses et intégrant alors les

notions d'incertitudes et d'adaptation de modèles pour la réutilisation de connaissance [ACL-2006-12, ACL-2008-5]. La robustesse des systèmes mécatroniques est au cœur d'un grand nombre de besoins industriels d'où la thèse en cours sur le sujet du déclenchement chromatique à distance de structures mécaniques bistables [thèse Zaidi].

- Dans une logique d'analyse de la valeur et d'ingénierie des exigences, nous chercherons à proposer des méthodes et des outils permettant de gérer la définition des solutions techniques tout en garantissant la qualité esthétique (design industriel et conception centrée utilisateur [DO-2009-3] et la valeur environnementale (éco-conception et analyse du cycle de vie) du produit. L'enjeu est d'intégrer toujours dans une approche systémique des performances autres que fonctionnelles ou structurelles en ouvrant notamment sur des problématiques socio-techniques plus larges bien que restant effectivement ancrée dans le domaine de la conception mécanique [ACTI-2008-15, ACTI-2010-54].

### 2.3.3 Synthèse

Le but est de structurer un axe en émergence au sein de l'UMR 6253 Roberval, qui s'inscrit pleinement dans l'axe stratégique d'innovation UTC en matière d'éco-conception : matériaux, énergie, équipements, habitat. Cet axe associe les compétences en terme de développement de systèmes mécatroniques compacts et celles en matière de méthodes et outils d'ingénierie de systèmes tout en étant en forte interaction avec notamment les thèmes 1 et 3 du laboratoire. Croiser ces deux compétences fournit un champ scientifique extrêmement riche et à forte valeur ajoutée technologique comme le montre l'apparition récente de congrès scientifiques les rapprochant, des stratégies voisines au plan national (Laboratoire SYMME et institut FEMTO), mais aussi l'association de l'UTC et du CETIM pour la création d'un Institut commun autour de la Mécatronique. Cet institut est de plus développé en partenariat avec le syndicat professionnel Artema représentant les industriels du domaine. La proposition d'un PPF Mécatronique au sein du collegium INSIS – UTC nous encourage à accentuer nos efforts sur un objet d'étude original qui permettra aux membres du Laboratoire d'avoir un positionnement situé en amont de cet institut et différenciateur tant dans la communauté nationale qu'internationale.

La participation active de membres du laboratoire au sein de projets labellisés par les pôles compétitivité I-Trans, Mov'éo et System@tic, montre que le positionnement, les objectifs et le programme de recherche sont pertinents en regard des besoins industriels tout en ayant les fondements scientifiques nécessaires : mécanique, électronique, automatique, ingénierie de conception. Les résultats obtenus dans le cadre du PPF Robustesse Projet-Process-Produit avec une application en mécatronique ont montré tout l'intérêt de se concentrer sur la conception et la maîtrise des performances techniques des systèmes intégrés. Enfin, soulignons que les travaux du groupe prospectif de l'AFM « Concevoir pour Fabriquer Robuste » nous confortent dans nos objectifs.

## 3 LES PERSPECTIVES DÉTAILLÉES DES ÉQUIPES

### 3.1 PERSPECTIVES DU THÈME MÉCANIQUE NUMÉRIQUE

#### Renforcement du dialogue essai-calcul

Notre premier champ d'action, en lien avec le thème 3 matériaux et surfaces, vise à renforcer notre expertise autour du dialogue essais-calcul. Il s'agit d'élaborer des méthodes et des modèles probabilistes, prédictifs, robustes, fiables prenant en compte la maîtrise des sources d'incertitudes et de variabilité du comportement, de la durée de vie, des performances des systèmes industriels mais aussi des processus de conception ou de production, soumis eux mêmes à une forte variabilité.

Nos travaux porteront sur la mise en œuvre de procédures numériques d'exploitation et d'identification de mesures de champs robustes, insensibles au bruit, prenant en compte les incertitudes, la variabilité et les erreurs de modélisation. Des méthodes d'identification à partir de mesures de champs seront développées ainsi que des approches inverses adaptées à ces mesures ayant par exemple recours à l'approximation diffuse comme outil de filtrage, d'approximation et de dérivation.

Ces approches menées dans un premier temps en statique linéaire se généraliseront à des comportements non-linéaires notamment l'endommagement jusqu'à rupture, à des mesures de champs cinématiques, sur des matériaux métalliques, composites et en particulier les composites à renfort interlock et agrosourcés étudiés au laboratoire. Un projet transversal, faisant l'objet d'un ressourcement Carnot a été mis en place pour fédérer les différentes actions menées autour des mesures de champs et favoriser les collaborations avec les acteurs du thème Matériaux et Surfaces.

#### Prise en compte des aspects stochastiques pour la simulation et l'optimisation robuste

Pour accroître la robustesse de nos simulations, il convient d'évaluer les sources d'erreur et de connaître l'incertitude avec laquelle les paramètres d'intérêt sont identifiés. Les erreurs de mesure, d'identification, de modélisation (venant des modèles de comportement adoptés, de la simulation numérique) seront pris en compte par une approche bayésienne permettant d'avoir des informations sur la variance et sur la corrélation des paramètres des modèles, des lois de comportement utilisés. Ces approches offrent une large place au calcul haute performance que l'on pourra coupler à des techniques d'optimisation exploitant des modèles réduits.

Autour des aspects stochastiques, nos perspectives s'orientent vers la prise en compte :

- des incertitudes et de la variabilité dans les modèles éléments finis dans les domaines statique, vibratoire et acoustique en liaison avec les 2 autres thèmes du laboratoire,
- des distributions de probabilités sur les paramètres des procédés à optimiser pour évaluer leur impact sur la robustesse et sur la fiabilité, l'idée centrale étant de formuler une méthode d'optimisation multidisciplinaire robuste,
- de la variabilité géométrique : dans la continuité du projet ANR APPROFI (Approche mécano Probabiliste Pour la conception Robuste en Fatigue), où l'on s'est attaché à étudier une approche non déterministe dans le contexte particulier des structures dont le mode de défaillance est la fatigue du matériau, on s'intéresse à la variabilité due aux tolérances de fabrication.

Afin d'étudier les problèmes liés à l'utilisation des lois de comportements dans le cadre du comportement en proche surface (usinage par abrasion), le comportement des matériaux sera relié aux paramètres pertinents de la microstructure, aspect déjà abordé dans le cadre du projet MICADUR. On s'appuiera sur les compétences de chercheurs récemment recrutés : Salima Bouvier (PU thème 3, caractérisation multiéchelle et identification en mécanique des matériaux) et Ludovic Cauvin (MCF, thème 1, étude expérimentale et modélisation micromécanique du comportement et de l'endommagement des nanocomposites à renforts plaquettaires, homogénéisation).



## **Robustesse de la simulation numérique**

On s'intéressera à la maîtrise des erreurs de modélisation par l'utilisation de procédures de simulation adaptatives incluant maillage, remaillage et transfert de champs ou par le développement de méthodes assurant une moindre dépendance de la solution vis-à-vis de la discrétisation comme les méthodes à discontinuités fortes. Celles-ci, moins sensibles à la discrétisation que les méthodes éléments finis standards seront étendues dans la perspective de décrire la phase d'amorçage de fissure à l'aide d'outils numériques s'appuyant sur la mécanique de la rupture (XFEM ou BEM). Une part importante des travaux à accomplir se concentre autour de la phase de transition entre amorçage et propagation, impliquant le développement d'outils de transfert de modèles et de champs. L'objectif final est de développer une approche intégrant les phénomènes d'endommagement de la phase d'initiation de défauts à la rupture des pièces.

En collaboration avec l'UTT et les Mines de Cracovie (Tomasz Jurczyk, chercheur invité), nous comptons poursuivre le développement de procédures adaptatives tridimensionnelles dans le cadre de la simulation numérique de procédés de mise en forme couplées à des indicateurs d'erreur construits notamment par dérivation par approximation diffuse des champs physiques et à des outils de transfert de champs.

