

MILIEUX FLUIDES ET RÉACTIFS : TRANSPORTS, TRANSFERTS, PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

Président

Gilles Flamant

Membres de la section

Christian Angelberger

Philippe Blanc

Jean-Pierre Bœuf

Jean-Pierre Cambon

Patrick Carré

Cathy Castelain

François Charru

Luminita Danaila

Pascale Desgroux

Benoît Goyeau

Élisabeth Guazzelli

Pierre Haldenwang

Karl Joulain

Jack Legrand

Annie Marc

Céline Morin

Stéphane Pasquiers

Michel Quintard

Florence Raynal

Benoit Rousseau

Exercice d'introspection ou de prospective ? Le rapport de conjoncture est plus un état des lieux qu'une projection dans l'avenir. Exercice disciplinaire ou multidisciplinaire ? Il est clairement disciplinaire, même dans une section comme la S.10, très pluridisciplinaire. Passage obligé de chaque mandat ce rapport a le mérite d'identifier une communauté de recherche par ses champs d'investigation, ses questions et ses pratiques. Nous espérons qu'il nourrira quelques débats.

1 MÉCANIQUE DES FLUIDES

1.1 Axes de développement

La mécanique des fluides est une discipline dont le statut a notablement évolué au cours des dernières décennies. Partie du statut simple de discipline de base pour l'hydraulique et l'aéronautique, la mécanique des fluides s'est avérée champ d'expériences fondamentales pour l'hydrodynamique physique, la physique non-linéaire, les mathématiques appliquées, et naturellement la turbulence. Elle est également une des disciplines qui sous-tendent bon nombre d'évolutions technologiques dans la plupart des grands secteurs économiques (transports, énergie, génie chimique, environnement, sécurité, aménagement du territoire, élaboration des matériaux, biomédical, ...). Par ailleurs, elle joue un rôle tout aussi central dans le domaine des sciences de l'univers (météorologie, climatologie, océanographie, planétologie, magnétisme naturel, cosmologie, etc.). Une dernière particularité de la mécanique des fluides tient aux outils d'investigation que cette discipline a su développer, notamment dans les domaines de la métrologie et de la simulation numérique. Par exemple, il n'est pas rare que d'autres domaines tels que la physique non-linéaire, les plasmas, l'astrophysique, la chimie, etc., empruntent à la mécanique des fluides numérique les compétences algorithmiques qu'elle a développées.

Constatant ce large spectre d'intervention, on ne s'étonnera pas qu'au sein du CNRS, la mécanique des fluides soit aujourd'hui répartie sur plusieurs instituts, et sur plusieurs sections. La section 10 en gère cependant une partie importante, en particulier les développements technologiques, et un certain nombre de sujets propres au cœur de la discipline y sont fortement présents. C'est le cas notamment de la turbulence, un problème-clé d'importance fondamentale. Cette dernière y est étudiée dans des conditions significatives vis-à-vis des champs d'application. Ceci nécessite des moyens de diagnostic et de simulation en adéquation avec ces champs d'application, permettant d'accéder à une connaissance très fine de la structure des écoulements et des mécanismes mis en jeu. Ces aspects méthodologiques sont fortement présents

dans les laboratoires de la section 10.

Les thèmes d'ampleur qui se sont dégagés au cours des dernières années sont :

– l'étude des mécanismes non linéaires en mécanique des fluides, qui reste un passage obligé pour la compréhension de la transition laminaire-turbulent en particulier. L'état des connaissances à propos de certains écoulements de base permet désormais d'orienter en partie ces recherches vers l'objectif de contrôler l'apparition du régime turbulent. Les outils d'investigation expérimentale, les modèles théoriques et les outils de simulation se développent activement en fonction de ce nouvel objectif ;

– la turbulence développée qui fait également l'objet d'une attention soutenue, notamment dans des situations d'anisotropie (rotation, stratification, magnétisation, ...). Cette meilleure connaissance des écoulements turbulents permet également de tester les différentes modélisations numériques de la turbulence par les diverses méthodes de dissipation, statistique et/ou de sous-maille. Il est évident que toute avancée dans la modélisation numérique de la turbulence en configuration réelle constitue un enjeu stratégique pour les applications industrielles actuelles et futures ;

– l'étude du transport turbulent qui s'avère être un sujet d'importance sur lequel la simulation numérique a fourni ces dernières années de nombreuses données prédictives qui doivent être validées par l'expérience. Les particules étudiées couvrent un large spectre, allant du scalaire passif jusqu'aux particules sédimentaires. Ces études incluent naturellement les transferts de chaleur turbulents ;

– l'étude de l'interaction fluide-structure (au sens large, incluant la nage ou le vol de structures déformables, et les interactions fluide-sédiments, entre autres exemples) qui est un sujet d'applications aussi bien industrielles qu'environnementales ;

– la microfluidique qui est une thématique en développement constant pour les questions fondamentales posées par des écoulements dans des systèmes de taille très réduite, pour la dynamique des micro-bulles ou des micro-gouttes, et pour l'approche d'effets mésoscopiques nouveaux ;

– la biomécanique des fluides, ou bio-fluidique, qui porte sur l'étude des écoulements de fluides biologiques et du transport qu'ils engendrent, depuis les végétaux jusqu'à la physiologie humaine. L'interaction fluide-structure prend dans ce domaine une importance particulière. On peut mentionner également la mise au point de systèmes biomimétiques inspirés du comportement des êtres vivants. On voit ici se développer de fructueuses interactions avec la physico-chimie et la biologie ;

– la dynamique des fluides complexes, et/ou en milieux complexes, qui vise à analyser la dynamique des écoulements des fluides à rhéologie sophistiquée (écoulements poly-phasiques, polymères, suspensions de particules, milieux granulaires, pâtes et poudres, fluides biologiques, milieux poreux) ;

– l'aéro-acoustique, ou acoustique non-linéaire, qui étudie la génération des ondes acoustiques par les écoulements, leur propagation au sein des écoulements turbulents, ou inversement, la génération d'écoulements par un champ acoustique, dans les micro-systèmes en particulier.

