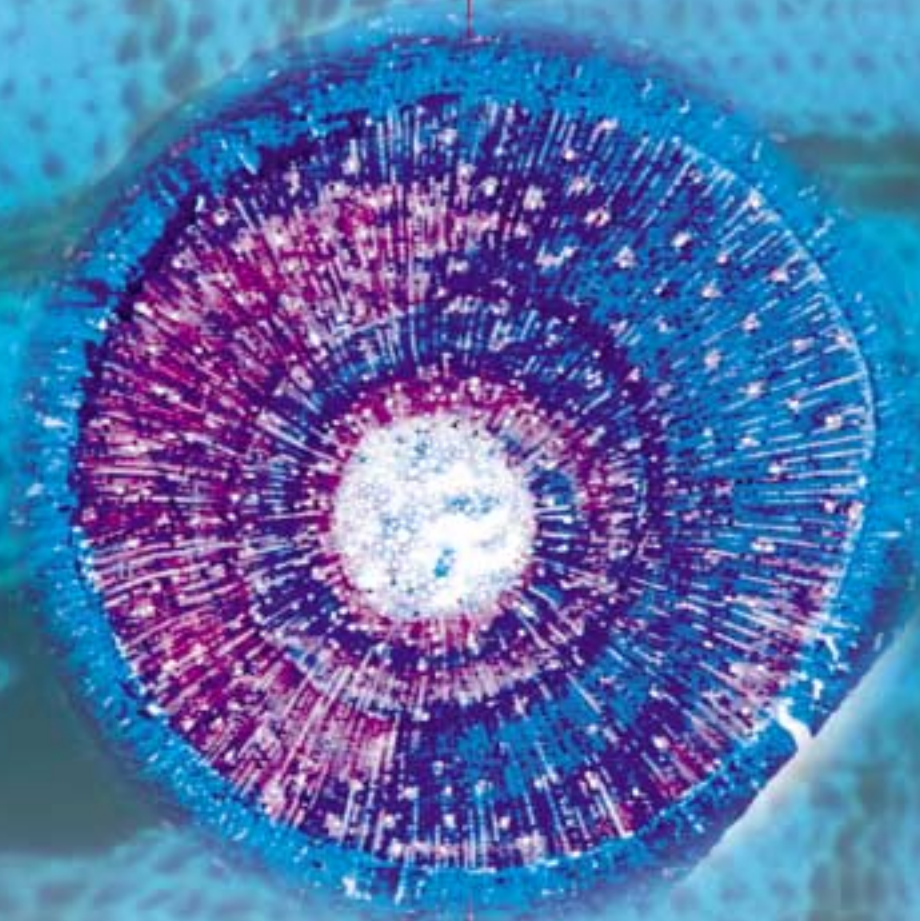


# SCIENCE S POUR L'INGÉNIEUR

LETTRES DES DÉPARTEMENTS SCIENTIFIQUES DU CNRS

N° 37 - FÉVRIER 2004



*Editorial*  
*Politique et événements*  
*Vie scientifique*  
*Brèves du département*



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

<b>Editorial</b>	par Victor Sanchez	3
<b>Avant-propos</b>	par Michel Suéry	4
<b>Politique et événements</b>		
	La Fédération FM2SP... Une nouvelle approche en Ile-de-France	5
	Distinction de l'Académie des Sciences	7
	Zoom labo : le GEPEA	8
	GDR Mousses solides	9
	La rénovation de la chambre sourde du LMA	11
	Le moyen national d'essai Propulsion Ionique pour les Vols Orbitaux - PIVOINE	12
	Le projet Allègement des structures dans l'aéronautique	14
	Le programme national PREDIT	16
	Les entretiens approfondis de chercheurs (EAC)	17
<b>Vie scientifique</b>		
<b>Matériaux et procédés</b>		
	Métaux à grains ultra fins	18
	Calcul et <i>design</i> de microstructures : une question de longueur interne ?	20
	Modélisation et expérimentation en usinage grande vitesse	22
	Tribologie - Matériaux - Procédés	26
	Procédés assistés par plasma pour la préparation des surfaces	28
	Les nanocomposites à matrice polymère	30
<b>Diagnostics lasers</b>		
	Diagnostic X de milieux polyphasiques. Exemple de la mesure de densités dans la zone proche injecteur d'un jet cryogénique d'azote sous haute pression	32
	La vélocimétrie par images de particules : une méthode d'imagerie quantitative pour la mécanique des fluides	36
	Les suies traquées par leur incandescence	40
<b>Brèves du département</b>		
	Session de printemps 2003	44
	Bourses 2003	49

# Editorial

La recherche bouge. L'ouverture vers l'Europe, phénomène irréversible, n'est pas étrangère à ce frémissement.

Le CNRS et ses laboratoires, conscients de la hauteur des enjeux, relèveront les défis qui se présentent. L'une des manières pour y parvenir, sans doute la plus pertinente, est de montrer clairement l'avancée de nos connaissances, leur intérêt scientifique mais aussi socio-économique. C'est l'objet de la lettre du département.

J'ai souhaité qu'elle devienne un véritable outil d'échange d'informations pour notre communauté et une vitrine pour le monde extérieur à la recherche. Pour cela au delà des nouvelles brèves concernant la vie du département, j'ai tenu à constituer des dossiers scientifiques sur l'avancement de nos recherches dans le cadre de nos thématiques prioritaires. Dans cette lettre, deux dossiers sont traités : la seconde partie du dossier des *Diagnostics Lasers* et un dossier spécifique *Matériaux et Procédés*.

D'autres dossiers paraîtront dans les prochains numéros. Je laisserai une place plus importante à nos ITA pour qu'ils fassent mieux connaître leurs réalisations et pour qu'ils parlent de leurs préoccupations. Un dossier spécifique paraîtra en 2004 sur nos relations avec les entreprises.

Je tiens à remercier le Comité Editorial de la Lettre, Michel Suéry coordinateur du dossier *Matériaux et Procédés* et l'ensemble des auteurs qui ont consacré beaucoup de temps à la rédaction de leurs articles.

Notre lettre doit être diffusée et lue aussi largement que possible. En plus du tirage, elle est disponible sur le site web SPI.

N'hésitez pas à nous faire parvenir vos remarques et suggestions pour améliorer sa forme et son contenu. Parvenir à l'excellence est l'affaire de tous.



**Victor Sanchez**

# Avant-propos

Dans ce nouveau numéro de la Lettre SPI, nous vous proposons un dossier consacré aux matériaux et procédés, plus exactement aux matériaux de structure et aux procédés.

Quelles motivations derrière ce thème ?

Actuellement, les matériaux de structure évoluent de façon importante et constante suivant une tendance générale : ils doivent être plus légers et plus performants. Ces performances concernent non seulement leurs propriétés mécaniques mais aussi d'autres propriétés, acoustiques ou thermiques par exemple. On parle alors volontiers de matériaux multifonctionnels. Pour aboutir à ces performances, les matériaux peuvent présenter des architectures complexes, tels les mousses ou les matériaux enchevêtrés. De plus en plus souvent également, le préfixe nano s'impose pour définir ces matériaux. On les qualifie alors de matériaux nanostructurés ou de nanomatériaux. Deux articles relatifs aux métaux et aux polymères illustrent cet aspect.

Pour les nanomatériaux ou pour les matériaux plus traditionnels, la modélisation de leur comportement mécanique constitue un enjeu important en vue du calcul de structures. La mécanique des milieux continus ne suffit plus pour décrire leurs propriétés car les effets d'échelle peuvent devenir très importants. La description du comportement de matériaux dits à longueur interne est en plein développement. Un article leur est consacré et illustre la nécessité de cette mécanique non traditionnelle dans le cas des mousses métalliques et des polycristaux.

Le deuxième volet de ce dossier porte plus particulièrement sur les procédés. En effet, ces deux aspects ne peuvent plus être découplés : trois exemples de procédés couplés aux matériaux sont présentés. L'usinage a fait ces dernières années de gros progrès avec le développement de procédés à grande vitesse. Par ailleurs, les contraintes environnementales imposent des lubrifiants moins polluants voire l'absence de lubrifiants. L'usinage à grande vitesse à sec devrait ainsi s'imposer dans un avenir proche comme une nécessité dans la perspective du développement durable. Les traitements de surface constituent une deuxième famille de procédés pour lesquels les progrès devront être importants compte tenu là encore des contraintes environnementales. Deux sujets sont abordés dans ce dossier, les dépôts DLC (Diamond Like Carbon) pour lesquels le couplage procédé – microstructure – propriétés tribologiques est particulièrement fort et les procédés assistés par plasma pour la préparation des surfaces.

La multiplicité des sujets et l'importance des travaux développés par les équipes du SPI témoignent de l'actualité du thème. Plusieurs dossiers seraient ainsi nécessaires pour en rendre compte. Cependant, le choix concernant ces derniers est clair : offrir dans chaque numéro un aperçu des recherches effectuées dans les laboratoires SPI. Place donc à de nouveaux dossiers thématiques, en profitant toutefois de cet avant-propos pour lancer un appel auprès des équipes qui souhaiteraient faire part dans un prochain numéro de la lettre du SPI de leurs compétences concernant le développement de nouveaux matériaux et de procédés.

**Michel Suéry**

*Chargé de mission au département SPI  
et membre du Comité éditorial de la Lettre*





# La Fédération FM2SP...

## Une nouvelle approche en Ile-de-France

La Fédération francilienne en mécanique des matériaux, structures et procédés (FR2609) a été créée en janvier 2003. Son action concerne, à travers 21 unités de recherche, près de 60 équipes, soit plus de 250 chercheurs et enseignants-chercheurs, 20 ingénieurs de recherche et d'études et 280 doctorants.

Cette initiative est novatrice : c'est la première fois que, sous l'égide du CNRS, une action de recherche couvrant un champ aussi large se met en place en Ile-de-France.

Le département SPI a donné la parole à son directeur, André Zaoui, directeur de recherche au CNRS, qui exposera brièvement la volonté et la stratégie qui animent la Fédération FM2SP.

### Sur les plans scientifique, opérationnel et stratégique, quelles motivations animent la mise en place de la Fédération FM2SP ?

La motivation scientifique est très proche de celle qui préside à l'actuelle redéfinition du champ couvert par la section 9 du Comité national de la recherche scientifique : elle relève du nécessaire rapprochement des problématiques concernant respectivement les structures, les procédés et les matériaux, de celui des approches théoriques, expérimentales et numériques ainsi que des investigations opérant à différentes échelles. Le champ est large et les besoins aussi. Pour atteindre ces objectifs scientifiques, il faut mobiliser pleinement les synergies possibles et valoriser au mieux la complémentarité des compétences. Ceci requiert une structure ayant la masse critique et la volonté nécessaires, d'où la création de la fédération.

Sur le plan opérationnel s'imposent efficacité et rationalisation concertée des moyens humains et matériels de la recherche. En faisant valoir les besoins collectifs d'une communauté coordonnée, il sera plus facile de convaincre de leur bien-fondé et, par exemple, d'accé-

der à certains grands instruments, voire de les adapter à ces besoins (Soleil !...). La fédération peut aussi améliorer la visibilité des forces de recherche concernées auprès de partenaires publics ou privés, au plan régional, national ou européen.

Elle doit aussi œuvrer pour le renouveau de l'image des sciences mécaniques en attirant les jeunes talents, aujourd'hui trop souvent fascinés par des domaines plus médiatisés tels que les NTIC. La mécanique n'a rien à envier à d'autres domaines en matière de modernité « high tech » : c'est ce qu'il faut démontrer. Une nouvelle dynamique s'engage pour le prouver ; la fédération s'efforcera de l'amplifier en organisant des forums de discussion et de rencontre et en créant les outils de communication nécessaires<sup>1</sup>.

L'Ile-de-France dispose d'une concentration exceptionnelle de grandes écoles d'ingénieurs : c'est une chance et une force ! Ce peut être aussi une faiblesse, par les risques, désormais inacceptables, d'émiettement et de « doublons ». Le renouvellement de toute une génération de chercheurs, à la faveur de départs massifs à la retraite, est une excellente

opportunité de réorganisation des forces et des compétences. En Ile-de-France, la fédération doit jouer un rôle important et s'imposer comme l'horizon naturel de ce renouveau et de la réflexion qui l'aura préparé. Elle le fera d'autant mieux qu'elle aura su faire travailler la nouvelle génération sur un programme de recherche construit ensemble, qu'elle aura su identifier et traiter de nouveaux sujets, engager de nouvelles approches, favoriser l'échange des idées et des compétences, révéler et valoriser au plan régional tout le potentiel existant.

### Comment décrire, de façon succincte, son fonctionnement ?

Nous avons souhaité, dès le départ, construire la fédération dans la définition et la réalisation d'un vrai programme de recherche ; ses projets, 13 au total, forment un noyau volontairement formalisé mais régulièrement revisité ; ses groupes d'étude préparent de nouveaux projets et ses « actions d'accompagnement » tissent les liens multiples du réseau dans son ensemble. C'est un principe d'organisation qui constitue une singularité de cette fédération. De

1. Ainsi, le site web de la fédération sera bientôt disponible à l'adresse : [www.idfmeca.polytechnique.fr](http://www.idfmeca.polytechnique.fr)

façon liée, les responsables de ces actions sont le plus souvent des représentants de la nouvelle génération de chercheurs, apprenant à assumer de nouvelles responsabilités dans ce cadre élargi et se préparant à s'approprier cet outil, porteur de leur propre avenir.

La fédération est une structure ouverte et évolutive. Elle entretient trois types de collaborations : d'abord celle des laboratoires membres, déjà associés au CNRS, pour celles de leurs équipes engagées sur son programme ; ensuite celle des laboratoires et équipes associés, pouvant appartenir à d'autres organismes de recherche (ONERA, CEA...) et enfin celle des équipes « postulantes » avec qui des collaborations partielles sont déjà engagées, permettant de mieux envisager concrètement leur possible intégration ultérieure... Définie sur une base régionale, la fédération n'en est pas moins ouverte sur des collaborations nationales (GDR, CNRT, associations diverses...), notamment avec d'autres entités régionales, et internationales, à commencer par les actions en vue de la construction de l'espace européen de la recherche.

### Quels sont les apports attendus d'une structure fédérative sur le plan régional, national et européen ?

Au niveau de la région, elle doit établir un nouveau dialogue, fécond et durable, avec les instances franciliennes qui, contrairement à bien d'autres, n'ont jusqu'ici guère manifesté un intérêt marqué pour le développement de la recherche.

Sur le plan national et européen, la fédération doit d'abord bien définir et exprimer son identité propre, marquée par ses compétences particulières en modélisation mécanique multiéchelle, cou-

plée à l'expérimentation et à la simulation numérique ; cette spécificité lui permet de définir son spectre d'action et ses complémentarités par rapport à d'autres structures régionales, notamment par rapport à la Fédération Rhône-Alpes, plutôt marquée *Sciences des matériaux et expérimentation* et à l'ensemble lorrain, plutôt axé sur *Sciences des matériaux et procédés*. Sur cette base, nous pouvons exploiter comme il le faut nos complémentarités et construire des projets cohérents et convaincants aux plans national et européen. C'est ce que nous avons déjà fait en préparant ensemble un projet pour le 6<sup>e</sup> PCRD, qui, bien qu'il n'ait pas été retenu, va pouvoir être repris et proposé dans le cadre le plus approprié.

En ce qui concerne les relations avec les partenaires industriels, la fédération veut être source d'information, de concertation et d'orientation car elle est à même de bien identifier, par rapport aux besoins exprimés, les compétences disponibles. Mais pour jouer pleinement le rôle qui lui revient, elle doit concentrer ses efforts sur des recherches plus en amont, identifier et engager de nouveaux sujets porteurs et forger de nouvelles approches, ce qui n'est pas toujours l'attente immédiate de l'industrie. En ce sens, elle dépend beaucoup du soutien que le CNRS acceptera de lui donner, au moins au démarrage. Ici, l'organisme doit comprendre que, sans cet investissement initial (traduit très concrètement par l'octroi de quelques bourses BDI classiques et de leurs moyens d'accompagnement), il sera très difficile d'engager dans cette aventure collective volontariste les jeunes chercheurs les plus talentueux, qui risquent d'être « happés » par l'environnement plus rassurant et mieux rodé de leur propre équipe et de leur propre laboratoire.

### La Fédération est en place depuis janvier 2003 ; que formulez-vous comme objectifs prioritaires ?

Je compte beaucoup dans un premier temps sur le démarrage de nouveaux thèmes déjà identifiés, tels que *Biomatériaux et biomécanique*, *Matériaux multifonctionnels et structures réactives*, *Nanomatériaux et nanomécanique*, *Identification de comportements à partir de mesures de champs...*, parmi d'autres. Les différents groupes constitués ont déjà démontré que la structure fédérative permet de recenser les forces et d'oser se lancer sur de nouvelles pistes, de pointer les complémentarités, de réduire les doublons et, *in fine*, de gagner en efficacité !

A plus long terme, la fédération doit aussi permettre de défricher de nouvelles approches, de développer de nouvelles méthodes, sur une base réellement multidisciplinaire (approches multiéchelles, couplages chimie/mécanique, approches probabilistes...).

D'autre part, nous attendons que sa représentativité et son rayonnement favorisent une meilleure visibilité et permettent une meilleure défense des projets proposés dans les cadres régionaux, nationaux ou européens.

*Propos recueillis par H. Devillers*

### Contact :

André Zaoui  
Laboratoire de mécanique des solides  
Ecole polytechnique  
91128 Palaiseau cedex  
Tél. : 01.69.33.33.70  
Fax : 01.69.33.30.26  
Mél : zaoui@lms.polytechnique.fr

# Distinction de l'Académie des Sciences

*Le prix Jaffé de l'Académie des Sciences 2003 a été attribué à Joël Sommeria, directeur de recherche au CNRS travaillant au Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels – LEGI – Unité mixte de recherche 5519.*

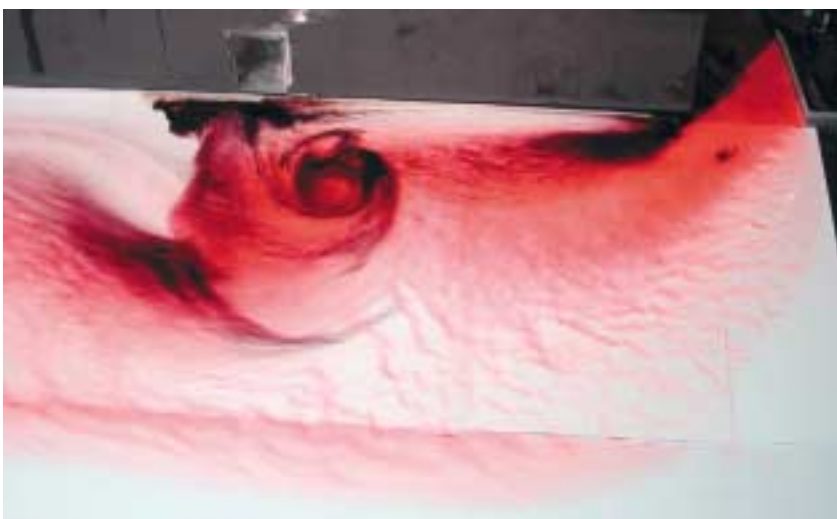
Ce prix récompense ses contributions à l'étude de la turbulence dans les fluides stratifiés en rotation. Ces travaux apportent une assise expérimentale pour la modélisation de la dynamique atmosphérique ou océanique.

Joël Sommeria est responsable depuis quatre ans de la grande plate-forme tournante Coriolis de Grenoble. Cet équipement, construit dans les années 1960 pour supporter un modèle physique de la Manche, était destiné à l'étude d'usines marémotrices. Ensuite, sous l'impulsion de son premier responsable, Gabriel Chabert d'Hières, elle a été reconvertie vers des études plus diversifiées de processus dynamiques. Sa reconnaissance interna-

tionale s'est concrétisée depuis 1992 par des contrats européens d'accès aux grands instruments.

Joël Sommeria a orienté ses travaux vers l'étude de régimes turbulents, pour lesquels les grandes dimensions de cet instrument permettent de combiner turbulence à petite échelle et mouvements tourbillonnaires quasi horizontaux à plus grande échelle. Ces problèmes sont particulièrement critiques dans les courants de gravité qui contrôlent les flux d'eau froide vers le fond de l'océan. Ils interviennent également dans les couches limites turbulentes et leur interaction avec la topographie, importantes pour l'océanographie côtière. Par ailleurs, sous

l'impulsion de Jacques Verron, directeur du LEGI, il a orienté les études en laboratoire vers la réalisation d'un « banc d'essai d'océanographie opérationnelle ». Des méthodes d'assimilation de données développées au LEGI par l'équipe de modélisation océanique permettent dès lors de tester un modèle en régime fortement instationnaire, à différents stades de son évolution. Une validation expérimentale des modèles numériques de l'environnement peut alors être obtenue, au même titre que la soufflerie utilisée en aérodynamique. Cette méthode ouvre ainsi de nouvelles perspectives à l'utilisation de « modèles physiques ».



*Vue de dessus d'un courant de gravité sur une pente dans la cuve tournante Coriolis, simulant la descente d'eau polaire. Le fluide dense, coloré en rouge, est introduit en haut et s'écoule le long de la pente, tout en étant dévié vers la droite par la force de Coriolis (échelle de la photo : 2 m x 3 m). Le colorant noir est injecté au-dessus du courant de gravité et permet de visualiser des tourbillons produits par instabilité barocline.*

## Contact :

Joël Sommeria  
Laboratoire des écoulements géophysiques et  
industriels - UMR 5519  
21, rue des Martyrs  
38000 Grenoble  
Tél. : 04.76.86.61.82  
Fax : 04.76.87.97.93  
Mél : [sommeria@coriolis-legi.org](mailto:sommeria@coriolis-legi.org)

## Zoom labo : le GEPEA

Créé en 1999, le laboratoire GENie des Procédés Environnement Agroalimentaire (GEPEA) développe, autour de la complémentarité écoulements – transferts – réactions dans les milieux complexes, le génie des procédés dans les domaines de l'environnement, de l'agroalimentaire et de la valorisation des produits de la mer. Cette démarche lui confère sa singularité. Son programme de recherche retenu dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région 2000-2006 est financé à hauteur de 1,8 M€ sur 7 ans. Depuis janvier 2002, GEPEA<sup>1</sup> est associé au CNRS en tant qu'unité mixte de recherche relevant du département des Sciences pour l'Ingénieur. Son potentiel humain représente une centaine de personnes.

Ses activités de recherche s'organisent autour de trois axes :

### Axe : Ecoulements et transferts

Les actions qui y sont développées reposent sur des études expérimentales faisant appel à différentes méthodes de mesures : anémométrie à fil chaud, vélocimétrie laser, analyse d'image, vélocimétrie par image de particules, méthodes électrochimiques...

La modélisation des procédés s'appuie sur l'élaboration de modèles de connaissance intégrant les apports de l'analyse locale des écoulements. La simulation numérique (utilisation des codes FLUENT et CFX et développement d'un code LES) est étudiée dans des géométries particulières adaptées aux procédés mis en œuvre.

Les applications concernent en particulier le confinement d'atmosphères nocives par jet et rideau d'air, le contrôle de la qualité de l'air dans les procédés agroalimentaires, la valorisation des matières premières naturelles et le domaine de l'environnement. Les principaux projets s'articulent autour de la complémentarité approche expérimentale-simulation numérique pour la conception de dispositifs de confinement, du développement de procédés utilisant des écoulements complexes et de l'étude des milieux poreux en vue d'applications

1. UMR 6144 sous la tutelle de l'Université de Nantes, l'ENITIAA, de l'Ecole des Mines de Nantes et du CNRS.

2. Le GIS PROSETIA a fait l'objet d'un article dans la Lettre du SPI, n° 36 - octobre, 2003.



Générateur de sorbet à surfusion (brevet CNRS)



dans le domaine de l'environnement. Plusieurs programmes sont en cours :

- le développement des méthodes électrochimiques pour l'étude des phénomènes de transfert, dans le cadre du programme COST-CEE F2 *Electrochemical sensors for flow measurements*, avec des applications dans le domaine de la microfluidique. Les capteurs, de toute petite taille, fournissent des renseignements sur l'écoulement et sur les transferts associés,

- l'utilisation de méthodes électrochimiques pour l'étude du nettoyage en place des installations agroalimentaires en collaboration avec l'INRA de Lille. En 2002, soutenu par les ministères de l'Agriculture et de la Recherche, le programme *Aliment – Qualité – Sécurité* (AQS) comptant la participation des industriels (Lactalis, Bocard, CETIM, Goavec, Pierre Guérin) a été initié ; il est relayé dans le cadre du GIS CNRS/INRA *PROcédés de SEparation et de Transformation dans les Industries Agro-alimentaires* (PROSETIA)<sup>2</sup>.

- la modélisation de la fluidisation liquide non-newtonien-solide dans le cadre du

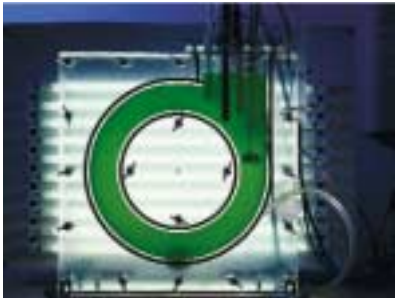
programme Barrande avec l'Université de Pardubice (République Tchèque).

### Axe : Procédés de séparation

Les procédés d'adsorption-désorption sur matériaux poreux, en particulier charbon actif et tissus de carbone activé, sont mis en œuvre sur des unités pilotes et les conditions d'utilisation sont optimisées en vue d'obtenir les meilleures performances d'élimination des charges polluantes (dans l'eau ou dans l'air), ou de récupération de co-produits. Les procédés sont étudiés dans leur globalité : matériaux, écoulement dans les milieux poreux, transfert à l'interface et réaction chimique ou biologique. Les procédés à membrane permettent la valorisation des produits de la mer et des cultures marines (production de métabolites à partir de microalgues et cyanobactéries, modification de l'eau de mer pour des applications bio-médicales, extraction d'arômes de poissons et crustacés). Les programmes concernent :

- l'intensification par couplage de procédés et utilisation de réacteurs multifonctionnels





Photobioréacteur torique pour la culture en conditions contrôlées de microalgues.