## **Structures et interfaces géométriquement complexes**

Nous comptons élaborer des méthodes permettant d'envisager des simulations dont la mise en œuvre s'avère délicate par des techniques classiques sur des structures et des interfaces géométriquement complexes. Dans ce contexte, nous aurons recours à des éléments finis spécifiques, à des techniques sans maillage, à des méthodes d'éléments de frontière, au couplage de ces précédentes techniques, à l'élaboration de techniques originales de discrétisation.

On développera ainsi des techniques d'avancée de front dans la continuité des travaux en coopération avec nos partenaires chiliens. Ces travaux concerneront la croissance des couches d'oxydes, l'évolution des fronts de solidification et dans le cadre de l'hydraulique environnementale en liaison avec le CETMEF, l'étude des écoulements à surface libre.

Dans ce contexte, les travaux sur la formulation variationnelle augmentée en collaboration avec Marc Dambrine de l'Université de Pau et J-P Boufflet du laboratoire Heudiasyc de l'UTC se généraliseront au cas tridimensionnel avec le développement d'applications dans le domaine des problèmes d'évolution avec changement de forme et d'interfaces mobiles, ainsi que des exemples en optimisation de forme.

Des travaux porteront sur le développement d'un solveur mixte éléments diffus/éléments finis adapté aux modèles de comportement locaux et non locaux et qui se caractérisent par de fortes non linéarités matérielles et géométriques avec des couplages forts entre les différents champs.

Des procédures numériques de type éléments finis ou ayant recours à un couplage meshless-éléments finis seront développées dans le cadre d'une action entre les thèmes 1 et 3 du laboratoire autour de la modélisation des architectures à renforcement tridimensionnel dans les structures composites. Une des difficultés consiste à créer un modèle de calcul de ces architectures très complexes en accord avec la réalité des techniques de tissage et traduisant fidèlement le comportement expérimental local de la structure jusqu'à endommagement ou les propriétés du composite comme sa perméabilité. L'approche sera paramétrée pour permettre au concepteur d'optimiser un type de tissage et le cas échéant de définir une base de donnée de VER reliant propriétés mécaniques et qualité de l'imprégnation. Ces résultats numériques corrélés à l'expérience alimenteront à terme une approche multi-échelle pour déterminer une loi de comportement homogénéisé d'un matériau composite endommageable.

## **Méthodes de résolution rapide et modèles simplifiés**

Le dernier point concerne la mise au point des techniques qui permettent dans un temps réaliste de mener un nombre suffisamment représentatif de simulations pour pouvoir ensuite appliquer des

techniques d'optimisation d'un coût souvent prohibitif. On constate par ailleurs que dans le cadre de la simulation des procédés de mise en forme et d'assemblage, des procédures d'optimisation sont de plus en plus souvent associées aux simulations pour déterminer les formes d'outils, les formes et les épaisseurs des tôles ou des parois ainsi que les évolutions optimales des chargements. Les limitations portent en général sur des critères de tenue en formage ou en service, de tolérances géométriques, de faisabilité. Dans le cadre de l'Optimisation Multi Disciplinaire, nos travaux se poursuivront par la prise en compte simultanée de plusieurs critères de défaillance (durée de vie, qualité de surface) et intégreront les enjeux actuels du calcul massivement parallèle.

En collaboration avec F.Chinesta de l'Ecole Centrale de Nantes, nous développons un solveur PGD pour les problèmes de contrôle optimal qui nous permet d'envisager une famille d'algorithmes originaux pour l'optimisation des procédés de fabrication en général. L'idée consiste à écrire que la solution du problème, qui dépend des variables d'état et des paramètres d'optimisation, se décompose en une somme de fonctions à variables séparées. Il faut noter qu'un GDR Réduction de Modèle est en préparation dans lequel l'UTC est partie prenante. Au niveau matériel, le laboratoire s'est donné les moyens de développer cette thématique par l'acquisition d'outils de calcul performants (plateforme Pilcam2).

Ces approches sont développées en statique et en dynamique, en mécanique du solide ou des fluides, avec des comportements linéaires et non-linéaires (contact, fatigue, endommagement jusqu'à rupture dans le volume et en surface), avec couplage (fluide-structure), en petites et grandes déformations avec entre autres des applications dans le domaine de la stabilité, de la tenue et de la durée de vie des structures, de la simulation des procédés de mise en forme et d'assemblage, de la dynamique des fluides environnementale.

### **3.2 PERSPECTIVES DU THÈME ACOUSTIQUE ET VIBRATIONS**

L'équipe Acoustique du Laboratoire Roberval a pour thème principal de recherche l'étude et la résolution de problèmes vibroacoustiques qui soulèvent différents niveaux de difficultés : structures complexes, multi-matériaux, propagation et rayonnement acoustique en présence d'écoulement, sources d'origine acoustique ou/et vibratoire.

L'équipe a entrepris, ces cinq dernières années, un recentrage sur l'axe du confort acoustique en réduisant l'activité ultrasonore, ce qui s'est traduit d'une part dans le profil des trois derniers recrutements et d'autre part dans la nature des derniers investissements en matériels (plus de 2 M€ au cours du dernier plan quadriennal). Les recherches menées sont marquées par une démarche commune qui peut être résumée en trois actions : modélisation physique, simulation numérique et validation expérimentale. Ces actions poursuivent le double but de comprendre les phénomènes physiques et de développer des méthodes expérimentales et des outils de calcul pour l'élaboration de modèles prévisionnels. La mise au point de ces modèles et des outils de calcul associés va de pair avec une démarche de validation expérimentale menée par le Laboratoire sur ses propres moyens d'essais et /ou en collaboration avec d'autres partenaires universitaires ou industriels.

Nous n'envisageons donc pas de modification de fond dans nos axes scientifiques qui restent principalement liés à la vibroacoustique numérique et expérimentale et nous considérons que le recentrage de notre activité est maintenant terminé.

#### **Personnel de l'équipe**

Au cours du dernier plan, il y a eu le recrutement de 1 MCF (J.D. Chazot), la promotion d'un MCF en PU (J. Antoni) et le départ d'un MCF (C. Maury, nommé PU à l'Ecole Centrale Marseille). Il y a eu aussi le départ à la retraite de 2 PU (J.F. de Belleval et Ph. Gatignol). L'année prochaine (septembre 2011), nous envisageons le recrutement d'un MCF. Ce recrutement sera orienté vers les aspects expérimentaux en acoustique et vibrations. Ce choix d'orientation est dicté par les importants investissements en équipements consentis par l'équipe ces dernières années (voir ci-dessous). Nous n'attendons pas un grand changement de la taille de l'équipe au cours du prochain quadriennal et cela malgré la taille réduite de l'équipe.

#### **Stratégie scientifique**

Le projet scientifique de l'équipe sera organisé autour des points forts suivants :

- Interaction écoulement complexe/onde acoustique ;
- Interaction structure/matériau acoustique ;
- Identification et caractérisation de sources par méthodes inverses.

Il s'agit là d'une continuité du précédent plan avec un approfondissement de chacune des actions. Le but recherché est toujours l'optimisation et l'amélioration du confort acoustique, particulièrement dans les applications liées aux moyens de transport.

#### **Interaction écoulement complexe/onde acoustique**

Cet axe constitue une référence de la compétence historique de l'équipe par ses deux volets numérique et expérimental. Il présente toujours un grand intérêt dans le domaine des transports à grande vitesse (aéronautique, train à grande vitesse, ..) comme en témoignent nos implications récentes dans différents grands projets nationaux (réponse à un appel à projet européen Clean sky «Development of exhaust noise attenuation technologies»).

Sur le plan théorique, le choix de l'équation de Galbrun pour la résolution numérique des problèmes de propagation a prouvé son utilité, particulièrement pour les problèmes couplés (thèse de B. NENNIG). Toutefois, il reste quelques problèmes fondamentaux, ouverts pour l'aéroacoustique : condition d'interface, conditions de rayonnement, définition de l'intensité, interaction des modes hydrodynamiques/acoustiques et thermiques, ..). Jusqu'à présent, nous avons toujours abordé le problème fréquentiel, ce qui fait perdre la causalité, qui a pour conséquence de générer des problèmes pour les modes hydrodynamiques. Pour éliminer cette difficulté, nous examinons actuellement le problème en temporel. Pour aborder les cas réels, il est impératif d'améliorer les performances des éléments finis que nous proposons. Ce travail a été commencé en partie avec la thèse de H. BERIOT (éléments finis hiérarchiques d'ordre élevé), il continue avec la thèse de X.

FENG (éléments finis spectraux mixtes d'ordre élevé). Nous pensons aussi étendre aux problèmes aéro/vibro le travail développé actuellement pour les éléments finis enrichis.

Un autre point important resté ouvert est celui des modèles d'impédance acoustique en présence d'écoulement. La thèse de B. Nennig dans le cadre du projet COMATEC a montré la nécessité de continuer à approfondir cette question. Ce travail va continuer en collaboration avec l'ONERA Toulouse. Le bilan global d'énergie, en utilisant la matrice de diffusion multimodale expérimentale en absence ou en présence d'écoulement, sera exploité pour l'optimisation et la validation des modèles d'impédance. Cet aspect a été abordé dans la thèse de M. Taktak en absence d'écoulement, il a donné des résultats prometteurs.

Sur le plan expérimental, l'amélioration du banc dédié aux applications aéronautiques va nous amener à développer de nouvelles techniques de mesures et de traitement du signal. En effet, nous envisageons d'étendre les méthodes de mesure développées pour caractériser en multimodal des éléments de circuits de propagation traités, passifs ou actifs : elle seront étendues aux cas avec écoulement entrant ou sortant de forte vitesse produisant un environnement difficile (interaction avec la sonde et bruit). Pour remplir cet objectif, nous envisageons une recherche suivant différents axes :

- dispositif d'antenne de sources pour augmenter le niveau sonore,
- signaux de type multi-sinus décorrélés qui permettent d'améliorer le rapport signal sur bruit et de réduire le temps des essais,
- méthodes de filtrage.

Une recherche pour la mise en œuvre de méthodes non intrusives qui demandent des investissements supplémentaires sera initiée.

Des investissements ont été faits dans ce sens : amélioration du banc de mesure en présence d'écoulement comprenant le renouvellement du revêtement de la chambre anéchoïque et le changement du circuit d'alimentation en air pour atteindre  $M=0,3$  en aspiration et en soufflage (de l'ordre de 200 K€ CPER/Laboratoire). Mise au point d'un banc, en collaboration avec la société Valeo pour l'étude des circuits de ventilation, dédié aux applications automobiles (de l'ordre de 150 K€) dans le cadre du projet CESAM du pôle de compétitive I-Trans). Acquisition d'un système d'étalonnage pour fil chaud.

### **Interaction structure/matériau acoustique**

Les problèmes classiques d'interaction entre une structure homogène et une cavité acoustique homogène sont maintenant résolus. Il existe sur le marché plusieurs codes commerciaux qui permettent de résoudre efficacement ces problèmes. Dans la réalité les structures sont de plus en plus inhomogènes et complexes. Elles sont obtenues par des assemblages de multi-matériaux (métalliques, composites, polymères,...etc.), souvent doublées par des couches de matériaux polymères et poreux-élastiques pour amortir les vibrations et absorber les ondes acoustiques. Le compartiment des passagers contient des équipements (sièges, habillages intérieurs,...etc.) qui interagissent fortement avec la structure porteuse et qui peuvent aussi avoir une forte capacité d'amortissement des vibrations et d'absorption des ondes acoustiques.

Nous avons introduit depuis les années 1998 une formulation mixte en pression déplacement des équations modifiées de Biot et proposé ensuite une méthode efficace de résolution par sous-structuration dynamique qui facilite l'intégration des composantes poreuses dans un modèle classique par élément finis d'un véhicule. La méthode proposée a prouvé son efficacité par la résolution d'applications concrètes dans le domaine de l'aéronautique [thèse de B. Nennig], de l'automobile [thèses de J. Money-Descombey et K. Bouayed], du Ferroviaire [thèse de A. Meknaci] et du spatial [thèse de J. Kanfoud]. Les résultats numériques restent cependant très sensibles aux propriétés mécaniques et acoustiques des matériaux polymères et poreux-élastiques, ainsi qu'aux conditions d'assemblage des habillages intérieurs sur les structures porteuses.

Nous proposons dans les prochaines années de poursuivre des recherches numériques et expérimentales qui visent une meilleure connaissance d'une part des propriétés des matériaux hétérogènes et d'autre part, des mécanismes d'amortissement et d'absorption, induits par l'interaction entre les structures et leurs habillages intérieurs. Pour se donner les moyens de s'attaquer à ce sujet très difficile et ambitieux, le Laboratoire s'est équipé dans le cadre du projet REVA monté dans le contexte du pôle i-Trans, d'une machine DMA (Analyseur Mécanique Dynamique de 150N ~150K€).

Le Laboratoire a aussi obtenu l'accord de principe du Conseil Régional de Picardie (CRP) et de la Direction Régionale de la Recherche et de la Technologie (D2RT), pour participer au financement (~300K€) d'appareillages spéciaux de caractérisation de matériaux poreux élastiques en fibres synthétiques et végétales. Ces appareillages seront partagés avec l'équipe du thème 3 (Matériaux et Surfaces) du Laboratoire Roberval.

D'ores et déjà plusieurs industriels, Alstom Transport, ArcelorMittal, Astrium-ST, ESI Group, Faurecia, Renault, Saint-Gobain et Valeo, pour ne citer que les plus importants, sont engagés avec le Laboratoire dans des projets long terme de recherche et d'innovation portant sur cet important sous-thème.

### **Identification et caractérisation des sources par méthodes inverses**

Des actions de recherche ciblées sont actuellement entreprises dans le domaine des problèmes inverses en acoustique. Elles concernent la reconstruction de distributions de sources et la séparation aveugle de celles-ci en sources d'origines physiques distinctes à partir de mesures microphoniques. Ces objectifs sont fortement motivés par les projets de l'équipe dans la thématique du confort acoustique et leurs retombées dans les secteurs du transport. L'accent est mis sur une approche mathématique de la résolution du problème qui fait une large place au traitement du signal spatio-temporel et aux récentes avancées dans le domaine de l'inférence bayésienne. La reconstruction et la séparation de sources à partir d'un nombre limité de mesures est une problématique qui a nourri de nombreux travaux dans la littérature, mais qui se heurte cependant à des questions récurrentes.

- **Reconstruction optimale :** De nombreuses méthodes sont aujourd'hui disponibles pour reconstruire une distribution source, dont les prémisses diffèrent selon les hypothèses de travail sur la plage de fréquence et la nature du champ acoustique rayonné (formation de voies, holographie acoustique en champ proche, méthode des sources équivalentes, IBEM, ...). Notre objectif est de montrer qu'une approche unifiée est possible qui généralise les méthodes existantes et surtout qui permet de concevoir l'opérateur inverse optimal (au sens de la minimisation de l'erreur de reconstruction) étant données une topologie de surface source et une géométrie d'antenne.

- **Méthodes parcimonieuses :** Une limite fondamentale inhérente au problème inverse acoustique porte sur la résolution spatiale atteignable par la reconstruction. Lorsque la distribution source est a priori constituée d'éléments parcimonieux (par exemple un ensemble de quelques monopoles), il est possible de forcer cette structure à l'aide d'une fonction coût qui implique l'utilisation de normes de degrés inférieurs à deux. Cette formulation découle aussi naturellement d'une approche bayésienne où la loi a priori des sources est remplacée par une loi normale généralisée qui favorise les événements rares. Notre objectif est de démontrer qu'une telle approche est propice à une analyse haute-résolution robuste.