Crédit photo : Pascal Goetgueluck

tionnels pour le traitement de l'eau et de l'air (élimination des particules et micropolluants, bioprocédés, ...),

- la valorisation des boues des stations d'épuration (programme *Eau et technologies de l'environnement* - RITEAU)

- la concentration et le fractionnement de protéines et arômes issus des jus de cuisson de poissons et crustacés (programme interrégional Bretagne-Pays de la Loire),

- le développement des bioréacteurs à membrane dans les domaines de l'environnement et de la valorisation des microalgues (bioproduction). Une partie de cette activité est faite dans le cadre du programme Microbiological Ecological Life Support Alternative (MELISSA) de l'Agence Spatiale Européenne,

- le développement de la chromatographie de partage centrifuge avec la mise en place d'un consortium pour la conception d'équipements industriels.

### Axe : Mélange – réacteur – transformations thermomécaniques

Cet axe de recherche vise l'étude des systèmes polyphasiques. Les relations entre les paramètres physico-chimiques et ceux du procédé sont particulièrement étudiées. Y sont développés des outils expérimentaux et notamment : cuves agitées pilotes, mélangeurs statiques, enceinte haute-pression, homogénéisateur haute-pression, système de congélation, extrudeur de laboratoire. La modélisation des résultats requiert l'approche systémique, couplée parfois à l'élaboration de modèles de connaissance utilisant les acquis de l'automatique et à la simulation numérique dans les cas où cette dernière peut suppléer efficacement l'expérimentation. Les programmes développés concernent :

- l'étude des procédés d'émulsification et de leurs interactions avec les caractéristiques des émulsions, en intégrant le comportement des tensioactifs protéiques et polysaccharidiques. L'étude des interactions émulsification-foisonnement sera réalisée dans le cadre du Réseau de recherche et d'innovation technologique Alimentation Référence Europe (RARE) du ministère de la Recherche,

- le développement des procédés de microencapsulation, notamment dans le cadre du programme européen Growth,

avec la mise en place d'un Institut virtuel *bioencapsulation sciences and technology*. Le partenariat industriel est aussi privilégié, - le développement de procédés frigorifiques innovants et d'outils de modélisation et de commande (collaboration en IRM-RMN avec le Cemagref Rennes), et des transferts couplés masse-chaleur dans les matrices biologiques hétérogènes et alvéolaires, programmes européens *Bugdeath* et *Safe-Ice*,

- l'étude des traitements thermomécaniques avec un triple objectif : l'encapsulation d'arôme, l'extrusion réactive et le contrôle du procédé,

- la modélisation des photobioréacteurs (collaboration avec IFREMER et l'Université de Clermont-Ferrand) et le développement des procédés de production d'hydrogène à partir de microalgues (collaboration avec le CEA de Cadarache) dans le cadre du programme *Energie* du CNRS-ministère de la Recherche.

#### Contact :

Jack Legrand

Laboratoire génie des procédés environnement agroalimentaire, UMR 6144

CRTT - IUT - BP 406

44602 Saint-Nazaire cedex

Tél. : 02.40.17.26.33

Fax : 02.40.17.26.18

Mél : [Jack.Legrand@gepea.univ-nantes.fr](mailto:Jack.Legrand@gepea.univ-nantes.fr)

## GDR Mousses solides

*Les mousses solides sont une famille de matériaux dont le comportement ne peut être compris qu'en associant les propriétés du matériau constitutif, la géométrie et la topologie de la répartition de la matière. De nombreuses équipes s'intéressent à ce type de matériaux, s'attachant, soit aux procédés, soit aux propriétés (mécaniques, acoustiques, thermiques) mais en ne considérant la plupart du temps qu'un type de matériau (polymère, métal, céramique).*

Le développement d'approches communes aux différentes classes de matériaux était donc peu fréquent et les efforts de modélisation souvent mal valorisés. Ce qui était d'autant plus dommageable

que le champ d'applications réel ou potentiel est immense : isolation acoustique et thermique (des moteurs jusqu'à l'habitat), allègement de structures (bâtiment, industries aéronautique et auto-

mobile) ou encore protection contre le choc (emballage, engins mobiles divers).

Pour cette raison, le département Sciences pour l'Ingénieur du CNRS a créé

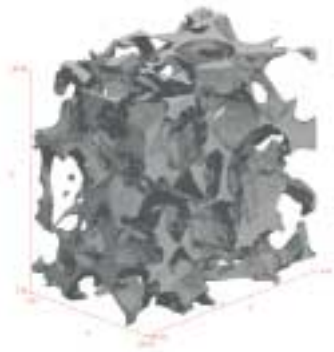


Figure 1. Mousse Al obtenu par infiltration de préforme de sel (collaboration EPFL)  
Crédits photos : Luc Salvo GPM2, UMR 5510, INP Grenoble.

en 2002 le Groupement de Recherche (GDR) Mousse *solides*, rassemblant une dizaine d'équipes, essentiellement universitaires, et relevant de différents départements du CNRS (SPI, SPM et SC).

Le premier but de ce GDR est donc de rassembler ces différentes équipes autour des thèmes génériques suivants :

- les propriétés mécaniques : quel que soit le matériau de base qui les constitue, les mousses présentent de très bonnes propriétés rapportées à leur densité, du fait de la présence d'un squelette porteur constitué de cellules ouvertes ou fermées plus ou moins régulières ;
- leurs capacité d'absorption d'énergie, qui est mise à profit, soit pour la réduction du bruit, soit pour amortir les chocs ;
- leurs propriétés thermiques ; en effet les mousses sont potentiellement des matériaux isolants.

La possibilité de jouer à la fois sur la matière du matériau et sur sa microstructure permet d'obtenir des propriétés adaptables à la demande et rend ces mousses très attractives. Cependant, malgré les lois d'échelle qui ont pu être établies entre les propriétés et la densité des matériaux, la compréhension des propriétés en liaison avec la microstructure est encore très lacunaire. En particulier, l'effet des hétérogénéités de microstructure sur l'apparition prématurée d'un endommagement, conduisant notamment à une forte dispersion de

propriétés, reste un problème largement ouvert.

Plusieurs atouts sont mis à profit par ce GDR pour aborder ces problèmes dans des conditions favorables :

- il est possible désormais de fabriquer des mousses avec tous les types de matériaux de base ; cela permet d'obtenir des microstructures très variées et des squelettes de cellules avec des comportements extrêmes (allant des matériaux fragiles aux matériaux viscoélastiques). On peut obtenir, soit des microstructures très différentes avec des squelettes ayant des propriétés données, soit des microstructures données avec des squelettes ayant des propriétés variables. C'est ce qui a été accompli dans le cadre de ce GDR : grâce à une coopération en cours avec l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et le Politecnico de Turin, il a été possible d'élaborer à partir d'une préforme en sel des mousses polymères, métalliques et céramiques ayant la même microstructure ; cela permet d'étudier l'effet du matériau constitutif à architecture donnée (figures 1 et 2) ;

- l'utilisation de méthodes d'investigation maintenant très opérationnelles permet de décrire les microstructures ou de suivre leur évolution lors de sollicitations mécaniques *in situ* (microscopie à balayage haute résolution et environnementale, tomographie X haute résolu-

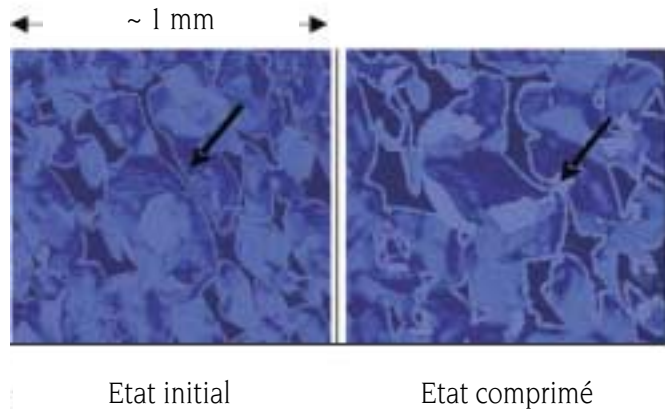


Figure 2. Mousse Al obtenu par infiltration de préforme de sel (collaboration EPFL).  
Crédits photos : Luc Salvo GPM2, UMR 5510, INP Grenoble.

tion permettant d'avoir une vision 3D et d'obtenir le champ de déformation, émission acoustique permettant d'accéder aux processus d'endommagement et à la prévision des durées de vie) ; la modélisation a énormément progressé tant du point de vue des méthodes que des moyens de calcul. Les logiciels intègrent de mieux en mieux les lois qui régissent les propriétés des matériaux (mécaniques, thermiques, acoustiques) et il devient possible de modéliser directement *via* la numérisation 3D de la microstructure réelle.

Les objectifs du GDR sont donc essentiellement de répondre à des questions fondamentales, mais avec des applications potentielles très larges allant des biscottes jusqu'au nez des avions. Pour cette raison, les réunions du GDR sont largement ouvertes à de nombreuses autres équipes universitaires et industrielles.

### Contact :

Gérard Vigier  
Groupe d'études de métallurgie physique et de physique des matériaux, UMR 5510  
Bât. 502  
20, av. Albert Einstein  
69621 Villeurbanne cedex  
Tél. : 04.72.43.80.65  
Fax : 04.72.43.85.28  
Mél : [gerard.vigier@insa-lyon.fr](mailto:gerard.vigier@insa-lyon.fr)

# La rénovation de la chambre sourde du LMA

Le Laboratoire d'Acoustique et de Mécanique (LMA) du CNRS, pôle national reconnu dans le domaine de l'acoustique, possède une grande chambre « anéchoïque ». Après une utilisation de près de 40 ans, celle-ci a été rénovée grâce au soutien de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, du CNRS (Département Sciences pour l'Ingénieur) et des moyens propres du laboratoire et a été inaugurée le 16 octobre 2003. Les revêtements devant être refaits, le choix du matériau « mélamine » en remplacement de la laine de roche permettra d'éviter tout problème de santé aux utilisateurs, chercheurs et ingénieurs. Les matériaux, qui représentent les trois quarts du coût des travaux, ont été conçus pour être amovibles, en cas de déménagement du laboratoire sur le site de Château-Gombert. Cette inauguration a été jumelée avec l'organisation de visites et conférences pour le public dans le cadre de la Fête de la Science.

Les chambres anéchoïques (ce qui signifie « sans écho ») sont des salles spécialement équipées pour que les parois ne réfléchissent pas de son, permettant l'étude d'une source acoustique comme si elle était placée en espace libre. Dans le domaine de l'acoustique c'est un équipement de base assez coûteux. Des variantes existent comme les chambres semi-anéchoïques (avec sol dur, réfléchissant, représentant des conditions normales du champ libre pour des machines posées sur le sol) ou les chambres avec soufflerie. Le LMA dispose de plusieurs chambres anéchoïques de tailles diverses. Si on exclut les grandes chambres semi-anéchoïques, comme celle de Montlhéry (où sont réalisés les tests des camions), le LMA dispose de la plus grande chambre anéchoïque en France (volume utile de 388 m<sup>3</sup>, longueur 11,4 m, largeur 6,3 m, hauteur 5,4 m), couplée à une chambre semi-anéchoïque (plus petite, rénovée en 1995), ce qui permet d'étudier des transmissions d'une salle à l'autre.

Deux critères gouvernent le choix des dimensions d'une chambre : la taille des machines qui peuvent y entrer et la fréquence la plus grave pour laquelle elle est effectivement sans écho, appelée fréquence de coupure. La plus grande



Figure 1.

chambre du LMA « coupe » ainsi vers 75 Hz, ce qui permet de l'utiliser pour l'étude de bruits industriels ou de transport basse-fréquence particulièrement gênants.

Les travaux portent sur la réduction du bruit à la source ou durant leur propagation, le LMA étant l'un des principaux laboratoires européens travaillant sur les solutions « actives » (utilisant l'« anti-bruit »). Une étude vise ainsi à réduire le bruit rayonné par des sources mobiles, dans le cadre du projet Ecrans Actifs Urbains, ou le bruit rayonné vers le sol

par un conduit avec un écoulement rapide (dispositif expérimental LEA-LAUM-LMA<sup>1</sup>, à la suite du réseau de recherche aéronautique sur le supersonique du ministère de la Recherche et des nouvelles Technologies).

Mais si le contrôle actif peut minimiser le bruit, il peut plus généralement minimiser certaines composantes seulement, ou même le modifier pour le rapprocher d'un bruit « cible », fixé a priori. Ainsi, afin de rendre « transparent » un objet, on peut minimiser le champ diffracté par celui-ci. Une expérience multi-

1. Laboratoire d'études aérodynamiques (UMR 6609) et Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine (UMR 6613)

canaux, avec 14 haut-parleurs et 34 microphones, en a montré la faisabilité sous certaines conditions (fig. 1). On peut aussi s'intéresser à la restitution virtuelle d'un champ acoustique : pour restituer le « bang » d'un avion supersonique, on reconstruit la pression sur une surface fermée entourant l'auditeur, et on peut prendre en compte l'influence de la tête de l'auditeur.

La chambre anéchoïque doit permettre également l'étude du rayonnement, proche et lointain, des enceintes acoustiques à très basses fréquences, pour mettre au point des modèles électroacoustiques, et caractériser des aspects

technologiques (collaboration industrielle). D'autres projets concernent la vibroacoustique de panneaux composites avec matériaux amortissants ou de panneaux multicouches (commission de « benchmarking » CVALOR, collaboration Renault/Usinor), et le rayonnement transitoire de plaques (mesures et perception).

Enfin, ce qui est sans doute moins attendu, c'est que les chambres anéchoïques permettent de valider des théories utiles à l'acoustique sous-marine : en effet les cuves, qui sont un autre équipement du LMA, ne permettent pas de s'affranchir des effets de

parois comme on peut le faire en acoustique aérienne. Ainsi, des travaux sur la détection d'objets enfouis dans l'océan utilisent la grande salle anéchoïque.

### Contact :

Jean Kergomard  
Laboratoire de mécanique et d'acoustique -  
UPR 7051  
31 Chemin Joseph Aiguier  
13402 Marseille cedex 20  
Tél. : 04.91.16.43.81  
Fax : 04.91.71.28.66  
Mél : kergomard@lma.cnrs-mrs.fr

# Le moyen national d'essai Propulsion Ionique pour les Vols Orbitaux - PIVOINE

*Le sous-système propulsif de contrôle d'attitude constitue un élément essentiel dans la conception d'une plate-forme satellite car il assure le maintien à poste du satellite pendant la durée de la mission. Optimiser sa masse par un choix technologique nouveau permettrait d'augmenter la masse d'ergol et allonger ainsi la durée de vie du satellite ou bien de diminuer sa masse globale lors du lancement, facteurs allant dans le sens d'une réduction des coûts.*

La propulsion électrique consiste à ioniser un gaz puis à accélérer les ions créés par un champ électromagnétique ; cette technique permet d'atteindre des vitesses d'éjection 5 à 8 fois supérieures à celles obtenues par la propulsion chimique, constituant ainsi une alternative à cette dernière dans des applications spécifiques comme le contrôle d'attitude des satellites en orbite ou le transfert d'orbite (conforme à mission Smart1).

Parmi les différentes technologies de la propulsion électrique, la plus porteuse aujourd'hui est celle des propulseurs à plasma de la famille SPT (*Stationary Plasma Thruster*) également appelés *propulseurs à effet Hall*. Déjà qualifiés au sol en durée de vie par des tirs d'endurance, ces propulseurs, dont le fonctionnement est en

apparence simple, sont caractérisés par des processus physiques complexes tels que les oscillations et le transport électronique dans la décharge et se heurtent à des phénomènes indésirables comme l'érosion des céramiques du canal, phénomènes dont la compréhension et les études nécessitent des travaux théoriques et expérimentaux approfondis.

Vers 1990, à l'exception des installations d'endurance, aucun outil dédié à l'étude de ces propulseurs n'existait en Europe. En 1994, le CNRS, le CNES et la Région Centre se sont réunis pour financer sa réalisation : ainsi était née PIVOINE dont la maîtrise d'œuvre globale de définition, de réalisation, de mise en fonctionnement opérationnel et d'exploitation ont été confiées au Laboratoire d'Aéro-

thermique, unité de recherche propre du CNRS, à Orléans.

Le projet comptait trois phases, échelonnées sur trois ans : en 95, sa définition ; en 96, sa réalisation et en 1997 sa mise au point. En 98 il était opérationnel. Sa mission : étudier le comportement dynamique de ces propulseurs à



Figure 1. Propulseur A53 en fonctionnement dans le banc PIVOINE



effet Hall sur de larges domaines de fonctionnement, tester de nouvelles technologies et à terme permettre la maîtrise du fonctionnement améliorant ainsi les performances de ce type de moteur.

Grand challenge, PIVOINE est ainsi le principal outil expérimental du Groupe de Recherche (GDR) Propulsion plasma pour Systèmes spatiaux, créé en 1996 qui associe le CNRS, le CNES, le groupe Snecma et l'ONERA. Aujourd'hui plus de 1 900 heures de tirs ont été réalisées permettant l'étude des différents types de propulseur (A53, STP®100, PPS®1350).

### PIVOINE

Constitué d'une enceinte à vide cylindrique à axe horizontal en acier inoxydable, sa dimension a été déterminée afin de limiter les interactions entre le jet de plasma et les parois. Les moteurs à effet Hall exigent pour un fonctionnement correct des pressions, dans l'enceinte, inférieures à une pression critique de  $2,5 \cdot 10^{-4}$  mbar de xénon. Au-delà de cette pression, le gaz de l'enceinte est largement rétro diffusé dans le propulseur et contribue à une augmentation apparente des performances du moteur. Le maintien du point nominal d'un propulseur SPT®100 requiert une vitesse de pompage de 70 000 l/s pour maintenir une pression 10 fois plus faible que la pression critique. Le dimensionnement de l'enceinte et la vitesse de pompage pour le xénon garantissent que l'environnement sol ainsi créé soit acceptable comme simulation des conditions spatiales.

En collaboration avec la société Air Liquide-DTA un système de cryopompage intégré fut développé. Il permet d'obtenir une pression de vide résiduel à  $5 \cdot 10^{-7}$  mbar et une pression de  $2,3 \cdot 10^{-5}$  mbar de xénon lorsqu'un moteur de type SPT®100 fonctionne à son point nominal. La mise sous vide, de la pression atmosphérique à  $10^{-4}$  mbar, est réalisée par un groupe primaire de pompes sèches. L'ensemble de la procédure



Figure 2. Une vue du moyen d'essai

(jusqu'à l'obtention du vide limite) prend environ 12 heures. Un automate associé à une supervision réalise la gestion des différentes séquences de la mise sous vide, du fonctionnement des moteurs et de la sécurité globale des opérations. Les paramètres de fonctionnement sont enregistrés en permanence, assurant la traçabilité des essais. Un deuxième système de contrôle-commande est consacré à la mise en œuvre des diagnostics de base du moyen d'essai.

Le banc possède deux systèmes de déplacement par translation, chacun associé à un sas relié à l'enceinte principale par une vanne d'isolement. Combinés, ils permettent de réaliser des séquences automatiques de cartographie polaire du jet dans le plan équatorial du propulseur pour la mesure des paramètres de plasma. Le réglage du référentiel des systèmes mécaniques de déplacement est fait à l'intérieur de l'enceinte et contrôlé périodiquement. Le propulseur est monté sur une balance de poussée, développée au laboratoire, dont les éléments en titane limitent les effets de dilatation. C'est un système pendulaire à plan constant où la mesure de la force de poussée s'effectue indirectement par une mesure de déplacement réalisée par un capteur capacitif sans contact.

L'équipe moyen d'essai est constituée d'un responsable opérationnel, d'un ingénieur et d'un technicien d'exploitation ; elle assure le fonctionnement opérationnel, la préparation des campagnes d'essai, la réalisation des mesures de performance ainsi que l'accueil des équipes



Figure 3. Réglage du référentiel des systèmes de déplacement dans l'enceinte

de recherche. Le coût des heures de tir, la mise en œuvre complexe et l'enchaînement des campagnes ont exigé des procédures clairement définies et adaptées au mieux des besoins de recherche ; ces méthodologies garantissent efficacité, traçabilité et qualité des essais.

### Perspectives

Des propulseurs de même type mais plus puissants pourraient être utilisés pour assurer l'opération de transfert d'orbite à partir de l'orbite d'injection donnée à la séparation avec le 3<sup>e</sup> étage du lanceur. Un propulseur démonstrateur PPSX000 a déjà été développé par Snecma. Son moteur est dimensionné pour des débits de xénon allant jusqu'à 20 mg/s et une puissance électrique de 6 kW, son modèle de laboratoire sera testé sur le banc PIVOINE en 2004 mais les performances actuelles de la cryopompe ne permettront pas de dépasser un débit de 10 mg/s de xénon. Dans le cadre du développement de cette nouvelle génération de propulseur, le moyen d'essai sera adapté. La définition d'une cryopompe auxiliaire permettant de tripler la vitesse de pompage du moyen d'essai pour le xénon est aujourd'hui achevée. Celle-ci devrait être opérationnelle dès la fin 2005.

### Contact :

Pascal Lasgorceix  
Laboratoire d'Aérothermique, UPR 9020  
1C, avenue de la Recherche Scientifique  
45071 Orléans cedex  
Tél. : 02.38.25.77.33  
Fax : 02.38.25.77.77  
Mél : lasgorc@cnrs-orleans.fr

# Le projet Allègement des structures dans l'aéronautique

Rendre les structures plus légères est une préoccupation majeure pour les industriels des transports, automobiles et aéronautiques en particulier, préoccupation qui est au cœur du projet ASA soutenu par le MINEFI depuis novembre 2000 dans le cadre du Réseau national matériaux et procédés. Ce projet, d'un montant de 3,8 M€ et soutenu par le MINEFI à hauteur de 2,7 M€, regroupe un producteur d'aluminium (Pechiney), une industrie aéronautique (EADS) et un groupe de laboratoires universitaires<sup>1</sup> (dont sept relèvent du département SPI) qui ont associé leurs compétences en métallurgie, mécanique, tribologie et procédés pour aborder un certain nombre de problèmes liés à la nécessité d'optimiser simultanément les matériaux, les procédés et la géométrie des pièces pour aboutir à des structures plus performantes et plus légères.

Cette activité de recherche coordonnée a mobilisé huit doctorants (dont deux ont déjà soutenu leur thèse) et trois chercheurs post-doctoraux ; elle comprend trois thèmes principaux.

Le premier porte sur l'optimisation du dimensionnement des structures aéronautiques. Deux questions fondamentales sont à l'étude : la résistance en fatigue des assemblages mécaniques et la rupture ductile des tôles en alliage d'aluminium. Dans les deux cas, des considérations matériaux (condition d'amorçage des fissures de fatigue, influence de la cristallographie locale ou des textures de déformation sur la rupture...) et mécaniques (état de contraintes, caractéristiques géométriques...) doivent être combinées pour une meilleure compréhension des phénomènes.

Le deuxième thème est centré sur l'assemblage des tôles d'aluminium par soudage en vue de substituer cette technologie au rivetage dans certaines situations. Le soudage laser est ainsi étudié à la fois du point de vue du procédé (para-

mètres, robustesse, distorsion résiduelle...) pour son adaptation aux conditions industrielles, et des propriétés de l'assemblage en relation avec la microstructure du joint et les traitements ultérieurs. Des études portent également sur le soudage par friction-malaxage (*Friction Stir Welding*, FSW) mis en œuvre à EADS et qui offre d'intéressantes perspectives de développement du fait de la nature du procédé qui ne met pas en jeu de fusion, même locale, des pièces à assembler (fig. 1).

Le troisième thème porte sur les perspectives d'allègement par introduction de nouveaux matériaux. Ainsi, les mousses d'aluminium peuvent être particulièrement intéressantes du fait de leur faible masse volumique et de leurs propriétés d'absorption des chocs, notamment lors d'impacts à l'oiseau. Des études de perforation de structures sandwich (peaux en alliage d'aluminium – cœur en mousse d'aluminium) ont ainsi été menées aussi bien en sollicitation quasi statique que dynamique (fig. 2). De même, les alliages de magnésium offrent

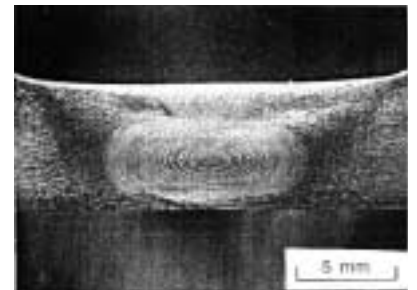


Figure 1. Micrographie optique du joint formé par friction-malaxage entre deux tôles en alliage d'aluminium. On distingue très nettement la zone centrale du joint (le noyau), qui présente une microstructure de grains très fins du fait des déformations très importantes mises en jeu. Photo de P. Heurtier et C. Desrayaud, PECM, ENSM Saint-Etienne.

d'importantes perspectives d'allègement mais ils ont la réputation d'être fortement sensibles à l'inflammabilité, ce qui est rédhibitoire pour les applications aéronautiques : les études menées portent ainsi sur une meilleure compréhension du phénomène et l'étude de nouveaux alliages présentant une sensibilité beaucoup plus faible à ce phénomène.

Ces trois thèmes de recherche pluridisciplinaires, tous orientés vers une

1. Groupe d'études de métallurgie physique et de physique des matériaux GEMPPM (UMR 5510 INSA Lyon - CNRS) ; Laboratoire de thermodynamique et physico-chimie métallurgiques LTPCM (UMR 5614 INP Grenoble - CNRS et Université Joseph Fourier) ; Laboratoire génie physique et mécanique des matériaux GPM2 (UMR 5010 INP Grenoble - CNRS) ; Laboratoire plasticité, endommagement et corrosion des matériaux PECM (UMR 5146 ENSM Saint-Etienne - CNRS) ; Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes LTDS (UMR 5513 Ecole Centrale de Lyon - CNRS - Ecole d'Ingénieurs de Saint-Etienne) ; Laboratoire laser et traitement des matériaux LTM (IUT le Creusot, Université de Bourgogne) ; Centre des matériaux CdM (UMR 7633 ENSM Paris - CNRS) ; Laboratoire mécanique des sols, structures et matériaux MSSMat (UMR 8579 Ecole Centrale de Paris - CNRS) ; et Laboratoire Roberval (UMR 6066, Université de Technologie de Compiègne - CNRS). Les cinq premiers laboratoires cités appartiennent à la Fédération CNRS FR2145 Matériaux de structure et propriétés d'usage.