- **Séparation aveugle de sources :** Dans de nombreuses situations, la reconstruction d'une distribution source n'est pas suffisante et il faut encore décomposer celle-ci en ses différents constituants d'origines physiques distinctes. L'usage d'une antenne acoustique constituée d'un très grand nombre de microphones offre une solution intéressante pour attaquer ce problème, car les méthodes de séparation aveugle de sources peuvent alors en principe être utilisées dans un cadre largement surdéterminé. Il subsiste cependant des difficultés théoriques qui ont invalidé jusqu'à présent la faisabilité de cette approche (nombre de sources a priori inconnu, présence d'un bruit de fond significatif, mélange convolutif). Nous proposons d'attaquer ces difficultés dans un cadre d'inférence bayésienne qui permet d'injecter autant que possible d'information physique a priori. Une thèse vient de démarrer sur le sujet en collaboration avec l'Université de Technologie de Troyes (UTT).

- **Reconstruction large champ à partir de mesure successives :** la dimension ainsi que la résolution spatiale du champ source qui peut être reconstruit est fondamentalement limitée par le nombre de microphones et les dimensions de l'antenne. Il n'existe à ce jour guère de solutions pour outrepasser cette limite. L'approche qui consiste à déplacer l'antenne et à juxtaposer les solutions d'une série de problèmes locaux est largement sous-optimale et est sujette à d'inévitables erreurs de bords : le problème bien posé consiste à reconstruire le champ source complet à partir d'une série de mesures successives de l'antenne en différents emplacements qui recouvrent l'objet rayonnant. Ainsi formulé, le problème s'apparente à une analyse factorielle avec variables latentes cachées (les sources). Cette thématique, riche en retombées mais difficile du point de vue théorique est actuellement en cours d'étude.

Des investissements ont été faits dans ce sens : vibromètre Laser 3D, antenne acoustique 60 voies,

différents Analyseurs (jusqu'à 60 voies), différents systèmes d'excitation, robot 2D pour l'intensimétrie et robot 3D pour le rayonnement (pour un investissement global de l'ordre de 1M€ en grande partie dans le cadre du dernier CPER).

### **Contrôle non destructif**

Enfin, Il est à noter que l'activité ultrasonore, déjà fortement réduite, a pris une autre orientation vers des aspects numériques et vers des applications liées au contrôle non destructif. Cette orientation veut d'une part profiter des acquis historiques de l'équipe et d'autre part s'associer aux actions entreprises au laboratoire dans les domaines du contrôle non destructif et de l'émission acoustique.

Nous avons proposé une formulation hybride décomposition en ondes planes/ éléments finis de frontière pour la détection de défauts finis de géométries quelconques (en 2D, thèse de N. BEDRICI). Nous étendons ce travail à la modélisation de l'émission acoustique générée par la propagation de fissure ou d'endommagement. Le modèle de source (qui peut provenir d'un calcul numérique de fissuration) sera couplé à la formulation hybride précédente. Il est aussi prévu de l'intégrer, dans le cadre du projet MACSIM (en collaboration ente autres avec Le CETIM/SENLIS et le CEA) au propogateur élastodynamique (par méthode pinceau) de la plate-forme CIVA du CEA.

### 3.3 PERSPECTIVES DU THÈME MATÉRIAUX ET SURFACES

#### 3.3.1 Morphologie et Mécanique des Surfaces et Interfaces (M2SI)

L'équipe « Morphologie et Mécanique des Surfaces et Interfaces » issue d'une restructuration des activités de recherche du thème 3 regroupe les travaux afférents à la mécanique des surfaces sur le plan de la caractérisation expérimentale (nanoindentation, AFM...), de la modélisation du comportement local (surfaces, interfaces, films minces...) et des propriétés mécaniques spécifiques aux surfaces. La morphologie multi-échelle des surfaces et interfaces est intégrée comme un élément interagissant avec les aspects mécaniques. Le projet de recherche de l'équipe pour la prochaine période quadriennale s'inscrit dans la continuité d'activités du laboratoire déjà initiées lors du précédent quadriennal et dans l'émergence de nouvelles thématiques à forte innovation scientifique et s'appuie fortement sur des compétences de nouveaux chercheurs du laboratoire.

L'équipe a quatre orientations principales de recherche portant sur le développement d'expérimentation innovante et de modélisation fine dans le domaine de la mécanique des surfaces, à savoir :

- (i) Caractérisation expérimentale de comportement par des essais en surface avec prise en compte des évolutions morphologiques,
- (ii) Modélisation de comportement par des approches phénoménologiques à base physique ou des modèles micromécaniques,
- (iii) Développement d'outils de simulation 3D et applications dans le cas du contact rugueux par des approches semi-analytiques ou par éléments finis,
- (iv) Morphologie 3D de surface rugueuse.

L'ensemble de ces travaux concerne des applications relatives à des matériaux métalliques à gradient de microstructure (cas de matériau ayant subi un traitement superficiel en surface) ou polymères de nature semi-cristalline (e.g. polymères pétrosourcés et/ou agrosourcés, à structure sphérolitique ou fibrillaire, nanocomposite, ...). Ces travaux répondent à des besoins très actuels de différents secteurs de l'industrie du transport, de la production d'énergie... et des secteurs émergents tel le biomédical, la microélectronique... Des interactions fortes existent entre les différents axes de recherche. Ainsi, les aspects développés dans le domaine morphologie 3D sont intimement liés aux préoccupations abordées dans l'étude du contact rugueux. Par ailleurs, l'interprétation de l'essai de caractérisation en proche surface est soutenue par la simulation numérique de l'essai. D'autres exemples d'interactions sont mentionnés dans le projet ci-dessous.

#### **Caractérisation expérimentale de comportement par des essais en surface avec prise en compte des évolutions morphologiques**

Cet axe de recherche regroupe les activités autour du développement de techniques expérimentales innovantes pour la caractérisation du comportement des matériaux par des essais en surface (nanoindentation et Microscopie à Force Atomique AFM). Dans le cas de la nanoindentation, l'exploitation de l'essai pour la caractérisation du comportement des matériaux suscite de nombreuses controverses. Outre les aspects relatifs à la reproductibilité de l'essai, à l'estimation de l'erreur expérimentale, à la prise en compte de défaut de pointe, à la prise en compte des effets d'échelle..., l'estimation précise de l'aire de contact est loin d'être immédiate et rend difficile la détermination du comportement local du matériau. Nous proposons de développer des techniques d'indentation multi-échelles basées sur la macro-indentation, suivie de micro-indentations dans la zone prédéformée, puis de nano-indentations dans la même zone en procédant également à la variation de la géométrie de l'indenteur (Berkovitch, Conique...). Ces essais permettent d'imposer des champs et des ratios de déformation élasto-plastique différents et une meilleure caractérisation du comportement local par approche inverse (i.e. simulation 3D de l'essai par E.F. voir § 3) à partir de courbes force-déplacement et de mesure de profils dans la zone indentée (e.g. thèse de Y. Xia 2010-2013). La validation (de l'approche mise au point pour l'interprétation de l'essai) se fera en comparant avec des résultats issus d'essais macroscopiques homogènes dans le cas de matériaux massifs.

Des développements autour de l'essai de nanoindentation seront menés également pour l'étude de matériaux à gradient. Il s'agit essentiellement de l'étude des effets des techniques d'élaboration de surface (e.g. procédés de finition, fonctionnalisation de surfaces) sur le développement d'hétérogénéité de microstructure en profondeur (e.g. affinement de taille de grain en surface,

transformation de phase...) et les conséquences sur l'évolution des propriétés mécaniques (e.g. durcissement superficiel, présence de contraintes résiduelles...). L'originalité de l'approche développée réside dans le couplage mécanique - métallurgie à la fois sur le plan expérimental et modélisation (voir §2) pour aborder les problèmes associés à l'intégrité des surfaces. Des interactions avec les travaux de l'équipe « Mécanique et Mécanismes de la Dégradation » peuvent émerger autour des problèmes d'endommagement (thèse de J. Marteau 2010-2013).

Dans le cas spécifique de polymères semi-cristallins massifs, la caractérisation du comportement de la phase amorphe et les effets de son confinement sur l'évolution de ses propriétés élastique, viscoélastique et thermo-élastique (à travers l'évolution de la température de transition vitreuse) sont des sujets encore mal connus. En effet, la caractérisation de ces matériaux se fait généralement à des échelles supérieures aux dimensions caractéristiques de leurs microstructures (notion de longueur interne, e.g. espacement moyen entre chaînes, masse molaire...), ne tient pas compte du caractère fortement hétérogène de ces matériaux et ne permet pas d'aboutir à des lois de comportement fines et prédictives. Ce constat est amplifié dans le cas de matériaux nano-composites où l'apport de nano-charge modifie le comportement mécanique de la matrice polymère. Le recours à l'essai de nano-indentation devient plus que nécessaire pour caractériser le comportement des phases constitutives, étant connu que les propriétés de la phase amorphe évoluent en présence de la phase cristalline (thèse de L. Thanh Nguyen 2010-2013). La technique de nano-indentation sera également développée et adaptée dans le cas d'applications sur films minces de polymères biocompatibles. Des interactions fortes ont d'ores et déjà été observées entre les propriétés mécaniques de ces films polymères et les mécanismes d'adhésion cellulaire. Il s'agit d'examiner l'évolution des propriétés mécaniques d'une phase amorphe (100%) en fonction du ratio masse molaire/épaisseur du film. Les premiers travaux seront menés sur des matériaux en l'absence de phase cristalline (par souci de simplicité) et permettront de comprendre les phénomènes observés et qui risquent d'être accentués en présence de phase cristalline (projet d'ANR « Jeunes chercheurs » courant 2011).

La difficulté d'estimer l'aire de contact a conduit à développer à partir de l'AFM une technique d'expérimentation et d'analyse en imposant à effort constant, un déplacement oscillant à amplitude croissante (essai de mise en glissement cyclique). L'AFM est ainsi utilisée comme outil de sollicitation mécanique et permet de travailler à l'échelle de la morphologie microstructurale (e.g. cas de polymères). Cette technique sera appliquée dans le cas des travaux cités précédemment, et permet de déterminer les propriétés élastiques et d'examiner expérimentalement dans le cas de différents matériaux la validité des modèles théoriques utilisés de contact élastique adhésif voire visco-élastique. Des protocoles expérimentaux basés sur les techniques d'AFM et de nanoindentation seront également développés dans le cas spécifique de la caractérisation du comportement du tissu osseux dans le cadre d'un projet de collaboration fédératif avec le laboratoire BMBI (Biomécanique et BioIngénierie) de l'UTC.

### **Modélisation de comportement par des approches phénoménologiques à base physique ou des modèles micromécaniques**

Cette partie du projet concerne l'exploitation de modèles récemment développés ([Bouvier *et al.*, 2009]) permettant d'accéder aux propriétés mécaniques des matériaux par la description de leur microstructure. Il s'agit de modèles issus des approches de type Kocks-Mecking-Estrin où la loi d'évolution de la contrainte d'écoulement plastique est fonction de paramètres telle la taille moyenne des grains, la densité de dislocations locales... Des extensions de ces modèles dans le cas de sollicitations complexes (i.e. trajet de déformation autre que le trajet monotone) ont été récemment proposées et appliquées dans des codes de calculs par EF [Carvalho-Resende *et al.*, 2009]. Les perspectives envisagées concernent l'utilisation de ces modèles pour la simulation 3D de l'essai de nanoindentation sur matériaux à gradient (e.g. application dans le cas de matériaux métalliques traités en surface par des procédés d'abrasion). La microstructure initiale sera prise en compte. Cet aspect sera traité dans la thèse de J. Marteau (2010-2013). Par ailleurs, afin de prendre en compte les effets d'échelle (i.e. variation de la dureté avec la profondeur d'indentation), une extension de ces modèles à la plasticité à gradient (approche de Nix-Gao) sera effectuée.

Les travaux développés dans le cas des polymères semi-cristallins, des nano-composites et de manière plus générale des matériaux hétérogènes ont nécessité le recours à des modèles de comportement élastique et viscoélastique basés sur des approches d'homogénéisation avec prise en compte de la morphologie des phases constitutives. Des résultats préliminaires très encourageants



ont été récemment publiés ([Bedoui, Guigon, 2010], [Bedoui *et al.*, 2008]) dans le cas de polymères semi-cristallins avec prise en compte des effets de la présence des cristallites sur le comportement de la phase amorphe. Ces travaux seront fortement développés dans le travail de thèse de L. Thanh Nguyen 2010-2013) en relation avec les développements expérimentaux. Des applications dans le cas de comportements thermoélastique et elasto-plastique seront développées.

### **Développement d'outils de simulation 3D et applications dans le cas du contact rugueux par des approches semi-analytiques ou par éléments finis**

Cette partie du projet concerne le développement d'outils numériques 3D de simulation du contact rugueux par éléments finis, ou par modèles semi-analytiques. Les objectifs visés sont nombreux. Il s'agit, en premier lieu, d'étendre les travaux effectués dans le cas du contact rugueux 2D au cas 3D. Les perspectives porteront sur le développement de modèles semi-analytiques 3D de contact élasto-plastique entre surfaces rugueuses en tenant compte de l'évolution morphologique pour l'estimation de l'aire réelle de contact. Des extensions de ces modèles, pour intégrer les phénomènes d'adhésion, seront effectuées par les approches de type JKR (Johnson, Kendall and Roberts, 1971) ou DMT (Derjaguin, Muller and Toporov, 1975). L'originalité des travaux se situe dans la prise en compte des aspects contact multi-aspérité élastoplastique avec modification d'état de surface. Les travaux développés dans le thème morphologie 3D seront mis à profit pour la description fine de l'état de surface initial et de son évolution. Les simulations numériques seront menées dans le cas de contact statique et avec glissement pour aborder les problèmes d'usure. Des confrontations avec des résultats expérimentaux en terme d'évolution morphologique et d'aire de contact seront effectuées pour affiner les modèles semi-analytiques d'usure et d'évolution de profils (basés sur des indicateurs morphologiques d'état de surface), développés au sein de l'équipe. De telles confrontations nécessitent le développement d'essais spécifiques sur un microscope interférométrique équipé d'un système d'application d'effort. Les résultats issus des simulations numériques par modèle semi-analytique seront comparés à des simulations par éléments finis 3D de contact plan sur surface rugueuse en élastoplasticité avec modèle d'écrouissage isotrope et cinématique non linéaire. Les sollicitations de type charge-décharge seront examinées. Un premier travail de faisabilité a été mené dans ce contexte. Ces travaux permettent d'aboutir à terme aux liens entre états de surface et d'usure.

Les simulations de contact par éléments finis 3D développées ci-dessus, seront appliquées à l'étude de l'essai de nanoindentation. Il s'agit d'exploiter ces travaux pour :

(i) L'aide à la compréhension et à l'analyse expérimentale de l'essai. En effet, contrairement à l'étude des matériaux en volume où la caractérisation de leurs comportements se fait grâce à une large variété d'essais mécaniques, la caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux en proche surface est un exercice souvent difficile. La nanoindentation est l'un des rares essais employés dans ce contexte, cependant il convient de rester prudent face aux valeurs de module d'élasticité et de dureté mesurées (protocole expérimental, incertitudes de mesure, défauts de forme de la pointe, irrégularités de surface, difficulté de détermination de la surface effective de contact...). Le recours à la simulation numérique constitue une aide efficace pour l'aide à l'interprétation de cet essai. Elle permet par ailleurs, de disposer de données non enregistrables expérimentalement (déformation, contraintes, pression, cinématique...) et de mener des études de sensibilité, telle l'analyse du lien comportement du matériau, évolution de morphologie au voisinage de l'indenteur, retour élastique après décharge, ...