Figure 2. Comportement à la perforation de structures sandwich simples constituées de mousses en aluminium présentant des masses volumiques différentes (croissantes de gauche à droite). Les peaux sont en alliage d'aluminium 2024. Photos de Luc Salvo, GPM2, INP Grenoble.

démarche d'allégement des structures, débordent du champ de compétences de chacun des laboratoires pris individuellement. Les différents sujets liés à ces thèmes comportent ainsi pour la plupart, à la fois des démarches expérimentales et d'importantes approches de modélisation et de simulation numérique. Pour résoudre les problèmes posés, des collaborations fortes sont mises en œuvre entre les différents laboratoires dans le cadre de groupes de travail et d'actions de réflexion sur des thèmes transverses, inhérents à différents sujets. Des réunions régulières de présentation d'avancement des travaux des doctorants et des chercheurs post-doctoraux regroupant plus de 30 participants des différents laboratoires

partenaires ont également lieu périodiquement, parfois associées à des visites de sites industriels. La visite de l'usine Pechiney d'Issoire, qui fabrique les tôles aéronautiques, et des ateliers de mise en forme et d'assemblage d'Airbus à Saint-Nazaire a ainsi permis aux universitaires et aux étudiants de mieux appréhender la réalité industrielle dans l'aéronautique. Enfin, un colloque international devrait être organisé à la fin du projet, afin de faire connaître les travaux réalisés et confronter les approches développées. Ce colloque devrait se dérouler dans le cadre des Journées Matériaux 2004, organisées par la Fédération des matériaux qui regroupe la plupart des sociétés savantes françaises impliquées dans ce domaine. Il sera étendu

à la problématique de l'allégement dans les transports en général, en raison des similitudes d'approche en terme d'optimisation des structures, de développement de nouvelles méthodes d'assemblage et d'introduction de nouveaux matériaux à fonctions multiples.

### Contact :

Michel Suéry  
Laboratoire génie physique et mécanique des matériaux, UMR 5010  
INP Grenoble - BP 46  
38402 Saint-Martin d'Hères  
Tél. : 04.76.82.63.42  
Fax : 04.76.82.63.82  
Mél : Michel.Suery@gpm2.inpg.fr

La création, depuis 1998, de 16 réseaux de recherche et d'innovation technologique (RRIT) correspond à une nouvelle approche globale de pilotage de l'action publique en faveur de la recherche industrielle. Ces réseaux sont destinés à favoriser l'émergence de projets technologiques stratégiques par une démarche conjointe des administrations, des institutions publiques de recherche et des milieux industriels.

L'apparition de matériaux et d'usages nouveaux stimulant la recherche-développement dans ce domaine particulièrement évolutif a justifié le lancement, en mars 2000, du Réseau national matériaux et procédés (RNMP). Il a pour objectif de faciliter la mise au point de nouveaux produits ou de nouveaux procédés destinés à être introduits sur le marché dans un délai limité. Il couvre un champ qui va de la conception de matériaux nouveaux et de l'amélioration de matériaux traditionnels à l'étude de leur comportement et de leur vieillissement à l'état de structure, en relation avec leurs procédés d'élaboration, de transformation et de mise en œuvre.

A ce jour, le Réseau a reçu et examiné plus de 80 projets de recherche et développement et en a labellisé près de la moitié. Une fois labellisés par le Comité d'orientation du Réseau, les projets sont dirigés vers une administration (ministère de la Recherche, ministère de l'Industrie, ANVAR, DGA) pour leur instruction définitive et leur financement.

Site RNMP : [www.reseau-materiaux.com.fr](http://www.reseau-materiaux.com.fr)

### Contact :

Francis Teyssandier, co-animateur du réseau  
Programme Matériaux  
29, rue Paul Bert - 94204 Ivry-sur-Seine  
Tél. : 01.49.60.41.43  
Fax : 01.49.60.41.46  
Mél : fteyssa@univ-perp.fr

# Le programme national PREDIT

*Le PREDIT (Programme de REcherche, et D'Innovation dans les Transports terrestres) est initié et conduit par les ministères en charge des Transports, de la Recherche, de l'Industrie, de l'Environnement ainsi que par l'ADEME et l'ANVAR. Son objet est de favoriser, dans le cadre d'un « développement durable », l'émergence de systèmes de transport socialement et économiquement plus efficaces, plus sûrs, moins gourmands en énergie et, finalement, plus respectueux de l'Homme et de son environnement.*

L'actuel PREDIT, le troisième du nom, couvre la période 2002-2006. A son lancement, la dotation prévisionnelle cumulée sur les 5 ans s'élevait à 300 millions d'euros environ.

Ce programme poursuit principalement trois objectifs :

- assurer une mobilité « durable » des personnes et des biens ;
- accroître la sécurité des systèmes de transport ;
- réduire les impacts environnementaux et contribuer à la lutte contre l'effet de serre.

Diverses disciplines sont directement concernées par ces objectifs, des sciences humaines aux sciences dites « dures ».

Onze « groupes opérationnels » (GO) thématiques sont chargés de définir et de mettre en œuvre les actions, y compris le suivi des travaux de recherche et leur valorisation. Ces actions s'inscrivent dans le cadre des priorités énoncées dans le « Programme de Travail » du PREDIT et discutées au sein du Conseil d'orientation. Elles intègrent également, le cas échéant, des évolutions voulues par le gouvernement dans le cadre de l'application de sa politique dans le domaine des transports.

Etant donné la nature des sujets traités, les sciences de l'ingénieur jouent, aux côtés des autres disciplines, un rôle primordial au sein de ce programme.

Diverses priorités relevant totalement ou partiellement de ce domaine scientifique ont été définies et sont, ou seront dans un futur proche, l'objet d'actions soutenues par le PREDIT.

Comme le montre le tableau, les axes de travail définis par certains groupes opérationnels recoupent assez largement les thématiques développées au sein du département SPI. On peut aussi y constater que des domaines de recherche considérés comme prioritaires par le département SPI sont largement pris en compte dans le cadre du PREDIT. C'est notamment le cas pour l'acoustique (GO 7 et 8), la sécurité (GO 4) et les maté-

	INTITULE	AXES DU PROGRAMME DE TRAVAIL
GO 4	Technologies pour la sécurité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Systèmes globaux de contrôle et de commande au sol des véhicules ferroviaires ou guidés</li> <li>- Sécurité des systèmes routiers</li> <li>- Aides à la conduite pour une sécurité naturelle</li> </ul>
GO 6	Technologies pour les transports de marchandises	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimiser et réguler le flux sur les infrastructures existantes</li> <li>- Améliorer la compatibilité environnementale du transport routier de marchandises</li> <li>- Favoriser les modes non routiers</li> <li>- Améliorer la sécurité des personnes et des biens</li> <li>- Elever la qualité du service à la marchandise</li> </ul>
GO 7	Impacts énergétiques et environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pollution de l'air aux échelles locales et régionales</li> <li>- Effet de serre</li> <li>- Bruits et nuisances sonores</li> <li>- Impacts sur les écosystèmes et les paysages</li> <li>- Approche intégrée</li> </ul>
GO 8	Véhicules propres et économes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Systèmes carburant-combustion-dépollution</li> <li>- Réduction du bruit émis par les véhicules</li> <li>- Motricité électrique</li> <li>- Electronique de puissance</li> <li>- Deux roues et petits véhicules</li> </ul>
GO 10	Véhicules et infra-structures : développement intégré	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les déplacements accessibles à tous</li> <li>- Des concepts-cibles pour la ville de demain</li> <li>- Optimiser les plates-formes de transports en commun de surface</li> <li>- Le transport en temps partagé</li> <li>- Les applications des piles à combustibles</li> </ul>



riaux (GO 4, 7, 8 et 10). Quant aux véhicules propres et économes, ils sont, de par la nature même du programme, l'objet d'une attention particulière (GO 7, 8 et 10). De plus, l'application du plan gouvernemental « véhicules propres » présenté mi-septembre devrait avoir pour conséquence le renforcement des recherches développées par le PREDIT et le réseau PACO (Piles A Combustibles) sur 5 thèmes considérés comme prioritaires dans ce dit plan : moteurs thermiques et carburants, gestion et stockage de l'énergie électrique embarquée (véhicules électriques), piles à combustibles, réduction du bruit de roulement.

Enfin, pour couvrir des champs interdisciplinaires, le PREDIT a favorisé le développement d'actions fédératives : PREDIM (Plate-forme de Recherche et d'Expérimentation pour une Information Multimodale), ARCOS (Action de Recherche pour une CONduite Sécurisée), et ELU (Espaces Logistiques Urbains). Elles dis-

posent, en lien avec les différents groupes opérationnels (GO 9, 4 et 5 respectivement), de leurs structures d'animation propres et elles participent au financement d'actions dans leurs domaines de compétences respectifs.

Le PREDIT accorde son soutien à des travaux de recherche ou d'expérimentation dans le champ des transports terrestres (routiers, ferroviaires, fluviaux). Les aides peuvent revêtir la forme de financement direct de ces travaux (convention de recherche ou subvention) et/ou de bourses ou salaires versés à des stagiaires, à des doctorants ou à des post-doctorants. Des appels à propositions sont régulièrement lancés sur l'initiative des groupes opérationnels sur des thèmes issus du programme de travail. Les financements sont accordés par les ministères ou agences qui soutiennent le PREDIT après labellisation des projets par ces groupes opérationnels. La publicité des appels à propositions est assurée par

divers moyens, notamment par l'intermédiaire du site Internet du PREDIT. Les procédures à suivre pour soumettre des projets de recherche sont détaillées dans le « Programme de Travail<sup>1</sup> ».

Pour obtenir d'autres renseignements sur le programme, le PREDIT dispose d'un site web **www.predit.prd.fr**. Le secrétariat permanent du PREDIT est également à la disposition de la communauté pour tout renseignement souhaité.

1. Qui peut être obtenu sur simple demande auprès du Secrétariat Permanent du PREDIT

### Contact :

Bertrand Theys  
Chargé de missions valorisation-capitalisation  
Secrétariat permanent du PREDIT  
Tour Pascal B, 92055 La Défense cedex  
Tél. : 01.40.81.22.73  
Fax : 01.40.81.15.22  
Mél : Bertrand.Theys@equipement.gouv.fr

## Les entretiens approfondis de chercheurs (EAC)

*Mis en place depuis 1995, les entretiens approfondis de chercheurs ont été généralisés à l'ensemble des départements il y a 6 ans. Ils concernent les chercheurs ayant 7 années d'ancienneté au CNRS quel que soit leur grade au moment du recrutement ainsi que ceux qui le souhaitent quelle que soit leur ancienneté. Si le chercheur le demande, des éléments personnels peuvent être communiqués à la direction scientifique du département.*

Deux directeurs de recherche, MM Jean-Pierre Martin, Directeur du *Laboratoire d'aérothermique* à Orléans, et Michel Suéry, Directeur de la *Fédération de recherche matériaux de structure et propriétés d'usage* à Grenoble, assurent ces entretiens pour le compte du département SPI depuis 2 ans. Ils rendent actuellement visite aux chercheurs recrutés en 1995 évalués par les sections 4, 9, 10 et 22.

Ces entretiens, qui demeurent confidentiels visent deux objectifs :

- dresser un bilan du parcours professionnel du chercheur,
- lui permettre de réfléchir à son déroulement de carrière et aux actions à mettre en œuvre.

A l'issue de sept années d'expérience dans le métier de chercheur, il est en effet temps de songer à une prise de responsabilités en dehors ou au sein de l'unité voire à infléchir sa carrière dans un sens compatible avec un passage au grade supérieur de directeur de recherche puisque la plupart des chercheurs sont recrutés au grade de chargé de recherche de 2<sup>e</sup> classe.

De l'avis des chercheurs, cet entretien leur permet de porter un regard critique sur leur activité en prenant un certain recul vis à vis de leurs préoccupations quotidiennes.

En outre, les statistiques qui en découlent permettent à la direction scientifique du

département d'avoir une meilleure vision de l'activité des chercheurs, de leurs souhaits et de leur perspective de carrière.

### Contact :

Michel Suéry  
Laboratoire génie physique et mécanique des matériaux, UMR 5010  
INP Grenoble - BP 46  
38402 Saint-Martin d'Hères  
Tél. : 04.76.82.63.42  
Fax : 04.76.82.63.82  
Mél : Michel.Suery@gpm2.inpg.fr

# Métaux à grains ultra fins

**Contact :**

Edgar Rauch  
 Laboratoire génie physique et mécanique des  
 matériaux, UMR 5010  
 ENSPG - BP 46  
 Domaine universitaire  
 101, rue de la Physique  
 38402 Saint-Martin d'Hères  
 Tél. : 04.76.82.63.40  
 Fax : 04.76.82.63.82  
 Mèl : edgar.rauch@inpg.fr

*Ces dernières années, le monde des matériaux a subi une véritable révolution avec l'émergence et le développement d'activités scientifiques et techniques autour du préfixe « nano » (nanomatériaux, nanostructures, nanograins...). L'intérêt porté à ces matériaux provient des possibilités de modifier leurs propriétés (physiques, optiques, magnétiques, mécaniques...) en réduisant la taille des domaines cohérents et en augmentant l'influence des interfaces.*

**Intérêt de l'affinage de la structure des métaux**

Concernant les métaux et leurs alliages, l'obtention d'une structure très fine se traduit par des caractéristiques remarquables. Pour ne s'intéresser qu'aux propriétés mécaniques, la diminution de la taille des grains permet d'augmenter la limite d'élasticité à froid des métaux tout en conservant – voire en l'augmentant dans certains cas (fig. 1) – une bonne ductilité. A chaud, et plus spécifiquement pour les alliages légers (bases Al ou Mg), l'affinage de la structure permet de diminuer la température de déformation superplastique rendant les procédés associés plus attractifs. La propagation d'une fissure est également sensible à la présence de joints de grains : un affinage de la structure aura pour conséquence de retarder la ruine du matériau en diminuant, pour les aciers par exemple, la température de transition ductile-fragile. Ce sont d'ailleurs les producteurs d'aciers qui explorent activement cette voie pour rester compétitifs par rapport aux alliages légers face aux impératifs de l'industrie automobile [1, 2, 3].

**Procédés d'affinage**

Les procédés de fabrication de matériaux à structure fine se sont considérablement diversifiés et peuvent, pour l'essentiel, se

classer en deux groupes selon que l'on agglomère des poudres dont les tailles caractéristiques sont nanométriques ou que l'on affine la taille de grains de matériaux massifs. La première voie combine une phase de production des éléments constitutifs via des techniques variées (procédés chimiques, évaporation-condensation, mécano-synthèse...) et une phase de compaction et de frittage. Les tailles obtenues peuvent être inférieures à la dizaine de nanomètres. Toutefois, les quantités produites restent limitées et la porosité fréquemment non négligeable. A l'inverse, les traitements thermomécaniques, qui combinent classiquement écrouissage et recuit de recristallisation, génèrent de grandes quantités de matériau mais les tailles de grains accessibles sont rarement inférieures au micron.

C'est dans cette dernière catégorie que s'inscrit une démarche plus récente qui consiste à faire subir au métal des hyper-déformations. Le principe en est simple : une augmentation du taux de déformation conduit à un morcellement de la microstructure initiale par accumulation de désorientations au niveau des parois des cellules intragranulaires. Cette désorientation n'étant que d'une fraction de degré par pourcent de déformation, il est nécessaire d'imposer des taux de déformation nettement plus élevés que ceux traditionnellement utilisés en plasticité. Les dimensions finales des grains sont bornées par la taille des sous-structures générées par l'accumulation de dislocations, cette dernière étant, quant à elle, contrôlée par la contrainte appliquée. Dans des conditions particulières (matériau intrinsèquement dur et/ou procédure optimisée), cet affinage peut produire des grains nanométriques. Notons que cette technique d'affinage est applicable à tout métal pour peu que celui-ci présente une ductilité suffisante. Elle est donc potentiellement adaptée à l'ensemble des alliages commerciaux utilisés dans l'industrie de la mise en forme des métaux. Dans ces cas, les charges nécessaires sont de plusieurs gigapascals et les tailles de grains résultantes sont de l'ordre de la centaine de nanomètres. Cette activité suscite un intérêt croissant depuis les années 90 et donne lieu actuellement à plus de 200 publications par an.

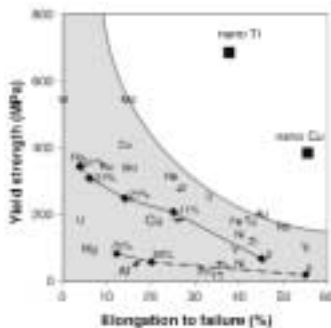


Figure 1. Propriétés mécaniques comparées de métaux présentant une taille de grains conventionnelle (partie grisée) et de métaux fortement affinés par hyper-déformations [4].

## Le procédé ECAE

Pour une large part, ces travaux font appel à des dispositifs simples qui permettent d'atteindre en laboratoire les taux de déformation requis. La technique la plus prisée est l'extrusion coudée à aires égales (ECAE, fig. 2) proposée par un chercheur russe [5] et dont on trouve actuellement une centaine d'exemplaires de par le monde (dont six en France).

Pour l'essentiel, ce dispositif se compose de deux canaux identiques qui forment un angle de 90 à 135°. Le matériau subit, lors de son passage dans la filière, un cisaillement intense au niveau du coude. La particularité fondamentale du procédé est que l'échantillon conserve après extrusion sa géométrie initiale, et notamment sa section. Cela permet de le réintroduire dans le dispositif et d'augmenter le taux de déformation en effectuant des passes successives. Pratiquement, on se limite à une dizaine de cycles, la structure et le comportement mécanique n'évoluant guère au-delà.

Outre les propriétés mécaniques à froid déjà illustrées, c'est la ductilité à chaud des alliages superplastiques qui s'avère être la plus bénéficiaire de ce traitement. La figure 3 présente l'évolution du comportement en traction d'un alliage d'aluminium-magnésium (AA5083). La ductilité augmente de façon spectaculaire avec le nombre de passes alors que la température d'essai reste relativement faible (260 °C). Cela provient du poids de plus en plus important du glissement aux joints de grains par rapport aux autres mécanismes de déformation plastique lorsque la quantité d'interfaces augmente. Ce même alliage dans son état standard, c'est-à-dire avec une taille de grains de l'ordre de 10 µm, ne présentera une formabilité similaire qu'à des températures supérieures à 500 °C.

La structure du matériau après hyper-déformation est fortement perturbée et nécessite des techniques fines pour être caractérisée. La très grande quantité de défauts générés par les hyper-déformations rend difficile l'interprétation des observations effectuées au microscope électronique en transmission et ce n'est que grâce à des outils particuliers qu'il est possible d'extraire les informations pertinentes. Essentiellement, cette

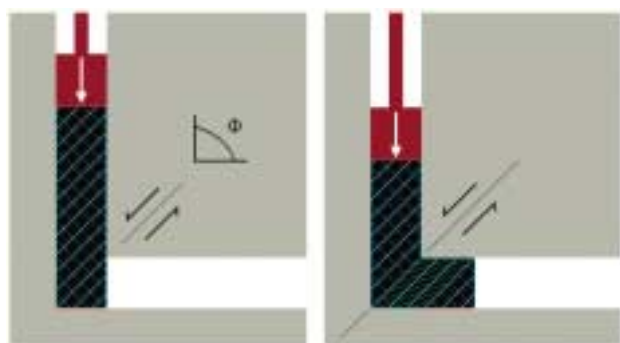


Figure 2. Principe du dispositif d'extrusion dans un canal coudé. L'échantillon présente la même géométrie à la sortie qu'à l'entrée et peut de ce fait être réintroduit dans le dispositif.

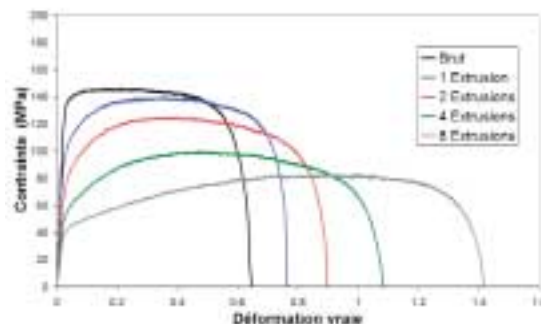


Figure 3. Comportement mécanique à 260 °C d'un alliage Al-Mg (AA5083) extrudé jusqu'à huit fois [6].

structure se révèle être composée d'un mélange de petits grains et de cellules dont la taille moyenne n'évolue que faiblement avec le nombre d'extrusions. En revanche, la proportion de joints de forte désorientation augmente de façon conséquente. C'est cette dernière qui conditionne en grande partie le comportement mécanique du matériau extrudé, notamment à chaud.

## Perspectives

L'accroissement des propriétés mécaniques par diminution de la taille de grains constitue une force motrice considérable pour le développement de travaux dans ce domaine. Nombre de ces études visent à faciliter l'intégration des techniques d'affinage dans les procédures industrielles. Concernant plus spécifiquement les hyper-déformations, deux voies sont explorées. La première, à dominante technologique, consiste à reproduire à grande échelle les techniques de laboratoire et notamment l'ECAE. La seconde, plus prospective, cherche à interpréter les modifications structurales induites par les conditions extrêmes de sollicitations. Dans ce cas, l'objectif est d'identifier les paramètres pertinents (mode et trajet de chargement, pré-requis structuraux...) qui favorisent l'affinage, afin de définir des conditions opératoires efficaces et viables industriellement.

## Références

- [1] Proc. of the 1st Symposium on Super Metal, Tokyo, 12-13 novembre 1998 (35-43 et 197-238).
- [2] Projet CECA 7210-PR-167, « Ultra Fine Steel Flat Products », 1999.
- [3] Projet RNMP (coordonnateur : Jean-Pierre CHEVALIER - CNAM), « Aciers à grains ultra fins (AGUF) : procédés d'élaboration et propriétés mécaniques », 2003.
- [4] R.-Z. Valiev, *Adv. Eng. Mater.*, 5, 2003, (296-300).
- [5] V.-M. Segal, *Patent of the USSR*, n° 57892, 1977.
- [6] L. Dupuy, J.-J. Blandin et E.F. Rauch, *Mater. Sci. Tech.*, 16, 2000, (1256-58).

# Calcul et design de microstructures :

## Une question de longueur interne ?

**Contact :**

Samuel Forest  
Centre des matériaux - UMR 7633  
Ecole des Mines de Paris  
BP 87 - 91003 Evry cedex  
Tél. : 01.60.76.30.51  
Fax : 01.60.76.31.50  
Mél : samuel.forest@ensmp.fr

*Les avancées prodigieuses du calcul de structures dans les 15 dernières années ouvrent de nouveaux horizons à la mécanique des matériaux. Le maillage 3D, le calcul parallèle, les algorithmes pour les lois de comportement non linéaires permettent aujourd'hui d'aborder le calcul de microstructures complexes présentes dans la plupart des matériaux industriels : alliages métalliques, composites et multi-matériaux. A partir d'images tridimensionnelles de la microstructure, des propriétés et de la taille des constituants, les propriétés physiques et mécaniques (conductivité thermique ou électrique, modules d'élasticité et comportement élastoplastique...), pourront être prévues.*

Le calcul de microstructures repose sur trois étapes principales : l'imagerie 3D de la microstructure, l'identification de la loi de comportement des constituants et le calcul numérique des propriétés résultantes [1]. De telles représentations réalistes sont aujourd'hui disponibles grâce aux méthodes des sciences des matériaux, comme la tomographie aux rayons X. Le choix d'un volume élémentaire représentatif de la microstructure est un point clé de la démarche. On peut alors définir un problème aux limites sur ce domaine, c'est-à-dire lui imposer un gradient de température ou de potentiel électrique, une déformation moyenne, etc., et calculer le flux de chaleur, de courant ou la contrainte moyenne qui en résultent. La méthode des éléments

finis est d'une grande souplesse pour traiter des géométries et des conditions aux limites très variées. La figure 1 montre par exemple que l'on peut passer d'une image tomographique 3D de mousse de nickel à un maillage par éléments finis de type poutres. L'arrangement particulier des 5% de matière solide contenue dans ce matériau cellulaire, utilisé dans les batteries de téléphones portables, détermine sa réponse élastoplastique en traction.

La distribution des phases au sein d'un matériau hétérogène joue un rôle déterminant sur les propriétés effectives. Cet effet est d'autant plus marqué que le contraste de propriétés entre les constituants est fort, comme c'est le cas dans les matériaux

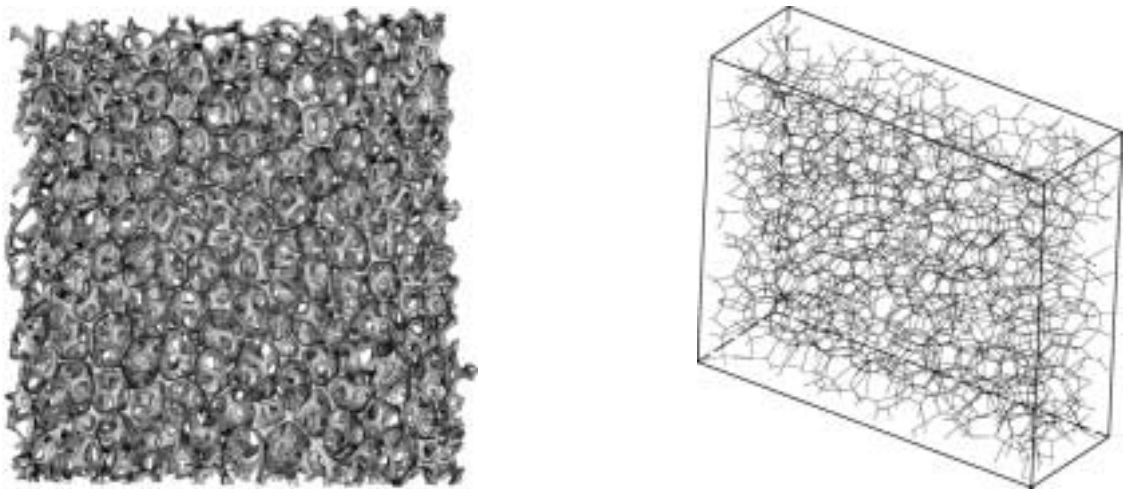


Figure 1. Reconstruction 3D d'une mousse de nickel observée par tomographie aux rayons X et le réseau de poutres associé en vue du calcul par éléments finis. La taille des cellules est de 500  $\mu\text{m}$ .