(ii) Calibrage (et/ou validation) de modèles par approche inverse à partir de données expérimentales en réponse globale (force – déplacement) et locale (évolution de profil de surface), (Thèse co-tutelle Université de Reims de L. Thien Nguyen 2010-2013).

### **Morphologie 3D de surfaces rugueuses**

Nous avons montré par diverses publications que pour tester l'efficacité d'un paramètre d'état de surface, une mesure de pertinence doit être construite et appliquée à la globalité des paramètres d'état de surface. Cette mesure de pertinence ne peut être dissociée de la fonctionnalité de surface. **Nous avons construit une méthodologie de traitement des paramètres 2D** (profilométrie) qui permet, à l'aide d'un système expert, de donner à l'utilisateur le (les) paramètre(s) d'état de surface optimal (optimaux) associé(s) à une fonctionnalité recherchée. Cette méthodologie nous a valu deux récompenses internationales (Meilleur article de l'année 2006 dans la revue Journal of Material

Science (IF1.6), Auteurs les plus cités dans la revue Acta Biomaterialia de 2005-2008 (IF3.1)). Nous proposons en perspective d'étendre notre application 2D au cas 3D. Un projet financé par la Région (200 KE) et le FEDER (100 KE) ainsi que deux thèses sont accordées sur cette problématique. Un système expert proposera les mesures à effectuer (archivage des surfaces numérisées) en fonction des paramètres de fonctionnalité recherchés. Les calculs des paramètres 3D seront alors effectués à l'aide d'algorithmes adéquats (C++) s'appuyant sur une base de données résultats qu'il conviendra de constituer relativement à des fonctionnalités attendues. Un système d'analyse statistique sera développé pour déterminer les paramètres pertinents. Nous comptons développer les analyses multi-échelles (ondelettes, splines, fractales, ...) pour déterminer les caractéristiques d'un ensemble d'éléments (échelle de la mesure, paramètre, filtre, ...) permettant de discriminer au mieux une propriété recherchée. Nous nous appuyerons sur une base de données topographique 3D d'état de surface qu'il conviendra de constituer, pour fournir aux diverses équipes un système de traitement commun. Nous nous attacherons à résoudre les verrous technologiques suivants :

- Dans les mesures sans contact, certains points ne sont pas mesurés. Or, la plupart des méthodes numériques en rugosimétrie 3D requièrent un pavage de l'espace equi-réparti. Il est donc nécessaire d'utiliser des algorithmes d'interpolation performants (pour assurer la continuité de l'information expérimentale) incluant la physique responsable de la perte de données (réflectivité de la surface, pentes locales des profils...).
- Dans certain cas, seule une réplique de la surface est envisageable pour effectuer la mesure ultérieurement. De nombreux matériaux existent pour répondre à ce besoin (e.g. résines thermodurcissables, élastomères...). Un travail de validation du protocole expérimental de dépose, de l'examen de la qualité de la réplique sera nécessaire et ce sur toutes les échelles fréquentielles de mesures.
- La mesure 3D est une mesure qui requiert un temps d'acquisition long, avec une résolution spatiale faible. En revanche, dans de nombreux systèmes de mesure 2D, la résolution spatiale est élevée et permet alors des mesures plus fiables. Nous proposons d'étudier la topographie 3D (morphologie, texture) afin de déduire les directions pour une mesure 2D optimum.
- Il existe plusieurs principes de technologies de mesure d'état de surface 3D (AFM, Interferométrie, tactile...). Nous proposons, en fonction de surfaces types, d'effectuer un comparatif des mesures obtenues. Ces analyses seront multi-échelles. Ces études seront menées pour qualifier la technologie la plus apte à caractériser une fonction visée.
- enfin, nous allons développer une méthode pour déterminer si un ensemble de mesures topographiques sur une même pièce est homogène : en effet, il est indispensable de posséder une méthode de pré-traitement afin de ne pas introduire de biais dans l'analyse ultérieure.

### **Rayonnement, Diffusion de connaissances, Transfert vers l'industrie**

Nous envisageons la parution d'un livre (un accord est signé avec l'éditeur HERMES). Nous avons comme projet la création d'un axe « rugosité et signal » dans une revue internationale à fort impact. Un projet est également en cours avec le laboratoire LTDS pour créer une revue spécialisée dans les états de surface. Un projet de partenariat avec le constructeur VEECO est en cours afin de transférer notre système expert sur les plateformes d'état de surface (AFM, Tactile, Interférométrie, Confocale). Notre équipe compte organiser un symposium de deux jours dans le but de créer les JIFES (Journées internationales Francophones des Etats de Surfaces). Nous avons le soutien d'une revue (Mechanical Systems and Signal Processing, Impact Factor 2.1, Elsevier) et serons soutenus par les participants au livre précédemment cité. Les perspectives directement issues de ce projet sont nombreuses. Un recrutement de Technicien affecté à la mesure des états de surface et d'un MDC dans le domaine des états de surface est demandé au Ministère. Finalement nous souhaitons la création d'une plate-forme de mesure d'état de surfaces, commune avec le CETIM qui permettrait de regrouper neuf appareils d'état de surfaces (AFM, Tactile, Mesure laser, Interférométrie, Confocale.....). Une salle de Métrologie est en cours de préparation à l'UTC ainsi que l'achat d'un Interféromètre haute résolution.

### 3.3.2 Endommagement et Dégradation des Surfaces et Interfaces (M2D)

Au niveau de l'action consacrée au **développement de techniques et méthodologies pour la caractérisation des matériaux**, il est nécessaire de développer davantage les méthodes d'analyse des signaux issus des mesures par **émission acoustique**. La manière actuelle d'exploiter les signaux acoustiques est très limitative dans le sens où elle ne restitue qu'une fraction de l'information véhiculée par les signaux et ne permet pas toujours une interprétation aisée des phénomènes observés. Des techniques de décision par intelligence artificielle sont d'ailleurs souvent utilisées pour pallier cette difficulté, mais elles nécessitent un haut degré d'expertise de l'utilisateur ainsi qu'une phase d'apprentissage qui n'est en aucun cas généralisable en dehors d'une application spécifique. Le traitement des signaux d'EA sur la base d'indicateurs scalaires répondait jusqu'à présent à une contrainte technologique liée aux limites de capacité de stockage des systèmes d'acquisition face à la large gamme de fréquence occupée par les signaux d'EA, interdisant ainsi l'échantillonnage temporel direct de leurs formes d'ondes. Les progrès continuellement réalisés dans le domaine informatique font que, pour la première fois, il est aujourd'hui possible de franchir cette limite. De fait, le Laboratoire Roberval vient de s'équiper d'un système d'acquisition qui permet l'échantillonnage temporel des formes d'ondes complètes des signaux d'EA. Cette avancée technologique ouvre des perspectives nouvelles et prometteuses sur les nouveaux traitements à imaginer pour exploiter au mieux l'information véhiculée par l'EA. Un projet en collaboration avec le thème 2 du laboratoire sera présenté en décembre 2010 dans le cadre des projets structurant de la région Picardie (projet ECOUTE).

Pour ce qui est de la **mesure des champs par corrélation d'images digitales (DIC)**, des améliorations techniques sont en cours (éclairage, système optique). Associées à une redéfinition des conditions de sollicitation, ces améliorations devraient permettre de discriminer les éléments limitants de cette approche, et de proposer une méthode expérimentale fiable et robuste de mesure de champs de déformation à une échelle plus fine que celle qui est accessible actuellement. Une fois ces difficultés techniques surmontées, l'objectif est de coupler ces résultats fournissant les déformations à l'échelle mésoscopique, soit à des modèles d'agrégats de grain dans le cas des matériaux métalliques, soit à des modèles géométriques descendant à l'échelle de la fibre pour les matériaux composites, afin d'en déduire des lois locales d'endommagement. Un système de stéréo corrélation d'image est en cours d'acquisition en collaboration avec nos collègues du laboratoire BMBI (fin 2010). Il devra enrichir les observations notamment en ce qui concerne les déformations hors plans.

En ce qui concerne le **contrôle non-destructif par méthodes magnétiques**, la compréhension et l'analyse du bruit Barkhausen restent un sujet d'actualité ; il existe encore de nombreux points d'amélioration de cette technique du point de vue expérimental (amélioration de la reproductibilité de la mesure). A l'issue des travaux qui ont été effectués récemment, la modélisation apparaît clairement comme une étape indispensable à l'interprétation du bruit généré par les matériaux hétérogènes. La grande variabilité des caractéristiques magnétiques des matériaux rend l'application de la technique Barkhausen encore délicate, cependant les applications de cette technique au suivi de l'endommagement et de la fatigue des matériaux peuvent constituer une perspective de développement intéressante. D'autre part, le développement du contrôle par mesures magnétiques s'appuie sur une expertise ancienne dans le laboratoire, qui inclut l'étude d'ensemble des couplages magnéto-mécaniques, en relation avec la microstructure des matériaux. Cette thématique conduit à d'autres développements, comme l'étude du soudage par impulsion magnétique (thèse en cours), l'étude du bruit généré par les transformateurs (début d'une collaboration avec le thème 2), et l'étude des interactions courant électrique / fissures.

Pour l'action associée à **la mécanique et à l'endommagement des matériaux en relation avec leur microstructure**, les perspectives concernent tout d'abord **l'endommagement des matériaux métalliques sous chargement cyclique**, pour lequel la démarche expérimentale mise en place permettra d'enrichir les modèles numériques à une échelle mésoscopique (de type agrégats de grains) à l'aide d'informations mécaniques locales. L'implantation dans des modèles de changement d'échelle du critère d'endommagement obtenu par cette action de recherche pourra offrir un cadre prédictif pour l'amorçage en fatigue, y compris pour des conditions de sollicitations se rapprochant de sollicitation-type en service (fatigue-endurance, fatigue multiaxiale, températures élevées). L'extension du critère d'endommagement aux essais de fatigue en température constituera la première étape de cette généralisation, en s'appuyant sur les compétences des membres du thème 3 en matière de couplage oxydation-comportement mécanique.

Concernant les **matériaux composites**, les futurs travaux se concentreront sur les composites à renforts interlock à travers trois axes :

- Le premier s'attachera à améliorer les modèles existants (par exemple, en introduisant des endommagements et le comportement viscoélastique non linéaire de la résine dans le modèle Voxel). De plus, la conception d'un outil d'aide à la décision dans le choix de matériaux composites à renfort 3D sera entreprise, regroupant l'ensemble des développements faits jusqu'à présent (tissus 2D, cousus, orthogonal 3D sandwich cousu) en y intégrant la modélisation analytique des interlocks.
- Le deuxième axe abordera le **collage de structures composites** à renfort interlock, comprenant aussi bien le collage par ajout d'un adhésif supplémentaire ou simplement par liaison en co-curing de deux monocouches interlock. Ces travaux feront appel aux concepts de la mécanique linéaire élastique de la rupture en y associant l'observation locale des phénomènes de décohésion. Cet axe fera l'objet d'une collaboration avec l'ONERA.
- Le troisième axe s'intéressera aux mécanismes d'endommagement des composites à renforts interlocks et **matrice céramique**. La nature spécifique de cette matrice induit des préoccupations supplémentaires essentiellement liées à leur emploi à haute température. Ce travail a pour objectif d'identifier les mécanismes de ruines pour des sollicitations dans le plan et hors plan, le comportement dans la troisième direction devenant un enjeu essentiel pour les composites à renfort 3D. Cette ouverture vers les composites à matrice céramique nécessitera d'une part, l'adaptation des méthodologies et concepts développés antérieurement, et sera d'autre part l'occasion d'un enrichissement des compétences des membres du thème et d'une mutualisation de leur savoir-faire en terme de matériaux cristallins et organiques. Ces travaux seront réalisés en collaboration avec la SNECMA et l'ONERA

Toujours concernant l'action associée à **la mécanique et à l'endommagement des matériaux en relation avec leur microstructure**, une autre perspective s'ouvre sur **l'interaction polymère / charges naturelles**. Jusque là, l'apport de l'ajout de charges et/ou fibres dans les matrices thermoplastiques a été motivé par des gains en masse et/ou une augmentation des performances mécaniques. Dans un souci de plus en plus écologique, cette approche intégrera dans le futur un paramètre environnemental. Dans ce contexte l'ajout de charges naturelles (fibres naturelles par exemple) devient aussi un enjeu scientifique. La mise en œuvre de ces nouveaux matériaux suppose deux phases : la première par extrusion de la matrice avec la fibre pour obtenir des *compounds*, et la deuxième par injection ou extrusion pour passer des *compounds* à la pièce de structure. Les propriétés de la structure finale seront alors affectées par l'évolution des propriétés des phases constituantes lors du procédé. En se basant sur ce qui a été développé dans l'activité mécanique des polymères du Laboratoire, une attention particulière sera accordée à la quantification de ces changements mécaniques, physiques et microstructuraux, à l'évolution des propriétés de la fibre naturelle lors du procédé (effet de la température et des efforts mécaniques sur les propriétés de la fibre et son intégrité), à l'interaction de cette fibre avec la matrice (phénomène de trans-cristallinité) et à l'effet de la présence de ces nouvelles charges sur la cinétique de cristallisation de la matrice. La combinaison d'une caractérisation expérimentale fine (mécanique et morphologique) et l'apport des modèles micromécaniques permettra de quantifier mécaniquement ces effets. Par la suite, cette quantification (changement de rigidité, de la fibre et/ou de la matrice) nous aidera à construire des lois de comportement plus robustes permettant un meilleur dimensionnement de ces nouveaux matériaux.

Enfin, concernant le comportement **des matériaux métalliques sous environnement agressif**, les travaux futurs vont se recentrer sur **les dégradations liées aux phénomènes d'oxydation/corrosion à haute température**. L'objectif est de renforcer les liens entre ces travaux déjà menés dans le thème 3 et ceux qui sont menés dans le thème 1 sur la **modélisation de l'endommagement des couches en proche surface**. Pour cela, il faut continuer à progresser sur l'analyse des signaux d'émission acoustique, comme suggéré ci-dessus, afin de mieux associer l'apparition de ces signaux aux phénomènes physiques qui en sont responsables. Parallèlement, il est nécessaire d'accéder à l'état de contraintes dans le duplex substrat métallique / couche de corrosion et d'en suivre l'évolution au cours de la croissance du film de surface à haute température. Ceci ne sera accessible qu'en couplant des mesures expérimentales à un modèle capable d'intégrer les différentes sources de déformation intrinsèques au matériau (déformation à l'interface substrat/film, déformation de croissance du film, ...). Différentes étapes sont donc nécessaires :

- Au niveau expérimental, il est envisagé à court terme, de mettre au point un essai de déflexion de lames minces. Le principe est d'oxyder à haute température, une des deux faces de la lame (l'autre face étant protégée de l'oxydation) et de suivre la courbure de cette lame due aux contraintes mécaniques générées par l'oxydation.
- L'accès aux différentes sources de déformation reste une étape délicate à franchir. Dans un premier temps, il est envisagé de s'atteler à la détermination des déformations se développant à l'interface substrat/film, déformations essentiellement dues aux relations d'épitaxie. Ceci fait appel à des calculs basés sur la théorie du réseau O de Bollmann, et à des mesures expérimentales des relations d'orientation cristallographiques entre métal et film, par la technique sEBSD.
- Afin de remonter par le calcul à l'état de contraintes du duplex métal/film à partir des sources de déformation, il sera nécessaire d'accéder à une bonne connaissance de la loi de comportement du substrat et du film en température. Pour le substrat, des méthodes d'investigation classiques doivent suffire et ne nécessitent donc pas de travaux de recherche spécifiques ; en revanche, pour ce qui concerne le film, il est envisagé d'avoir recours à des essais de micro-indentation instrumentée fonctionnant à haute température. Le laboratoire sera équipé de ce dispositif courant 2011, suite à un développement de cet appareil dans le cadre du projet structurant régional DUCHEM, en collaboration avec la société CSM (Suisse). Un recours à la simulation numérique des essais d'indentation sera nécessaire pour réaliser le calage des lois de comportement par méthode inverse.