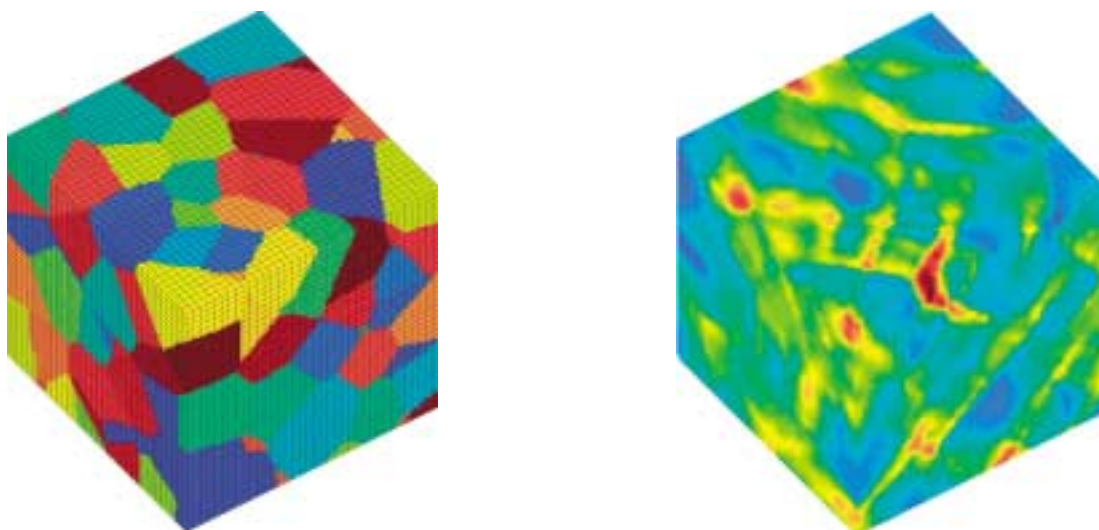


Figure 2. Calcul d'un agrégat polycristallin en élastoplasticité : maillage par éléments finis et carte de déformation plastique équivalente pour une traction moyenne imposée de 3 %. La couleur rouge correspond à des déformations locales de plus de 7 %.

cellulaires. La propriété attendue se situe en fait entre des bornes possibles, d'autant plus écartées que le contraste est grand. Cet espace laisse tout un domaine à explorer pour inventer et optimiser des microstructures en fonction des propriétés souhaitées : quelle est la morphologie cellulaire la mieux adaptée pour une application donnée ? L'arrangement doit-il être plutôt périodique ou aléatoire ? La méthode doit aboutir dans le futur à un véritable *design* de microstructures.

Le maillon faible de cette chaîne est indéniablement la loi de comportement des constituants individuels du matériau hétérogène. Cette difficulté se pose dans le cas des propriétés non linéaires des matériaux, par exemple la réponse élastoplastique locale des polycristaux métalliques. On se limite ici au cadre de la mécanique des milieux continus. Cette règle du jeu fixe les dimensions minimales des éléments de microstructure à traiter – le micromètre, voire la centaine de nanomètres. Les lois de comportement relient par exemple contraintes et déformations par l'intermédiaire de variables internes (variables d'écrouissage notamment). Or, ce comportement intrinsèque dépend en fait de la dimension du constituant au sein du matériau hétérogène, comme l'ont montré de nombreux essais de micro et nanoindentation. Par conséquent, il ne suffit pas de connaître la réponse du monocristal massif pour prévoir celle du polycristal. Il faut connaître aussi les lois d'échelles, c'est-à-dire des relations entre taille de grain et réponse locale du monocristal. La figure 2 illustre la modélisation d'un volume élémentaire représentatif de polycristal constitué de grains dont la couleur représente l'orientation, et les résultats d'un calcul parallèle réalisé sur 12 processeurs. Dans le cadre de la théorie continue de la

plasticité cristalline, la cristallographie du glissement plastique est prise en compte. On constate la formidable hétérogénéité et l'organisation de structures de déformation qui se développent au sein de ce polycristal CFC lors d'un essai de traction.

Les lois de comportement sensibles aux effets d'échelles sont en plein développement aujourd'hui. Elles incitent à introduire dans la modélisation non seulement la déformation elle-même mais son gradient, qui a la dimension de l'inverse d'une longueur. L'identification de(s) longueur(s) interne(s) intervenant alors dans les lois de comportement est la difficulté majeure de la démarche. L'enjeu est considérable, en particulier dans la course actuelle aux aciers à grains ultra-fins ou aux matériaux en couches minces permettant d'atteindre des niveaux de contraintes inégalés.

La mise en œuvre de la démarche du calcul de microstructures est nécessairement un travail d'équipe, car les compétences en imagerie et caractérisation des matériaux, puis en calcul intensif des structures, doivent être réunies. L'exemple des mousses métalliques est le fruit de la coopération de plusieurs équipes des fédérations des régions Ile-de-France et Rhône-Alpes<sup>1</sup>. Celui du polycristal met à contribution trois laboratoires de l'École des Mines de Paris et de l'ONERA<sup>2</sup>.

## Référence

[1] S. Forest, G. Cailletaud, D. Jeulin, F. Feyel, I. Galliet, V. Mounoury et S. Quilici, « Introduction au calcul de microstructures », *Mécanique & Industries*, 3, 2002 (439-56).

1. Respectivement la Fédération Francilienne en Mécanique des Matériaux, Structures et Procédés (FR2609) et la Fédération Matériaux de Structure et Propriétés d'Usage (FR 2145).  
2. A savoir, le Centre des Matériaux (UMR 7633 – CNRS/École des Mines de Paris) à Évry, le Centre de Morphologie Mathématique (École des Mines de Paris) à Fontainebleau et le Département Mécanique du Solide et de l'Endommagement (ONERA DMSE/LCME) à Châtillon.

# Modélisation et expérimentation en usinage grande vitesse

**Contacts :**

Daniel Dudzinski  
 Laboratoire de physique et mécanique des matériaux, UMR 7554  
 Université de Metz  
 Ile du Saulcy - 57045 Metz cedex 1  
 Tél. : 03.87.31.53.62 - Fax : 03 87 31 53 66  
 Mél : dudzinski@lpm.univ-metz.fr

Philippe Lorong  
 Laboratoire de mécanique des systèmes et des procédés, UMR 8106  
 ENSAM-Paris  
 151, boulevard de l'Hôpital - 75013 Paris  
 Tél. : 01.44.24.62.85 - Fax : 01.44.24.64.68  
 Mél : philippe.lorong@paris.ensam.fr

L'usinage par enlèvement de matière est le procédé le plus utilisé dans la production de composants pour l'industrie mécanique ; il peut se décomposer en trois catégories suivant les moyens utilisés :

- meules abrasives,
- outils coupants,
- électroérosion, laser, jet d'eau, etc., tous procédés dits « non conventionnels ».

Nous présenterons ici la modélisation et l'expérimentation en usinage par outils coupants, le plus fréquent pour les opérations sur pièces mécaniques (tournage, fraisage et perçage principalement).

L'introduction dans la machine-outil de l'électrobroche, qui permet des vitesses de coupe bien supérieures aux vitesses conventionnelles, a permis de développer l'usinage grande vitesse (UGV), qui a surtout profité à l'aluminium et aux alliages légers. Parallèlement, des progrès importants ont été réalisés pour les outils avec notamment l'utilisation des céramiques et du CBN (nitride de bore cubique) et le développement des revêtements. Tout cela, associé à l'accroissement progressif des puissances des électrobroches, a permis d'envisager l'extension de la grande vitesse aux matériaux durs.

La pièce usinée par UGV étant d'une précision supérieure, les efforts de coupe sont réduits, la consommation d'énergie est diminuée, les déformations subies moindres et certaines opérations de superfinition, comme la rectification, sont supprimées. L'augmentation du débit des copeaux augmente la productivité d'un facteur pouvant aller de trois à dix. Enfin, l'UGV permet l'usinage de pièces impossible à réaliser avec des moyens conventionnels (les voiles minces en aéronautique, par exemple).

La qualité de la surface usinée et la durée de vie des outils dépendent largement des conditions de coupe, qui nécessitent encore des essais longs et coûteux. De ce fait, la modélisation et la simulation des procédés d'usinage sont incontournables et ce, d'autant plus que les performances de la machine et des outils ne cessent d'évoluer. Nous nous limiterons ici à l'étude de l'interaction outil-matière et, plus précisément, à la modélisation et à l'expérimentation de la coupe, avant de discuter de l'évolution actuelle de l'usinage dans le souci de limiter, et même de supprimer, l'emploi des lubrifiants afin d'obtenir des procédés plus respectueux de l'environnement et de la santé des opérateurs.

## 1. Mécanismes de la coupe

Considérons d'abord un processus élémentaire de coupe - la coupe orthogonale, où l'arête de l'outil est perpendiculaire à la direction de coupe (fig. 1). Dans ce processus, le copeau se forme par déformation plastique provoquée par un cisaillement intense dans une zone dite primaire, qui s'étend de la pointe de l'outil (où la matière s'ouvre pour créer une nouvelle surface) à la surface libre de la pièce. Cette déformation plastique s'effectue à grande vitesse de déformation, de l'ordre de  $10^4$  à  $10^6$  s<sup>-1</sup>, et les glissements observés sont très importants entre 2 et 4. La déformation s'accompagne d'un échauffement significatif avec des températures d'environ 200 à 400 °C. Le copeau s'écoule ensuite en adhérant puis en glissant avec frottement sur la face de coupe de l'outil. De nouvelles déformations plastiques par cisaillement interviennent dans cette deuxième zone, ainsi qu'un échauffement à l'interface outil-copeau pouvant atteindre, et même dépasser localement, les 1 000 °C. Enfin en dépouille, le contact de l'outil avec pénétration partielle et retour élastique

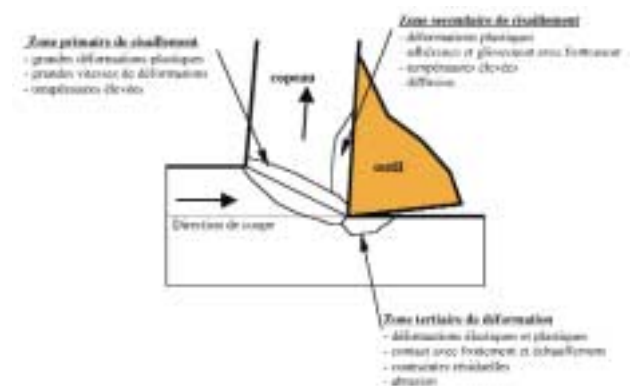


Figure 1. Formation d'un copeau en coupe orthogonale.

du matériau usiné provoque un labourage de la surface nouvellement créée et, là aussi, des déformations plastiques et un échauffement (zone tertiaire). Le chargement mécanique et thermique de la surface usinée entraîne notamment des contraintes résiduelles souvent néfastes pour la tenue en fatigue des composants usinés.

L'étude de la coupe couvre différents domaines scientifiques :

- le comportement des matériaux aux grandes déformations et vitesses de déformations élevées ;
- la thermique : étude des transferts de chaleur vers l'outil et la pièce usinée ;
- la tribologie, physico-chimie des surfaces : étude du contact outil-copeau et de l'usure de l'outil. La figure 2 propose des exemples d'usure, avec en particulier l'adhésion et le collage du matériau usiné sur les faces de l'outil, la dégradation de l'arête et l'abrasion en face de coupe.

## 2. Approche de modélisation semi-analytique de la coupe

La modélisation thermomécanique de la coupe était l'objectif initial des travaux menés au LPMM et cela, en intégrant les connaissances acquises au laboratoire sur le comportement dynamique des matériaux et sur l'étude des processus aux grandes vitesses et déformations élevées. En coupe orthogonale, la zone primaire de déformation est modélisée par une bande d'épaisseur constante et inclinée d'un angle  $\phi$  par rapport à la surface libre de la pièce usinée [1]. Lorsque le matériau traverse cette zone, il subit un cisaillement intense à l'origine de la formation du copeau. Le comportement du matériau usiné est supposé rigide viscoplastique, décrit par exemple par une loi de Johnson-Cook identifiée par des essais dynamiques à différentes températures :

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ A + B \left( \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \right)^n \right] \left[ 1 + m \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{\theta - T_r}{T_f - T_r} \right)^v \right]$$

où  $\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $\theta$  sont la contrainte de cisaillement, le glissement, la vitesse de glissement et la température. Les caractéristiques du

matériau sont le coefficient d'écroutissage  $n$ , la sensibilité à la vitesse de déformation  $m$ , le coefficient d'adoucissement thermique  $v$ , les constantes  $A$ ,  $B$  et  $\dot{\gamma}_0$  et enfin les températures  $T_r$  (température de référence) et  $T_f$  (température de fusion). Les équations de l'écoulement thermomécanique de la matière dans la zone primaire, en particulier celles du mouvement, de la compatibilité et de l'énergie, sont résolues pour obtenir les contraintes, les déformations et les températures dans cette zone. Le contact du copeau avec l'outil est supposé glissant, avec un coefficient moyen de frottement  $\bar{\mu}$  fonction de la température moyenne à l'interface outil-copeau  $\bar{T}_{int}$  :

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}(\bar{T}_{int}) = \bar{\mu}_0 \left( 1 - \left( \frac{\bar{T}_{int}}{T_f} \right)^q \right)$$

Les paramètres de cette loi sont identifiés à partir d'essais de coupe orthogonale [2].

Le modèle a ensuite été généralisé à la coupe oblique (fig. 3a), processus tridimensionnel où l'arête de coupe n'est plus orthogonale à la direction de déplacement de la matière vers l'outil [3]. L'approche ainsi développée a finalement été validée par une campagne d'essais sur l'acier 42 CrMo4 [4]. Les résultats des calculs en termes d'efforts ont été comparés avec satisfaction aux mesures expérimentales (fig. 3b).

L'étude de la coupe oblique était l'étape préliminaire indispensable avant la modélisation et la simulation des procédés industriels d'usinage. En effet, pour une opération de fraisage périphérique par exemple, l'arête de coupe (hélice tracée sur le cylindre de base de la fraise) en contact avec la matière peut être discrétisée en éléments rectilignes pour lesquels la formation du copeau s'effectue dans des conditions de coupe oblique. Ainsi, en appliquant l'approche précédemment décrite à chacune de ces arêtes élémentaires, nous obtenons avec de faibles temps de calcul la répartition des efforts et des températures sur l'outil.

## 3. Approche numérique de modélisation de la coupe

L'intérêt majeur des approches numériques réside dans leur potentiel à aller plus loin dans la simulation de la formation du copeau, dans l'étude des sollicitations mécaniques et ther-

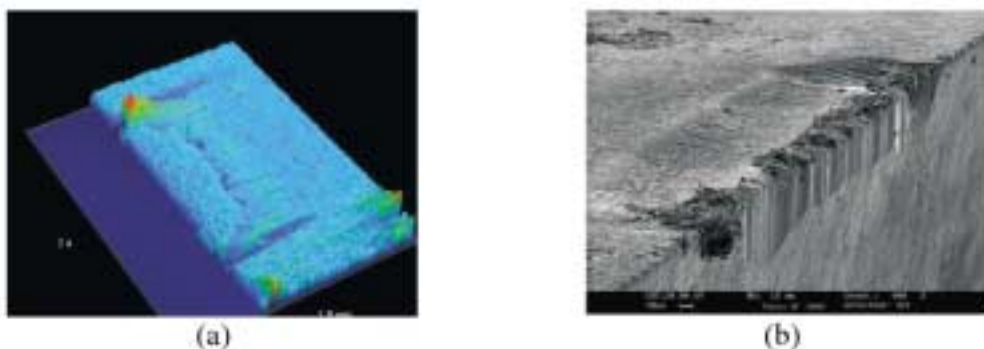


Figure 2. Observation des outils après usinage à sec de matériaux réputés difficiles à usiner avec des outils revêtus : (a) au microscope à interférométrie, (b) au microscope électronique à balayage. Photos LPMM.

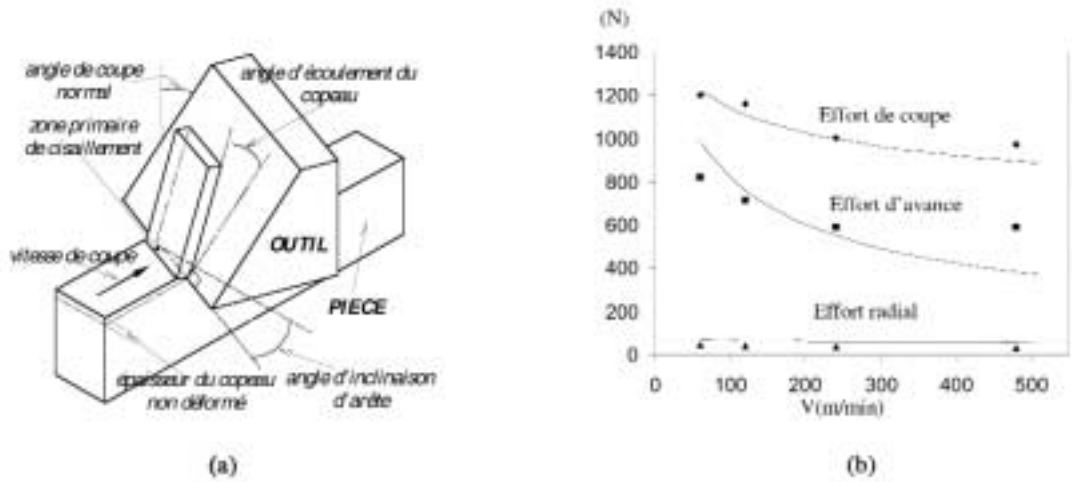


Figure 3. (a) Définition de la coupe oblique, (b) Comparaison entre les résultats du modèle et les essais [4].

miques (voire chimiques) appliquées à l'outil et dans la prédiction de l'état résiduel de la pièce au voisinage de la surface usinée. Elles peuvent ainsi rendre compte de mécanismes stationnaires dans la formation du copeau, tels que ceux rencontrés en fraisage à grande vitesse, et se révéler particulièrement utiles pour la définition de lois de coupe macroscopiques. Cependant, leurs limitations restent multiples.

Le cadre classique de l'approche numérique est celui des éléments finis. L'utilisation de logiciels généralistes, comme HKS-ABAQUS/Explicit (fig. 4), est possible pour la modélisation de la coupe. Cependant, ils ne comportent généralement pas toutes les fonctionnalités nécessaires à une simulation représentative de la coupe, notamment des outils de détection des zones où le cisaillement pourra se localiser, des modèles de comportement adaptés au niveau de l'interface outil/matière, etc. Des logiciels dédiés à la coupe existent (par exemple [5]) mais, à l'instar des logiciels généralistes, ils ne permettent pas l'adoption d'approches novatrices alors que la simulation numérique de la coupe est en pleine évolution.

Par ailleurs, les approches éléments finis sont naturellement limitées par la nécessité d'un maillage régulier du domaine de

la pièce, consécutif aux importantes déformations subies dans la zone de coupe. Si, actuellement, des procédures de remaillage pour les modèles bidimensionnels sont opérationnelles, le remaillage en 3D reste problématique. Une fiabilité défailante et un coût très important limitent les approches éléments finis 3D à des problèmes proches de l'indentation de la matière ou à des cas de coupe stationnaire où l'on peut éviter les remaillages. La simulation de la coupe oblique et celle des opérations de fraisage sont notamment interdites.

Pour surmonter cet obstacle, le LMSP développe une approche dite « sans maillage », concurrente à celle des éléments finis [6] : il s'agit de l'approche C-NEM (méthode des éléments naturels contraints [7]), qui propose une interpolation nodale basée sur un diagramme de Voronoï contraint déduit d'un nuage de nœuds collés à la matière. La particularité de cette approche est d'utiliser une description explicite de la surface de la pièce qui permet, par introduction de la notion de visibilité entre nœuds, de l'étendre à des domaines fortement non convexes (cas des milieux fissurés – prise en compte de bandes de cisaillement).

La figure 6 présente un premier cas bidimensionnel de simulation de coupe réalisée avec ce type d'approche. Aucune redistri-

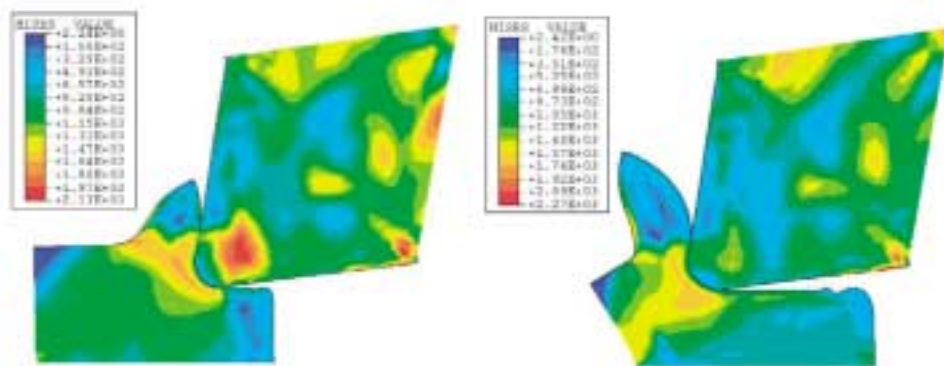


Figure 4. Simulation de la formation d'un copeau avec ABAQUS/Explicit – Contrainte équivalente de Von Mises.



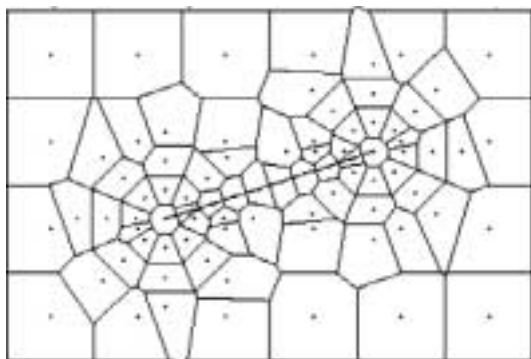


Figure 5. Diagramme de Voronoï contraint au voisinage d'une fissure.

bution de nœud (ou de « remaillage ») n'a été effectuée pendant cette simulation.

Les développements informatiques sont réalisés au sein de la plate-forme logicielle propre au laboratoire, (Nessy, pour « Network solver system ») [8], conçue pour capitaliser les travaux du laboratoire sur plusieurs années et permettre l'expression d'idées nouvelles en s'affranchissant du cadre rigide des logiciels industriels.

Enfin, l'approche numérique se nourrit, comme l'approche semi-analytique, de modèles de comportement pour la matière usinée et les contacts outil/matière. La qualité des résultats obtenus dépend de la représentativité de ces modèles. S'il est relativement facile d'intégrer des modèles d'une grande complexité dans un code de calcul, la difficulté est plutôt liée aujourd'hui à l'identification des paramètres de ces modèles.

Un laboratoire commun CNRS-CETIM-LMSP adossé au LMSP, le LASIP, a été créé pour étudier le découpage de la matière à grande vitesse par simulation numérique, dans l'objectif d'accéder à une meilleure maîtrise du procédé et promouvoir son développement dans les entreprises.

#### 4. Usinage à sec et revêtements des outils

Les initiatives gouvernementales concernant la prévention de la pollution et le respect de l'environnement, de la sécurité et de la santé des populations exercent une pression croissante sur

l'industrie afin qu'elle minimise ses rejets. Les industries du travail des métaux sont particulièrement concernées, notamment pour l'utilisation des fluides de coupe en usinage. L'usinage à sec est écologiquement souhaitable et devrait bientôt devenir incontournable. Il ne peut se développer sans la grande vitesse, on sait en effet qu'aux grandes vitesses de coupe, l'efficacité du lubrifiant est réduite, usinage à sec et UGV sont ainsi associés.

L'équipe du LPMM travaille actuellement sur un programme financé par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et dont la société Snecma-Moteurs est le principal partenaire, dans l'objectif de développer l'usinage à sec et à grande vitesse des matériaux aéronautiques [9]. Les aspects expérimentaux et de modélisation et de simulation sont développés.

L'usinage à sec des aciers et des alliages à hautes caractéristiques mécaniques passe par la réalisation de nouveaux revêtements d'outils et l'optimisation des conditions de coupe. Les revêtements doivent être suffisamment durs et résistants pour travailler ces matériaux et avoir des propriétés auto-lubrifiantes afin de remplacer les fluides de coupe. Certains sont déjà disponibles et d'autres sont à l'étude. Le LPMM s'est associé à deux autres laboratoires du CNRS, le LSGS (UMR 7570) et le LaMCoS (UMR 5514), dans le cadre d'une Action Concertée, pour travailler sur le contact outil-matière usinée, proposer de nouvelles solutions technologiques pour les revêtements et rechercher les conditions optimales de fonctionnement de ces nouveaux outils.

Nous tenons à remercier A. Devillez et S. Dominiak, ingénieurs au LPMM, pour les photos des micrographies.

#### Références

1. D. Dudzinski et A. Molinari, "A Modelling of cutting for viscoplastic materials", *Int. J. Mech. Science*, Vol. 39, N° 4, 1997 (369-89).
2. A. Moufki, A. Molinari et D. Dudzinski, "Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 46, N° 10, 1998 (2103-38).

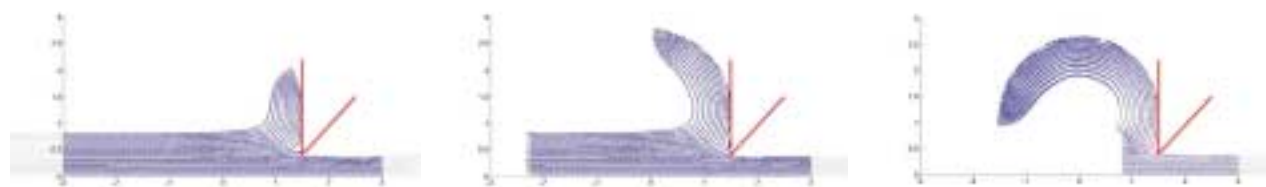


Figure 6. Simulation de la formation du copeau avec la méthode des éléments naturels.

3. A. Moufki, D. Dudzinski, A. Molinari et M. Rausch, "A Thermo-viscoplastic modelling of oblique cutting", *Int. J. Mech. Science*, Vol. 42, 2000 (1205-32).
4. A. Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski et A. Molinari, "Thermo-mechanical modelling of oblique cutting and experimental validation", à paraître dans *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
5. <http://www.thirdwaysys.com/>.
6. F. Chinesta, P. Lorong, D. Ryckelynck, G. Coffignal, M. Touratier, M.-A. Martinez, E. Cueto et M. Doblaré, "Thermomechanical cutting model discretisation: Eulerian or Lagrangian, mesh or meshless?", à paraître dans *International Journal of Forming Processes*, Vol. 7, n° 1 & 2.
7. J. Yvonnet, D. Ryckelynck, P. Lorong et F. Chinesta, « Interpolation naturelle sur les domaines non convexes par l'utilisation du diagramme de Voronoï contraint : méthode des éléments C-naturels », *Revue européenne des éléments finis*, Vol. 12, N° 4, 2003 (487-509).
8. G. Coffignal et P. Lorong, *Un Logiciel éléments finis pour développer et capitaliser des travaux de recherche*, 6<sup>e</sup> Colloque national en calcul des structures, Giens, mai 2003.
9. D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki, V. Zerrouki, D. Larrouquere et J. Vigneau, "A Review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718", à paraître dans *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.