Cette démarche globale nécessitera donc des interactions fortes thème 1/ thème 3 du laboratoire Roberval. Une partie de ces travaux est déjà engagée dans le cadre du projet structurant régional SIGMA-FILM débuté fin 2009.

## 4 MISE EN OEUVRE

### 4.1 LES MOYENS HUMAINS

Pour le prochain plan quadriennal, les demandes de recrutement suivantes sont envisagées. Celles-ci correspondent au maintien et renforcement des trois thèmes du Laboratoire en prenant en compte les réorientations du Laboratoire et les départs en retraite probables :

- activité non maintenue en corrosion aqueuse au profit de la corrosion en température,
- soutien des activités en vibroacoustique (détection de sources, traitement des signaux),
- pérennisation de l'activité en mécanique et acoustique numériques,
- renforcement du personnel technique (développement des plateformes),
- soutien technique aux charges administratives.

Statut	Spécialité	Thème	Année
MCF	VibroAcoustique	2	2011
MCF	Corrosion en température	3	2011
PR	Systèmes Mécaniques, couplages multiphysiques	3	2011
PR	Corrosion en température	3	2012
PR	Acoustique Numérique	2	2014
PR	Mécanique Numérique	2	2015
IATOS	Gestionnaire	SC	2012
ITA ou IATOS	Informatique et calcul	SC	2012
ITA ou IATOS	Expérimentation (matériaux)	3	2013
ITA ou IATOS	Expérimentation (matériaux)	3	2013

#### Recrutements envisagés 2011-2015

Le Laboratoire est confronté à un manque criant d'effectifs ITA dans nombreux domaines : gestion, valorisation, informatique, expérimental... Une politique de recrutement du personnel contractuel sur les ressources propres devra être envisagée, avec tous les risques que cela comporte : précarisation des statuts, désengagement des tutelles. Cette tendance, liée aux évolutions actuelles du paysage universitaire semble inévitable.

Au cours du quadriennal, cinq départs à la retraite sont programmés.

L'attractivité du Laboratoire vis-à-vis de candidats aux postes de chercheurs CNRS est à travailler. Cela passe par le recrutement des candidats en thèse et en post doc de grande qualité afin de préparer les candidatures potentielles.

### 4.2 LA POLITIQUE D'ANIMATION DE L'UNITÉ

L'audition des doctorants de première année est organisée systématiquement, pour des besoins de communication interne dans le Laboratoire, mais aussi pour permettre de repérer précocement les situations difficiles.

Les journées des doctorants se déroulent au mois de juin sur un site extérieur, sous la forme d'un mini-colloque, accompagné d'un événement festif en fin de journée.

Le séminaire hebdomadaire du jeudi après-midi accueille des intervenants extérieurs et locaux. Des initiatives d'animation scientifique ont également lieu dans les thèmes.

Le Laboratoire va continuer la politique d'affectation des financements de thèse en priorité aux jeunes maîtres de conférence.

On sensibilise les membres de l'unité à publier dans les revues reconnues par un des outils de référencement de la publication scientifique.

#### 4.3 LE SCHÉMA DE FINANCEMENT DU PROJET PRÉSENTÉ.

Le financement se compose de la dotation annuelle du Ministère, d'une dotation du CNRS (résiduelle, car liée au nombre de chercheurs CNRS) et du prélèvement de 10% sur les contrats. Ce financement sera maintenu.

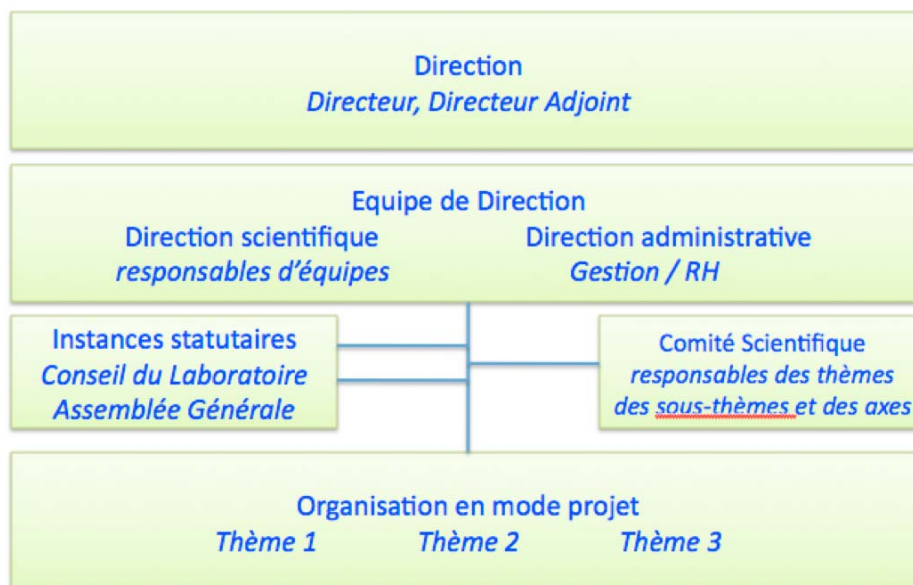
#### LES INVESTISSEMENTS du LABORATOIRE

thème 1 : le thème va continuer à investir dans les moyens de calcul communs du Laboratoire, avec des investissements principalement de renouvellement de serveurs de calcul de l'ordre de 50K€/an ; sur le plan des licences de logiciels, un investissement du même ordre sera nécessaire ; le mode de fonctionnement proposé s'appuie sur le Pôle Régional de Modélisation regroupant les centres de recherche industriels picards (ArcelorMittal, Montupet, Inergy), avec le soutien de la Région Picardie ;

thème 2 : vu les gros investissements réalisés dans la deuxième partie du quadriennal actuel (de l'ordre de 2M€), le thème ne prévoit pas d'équipements lourds supplémentaires ; les besoins se situeront principalement au niveau du fonctionnement, qui devra faire appel aux projets de recherche ;

thème 3 : l'acquisition d'un micro-tomographe (450K€) sera proposée dans le cadre du futur CPER ; une plate-forme de mesure d'état de surfaces commune avec le CETIM permettra de regrouper neuf appareils d'état de surfaces (AFM, Tactile, Mesure laser, Interférométrie, Confocale....). Une salle de Métrologie est en cours de préparation à l'UTC ainsi que l'achat d'un Interféromètre haute résolution.

#### 4.4 ORGANISATION FONCTIONNELLE DU PROJET PRÉSENTÉ.



## **4.5 HYGIÈNE ET SÉCURITÉ**

Suite à l'établissement du document unique par les groupes de travail du comité d'hygiène et sécurité, les risques ont été classés en quatre catégories (prioritaires, secondaires, sous contrôle et non significatifs). Des actions d'amélioration seront poursuivies pour contrôler ou supprimer ces dysfonctionnements.

Les quantités de produits chimiques entreposés dans les laboratoires vont continuer à baisser.

Afin de sensibiliser encore plus les membres de l'unité, il est envisagé d'ouvrir une session Hygiène et Sécurité sur le site intranet du laboratoire.