# Tribologie - Matériaux - Procédés

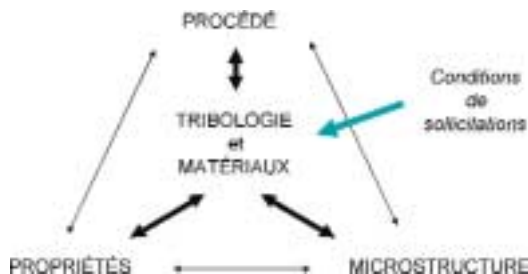
## Contact :

Philippe Kapsa  
Laboratoire de tribologie et dynamique des  
systèmes - UMR 5513  
Ecole Centrale de Lyon  
36, av. Guy de Collongue - BP 163  
69134 Ecully cedex  
Tél. : 04.72.18.62.74  
Fax : 04.78.43.33.83  
Mél : [philippe.kapsa@ec-lyon.fr](mailto:philippe.kapsa@ec-lyon.fr)

*La tribologie, comme les matériaux, se trouve au centre du triangle classique d'interactions Procédé d'élaboration - Propriétés - Microstructure.*

*Le comportement tribologique d'un matériau constitutif d'un élément d'un système mécanique complexe dépend en effet entre autres des caractéristiques de ce matériau et donc de son procédé d'élaboration.*

Le frottement et l'usure ne peuvent cependant pas être considérés comme des propriétés intrinsèques des matériaux, car les conditions de sollicitations peuvent influencer de manière importante sur les interactions tribologiques.



Cet aspect se retrouve de façon très marquée dans toutes les actions de recherche qui visent à améliorer les performances et la durabilité par l'optimisation de matériaux massifs, composites ou en couche mince. Ainsi, de nombreux systèmes mécaniques fonctionnent grâce à des matériaux dont les propriétés ont été adap-

tées aux sollicitations particulières. Dans ce cadre, on peut mentionner les revêtements qui font l'objet de nombreux travaux de recherche amont mais aussi de développements commerciaux.

L'une des difficultés majeures rencontrées lorsque l'on considère tribologie et revêtements est que, face à une application particulière qui se traduit par des sollicitations spécifiques au niveau des contacts, il n'y a pas d'unicité des solutions technologiques. Des couches dites « dures » peuvent aussi bien que des couches dites « molles » lutter efficacement contre l'usure et réduire la résistance au frottement. Il existe donc de multiples solutions. De plus en plus, on fait appel à des matériaux en revêtement à structure complexe dont les propriétés spécifiques (dureté, module d'élasticité, contraintes résiduelles, limite à la rupture...) sont très intéressantes – il s'agit de nanocomposites, de multicouches ou de matériaux à gradients par exemple. On peut aussi mentionner le développement de matériaux réputés ultradurs comme le nitrure de carbone (CNx) dont la structure, à l'instar de celle du diamant, a été imaginée théoriquement avant d'avoir été réalisée, avec un succès limité, grâce à des procédés d'élaboration sophistiqués.

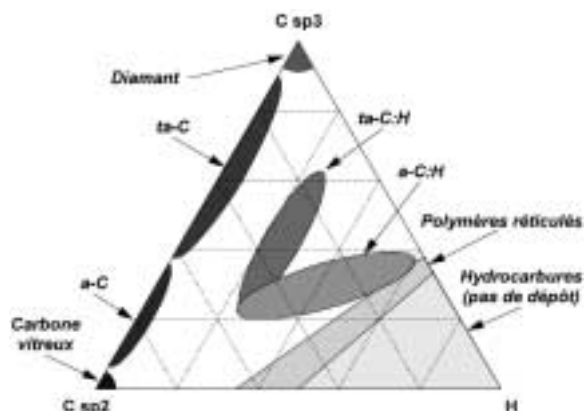


Figure 1. Pseudo-diagramme ternaire représentant les différents types de couches minces de carbone amorphe, en fonction des quantités d'hydrogène et de carbone trivalent ( $sp^2$ ) et tétravalent ( $sp^3$ ). Il s'agit de matériaux amorphes et métastables (d'après [1]).

a-C : carbone amorphe (amorphous carbon)

ta-C : carbone amorphe tétravalent (tetraivalent amorphous carbon)

ta-C:H : carbone amorphe tétravalent hydrogéné (hydrogenated tetraivalent amorphous carbon)

Enfin, des matériaux classiquement employés depuis longtemps comme le nitrure de titane (TiN), le carbone (sous diverses formes) ou le sulfure de molybdène ( $MoS_2$ ) font toujours l'objet de recherches sur les procédés d'élaboration afin d'améliorer encore leurs performances.

Connues depuis plus de 20 ans, les couches minces à base carbone ou carbone et hydrogène, souvent appelées *Diamond-Like Carbon* (DLC) en raison de leurs excellentes propriétés optiques et mécaniques, ont fait leur apparition dans l'industrie mécanique dans les années 90. Encensées par certains, décriées par d'autres, ces couches minces ont eu du mal à s'imposer, malgré leurs potentialités, face à des revêtements mieux connus comme le nitrure de titane. La principale raison vient de la grande diversité des procédés d'élaboration et des paramètres expérimentaux, qui conduisent à des structures et des propriétés très variables (fig. 1) [1]. Il est donc primordial pour un industriel d'une part de s'assurer de la stabilité du procédé d'élaboration et d'autre part de choisir le bon procédé et les bons paramètres, afin d'obtenir les propriétés requises pour l'application visée.

Le Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes (LTDS) s'est impliqué dans l'optimisation de couches DLC pour la lubrification des mécanismes spatiaux, pour lesquels l'utilisation de matériaux lubrifiants solides permet un gain de poids sensible et facilite grandement la conception. En interagissant, côté élaboration, avec la société HEF de Saint-Étienne et, côté application, avec le CNES, il a été possible d'adapter un produit industriel standard pour cette application particulière [2, 3].

En effet, certaines couches de carbone amorphe hydrogéné (a-C:H), obtenues par dépôt chimique en phase gazeuse assisté par plasma (PACVD), conduisent à de faibles coefficients de frottement sous vide ( $< 0,01$ ). Les travaux ont montré l'existence

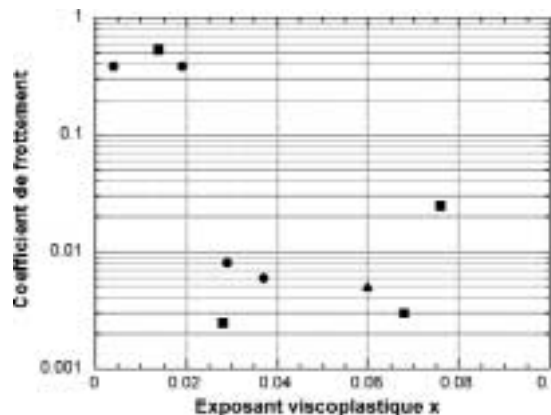


Figure 2. Coefficient de frottement sous ultra-vide de couches a-C:H, issues de trois procédés différents, en fonction de leur exposant viscoplastique  $x$  dans la relation de Norton-Hoff :  $H = H_0 \cdot \dot{\epsilon}^x$  où  $H$  est la dureté et  $\dot{\epsilon}$  la vitesse de la déformation [4]. Les valeurs de  $x$  inférieures à 0,02 peuvent être considérées comme quasi nulles.

d'une teneur minimale en hydrogène pour garantir ce résultat, teneur contrôlée principalement par un paramètre du procédé, la tension de polarisation des substrats.

Le rôle de l'hydrogène serait de favoriser des interactions faibles entre les surfaces en contact (force de Van der Waals), mais cette valeur seuil s'avère fortement dépendante du procédé. Ce fait s'explique par la présence d'hydrogène piégé dans la couche et non lié au carbone, et par le fait que pour une teneur donnée en hydrogène, de nombreuses structures sont possibles. Les propriétés mécaniques semblent un moyen indirect mais plus fiable d'appréhender la structure : la nanoindentation révèle la nature viscoplastique de tous les dépôts a-C:H à faibles coefficients de frottement sous vide (fig. 2) [4]. Ce comportement viscoplastique est révélateur de la présence de volumes libres dans la structure, autorisant les phénomènes de relaxation.

Ainsi, pour une application tribologique donnée, les liens entre un paramètre procédé, une structure du matériau, une propriété mécanique et un comportement tribologique ont été identifiés.

J. Fontaine a contribué à cet article.

## Références

- [1] J. Robertson, « Diamond-like amorphous carbon », *Materials Science and Engineering Reports*, 37(4-6), 2002 (129-281).
- [2] C. Donnet, J. Fontaine, T. Le Mogne, M. Belin, C. Héau, J.-P. Terrat, F. Vaux et G. Pont, « Diamond-like carbon-based functionally gradient coatings for space tribology », *Surface and Coatings Technology*, 120-121, 1999 (548-54).
- [3] J. Fontaine, *Elaboration, caractérisation et tribologie de couches minces DLC pour la lubrification des mécanismes spatiaux*, thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 2000.
- [4] J. Fontaine, J.-L. Loubet, T. Le Mogne et A. Grill, « Superlow friction of diamond-like carbon films: a relation to viscoplastic properties », article soumis à *Tribology Letters*.

# Procédés assistés par plasma pour la préparation des surfaces

## Contact :

Thierry Belmonte  
Laboratoire de science et génie des surfaces -  
UMR 7570  
Institut national polytechnique de Lorraine  
Parc de Saurupt  
54042 Nancy cedex  
Tél. : 03.83.58.40.91  
Fax : 03.83.53.47.64  
Mél : belmonte@mines.inpl-nancy.fr

*Pour modifier et/ ou apporter des propriétés spécifiques à une surface donnée, il est fréquent de faire appel à un traitement de dépôt de couches minces. La surface réceptrice doit alors être préparée par un traitement préliminaire de fonctionnalisation, d'élimination d'oxydes natifs ou de nettoyage, effectué aujourd'hui essentiellement par voie aqueuse. Avec l'accroissement des contraintes environnementales, il devient indispensable de proposer des alternatives aux procédés classiques de nettoyage. Parmi les technologies à fort potentiel de développement se trouvent les procédés par plasmas froids [1].*

Ces technologies commencent à être industrialisées. Ainsi, la société allemande Technics Plasma GmbH a mis en œuvre un procédé de nettoyage à plasma micro-ondes dans un atelier de peinture de la société Swissair [2]. La société PlasmaFinish a développé un procédé industriel de nettoyage par plasma d'oxygène du verre et des fibres de carbone [3]. En France, la société AcXys propose des dispositifs clés en main de préparation et de modification de surface [4].

La préparation des surfaces par un plasma exploite des effets physiques et des effets chimiques induits par le plasma. Dans le premier cas, ce sont des ions positifs accélérés sous une différence de potentiel de quelques dizaines de volts qui provoquent l'éjection de particules par pulvérisation. Dans le second cas, ce sont des réactions chimiques mettant en jeu des espèces très réactives du plasma et formant des composés volatiles qui modifient la surface. Différents mélanges gazeux peuvent être utilisés suivant l'objectif visé :

- les gaz oxydants ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CF_4/O_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $N_2/O_2$ ) actifs pour la décomposition des composés organiques ;
- les gaz réducteurs ( $H_2$ ,  $Ar/H_2$ ,  $N_2/H_2$ ) actifs pour la réduction des oxydes et l'activation des surfaces ;
- les gaz de gravure ( $CF_4$ ,  $C_2F_6$ ,  $NF_3$ ) utilisés sur le silicium en microélectronique.

Alors que la pulvérisation peut être efficacement mise en œuvre à basse pression, seules les réactions chimiques peuvent être utilisées à haute pression. On distingue donc procédés sous vide et procédés à la pression atmosphérique. On distingue également les traitements où la pièce à traiter est immergée dans le

plasma de ceux où elle est disposée en aval du plasma, c'est-à-dire en post-décharge.

## Procédés plasmas sous vide ou à la pression atmosphérique

Les réacteurs à plasmas froids les plus utilisés fonctionnant sous vide sont de configuration diode radio-fréquence dans des mélanges  $O_2-CF_4$ . On trouve également des réacteurs micro-ondes fonctionnant à la résonance cyclotron électronique [5]. Les applications les plus couramment visées sont l'élimination des masques en résines photosensibles, le nettoyage avant enrobage lors du conditionnement des circuits intégrés, le nettoyage des contacteurs de tableau de bord ainsi que des enceintes à vide, des accélérateurs de particules, etc. [6].

Les réacteurs sous vide font intervenir des technologies de pompage qui peuvent s'avérer onéreuses. Pour promouvoir l'utilisation des plasmas dans l'industrie, il est souhaitable de développer, à performance équivalente, des procédés fonctionnant à la pression atmosphérique. Il est assez simple, par exemple, de réaliser des traitements au défilé de surfaces planes. Les décharges à barrières diélectriques (DBD) sont des technologies très faciles à adapter sur des lignes de production (fig. 1). Elles sont obtenues par application d'une tension entre deux électrodes séparées par un espace gazeux et un diélectrique solide [7]. Dans le domaine du nettoyage des huiles, il a été montré qu'un traitement de 10 minutes dans une DBD donne des résultats comparables à ceux obtenus par un procédé chimique performant [8].



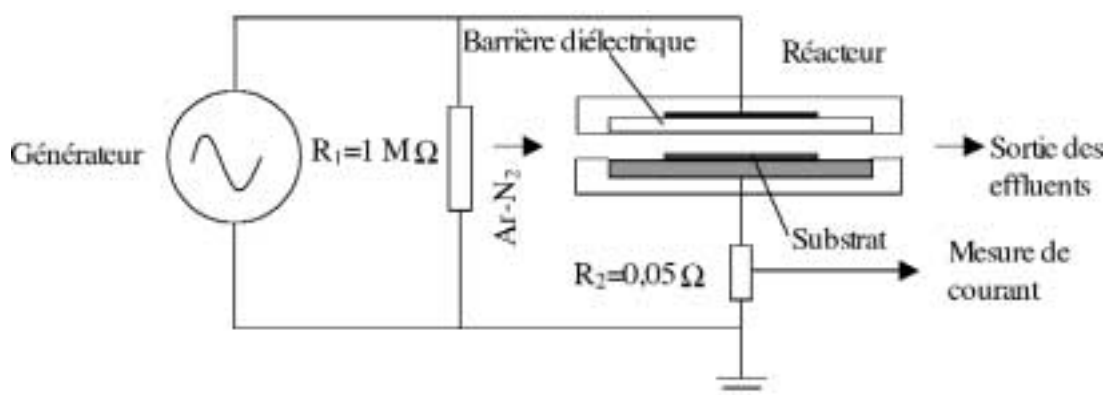


Figure 1. Schéma de principe d'un réacteur DBD utilisé pour la préparation d'échantillons métalliques (d'après [5]).

### Procédés en post-décharge

Enfin, il est indispensable d'évoquer les procédés en post-décharge. Dans ces procédés, les espèces actives neutres sont transportées par convection en aval du plasma où sont disposés les substrats à traiter. Ainsi, les températures mises en œuvre sont typiquement comprises entre l'ambiante et 100 °C et une préparation « douce » de la surface peut être opérée (fig. 2). Surtout, les post-décharges peuvent être étendues sur de grands volumes, y compris à haute pression, si l'hydrodynamique des gaz est bien maîtrisée. Industriellement, des sources fonctionnant sous vide – notamment pour la fonctionnalisation des matériaux polymères [9] – et à la pression atmosphérique [4] sont commercialisées. Enfin, l'utilisation de post-décharges est à l'étude pour stériliser des matériaux labiles, c'est-à-dire des matériaux dont la structure serait affectée par une augmentation sensible de la température au-delà de quelque 50 °C [10].

Ont contribué à cet article T. Czerwiec, J.-M. Thiébault et H. Michel.

### Références

[1] T. Belmonte, T. Czerwiec, J.-M. Thiébault, D. Mézerette et H. Michel, *ATTT 2002*, PYC Édition, Paris, 2002 (133) et *Traitement thermique*, 347, 2003 (27).  
 [2] W. Petasch, B. Kegel, H. Schmid, K. Lendenmann et K.-U. Keller, *Surf. Coat. Technol.*, 97, 1997 (176).  
 [3] P. Kruger, R. Knes et J. Friedrich, *Surf. Coat. Technol.*, 112, 1999 (240).  
 [4] B. Andries, T. Sindzingre et A. Merluzzi, *Le vide, science technique et applications*, Numéro spécial, actes du colloque CIP'2001, 189, [http://www.acxys.com/\(34\)](http://www.acxys.com/(34)).

[5] P. Raynaud et C. Pomot, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 11, 1993 (699).  
 [6] B. Kegel et H. Schmid, *Surf. Coat. Technol.*, 112, 1999 (63).  
 [7] F. Massines, *Le vide, science technique et applications*, 299, 2001 (55).  
 [8] G. Baravian, D. Chaleix, P. Choquet, P.-L. Nauche, V. Puech et M. Rozoy, *Surf. Coat. Technol.*, 115, 1999 (66).  
 [9] F. Poncin-Epaillard et Y.-I. Chang, *Langmuir*, 16 3, 2000 (1450-53).  
 [10] M. Moisan, J. Barbeau et J. Pelletier, *Le vide, science technique et applications*, 299, 2001 (15).

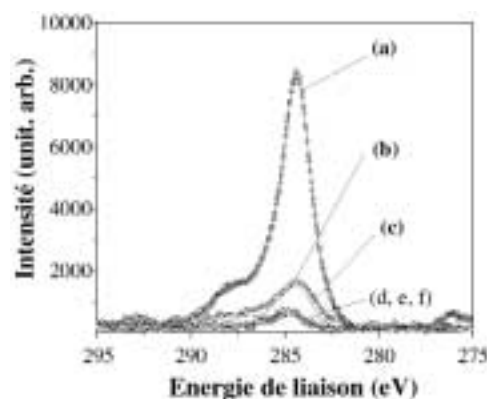


Figure 2. Signal XPS C(1s) du carbone mesuré sur une feuille de fer pur contaminée par les impuretés atmosphériques. (a) Avant traitement de nettoyage. (b) Après traitement de nettoyage en post-décharge micro-ondes Ar-N<sub>2</sub> à 323 K. (c) A 373 K et après 10 minutes (d), 20 minutes (e) et 40 minutes (f) de pulvérisation ionique dans la chambre XPS.

# Les nanocomposites à matrice polymère

**Contact :**

Jean-Yves Cavaillé  
 Groupe d'études de métallurgie physique et de  
 physique des matériaux, UMR 5510  
 Bât. 502  
 20, av. Albert Einstein  
 69621 Villeurbanne cedex  
 Tél. : 04.72.43.88.03  
 Fax : 04.72.43.85.28  
 Mél : jyc@insa-lyon.fr

La littérature scientifique de ces dix dernières années témoigne d'un très grand intérêt pour les nanocomposites. L'étude de polymères renforcés par des nanophases n'est pas nouvelle : les polymères semi-cristallins par exemple peuvent être considérés comme des systèmes nanostructurés composés de cristallites dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques nanomètres, dispersées dans une matrice amorphe. De même, les caoutchoucs chargés au noir de carbone sont utilisés depuis longtemps, notamment dans l'industrie des pneumatiques.

La science des composites utilise généralement des renforts fibreux avec des diamètres de l'ordre du micron. Avec des renforts d'une taille nanométrique, on pourrait obtenir des composites multifonctionnels alliant des propriétés mécaniques et des propriétés optiques (transparence) ou de surface (rugosité) améliorées.

La recrudescence des recherches sur les nanocomposites s'accompagne du développement de nouveaux renforts ayant des facteurs de forme (rapport de la plus grande dimension sur la plus petite) variés [1]. Pour les facteurs proches de l'unité, on peut citer par exemple les nanoparticules de silice de précipitation. Elles ont relancé les études sur les élastomères chargés et leur utilisation dans l'industrie des pneumatiques est très récente [2]. Pour les facteurs de forme plus élevés, on peut distinguer les charges plaquettaires (fig. 1), telles les nanoargiles [3] (laponite, montmorillonite...) et les renforts fibreux tels les nanofibrilles de cellulose (fig. 2) ou les nanotubes de carbone (fig. 3). Bien qu'ils soient obtenus par des procédés très semblables, peu d'études ont porté sur la comparaison entre les propriétés mécaniques des micro et des nanocomposites. L'une des raisons primordiales reste la difficulté de disperser, de manière identique à leurs homologues microniques, des particules qui ont spontanément tendance à s'agréger. Dans ce contexte, un certain nombre d'études portent sur l'optimisation des procédés d'élaboration. L'une des voies explorées consiste à fonctionnaliser la surface des particules, mais l'on peut aussi opter pour la polymérisation *in situ*.

Toutefois, quel que soit le procédé de mise en œuvre, la présence de nanorenforts améliore de façon indéniable la rigidité de la matrice polymère, en particulier dans le domaine caoutchoutique et cela, sans effet préjudiciable sur les grandes déformations [1]. Différents modèles mécaniques, généralement utilisés dans le cas des microcomposites, permettent de rendre compte de l'influence des nanorenforts en dessous de la tempé-

rature de transition vitreuse. Mais leur utilisation dans le domaine caoutchoutique (c'est-à-dire au-dessus de cette température) conduit le plus souvent à une sous-estimation des performances des nanocomposites.

Il faut donc s'interroger sur les spécificités des nanocomposites à matrice polymère. La première est la surface d'interface consi-



Figure 1. Plaquettes de montmorillonite dans du PA6 observées par microscopie électronique à transmission (MET).

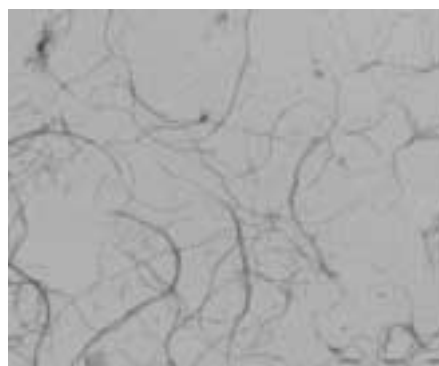


Figure 2. Nanofibrilles de cellulose vues par MET.



Figure 3. Nanotubes de carbone vus par MET.

dérable, qui peut atteindre 100 à 1 000 m<sup>2</sup>/g de renforts. Ainsi, si l'on considère que la mobilité moléculaire des chaînes est modifiée au voisinage de l'interface sur une distance de l'ordre de leur rayon de giration (quelques nanomètres), il apparaît qu'une fraction importante de la matrice est concernée. En outre, une diminution de la taille des particules à fraction volumique constante conduit en moyenne à une diminution de la distance entre particules. Cela peut favoriser les interactions particule-particule à courte distance et la formation d'un réseau connexe rigide de renfort [4]. Une autre conséquence est que les renforts peuvent être connectés par les macromolécules et former alors un réseau flexible.

Si les approches intégrant les lois de percolation permettent de bien décrire les propriétés mécaniques dans le cas du réseau rigide, un effort reste à faire lorsque les interactions entre particules de renfort sont faibles mais non négligeables [4]. Une approche prometteuse repose sur la modélisation par éléments discrets, qui permet de prendre en compte explicitement ces contacts ainsi que la microstructure [5]. La difficulté la plus grande est de relier les paramètres régissant le couplage particule-particule et particule-matrice aux caractéristiques physico-chimiques des phases constituant les matériaux. Une question souvent débattue et non réglée porte sur la nature de la couche

interfaciale et la présence d'un gradient de mobilité. Bien évidemment, la description du comportement dans le domaine linéaire devient inadaptée lorsque l'on s'intéresse au comportement aux plus grandes déformations. En particulier, la question de l'endommagement des matériaux nanocomposites est complexe, car il correspond à des tailles caractéristiques nanométriques elles aussi difficiles à observer. La nanotomographie développée sous MET est une technique qui permettra sûrement de faire progresser cette problématique.

Le développement et l'optimisation des nanocomposites passent donc par la résolution de problèmes technologiques et scientifiques en termes de procédés de mise en œuvre, de caractérisation microstructurale et mécanique, et l'établissement de relations entre leur microstructure et leurs propriétés.

Ont contribué à cet article : Catherine Gauthier et Laurent Chazeau.

## Références

- [1] L. Chazeau, C. Gauthier, G. Vigier et J.-Y. Cavallé, « Relationships between Microstructural Aspects and Mechanical Properties of Polymer-Based Nanocomposites », *Handbook of Organic-Inorganic Hybrid Materials and Nanocomposites*, 1, sous la direction de H.-S. Nalwa, American Scientific Publishers, 2002.
- [2] J. Ramier, C. Gauthier, L. Chazeau, L. Ladouce, L. David et R. Vassoille, conférence « Euro-Fillers 01 », Lodz, Pologne, 9-12 juillet 2001.
- [3] K. Varlot, E. Reynaud, M.-H. Kloppfer, G. Vigier et J. Varlet, *J. Polym. Sci. Polym. Phys.*, 39, 2001 (1360).
- [4] E. Chabert, R. Dendievel, C. Gauthier et J.-Y. Cavallé, article proposé à *Compos. Sci. Technol.*
- [5] Y. Bréchet, J.-Y. Cavallé, E. Chabert, L. Chazeau, R. Dendievel, L. Flandin et C. Gauthier, *Adv. Eng. Mat.*, 3, 2001 (571).

# Diagnostic X de milieux polyphasiques

## Exemple de la mesure de densités dans la zone proche injecteur d'un jet cryogénique d'azote sous haute pression

### Contact :

Jean-Michel Pouvesle  
Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés, UMR 6606  
Université d'Orléans  
14, rue d'Issoudun  
BP 6744  
45067 Orléans cedex 2  
Tél. : 02.38.41.71.24  
Fax : 02.38.41.71.54  
Mél : Jean-Michel.Pouvesle@univ-orleans.fr

Le diagnostic des écoulements turbulents ou des jets à haute pression revêt une extrême importance pour les études liées au développement des technologies moteur et propulseur de tous types, particulièrement celles concernant les injecteurs cryogéniques ( $H_2$ ,  $O_2$ ) pour les moteurs de fusée. L'utilisation des méthodes optiques classiques pour le diagnostic des sprays denses ou des jets à haute densité est limitée. Quand les gradients d'indice de réfraction sont très grands, comme cela arrive dans la région cœur des jets liquides, les méthodes utilisant des nappes lumineuses (fluorescence induite par laser<sup>1</sup>, diffusion Raman ou Mie...) sont seulement qualitatives. L'utilisation du rayonnement X peut permettre de pallier ces difficultés et d'apporter un certain nombre de résultats quantitatifs nécessaires à une meilleure compréhension des phénomènes régulant le comportement des zones de mélange dans la région proche des injecteurs. Des expériences réalisées récemment avec un flash de rayonnement X compact et transportable par l'équipe du GREMI<sup>2</sup>, en collaboration avec le LCSR<sup>3</sup>, laboratoires de la Fédération EPEE<sup>4</sup>, au Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) de Lampoldshausen en Allemagne, sur le banc d'essais M51, ont montré l'intérêt de ces nouvelles techniques. Elles ont notamment permis de mesurer des densités dans des zones habituellement non accessibles aux techniques traditionnelles dans une très large gamme de températures d'injection et de pression dans la chambre de tests. Les travaux réalisés sur M51 avec l'équipe de Wolfgang Meyer\* ont permis d'obtenir pour la première fois des images radiographiques

dans la zone proche de l'injecteur (avec  $z/d < 10$ ,  $z$  étant la distance à la sortie de l'injecteur et  $d$  le diamètre du jet). Il faut noter que cette technique se fait sans ajout de traceurs lourds (Xe, I) qui peuvent perturber l'écoulement de jets d'azote liquide à des températures comprises entre 100 à 130 K dans une cellule remplie d'azote à des pressions de 10 à 60 bars, engendrant pour certains points de mesure des conditions avoisinant un état supercritique.

Dans le cadre d'expériences faisant intervenir différentes espèces, ce diagnostic peut être éventuellement couplé à de l'imagerie de fluorescence induite par le flash de rayonnement X [1], dont l'analyse permet de visualiser, en fonction du temps, les zones de mélanges des principaux composants. Ces méthodes sont bien sûr applicables à d'autres domaines utilisant des jets denses ou diphasiques (sprays).

### Quelle source X ?

Il existe de nombreuses sources X dans les laboratoires ou dans l'industrie présentant des caractéristiques tout à fait exceptionnelles en termes de flux, de domaine d'énergie des photons produits ou de largeur d'impulsion. Celles-ci sont cependant la plupart du temps inadaptées pour les études qui viennent d'être mentionnées. La source *a priori* idéale est bien sûr le rayonnement synchrotron qui a toutes les caractéristiques recherchées mais présente des inconvénients majeurs liés à la taille de l'installation et à sa faible disponibilité. Si son utilisation est concevable par exemple pour l'étude d'injecteurs dans le domaine de l'automobile [2], cela devient impensable dans le secteur de l'espace où les installations test sont elles-mêmes de grandes dimensions et non déplaçables. Si l'expérience ne peut venir à la source de rayonnement, c'est bien entendu l'inverse qui doit être envisagé. Les sources plasma laser pouvant émettre des doses suffisantes de rayonnement restent relativement sophistiquées et difficiles à mettre en œuvre dans l'environnement immédiat des installations. Les dispositifs utilisant des tubes à rayons X continus, largement utilisés dans le domaine médical ou l'indus-

1. Voir Lettre SPI n° 36.

2. GREMI : Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés.

3. LCSR : Laboratoire de combustion et système réactifs.

4. EPEE : Fédération de recherche énergie, propulsion, espace, environnement.



trie, sont difficilement déplaçables et nécessitent des infrastructures spécifiques pour leur fonctionnement et la protection du personnel, la plupart du temps incompatibles avec les bancs de test utilisés. Par ailleurs, bien que ces derniers émettent d'importantes doses moyennes de rayonnement X et puissent être assez facilement réglés en énergie, les flux de photons sur des temps courts caractéristiques de l'évolution des systèmes observés sont très faibles et inexploitable. Les sources flash X industrielles sont transportables mais émettent dans une gamme d'énergies trop élevées ( $E_{ph} > 50$  keV) pour les milieux à diagnostiquer [3-5]. Pour ces énergies en effet, la différence entre l'absorption des photons X dans le jet et celle dans le gaz ambiant sur la même épaisseur est trop faible et ne permet pas d'obtenir un contraste suffisant exploitable sur une image.

Dans ce contexte, le GREMI, qui travaille sur les sources de rayonnement X durs impulsives depuis une décennie [6, 7], a développé, parmi d'autres, un nouveau type de flash X portable (fig. 1) émettant des photons dans une gamme d'énergie (5-50 keV) adaptée aux milieux à caractériser et pouvant très facilement être mis en œuvre sur n'importe quel site expérimental.

### Dispositif expérimental et mesures

Dans le cas des expériences réalisées sur M51[8], la source X, composée de deux sous-ensembles distincts – une partie alimentation et pompage et une partie source, déportée, compre-



Figure 1. Photographie d'ensemble du dispositif sur l'installation M51 du DLR de Lampoldshausen. On peut y voir le flash X devant la boucle de gaz et la chambre haute pression contenant l'injecteur.

nant le dispositif de mise en forme de l'impulsion haute tension et la diode X – a été adaptée à l'environnement de la chambre haute pression (caractéristiques géométriques de la diode X, fenêtre spéciale de sortie de la diode). L'impulsion X est obtenue par décharge rapide haute tension, en configuration anode pointe/cathode disque, à une pression résiduelle de l'ordre de  $10^{-3}$  mbar. Pour une tension de charge de 28 kV, les doses émises sont de 0.3 mrad à 1 m dans des impulsions de 50 ns à mi-hauteur. La très courte durée des impulsions X par rapport au temps caractéristique d'expansion des jets permet de totalement négliger le flou de bougé dans l'analyse des images obtenues. Il faut en revanche tenir compte de la taille de la source ( $\varnothing \sim 300$   $\mu$ m) et de ses fluctuations possibles en position dans le cas d'images obtenues sur plusieurs tirs. La source (fig. 1) peut fonctionner du régime mono-coup jusqu'à 50 Hz. D'autres sources développées au GREMI, émettant des photons d'énergie allant jusqu'à 400 keV, permettent des rafales d'impulsions jusqu'à 20 kHz.

L'ensemble du dispositif expérimental comprenant la chambre haute pression équipée d'un injecteur modèle ainsi que la source X est présenté à la figure 1. La chambre haute pression (fig. 2a et b), équipée de quatre fenêtres de visées, peut être pressurisée jusqu'à 60 bars avec, dans le cas présent, de l'azote à la température ambiante. Elle contient un injecteur cryogénique permettant d'introduire de l'azote liquide à des vitesses comprises entre 1 et 10 m/s à des températures contrôlées entre 100 et 130 K dans le cadre des expériences rapportées ici.

Les photons X pénètrent dans la chambre maintenue sous pression d'azote (10-60 bars) à travers une fenêtre spéciale équipée d'un hublot ( $\varnothing$  9 mm) en Mylar® de 320  $\mu$ m d'épaisseur. Ils interagissent avec le gaz ambiant et le jet cryogénique d'un diamètre de 2.2 mm à la sortie de l'injecteur placé au centre de la cellule. La radiographie est obtenue en reprenant l'image par

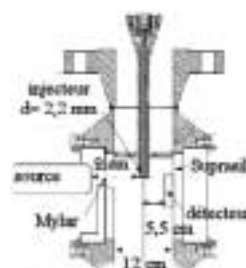


Figure 2. a) Photographie de la chambre haute pression de M51 ; b) coupe schématique de cette chambre avec le positionnement de la source X.

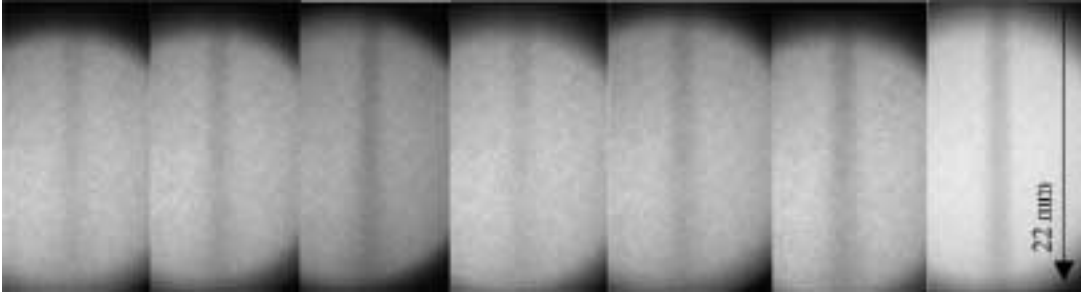


Figure 3. Radiographies des jets d'azote pour différentes conditions de pressions ambiantes et de températures du jet (de gauche à droite) : 60 bars à 130, 120 et 100 K, 40 bars à 130, 120 et 100 K, 10 bars à 100 K.

ICCD d'un scintillateur ACS (CsI sur une couche de carbone amorphe) placé dans la chambre à une distance suffisante du jet pour ne pas perturber l'écoulement. Les mesures sont réalisées sur les deux premiers centimètres après la sortie de l'injecteur dans la zone la plus dense du jet difficilement accessible aux autres diagnostics optiques. Compte tenu des milieux en présence, on obtient un contraste suffisant sur l'épaisseur du jet entre celui-ci et le gaz ambiant pour des photons X dans la gamme d'énergie allant de 8 à 20 keV, gamme d'énergie pour laquelle le flash a été optimisé (raies caractéristiques du matériau de l'anode en tungstène entre 8 et 10 keV et continuum de Bremsstrahlung).

Des exemples de radiographies obtenues dans différentes conditions expérimentales sont donnés en figure 3 pour un injecteur de 2.2 mm de diamètre. Quelles que soient les valeurs des pressions de gaz ambiant (10, 40, 60 bars) et les températures de jet (100, 120 et 130 K), des contrastes suffisants sont obtenus pour permettre une analyse des images et quantifier les densités dans la zone proche de l'injecteur. Les radiographies sont effectuées soit sur un seul tir, soit en moyennant sur 200 tirs, ce dernier cas permettant de comparer directement les résultats obtenus à d'autres diagnostics qualitatifs faisant appel à des mesures moyennées.

Au-delà de l'analyse qualitative des radiographies obtenues, un algorithme actuellement développé au laboratoire permet le calcul de la densité dans le jet. L'absorption des photons X traversant un milieu est liée à sa densité par la loi de Beer-Lambert. A partir de l'analyse des images radiographiques, on peut remonter aux variations de densité du milieu observé, connaissant le coefficient d'absorption massique  $\sigma$  et le spectre du rayonnement émis par la source. L'interaction des photons X avec les milieux traversés dépend aussi de facteurs géométriques liés à la propagation depuis le foyer X jusqu'au détecteur. L'algorithme développé, prenant en compte la modification du spectre tout au long du parcours des photons X dans le milieu gazeux ambiant, requiert une hypothèse de symétrie cylindrique de l'objet. L'épaisseur des différentes couches d'isodensité est fixée par la taille des pixels du détecteur sur lequel s'effectue la radiographie. Cette procédure de calcul, de type inversion d'Abel, fournit un profil de densité radial de l'objet à

une position donnée le long de l'axe de l'écoulement. La répétition du calcul pour les différentes zones en aval de l'injecteur permet de reconstruire en trois dimensions la carte de densité du jet.

La figure 4 présente le résultat du calcul de densité effectué à partir de la radiographie d'un jet d'azote à 10 bars et 100 K de la sortie d'injecteur  $z = 0$  à  $z/d = 10$ . La comparaison de ce profil calculé avec celui d'un jet parfaitement cylindrique et homogène permet de mettre en évidence la chute de densité le long de l'écoulement dans les premiers millimètres en sortie d'injecteur. Cette chute de densité est liée en partie à une légère ouverture angulaire du jet, qui le distingue d'un pur jet bâton, mais traduit également le mélange et l'atomisation du jet lors de sa pénétration dans la zone à forte pression. La qualité de cette atomisation est l'une des clefs d'une combustion efficace du carburant liquide dans les conditions de fonctionnement du moteur.

L'impact des différents paramètres (taille et bougé de source, spectre de photons, grandissement, etc.), est calculé et simulé sur des objets test afin d'améliorer à l'avenir les conditions d'enregistrement des radiographies et d'affiner les calculs de densité absolue. L'application de ces méthodes est proposée dans le cadre du programme INCA (INitiative pour la Combustion Avancée) actuellement en cours de discussion entre les

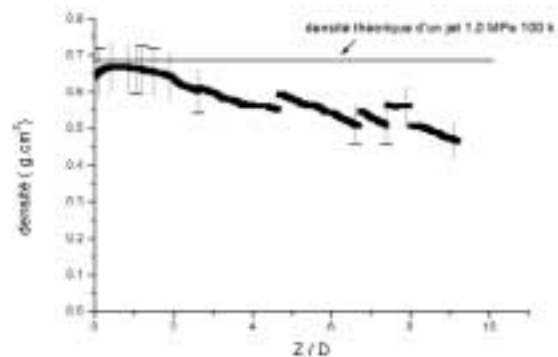


Figure 4. Evolution de la densité le long de l'axe d'un jet à 100 K se détendant dans une atmosphère d'azote à 10 bars.

principaux partenaires privés et publics du secteur de la propulsion.

### Conclusion et perspectives

Le pouvoir de pénétration de la matière par des photons X, beaucoup plus fort que celui des photons visibles, permet de s'affranchir dans de nombreux cas de problèmes de diffusion, d'absorption ou de refocalisation auxquels se heurtent les techniques optiques classiques. Dans le cadre du diagnostic des jets denses ou cryogéniques, l'intérêt pour le développement de nouvelles techniques de mesures basées sur l'utilisation des photons X repose donc sur la possibilité d'obtenir des données expérimentales dans les zones des écoulements où les techniques traditionnelles deviennent difficilement exploitables du fait des propriétés intrinsèques du milieu (haute pression, haute température, émission lumineuse très intense...). Le travail doit continuer sur le développement d'outils de diagnostics (radiographie ultra-rapide à faible contraste dans des milieux de Z faible, imagerie de fluorescence induite par flash de rayonnement X) adaptés aux conditions propres des expériences concernant le développement ou la validation des technologies moteur de fusée utilisant des liquides (classiques hydrogène/oxygène liquide ou faisant appel à l'utilisation d'hydrocarbures). Cela nécessite l'optimisation de nouvelles sources répondant à des critères très spécifiques sur l'énergie des photons X et l'énergie rayonnée, et la validation des diagnostics sur des systèmes test, avant de procéder à des mesures *in situ* sur des bancs expérimentaux des principaux organismes concernés.

Participant à ces travaux : Eric Robert, Brice Metay, Raymond Viladrosa, Christophe Cachoncinlle, Iskender Gökalp, Jean-Michel Pouvesle

\* Les auteurs ont une pensée émue pour leur collègue du DLR, Wolfgang Meyer, responsable de M51, acteur à part entière de ce travail et décédé le 23 octobre 2003 à l'âge de 44 ans.

### Références

- [1] E. Robert, L. Huré, C. Cachoncinlle, R. Viladrosa et J.-M. Pouvesle, "Simultaneous flash X-ray induced fluorescence imaging and radiography of argon jets in ambient air", *Meas. Sci. Technol.*, 10, 1999 (789).
- [2] Y. Yue, C.-F. Powell, R. Poola, J. Wang et J.-K. Schaller, "Quantitative measurements of diesel fuel spray characteristics in the near-nozzle region using x-ray absorption", *Atomization and Sprays*, 11, 2001 (471-90).
- [3] T.-G. Theofanous, S. Angelini, X. Chen, R. Luo et W.-W. Yuen, "Quantitative radiography for transient multidimensional, multiphase flows", *Nuclear Engineering and Design*, 184, 1998 (163-81).
- [4] P. Krehl et D. Warken, "Flash soft radiography – its adaptation to the study of breakup mechanisms of liquid jets into a high-density gas", *SPIE vol. 1358, 19th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*, 1990 (162-73).
- [5] A. Birk, M. McQuaid et M. Gross, "Liquid core structure of evaporating sprays at high pressures – flash X-ray studies", *ICLASS-94, Publication n° IV-11*, 1994 (459-66).
- [6] J.-M. Pouvesle, C. Cachoncinlle, R. Viladrosa, E. Robert et A. Khacef, "Compact flash X-ray sources and their applications", *Nucl. Instrum. Meth. Phys. B*, 113, 1996 (134).
- [7] J.-M. Pouvesle, E. Robert, T. Gonthiez, R. Viladrosa, J. Pons, O. Sarroukh, M. Idrissi, B. Metay, S.-R. Mohanty, C. Fleurier et C. Cachoncinlle, "Discharge-based sources of XUV-X radiations: development and applications", *Plasma Sources Sci. Technol.*, 12, S43-S50, 2003).
- [8] B. Metay, E. Robert, R. Viladrosa, M. Dudemaine, C. Cachoncinlle, J.-M. Pouvesle, W. OH. Mayer, G. Scheinder, I. Gökalp, "X-rays diagnostics applied to high pressure cryogenic spray", *proceedings ICLASS 2003, July 13-17, Sorrento, Italy*.

# La vélocimétrie par images de particules : une méthode d'imagerie quantitative pour la mécanique des fluides

### Contacts :

Bertrand Lecordier  
Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie -  
UMR 6614

Site universitaire du Madrillet - BP 12  
76801 Saint-Étienne du Rouvray cedex  
Tél. : 02.32.95.36.81 - Fax : 02.32.91.04.85  
Mél : [bertrand.lecordier@coria.fr](mailto:bertrand.lecordier@coria.fr)

Michel Stanislas  
Laboratoire de mécanique de Lille - UMR 8107  
Bd Paul Langevin, Cité scientifique - 59655 Villeneuve d'Ascq cedex  
Tél. : 03.20.33.71.70 - Fax : 03.20.33.71.69  
Mél : [stanislas@ec-lille.fr](mailto:stanislas@ec-lille.fr)

La métrologie optique est une approche privilégiée de la mécanique des fluides expérimentale, tirant parti de la transparence des fluides et des progrès constants de l'optique. L'apparition des lasers a constitué une véritable révolution dans tous les domaines de l'optique et a permis, à partir des années 70, le développement d'outils de mesure non intrusifs pour la mécanique des fluides tels que la vélocimétrie laser doppler (LDV pour *Laser Doppler Velocimetry*), la tomographie laser, la diffusion Raman, les techniques de fluorescence... Néanmoins, les expérimentateurs rêvaient depuis longtemps d'une technique de mesure qui leur donne accès au champ instantané des vitesses d'un écoulement ; il a fallu attendre une deuxième révolution – l'apparition de capteurs CCD de haute résolution et de bonne sensibilité – pour que la vélocimétrie par images de particules (PIV pour *Particle Image Velocimetry*) puisse se développer. En cinq ans, cette approche est devenue un outil incontournable, ouvrant de nouveaux espaces d'investigation et de compréhension de l'aérodynamique des écoulements, aussi bien au niveau de la recherche fondamentale que de la recherche appliquée aux besoins industriels (aéronautique, aérospatiale, automobile, bio-médical...).

### Principe de base et intérêt de la PIV

La PIV permet d'obtenir une cartographie instantanée des vitesses d'un écoulement. De la même manière que la LDV, la PIV n'effectue pas une mesure directe de la vitesse du fluide, mais de celle de très fines particules d'ensemencement transportées par l'écoulement. La vitesse est mesurée à partir des positions successives des particules, enregistrées sur deux clichés

séparés d'un court intervalle de temps, par l'exposition d'une tranche de l'écoulement à l'aide de deux flashes laser. Le déplacement local des particules est alors déterminé par des traitements d'image numériques du type corrélation spatiale ou suivi de particules. L'analyse de l'intégralité des images conduit au champ de déplacement des particules, que l'on peut relier, sous certaines conditions, au champ des vitesses de l'écoulement.

En mécanique des fluides, la PIV ouvre un champ d'investigation considérable pour l'étude des écoulements laminaires et turbulents et, en particulier, pour la compréhension de tous les phénomènes aérodynamiques instationnaires. Même si actuellement les limitations technologiques des capteurs CCD et des sources lasers ne permettent pas encore d'atteindre une résolution temporelle suffisante, la souplesse de l'enregistrement vidéo permet d'accumuler un nombre de réalisations suffisant pour procéder à des études statistiques. Le fait de disposer de champs de vitesses instantanées de bonne qualité conduit le mécanicien des fluides à reconsidérer son analyse de bon nombre d'écoulements. Un exemple typique est celui du tourbillon en fer à cheval en couche limite turbulente. La structure moyenne de l'écoulement, obtenue par un balayage à l'aide d'une méthode de mesure ponctuelle telle que la LDV, est nettement différente de celle que donne la PIV. La LDV donne notamment une vorticités du tourbillon principal qui, compté tenu des mouvements rapides de celui-ci, est inférieure d'environ 50 % à la valeur instantanée fournie par la PIV. Cet exemple montre clairement l'un des intérêts de la PIV par rapport aux méthodes ponctuelles, qui est de pouvoir dissocier les instationnarités à grandes échelles (temporelle et spatiale) des structures de la turbulence à plus petites échelles. Ces nouvelles visions expérimentales de la dynamique des écoulements s'accordent parfaitement avec les orientations récentes prises dans le domaine de la simulation numérique grâce aux approches de type *Large Eddy Simulation* (LES, simulation aux grandes échelles).

L'une des particularités de la PIV est également d'être facilement associable à une autre méthode de mesures par imagerie, et en particulier la fluorescence induite par laser (LIF pour *Laser Induced Fluorescence*). Le couplage de deux diagnostics permet alors d'obtenir des corrélations instantanées entre la vitesse de l'écoulement et une autre grandeur physique (température, concentration...). Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour l'étude des écoulements réactifs, où les processus de mélange sont fortement couplés à l'aérodynamique de l'écoulement.



ment. Ainsi, la figure 1 présente une mesure simultanée PIV/LIF permettant d'obtenir la répartition instantanée de combustible et le champ de vitesse devant une flamme turbulente allumée par étincelle. Il y a encore quelques années, ces informations couplées n'étaient accessibles que pour des écoulements à très faible nombre de Reynolds grâce à la simulation numérique directe (DNS pour *Direct Numerical Simulation*).

### Coopération internationale autour du développement de la méthode

Au niveau européen, l'industrie aéronautique a vite compris l'intérêt potentiel de la PIV dans les grandes souffleries compte-tenu, notamment, de sa relative simplicité de mise en œuvre et de la rapidité d'acquisition des données. Des programmes coopératifs ont été mis en place ; un premier programme de comparaison des différentes approches de la méthode s'est déroulé dans le cadre du *GARTEUR* de 1993 à 1995, regroupant essentiellement les grands organismes de recherche de l'aéronautique, tel que l'ONERA en France, le DLR en Allemagne... Le

relais été pris par la Commission européenne à travers deux programmes de recherche : *EUROPIV* de 1997 à 1998 et *EUROPIV 2* de 2000 à 2003. Ces programmes, élargis aux communautés universitaire et industrielle, ont permis de :

- démontrer la faisabilité de la méthode dans plusieurs grandes souffleries industrielles subsoniques et transsoniques (EADS Brême, DNW LST, ONERA S2 Modane) ;
- fournir des bases de données pour des validations de codes de calcul dans des configurations d'intérêt industriel (sillage d'avion, aile d'avion à grande incidence) ;
- contribuer au développement de la méthode sur plusieurs de ses aspects tant pratiques que théoriques [7 et 9].

Parallèlement, la Commission européenne a mis en place de 1997 à 2001 un réseau thématique – *PIVnet* – prolongé par *PIVnet 2* de 2002 à 2006<sup>1</sup>. Ce réseau, qui comprend une cinquantaine de participants dans toute l'Europe, vise à accélérer le transfert de la méthode développée en laboratoire vers les applications industrielles aéronautiques et dans d'autres sec-

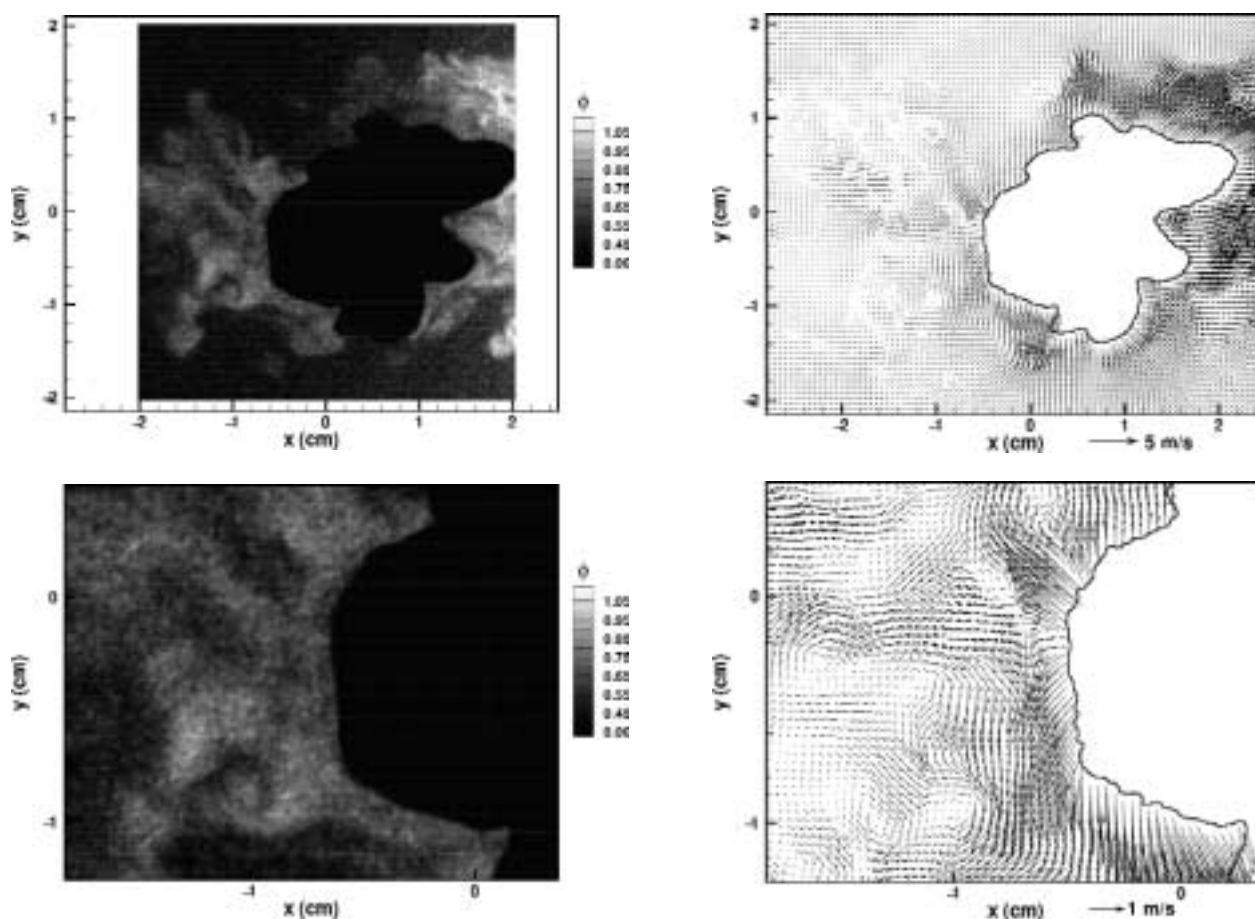


Figure 1. Exemple d'une mesure couplée PIV/LIF pour l'étude de la propagation d'une flamme turbulente allumée par étincelle dans un mélange combustible air/propane inhomogène. Les champs de gauche montrent la répartition de combustible (richesse) mesurée par fluorescence induite par laser au même instant que les champs de vitesse devant les zones réactives (UMR 6614-CORIA).

teurs d'application. Pour ce faire, des ateliers sont organisés à intervalles réguliers autour de démonstrations *in situ* pour des applications variées : grandes souffleries aéronautiques, grands bassins de carène, souffleries automobiles, turbomachines, moteurs à explosion, aérodynamique domestique... Ce réseau est également en relation avec l'association européenne ERCOFTAC, à travers le *Special Interest Group SIG 32* consacré à la PIV. Dans ce cadre, des ateliers à caractère de recherche sont organisés annuellement pour faciliter les échanges entre les nombreuses équipes européennes qui travaillent sur le développement de la PIV<sup>2</sup>. Ce cadre a également permis la mise en place d'une collaboration internationale visant à caractériser la précision et les limites de la méthode. Cette collaboration s'est concrétisée sous forme d'un premier challenge international en 2001 [8] qui a permis de comparer les performances d'une dizaine de logiciels d'analyse appliqués à une dizaine de cas

tests présentant des difficultés de tous ordres. Des exemples et les principaux résultats sont disponibles sur le site : [www.piv-challenge.org](http://www.piv-challenge.org). Vu l'intérêt suscité, une deuxième édition visant à caractériser les performances de la méthode en écoulements turbulents a eu lieu en 2003 ; elle s'est conclue par un atelier au mois de septembre dernier et les résultats devraient être publiés en 2004. La figure 2 donne un exemple de cas test typique du premier challenge et la figure 3, un exemple de résultat du deuxième challenge.

### Perspectives

La technique de PIV a atteint un stade de maturité qui permet son utilisation pour l'étude de l'aérodynamique de nombreux écoulements, aussi bien au niveau de la recherche fondamentale que de la recherche appliquée aux besoins industriels. Depuis plusieurs années, différents systèmes intégrés sont com-

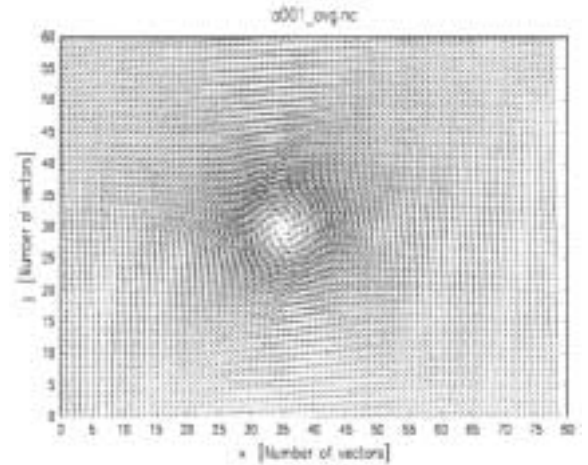


Figure 2. a) Image de PIV d'un tourbillon marginal enregistrée au DLR dans la soufflerie DNW-LLF dans le sillage d'un avion de transport en configuration d'atterrissage. Le plan laser est à 1,64 m derrière l'aile. L'écoulement principal traverse le plan de l'image. La taille du champ visualisé est de 170 x 140 mm<sup>2</sup>. Cette image fait partie des cas test du Challenge 2001. b) champ de vitesse déduit de l'image a).

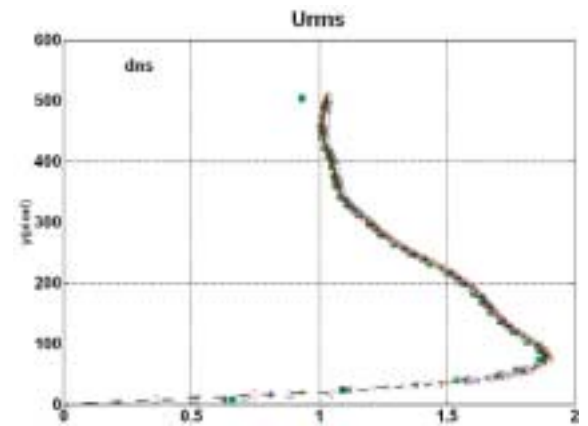
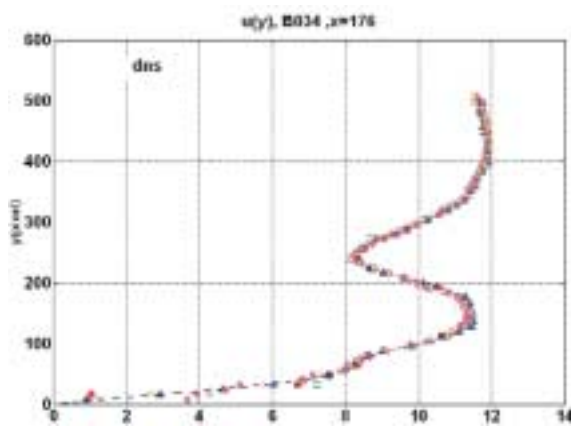


Figure 3. Exemple de résultats obtenus par les participants du Challenge 2003. Les images PIV sont synthétiques. Cent couples d'images ont été générés à partir d'une DNS de canal plan. La figure 3a montre une comparaison des résultats des différents algorithmes sur un profil de vitesse instantané, sélectionné pour ses gradients intenses. La figure 3b présente la comparaison du taux de turbulence longitudinal. Ce cas test n'est pas accessible à un algorithme de PIV standard.

mercialisés ; néanmoins, cette technique de mesure doit encore être développée sur de nombreux points. A court terme, on peut envisager deux évolutions rapides : les mesures résolues dans le temps et l'application de la méthode pour l'étude de la turbulence, ces deux aspects étant bien évidemment complémentaires. Pour le premier aspect, les limitations actuelles sont essentiellement liées à la disponibilité de technologies pour les acquisitions hautes cadences, c'est-à-dire les lasers de forte énergie à haut taux de répétition et les caméras vidéo rapides haute résolution ayant une grande sensibilité. Les premiers systèmes d'acquisition rapide proposés permettent d'atteindre environ 1 kHz et donnent accès à la dynamique des plus grosses structures des écoulements. Dans les années à venir, on peut espérer voir des progrès significatifs en terme de cadence d'acquisition et ainsi envisager des études détaillées de phénomènes transitoires rapides. Pour les mesures des propriétés de la turbulence, les développements sont plus liés à des problématiques scientifiques, même si des aspects technologiques comme la résolution des capteurs entrent en ligne de compte. Ces dernières années, de nombreuses améliorations des méthodes d'analyse numérique des images de particules (déformation d'image, super résolution, *optical flow*...) ont permis d'envisager l'étude de la turbulence à l'aide des méthodes PIV. Néanmoins, les limites de la PIV (échelle de coupure, résolution spatiale...) ne sont pas encore parfaitement connues et de nombreux travaux sont réalisés pour les évaluer, comme par exemple des approches entièrement numériques basées sur la simulation numérique directe (DNS) [4]. Ce problème a également fait l'objet de la deuxième édition du challenge international sur les algorithmes PIV et les résultats montrent une amélioration significative des mesures en turbulence par rapport à l'édition précédente. Des travaux sont en cours pour améliorer les algorithmes de PIV et repousser un peu plus loin les limites de la méthode pour les applications en turbulence.

A plus long terme, la PIV doit être étendue à la 3<sup>e</sup> dimension. Dans ce domaine, une étape intermédiaire entre la mesure de vitesse en volume (3D) et les mesures classiques (2D) a été développée depuis plusieurs années. Ces méthodes, dites PIV stéréoscopique [2], sont maintenant bien établies et ajoutent aux deux composantes accessibles en PIV classique (2D2C) la mesure de la 3<sup>e</sup> composante de la vitesse (2D3C) perpendiculaire au plan laser. Cette extension a permis de mieux appréhender certains écoulements turbulents présentant par exemple de fortes rotations tourbillonnaires à grande échelle ; mais cela a malheureusement aussi mis en évidence la difficulté à interpréter la structure fortement tridimensionnelle des écoulements turbulents à partir d'une vision 2D. Dans le domaine des mesures 3D, les premiers travaux se sont bien évidemment tournés vers les approches holographiques déjà utilisées dans de nombreux domaines. Il y a plusieurs années, les premières mesures de champs de vitesse 3D ont été réalisées en analysant des plaques holographiques photosensibles contenant l'information sur le champ volumique des particules [5 et 6]. Ces

études ont montré la faisabilité de la méthode holographique et tout le potentiel de cette technique, mais elle reste aujourd'hui encore très marginale, car fortement liée aux contraintes inhérentes aux plaques holographiques (développement chimique et analyse relativement longue des hologrammes). Depuis plusieurs années néanmoins, de nouveaux supports holographiques réinscriptibles et ne nécessitant pas de traitement chimique semblent pouvoir progressivement remplacer les plaques argentiques et laissent entrevoir des applications prometteuses pour les mesures de vitesse 3D. Parallèlement, des techniques holographiques digitales font leur apparition depuis peu. Elles consistent à enregistrer directement sur une caméra vidéo les figures de diffraction produites par un champ de particules [1]. Ensuite, à partir de méthodes de traitement d'image numérique (ex : reconstruction par ondelette), il est possible de remonter à la position de chaque particule (voire à leur taille) dans le volume de mesure et, à partir de deux clichés, à leur vitesse en 3D. Cette approche est limitée par la faible taille actuelle des capteurs CCD et leur résolution spatiale. Elle présente néanmoins un fort potentiel pour les mesures 3D dans les milieux contenant une faible concentration en particules.

Une évolution récente de la PIV ouvrant des perspectives prometteuses est liée aux changements d'échelle des champs observés. Jusqu'à présent en effet, les dimensions des champs étudiés étaient généralement de l'ordre de la dizaine de centimètres. Aujourd'hui, on voit apparaître des études allant au-delà de ces dimensions aussi bien du côté des grands champs ( $\approx$  mètre) que du côté des champs de très petites dimensions (inférieures à quelques dizaines de microns pour la « Micro-PIV »). Pour les grands champs, les contraintes et les progrès restent étroitement liés à des considérations techniques peu dépendantes des laboratoires, comme l'amélioration de la résolution et de la sensibilité des capteurs CCD et l'augmentation de l'énergie fournie par les lasers ( $> 500$  mJ par impulsion). En revanche, de nombreuses recherches sont menées dans le domaine de la Micro-PIV pour accéder à des zones d'étude de très faible dimension. Des progrès rapides sont en cours, tant du point de vue de l'imagerie que de celui des traceurs utilisés (ex : cellules, particules fluorescentes...) [3]. La figure 4 donne un exemple typique de montage optique utilisé en Micro-PIV.

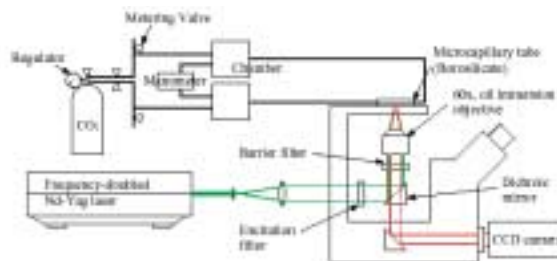


Figure 4. Exemple de montage de Micro-PIV utilisé pour des mesures dans des microcapillaires hydrophobes et hydrophiles. Communication présentée au symposium PIVO3 en septembre 2003 à Busan (Corée) par le Pr. Kim de l'université de Busan [3].

Cette technique, en pleine expansion, ouvre des champs d'application importants dans des nouveaux domaines tels que la biologie, la médecine ou les micro-systèmes mécaniques et électroniques.

### Références

- [1] S. Coetmellec, C. Buraga-Lefebvre, D. Lebrun et C. Özkul, Application of in-line digital holography to multiple plane velocimetry, *Measurement Science and Technology* 12, 2001 (1392).
- [2] S. Coudert et J.-P. Shon, Back projection algorithm with misalignment corrections for 2D3C stereoscopic PIV, *Measurement Science and Technology* 12, 2001 (1371-81).
- [3] S. Kim, H.-J. Lee et J.-Y. Yoo, Micro-PIV measurement of the fluid motion near the meniscus in the hydrophilic and hydrophobic capillaries, 5th International Symposium on Particle Image Velocimetry Busan, Corée, 22-24 septembre 2003.
- [4] B. Lecordier, D. Demare, L.M.J. Vervisch, J. Réveillon et M. Trinité, Estimation of the accuracy of PIV treatments for turbulent flow studies by the direct numerical simulation (DNS), *Measurement Science and Technology* 12, 2001 (1382-91).

[5] H. Royer, *La mesure des vitesses des microparticules par holographie*, r. Rapport ISL 107/75, 1975.

[6] M. Stanislas, Applications de l'holographie à expositions multiples de micro-particules à la mesure des vitesses dans les écoulements, *Sciences et techniques de l'armement*, Mémorial de l'artillerie française, tome 61, 1987 (149-76).

[7] M. Stanislas, J. Kompenhans et J. Westerweel, Particle Image Velocimetry, progress toward industrial application, *Fluid Mechanics and its Applications*, Kluwer Academic Publisher, 2000.

[8] M. Stanislas, K. Okamoto et C. Kaehler, Main results of the first international PIV Challenge, *Measurement Science and Technology* 14, R63-R89, 2003.

[9] M. Stanislas, J. Kompenhans et J. Westerweel, *Particle Image Velocimetry*, proceedings of the EUROPIV 2 workshop, Saragosse, avril 2003, à paraître chez Springer Verlag.

1. PIVnet : [db8164@pivnet.sm.go.dlr.de](mailto:db8164@pivnet.sm.go.dlr.de)
2. Voir le site : [www.univ-lille1.fr/pivnet](http://www.univ-lille1.fr/pivnet).

# Les suies traquées par leur incandescence

### Contact :

Pascale Desgroux  
Physicochimie des processus de combustion et  
de l'atmosphère - UMR 8522  
Bâtiment C11  
59655 Villeneuve d'Ascq cedex  
Tél. : 03.20.43.49.30  
Fax : 03.20.43.69.77  
Mél : [pascale.desgroux@univ-lille1.fr](mailto:pascale.desgroux@univ-lille1.fr)

Les particules de suies sont émises par un grand nombre de foyers de combustion, brûleurs domestiques ou industriels, moteurs diesel ou moteurs d'aéronautique et, bien sûr, les feux (foyers d'incendie). Elles se présentent sous la forme d'agrégats constitués de plusieurs dizaines de particules primaires (fig. 1), elles-mêmes comparables à des sphérules de très petite taille, typiquement quelques dizaines de nanomètres (nano-particules) et donc facilement assimilables par l'organisme. Ces suies présentent une phase adsorbée dont la composition (notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques) et

l'impact sur la santé sont encore mal connus. Les suies altèrent la qualité locale de l'air et agissent également à l'échelle troposphérique et stratosphérique (aspect chimique et radiatif), en raison des émissions provoquées par le trafic aérien.

La compréhension des processus de formation ou de consommation des suies requiert des outils de diagnostic capables de caractériser les particules de suies en temps réel et au sein des foyers de combustion. Une caractérisation précise des suies concerne :

- leur morphologie : taille des particules primaires (rayon  $r$ ) et de l'agrégat, c'est-à-dire nombre moyen de particules primaires par agrégat ;

- leur quantité : nombre de particules de suies  $N_p$  par unité de volume ( $m^{-3}$ ) ou fraction volumique de suies (notée  $f_v$  : volume de suies par  $m^3$  de gaz,  $f_v = 4/3 \pi r^3 N_p$ ) ou concentration massique de suies ( $kg.m^{-3}$ ) ;

- leurs propriétés optiques.

L'obtention de ces grandeurs nécessite la mise en œuvre de plusieurs méthodes expérimentales : techniques optiques, méthodes



de prélèvement, gravimétrie, granulométrie, microscopie électronique... Parmi elles, les diagnostics laser permettent de réaliser des mesures instantanées et *in situ*. Initialement, les méthodes appliquées aux suies combinaient les techniques d'extinction et de diffusion de la lumière. Cependant, la technique d'incandescence induite par laser (LII, pour *Laser Induced Incandescence*) s'est vite imposée pour l'obtention de cartographies de fraction volumique de suies ; elle permet également d'accéder à la taille des particules primaires. Nous nous focaliserons ici sur cette récente technique aux nombreuses applications en combustion.

### Qu'est-ce que l'incandescence induite par laser ?

Le phénomène d'incandescence est connu depuis les années 1970. Son principe est simple : sous l'effet d'un rayonnement laser (typiquement une impulsion de 10 ns), les particules de suies présentes dans une flamme ou dans l'atmosphère s'échauffent très rapidement jusqu'à une température T (qui peut avoisiner 4 000 K), puis se refroidissent par divers processus de transfert schématisés à la figure 2, dont le transfert radiatif que l'on nomme *incandescence*.

A l'origine, l'incandescence, dont les caractéristiques spectrales sont analogues à celles d'un corps noir, est considérée comme un rayonnement parasite pouvant perturber d'autres mesures (par exemple en spectroscopie Raman). Il faut attendre 1984 [1] pour voir apparaître des études démontrant la relation de proportionnalité entre le rayonnement d'incandescence (appelé dans la suite de l'article « signal LII ») et la fraction volumique de suies ( $f_v$ ). La technique d'*incandescence induite par laser* connaît dès lors un essor important en tant qu'outil de diagnostic quantitatif de suies [2], essor favorisé par l'accessibilité de la méthode tant sur le plan théorique qu'expérimental.

### Mise en œuvre expérimentale

La figure 3 représente un exemple de dispositif expérimental LII. Il comporte une source laser à impulsions (en général le fondamental (1064 nm) d'un laser Nd:YAG), le foyer de combustion et le détecteur placé à 90° de l'axe laser. Le faisceau laser est souvent transformé en nappe laser afin d'accéder directement à une



Figure 1. Exemple d'agrégat de suies.

cartographie bidimensionnelle (image 2D) de la fraction volumique de suies dans la flamme. Dans ce cas, le détecteur est une caméra CCD intensifiée pulsée équipée d'un filtre interférentiel. La caméra peut également être disposée à la sortie d'un spectrographe. On obtient alors une image 1D-spectrale qui comporte un axe spatial (direction du laser à travers la flamme) et un axe spectral. Ce type d'analyse permet de contrôler le comportement radiatif du processus LII et de s'affranchir de phénomènes photolytiques (par exemple la production du radical  $C_2$ ). Le spectre d'émission s'étend de 320 nm jusqu'au-delà de 700 nm (émission du corps noir). Enfin, l'évolution temporelle du signal LII (*time-resolved LII* ; figure 4a) issu d'un photomultiplicateur (PMT) peut être enregistrée par un oscilloscope.

### La technique LII

#### Description simplifiée

Le signal d'incandescence  $I_i(t, \lambda_i)$  issu d'une particule de suie et collecté à la longueur d'onde  $\lambda_i$  s'exprime à l'aide de la loi de Planck corrigée par un terme d'émissivité  $\epsilon(\lambda_i)$ . Ce terme prend en compte le fait que la suie n'est pas un corps noir. Il s'exprime à partir de la section efficace d'absorption des suies  $C_{abs}$  et se simplifie dès lors que le diamètre de la particule  $d_p$  est suffisamment petit devant la longueur d'onde d'excitation ( $\pi d_p / \lambda < 0.3$  : régime de Rayleigh). Dans ce cas on peut considérer que les particules absorbent le rayonnement incident proportionnellement à leur volume et la section efficace d'absorption des suies suit alors une loi en  $d^3$  :  $C_{abs} = \pi^2 d_p^3 E(m) / \lambda$  où  $E(m)$  est une fonction de l'indice de réfraction complexe  $m$  des suies (des représentations plus sophistiquées montrent une loi en  $d_p^x$  où  $x = 3 + 0.154 / \lambda_{det} \text{ (mm)}$ ) [1]. Il s'ensuit :

$$I_i(t, \lambda_i) = C \frac{2\pi c^2 h}{\lambda_i^5} \left[ \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_i k T(t)}\right) - 1 \right]^{-1} \pi^2 d_p^3 \frac{E(m_i)}{\lambda_i} \quad (1)$$

où C est une constante liée au dispositif de détection, h, c et k sont respectivement la constante de Planck, la vitesse de la lumière et la constante de Boltzmann, et T(t) est la température de la suie à l'instant t après le début de l'impulsion laser. Il est intéressant de constater que la puissance laser n'apparaît pas



Figure 2. Schématisation des transferts d'énergie lors de l'interaction suies/laser.

dans cette expression. En réalité, la puissance absorbée sert à échauffer la particule et c'est donc la température  $T(t)$  qui rend compte du régime d'excitation laser. Le signal d'incandescence issu d'un volume de mesure contenant  $N_p$  particules de suies est donc proportionnel à  $N_p d_p^3$  (soit à la fraction volumique  $f_v$ ) ; c'est pourquoi les résultats quantitatifs sur les suies concernent en priorité cette grandeur.

### Le bilan énergétique et la modélisation des phénomènes

Une compréhension plus fine du processus d'incandescence passe par la modélisation des phénomènes de transfert au cours de l'impulsion laser et après [3]. Ces processus sont :

- l'absorption du flux laser  $H_A$ ,
- la radiation thermique  $H_R$ ,
- la sublimation de la particule  $H_S$ ,
- le transfert par conduction avec le milieu extérieur  $H_C$ ,
- l'accumulation de chaleur  $H_{AC}$ .

Le bilan énergétique au niveau de la particule impose  $H_{AC} = H_A + H_R + H_S + H_C$ . La figure 4b illustre l'importance relative de ces processus au cours de l'impulsion laser et pendant toute la durée de refroidissement de la particule. Ces évolutions respectives expliquent le comportement temporel du signal LII, de la température de la suie et du rayon de la particule primaire au cours du phénomène (figure 4a).

Dans cet exemple, la sublimation a un rôle important dans les premières 50 ns, qui se traduit notamment par une diminution du rayon de 0,3 %. Le refroidissement est dominé par les processus conductif et radiatif (incandescence) et dure plusieurs centaines de nanosecondes. Plus la particule primaire est grosse, plus elle mettra de temps à se refroidir. La mesure de la

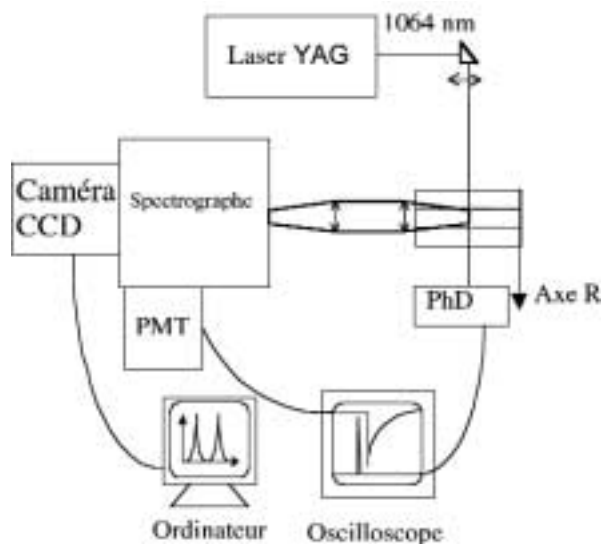


Figure 3. Exemple de dispositif d'imagerie LII 1D-spectral. PhD : photodiode de déclenchement. Le brûleur schématisé est de type Wolfrard-Parker et permet de stabiliser des flammes de diffusion.

décroissance temporelle du signal LII est donc un indicateur sensible de taille (figure 5).

### Considérations pratiques

En pratique, les mesures LII résolues en temps sont effectuées à faible énergie laser (pour éviter la sublimation de la suie) et conduisent au diamètre de la particule primaire. Un étalonnage complémentaire par microscopie électronique est souhaitable pour « caler » le modèle. Les mesures de fractions volumiques sont effectuées de préférence au pic temporel du signal LII (prompt LII) pour éviter toute influence de la taille de la suie. L'émission des suies est collectée dans le domaine visible (émission de Planck) ou filtrée spectralement.

En déplaçant le volume de mesure dans la flamme ou en imageant une portion de nappe laser sur un capteur CCD, on peut obtenir une cartographie de fractions volumiques de suies en valeur relative. Le calibrage en absolu nécessite de déterminer la fraction volumique absolue en un point, par une méthode complémentaire telle que l'extinction laser ou le *Cavity Ring-Down Spectroscopy* (pour les flammes très peu suitées) [3]. Une autre approche consiste à déterminer la constante  $C$  de la relation (1) par un étalonnage soigné de la chaîne de détection et de la température  $T(t)$  par pyrométrie [4].

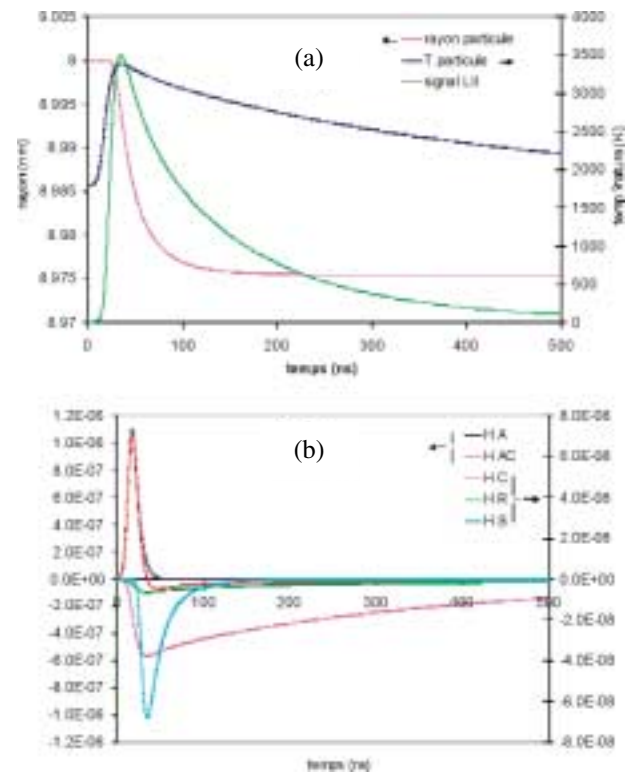


Figure 4. Représentation des évolutions temporelles du signal LII, de la température  $T(t)$  de la suie et de son rayon (rayon initial : 9 nm) sous l'action d'une impulsion laser de 15 ns et de puissance  $85 \text{ MW.cm}^{-2}$  (a), ainsi que des différents flux intervenant dans le bilan énergétique de la particule (b).

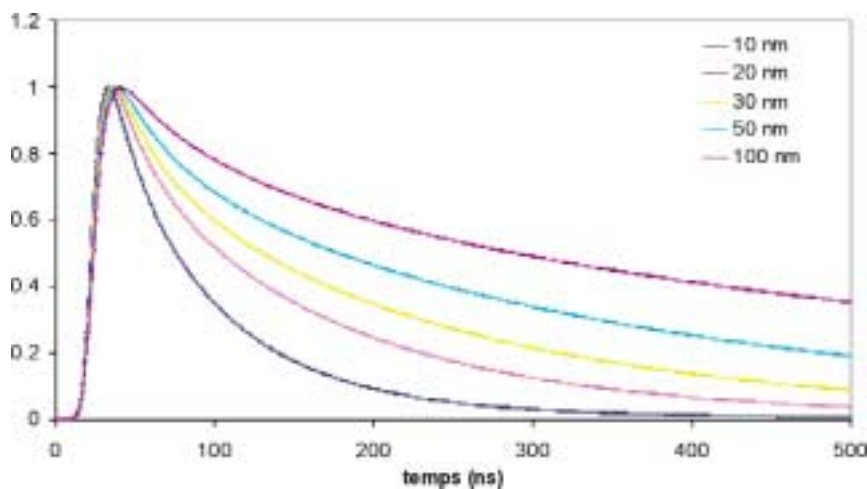


Figure 5. Simulation des évolutions temporelles du signal LII pour différents diamètres de la particule primaire.

Enfin, il faut souligner qu'au cours du processus d'incandescence, d'autres phénomènes peuvent interférer, notamment la fluorescence induite par laser (LIF) d'espèces gazeuses présentes au voisinage des suies. Ainsi, la fluorescence des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) est favorisée sous l'action d'une impulsion laser émise dans l'UV ou le visible. Pour illustrer ce phénomène, nous avons comparé les images brutes obtenues pour deux longueurs d'onde d'excitation (532 nm et 1064 nm) dans des flammes de diffusion méthane/air de teneur en suie différente, stabilisées sur le brûleur représenté à la figure 3. Les deux premières colonnes de la figure 6 représentent les cartographies (a) du signal mesuré avec une impulsion laser à 1064 nm :  $S_{1064}$  (b) du signal mesuré avec une impulsion laser à 532 nm :  $S_{532}$ .  $S_{1064}$  est bien représentatif des suies ( $S_{1064} = LII_{1064}$ ) alors qu'à 532 nm, le signal mesuré comporte non seulement le signal LII, mais aussi la fluorescence des HAP. Cette fluorescence domine largement le signal  $S_{532}$  dans la flamme très peu suitée (flamme (1),  $f_{v,max} = 3ppb$ ). Au contraire dans la flamme (2) ( $f_{v,max} = 160 ppb$ ), on distingue la zone des HAP de celle des suies. A partir de cette approche à deux couleurs, nous avons montré qu'il était possible de reconstituer les localisations respectives des HAP et des suies [5]. Ce type

d'études contribue à la compréhension du mécanisme de formation des suies initié par les HAP.

Eric Therssen a contribué à cet article.

### Références

- [1] L.-Y. Melton, "Soot diagnostics based on laser heating", *Applied Optics*, vol. 23, no 13, 1984.
- [2] R.-J. Santoro et C.-R. Shaddix, "Laser-Induced Incandescence", *Applied Combustion Diagnostics*, chapitre 9, Taylor and Francis, New York, 2002.
- [3] C. Schoemacker Moreau, *Diagnostics laser dans une flamme de diffusion : imagerie quantitative de nanoparticules de suies et d'espèces majoritaires et minoritaires*, thèse de l'université de Lille 1, 2002.
- [4] D.-R. Snelling, G.-J. Smallwood, R.-A. Sawchuck, W.-S. Neill, D. Gareau, W.-L. Chippior, F. Liu et O.-L. Gülder, *In situ real-time characterization of particulate emissions from a Diesel engine exhaust by laser Induced-Incandescence*, SAE paper 2000-01-1994, 2000.
- [5] C. Schoemacker Moreau, E. Therssen, X. Mercier, J.-F. Pauwels et P. Desgroux, "Two-color laser-induced incandescence and cavity ring-down spectroscopy for sensitive and quantitative imaging of soot and PAH in flames", *Appl. Phys. B*, à paraître.

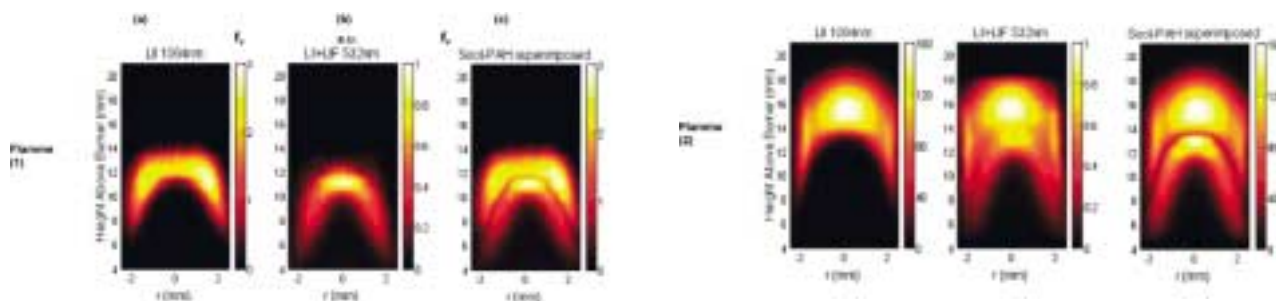


Figure 6. Images 2D de HAP et de suies résultant d'une excitation laser à deux couleurs (LII<sub>1064</sub> et (LII+LIF)<sub>532</sub>) dans deux flammes de teneur en suies différentes.

# Session de printemps 2003

### Suppression de structures au 31/12/2003

UMR 6138	S.09	DR19	Laboratoire de mécanique de Rouen	Eduardo SOUZA DE CURSI
FRE 2165 devient UMR6182	S.10	DR12	Laboratoire lasers, plasmas et procédés photoniques	Marc SENTIS
FRE 2405 devient UMR6181	S.10	DR12	Modélisation et simulation numérique en mécanique	Patrick BOUTOUX
UMR 6604 devient UMR6174	S.09	DR6	Laboratoire de mécanique appliquée R. Chaleat	Dominique PERREUX
UMR 6066 devient FRE 2833	S.09	DR18	Laboratoire Roberval - Unité de recherche appliquée	Jean-François DE BELLEVAL

### Création de structures au 01/01/2004

UMR 6181 (CNRS, AM3, AM1, AM2)	S.10	DR12	Modélisation et simulation numérique en mécanique et génie des procédés	Patrick BOUTOUX
UMR 6182 (CNRS, AM2)	S.10	DR12	Laboratoire lasers, plasmas et procédés photoniques	Marc SENTIS
UMR 6183 (CNRS, EC Nantes, Univ. Nantes)	S.09	DR17	Institut de recherches en génie civil et mécanique	Pierre-Yves HICHER
FRE 2717	S.09	DR17	Laboratoire de recherche en mécanique appliquée de l'université de Rennes	Tanguy ROUXEL
FRE 2719	S.09	DR6	Laboratoire des systèmes mécaniques et d'ingénierie simultanée	Jian LU
FRE 2833	S.09	DR18	Laboratoire Roberval - Unité de recherche appliquée	Jean-Marc ROELANDT
UMR 2832	S09	DR5	Laboratoire de mécanique des structures industrielles durables	Stéphane ANDRIEUX

### Renouvellement de structures au 01/01/2004

#### Hors contractualisation

UPR 7051	S.09	DR12	Laboratoire de mécanique et d'acoustique	Michel RAOUS
USR 2164	S.10	DR12	Laboratoire d'aérodynamique et de biomécanique du mouvement	Daniel FAVIER
UMR 2214	S.10	DR7	Laboratoire de génie des procédés catalytiques	Claude MERIC de BELLEFON



*Contractualisation vague B – 2004-2007*

UMR 6068	S.09	DR19	Laboratoire d'acoustique ultrasonore et d'électronique	Jean-Louis IZBICKI
UMR 6610	S.09	DR15	Laboratoire de mécanique des solides	Olivier BONNEAU
UMR 6613	S.09	DR17	Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine	Sohbi SAHRAOUI
UMR 6617	S.09	DR15	Mécanique et physique des matériaux	José MENDEZ
UMR 6067	S.10	DR18	Génie des procédés industriels	Gérard ANTONINI
UMR 6069	S.10	DR8	Laboratoire arc électrique et plasmas thermiques	Pascal ANDRE
UMR 6134	S.10	DR12	Systèmes physiques de l'environnement	Jacques-Henri BALBI
UMR 6144	S.10	DR17	Laboratoire de génie des procédés - environnement - agro-alimentaire	Jack LEGRAND
UMR 6594	S.10	DR12	Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre	Alain POCHEAU
UMR 6595	S.10	DR12	Institut universitaire des systèmes thermiques industriels	Roger MARTIN
UMR 6598	S.10	DR17	Laboratoire de mécanique des fluides	Gérard DELHOMMEAU
UMR 6600	S.10	DR18	Biomécanique et génie biomédical	Catherine MARQUE
UMR 6606	S.10	DR8	Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés	Jean-Michel POUVESLE
UMR 6607	S.10	DR17	Laboratoire de thermocinétique	Hassan PEERHOSSAINI
UMR 6608	S.10	DR15	Laboratoire d'études thermiques	Daniel PETIT
UMR 6609	S.10	DR15	Laboratoire d'études aérodynamiques	Yves GERVAIS
UMR 6614	S.10	DR19	Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie	Michel LEDOUX
UMR 6142	S.22	DR6	Médicaments : dynamique intracellulaire et architecture nucléaire	Michel MANFAIT
UMR 6612	S.22	DR12	Centre de résonance magnétique biologique et médicale	Patrick COZZONE

### Changements de directeurs au 01/01/2004

UMR 6068	S.09	DR19	Jean-Louis IZBICKI	remplace Gérard MAZE
UMR 8006	S.09	DR1	Thierry BRETHERAU	remplace Didier BAPTISTE
UMR 6069	S.10	DR8	Pascal ANDRÉ	remplace André LEFORT
UMR 6594	S.10	DR12	Alain POCHEAU	remplace Paul CLAVIN
UMR 6606	S.10	DR8	Jean-Michel POUVESLE	remplace Claude FLEURIER
UMR 6609	S.10	DR15	Yves GERVAIS	remplace Jean- Paul BONNET
UMR 2214	S.10	DR7	Claude MERIC de BELLEFON	remplace Daniel SCHWEICH
UMR 8578	S.10	DR4	Gérard GOUSSET	remplace Jean BRETAGNE
UPR 8521	S. 10	DR13	Gilles FLAMANT	remplace Bernard SPINNER

### Enseignants-chercheurs accueillis en délégation au CNRS pour l'année 2003-2004

#### Nouvelles demandes

##### Section 09

BOU MATAR LACAZE Olivier (Cappy), CHAVET Pascale (Favier), FOLTETE Emmanuel (Perreux), GARAJEU Mihail (Raous), INAL Karim (Patoor), LANCELOT Laurent (Caignaert), RUBINEK Alexis (Patoor), MILLET Olivier - procédure simplifiée - (Caignaert)

##### Section 10

BALBI Jacques-Henri (Balbi), BLAISOT Jean-Bernard (Ledoux), GICQUEL Alix (Bocquet), HUBERSON Serge (Gervais), PIETRI Laurence (Clavin)

##### Section 22

GOMA Gérard (Goma), SOCKALINGUM Ganesh D. (Manfait)

#### Renouvellements

##### Section 09

DE BELLEVAL Jean-François (de Belleval), VIGGIANI Gioacchino (Boulon)

##### Section 10

ABABOU Rachid (Simonin), BEDAT Benoît (Simonin), CHANTRENNE Patrice (Perez), COHEN-ADDAD Sylvie (Adler), CORDIER Laurent (Moyne), FORTES-PATELLA Régiane (Verron), LE MAITRE Olivier (Le Quéré), SPINNER Bernard (Spinner)

## Evolution globale du volume des structures de recherche et de service

Type de structures	Volume au 31/12/2003				Volume global au 01/1/2004
		Suppressions	Créations	Solde	
UPR	11	–	–	–	11
UMR	83	3	4	1	84
URA	1	–	–	–	1
USR	1	–	–	–	1
UPS	2	–	–	–	2
UMS	1	–	–	–	1
FRE	5	2	3	1	6
FR	4	–	–	–	4
GDR	20	–	–	–	20
<b>Total général</b>	<b>128</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>+ 2</b>	<b>130*</b>

\* Ce total ne prend pas en compte les éventuelles créations de GDR à compter du 01.01.04

## Concours chercheurs 2003

### Postes ouverts aux concours

Section CN	CR2	CR1	DR2
S.04	1	1	–
S.09	4 1 SPI → SDU	1	4
S.10	7 2 SC 1 SPI → SPM 1 SPI → STIC	1	7
S.22	3	–	–
S.37	1 SPI → SHS	–	–
S.01	1 SPM → SPI	–	–
S.08	1 STIC → SPI	2	0
<b>TOTAL</b>	<b>15</b> <b>+ 2 autres dpts → SPI</b> <b>+ 4 SPI → autres dpts</b> <b>+ 2 SC</b>	<b>3</b>	<b>11</b>

## Changements de corps CR1 → DR2

---

### Section 04

AUDEBERT Patrick (Amiranoff)

### Section 09

BLANDIN Jean-Jacques (Bouvard), HILD François (Ladevèze), MEYSSONNIER Jacques (Fily), MICHEL Jean-Claude (Raous)

### Section 10

BERTIN Henri (Puiggali), CARTELIER Alain (Verron), DELAPORTE Philippe (Sentis), FOURNIER Jean-Michel (Frisch), GRANIER Agnès (Lefrant), MAGNIN Albert (Piau), MARQUAIRE Paul-Marie (Viriote), ROUX de BALMANN Hélène (Bertrand)

## Chargés de recherche CR2

---

### Section 01

LAURENT Frédéric (Darabiha)

### Section 04

TZORTZAKIS Stylianos (Amiranoff)

### Section 08

LECLERC Eric (Marque)

### Section 09

BRUNETIERE Noël (Bonneau), LOMBARD Bruno (Raous), OVARLEZ Guillaume (Cousot), PITHIOUX Martine (Favier)

### Section 10

ABANADES Stéphane (Spinner), ASLLANAJ Fatmir (Moyne), AUBIN Joëlle (Bertrand), JORDAN Peter (Gervais), MATHELIN Lionel (Le Quéré), MAZOUFFRE Stéphane (J.P. Martin), MURA Arnaud (Champion)

### Section 22

PINZANO Astrid (Netter), PITRE Stéphanie (Mueller)

## Chargés de recherche CR1

---

### Section 04

ROSMEJ Frank (Stamm)

### Section 09

LÊ Thien Nga (Halphen)

### Section 10

SERRE Eric (Bontoux)



# Bourses 2003

## Bourses post-doctorales cofinancées

Noms	Code laboratoire	Directeur	Durée	Partenaires
DUMONCEAUD	UMR 5508	MOTRO	12 mois	Région Languedoc-Roussillon
CATUOGNO	UMR 7561	NETTER	12 mois	Région Lorraine
DUCLOS	UMR 6598	DELHOMMEAU	12 mois	Région Pays de la Loire
GUILLERM	UMR 6598	DELHOMMEAU	12 mois	Région Pays de la Loire

## Bilan global BDI

	Classiques	Entreprises	Régions	Entreprises et Régions	Total	Pays en développement
Effectif	3	20	1	16	40	3
Postes budgétaires	1,5	12,2	0,5	5,3	19,4	
Répartition	7,5 %	50,0 %	2,5 %	40,0 %		

## BDI 2003

Section	Nom	Prénom	DR	Ecole	Directeur	Code labo	Partenaire
<b>CLASSIQUES EN PARTENARIAT</b>							
8	AURIOL	Muriel	14	INSA Toulouse	BERTRAND	UMR 5503	STIC
22	BONZOM	Sébastien	4	ESO	MUELLER	UMR 8608	IN2P3
10	CAILLARD	Amaël	8	Polytech Orléans	FLEURIER	UMR 6606	Australie (18 mois)
<b>ENTREPRISES</b>							
10	ADRAGNA	Laurent	7	ESCPE	FESSI	UMR 5007	RODHIA
9	ARNST	Maarten	5	Leuven	AUBRY	UMR 8579	Centrale - Recherche SA
10	BARBIN	Pascal	14	ENSIACET	BERTRAND	UMR 5503	Les Vignerons de Buzet
10	BARDET	Benoît	11	ENSHMG	TRASSY	UPR 9033	ESA
10	BENAÏSSA	Wassila	14	ENSIACET	BERTRAND	UMR 5503	INERIS
9	BOÏTEL	Guillaume	11	ENSHMG	VERRON	UMR 5519	CNES
10	BOUST	Bastien	15	ENSMA	CHAMPION	UPR 9028	RENAULT

10	COQUARD	Typhaine	14	INSA	SIMONIN	UMR 5502	CNES
10	COT	Marlène	14	INSA	GOMA	UMR 5504	MYLUM
10	DEBOUT	Vincent	8	ENSIL	BAUMARD	UMR 6638	CEA
9	DEXET	Marie	5	ENSIL	HALPHEN	UMR 7649	CEA
9	DUCLAIROIR	Eve Marie	1	ESMN	BONNET BENDHIA	UMR 2706	EADS
10	GUERRINI	Olivier	14	INSA	GOMA	UMR 5504	ADEME
10	LÊ	Thi-Hong-Hieu	15	ENSMA	BONNET	UMR 6609	CNES (12 mois)
9	LORENTZ	Julien	11	Polytech UJF	MAZARS	UMR 5521	INSRN
10	MANGIN	Bruno	8	ENSMA	MARTIN	UPR 9020	ONERA
10	RIBER	Eléonore	14	ENSEEIH	SIMONIN	UMR 5502	CERFACS
10	RICHECOEUR	Franck	5	ENSMA	DARABIHA	UPR 288	SNECMA
10	ROCHEFORT	Charles	15	ENSAM	PUIGGALI	UMR 8508	CNES
9	ROGUET	Eléonore	15	ENSMA	MENDEZ	UMR 6617	ATOFINA

### REGIONS ET ENTREPRISES

9	MOUTIER	Luc	18	Ecole des mines de Douai	CAIGNAERT	UMR 8107	« Nord - Pas de Calais Alstom - Transport »
---	---------	-----	----	--------------------------	-----------	----------	---

### REGIONS

9	DESUELLES	Nicolas	6	ENSMM	PERREUX	UMR 6604	Franche - Comté
9	DUKLOUX	Olivier	18	ECL	CAPPY	UMR 8521	Nord - Pas de Calais
10	DURANDAL	Cédric	17	Polytech Nantes	PEERHOSSAINI	UMR 6607	Pays de la Loire
10	ESNAULT	Olivier	15	ENSIMEV	CHAMPION	UPR 9028	Poitou - Charentes
10	FADAI-GHOTBI	Atabak	15	ENSMA	BONNET	UMR 6609	Poitou - Charentes
9	FRANCESCHINI	Emilie	12	ESIM	RAOUS	UPR 7051	PACA / STIC
10	FURMAN	Mark	6	ENSIC	VIRIOT	UMR 7630	Lorraine
10	GOUGEON	Ludivine	8	ESEM	GÖKALP	UPR 4211	Centre
10	GUILLEMAUD	Vincent	17	ECN	DELHOMMEAU	UMR 6598	Pays de la Loire
10	GUJISAITE	Valérie	6	ENSIC	SARDIN	UPR 6811	Lorraine
10	HO KONTIAT	Vanessa	15	ENSIMEV	PUIGGALI	UMR 8508	Aquitaine
9	LE CARROU	Jean-Loïc	17	ENSIM	SAHRAOUI	UMR 6613	Pays de la Loire
22	MILAN	Jean-Louis	12	ESIM	FAVIER	USR 2164	PACA
9	PERTON	Mathieu	15	ESM2	DESJARDINS	UMR 5469	Aquitaine
9	VANLEENE	Maximilien	18	UTC	MARQUE	UMR 6600	Picardie
9	WONG	Jonathan	18	EUDIL	CAIGNAERT	UMR 8107	Nord - Pas de Calais

## BDI 2003 - Pays en développement

Section	Nom	Prénom	DR	Pays d'origine	Directeur	Code labo
9	NGUYEN	Ngoc-Thanh	11	Vietnam	MAZARS	UMR 5521
10	AYED	Hamdi	14	Tunisie	SIMONIN	UMR 5502
22	AU DUONG	My	12	Vietnam	COZZONE	UMR 6612

# Le nouveau site du SPI

Respectant la charte Web choisie par la direction générale du CNRS, le nouveau site du département des Sciences pour l'ingénieur a été mis en ligne le 13 janvier 2004.

Support de l'identité du CNRS, cette nouvelle charte a pour objectif d'assurer l'harmonisation graphique et ergonomique de l'ensemble des sites de l'organisme. Développée en interne par les équipes de la direction de la communication et de la direction des systèmes d'information, elle accorde une place importante aux images scientifiques provenant des unités. En 2004, son extension pourra fournir aux laboratoires qui le souhaitent les éléments graphiques signifiant leur appartenance à l'institution.

Comme vous pourrez le constater, un effort éditorial important a été accompli par le département SPI : nouveaux contenus et fonctionnalités inédites. Des images aléatoires sont désormais en ligne tandis que de nouvelles rubriques sont en cours d'activation afin d'apporter aux internautes toute l'information sur la vie du département et de ses unités de recherche.

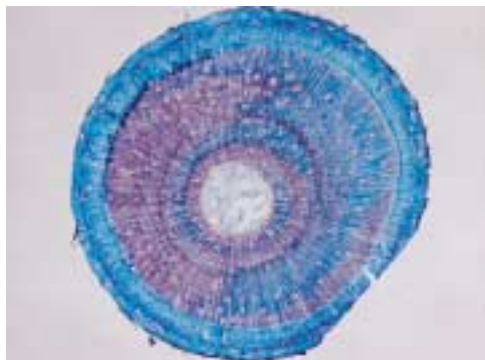
Afin de poursuivre cette amélioration, la direction du SPI invite les équipes de recherche à envoyer des images de recherche, accompagnées des légendes et crédits photographiques. Si le format le permet, elles pourront enrichir le site et ainsi valoriser les activités de recherche.

D'autre part, le département SPI propose à ses équipes d'utiliser le site web pour lui communiquer de courts articles (via l'outil « intranet » pour lequel chaque directeur de laboratoire a reçu un mot de passe). Ces articles pourront être affichés sur la Une du site SPI dans l'objectif :

- d'offrir une meilleure connaissance du territoire thématique couvert par la communauté des sciences pour l'ingénieur
- de diffuser la culture scientifique et technique au public.

Contact pour information : [helena.devillers@cnrs-dir.fr](mailto:helena.devillers@cnrs-dir.fr)

Photos de couverture :



**Photo centrale :** Coloration d'une coupe transversale d'un axe de Wapa de 8 mm de diamètre. Partie bleue foncée externe : écorce, partie blanche centrale : moelle. Entre les deux le bois de tension en bleu pâle, le bois normal en rose. Cette double coloration permet la mise en évidence du bois de tension lorsqu'il est caractérisé par une modification de la couche interne de la paroi des fibres du bois. Ainsi le bois de tension peut être comparé à un ressort qui exerce une force pré-contrainte interne en traction sur une face d'un axe ligneux ce qui permet à celui-ci de se réorienter dans l'espace. (Réf. CNRS-INFO N°243 Mai 92).

Laboratoire de rhéologie du bois - LRBB - UMR 5103, Talence. © CNRS Photothèque. Photographie : CHANSON Bernard

**Photo de fond :** Coupe transversale d'*Eperua Falcata* en lumière UV, X100

L'*Eperua* ou Wapa est un des principaux bois commerciaux de Guyane, notamment grâce à sa bonne durabilité naturelle = résistance aux attaques biologiques. Cette résistance est liée à la présence dans le bois de cœur de certains composés chimiques secondaires, déposés dans le bois après la mort et la lignification des cellules. Ici, nous sommes dans l'aubier, partie physiologiquement active pour le transport de la sève brute – transport ayant lieu dans des cellules mortes et lignifiées. En lumière ultraviolette, la lignine est fluorescente (bleu clair sur cette photo pour les parois des fibres et des vaisseaux). Les cellules plus foncées sont les parenchymes (horizontaux et verticaux), cellules restées vivantes, et assurant le stockage et la distribution de composés secondaires. Ce sont ces dernières cellules qui vont « déposer » dans le bois de cœur les produits qui lui confèrent sa résistance biologique.

Laboratoire de mécanique et génie civil - LMGC - UMR 5508, Montpellier. © CNRS. Photographie : BREMAUD Iris



## LETTRE DU DÉPARTEMENT DES SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

en ligne sur le Web : <http://www.spi.cnrs-dir.fr>

---

<b>DIRECTEUR DE LA PUBLICATION</b>	Victor Sanchez <i>Directeur Scientifique</i>
<b>COMITÉ ÉDITORIAL</b>	Béatrice Biscans, André Briguet, Helena Devillers, Arlette Goupy, Sylvie Goujon, Patrick Le Quéré, Michel Suery, Francis Yguel
<b>CONCEPTION ET RÉALISATION DE LA LETTRE</b>	Communication du département SPI Helena Devillers Tél. : 01 44 96 42 32 Fax : 01 44 96 49 69 Mél : <a href="mailto:helena.devillers@cnrs-dir.fr">helena.devillers@cnrs-dir.fr</a>
<b>COMPOSITION</b>	Interlignes 2.1
<b>IMPRESSION</b>	Burlet Graphics



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
DÉPARTEMENT DES SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR  
3, rue Michel-Ange - 75794 Paris cedex 16