D'une manière générale, on assiste à un élargissement du champ des investigations conduites par les mécaniciens des fluides, du fait, d'une part, que l'aéronautique et l'espace « consomment » désormais moins de sciences de base, et d'autre part, de l'émergence de nouveaux problèmes comme évoqués ci-dessus. Ainsi, il n'est pas rare que des mécaniciens des fluides s'intéressent à des processus industriels très particuliers en participant à l'amélioration de leur performance et/ou à la diminution de leurs nuisances. On trouve de nombreux exemples dans l'élaboration ou le traitement des matériaux, la séparation de phases ou d'espèces, la dynamique des interfaces, la combustion, etc. Les « ingrédients » supplémentaires qu'ils peuvent désormais prendre en compte sont, par exemple, le changement de phase, les réactions chimiques/biologiques, le rayonnement, la criticité du fluide ou du mélange, la présence de particules ou de bio-organismes,

1.2 Moyens d'action et d'organisation

Ces différentes thématiques connaissent des degrés divers de développement dans les laboratoires français. Les moyens d'action et d'organisation ne relèvent pas uniquement du CNRS ; ils sont, en fait, partagés avec plusieurs autres acteurs importants : les universités car une majorité d'unités de recherche sont mixtes, les contractants industriels qui financent (et qui parfois embauchent les docteurs), l'ANR, les leaders pré-industriels de certains secteurs applicatifs comme l'ONERA, CEA, IFP, INRS, CEMAGREF, etc. La multiplicité de ces différents acteurs est, bien sûr, source de diversité et de dynamisme. Malgré cela, certains thèmes séduisent un grand nombre de laboratoires, alors que d'autres sujets restent moins souvent traités. Néanmoins, les laboratoires de la section se positionnent, d'une manière générale, en très bonne place au niveau mondial dans la plupart des domaines cités plus haut.

Parmi les acteurs orientant cette recherche, nous voyons apparaître de plus en plus un acteur inattendu : la bibliométrie. Celle-ci tend à renforcer le rôle joué par les effets de mode : pour avoir un taux de citations élevé, il n'est pas recommandé de travailler sur un sujet peu couru, ou de changer de thématique. De plus, pour flatter la bibliométrie, il vaut également mieux travailler sur une « manip » de coin de table que sur un moyen d'essai d'envergure ; de même, mieux vaut effectuer une simulation numérique en géométrie périodique qu'en géométrie plus réaliste... Ces évolutions risquent d'appauvrir la discipline. Les effets pervers de la bibliométrie ne sont pas seuls responsables : la difficulté de remplacer le départ des ingénieurs et techniciens fait que l'expérimentation devient de plus en plus difficile pour le chercheur, a fortiori pour un doctorant. Dans le même ordre d'idées, rares sont les laboratoires qui peuvent compter sur un ingénieur de maintenance de

logiciels «lourds» de simulation numérique (collaborateur pourtant indispensable si l'on veut que ces logiciels circulent dans la communauté). Sur certains thèmes que nous jugeons à fort enjeu applicatif, nous notons avec inquiétude le déclin du nombre de docteurs candidats au concours de chargés de recherche.

Les développements de la discipline ont bénéficié de nets progrès dans les moyens de l'expérimentation : visualisation rapide et à haute résolution, vélocimétrie à imagerie de particules (PIV) tridimensionnelle, tomographie de systèmes complexes (e.g., de systèmes vasculaires). Le développement de ces nouvelles techniques a engendré des volumes considérables de données, dont la manipulation et l'analyse posent des problèmes semblables à ceux rencontrés par la simulation numérique. Enfin, considérant la situation stratégique de la modélisation, et de la simulation numérique de la turbulence en particulier, pour ce qui est du transfert technologique, nous notons une nette amélioration de nos moyens de calcul. En effet, après quelques années difficiles, nous constatons une récente remise au niveau international des moyens nationaux mis à la disposition de notre communauté scientifique. Pour l'avenir, nous souhaiterions un processus plus continu d'évolution...

2 GÉNIE DES PROCÉDÉS

2.1 Description de la thématique

La discipline du Génie des Procédés regroupe l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires pour aborder l'étude, la conception et l'optimisation des procédés complexes de transformations physico-chimiques et biologiques de la matière et de l'énergie. Le Génie des Procédés intègre ainsi les compétences du génie chimique, de la thermodynamique, de la chimie-physique et de la biologie, avec une approche multi-échelle en temps et espace, allant des processus élémentaires jusqu'au dimensionnement des réacteurs et à la simulation et la commande des procédés.

Les recherches portées par le Génie des Procédés contribuent à répondre à de nombreux enjeux sociétaux :

- la compétitivité de l'industrie par l'obtention de produits ayant des propriétés d'usage : celle-ci ne peut se concevoir en dehors du cadre de développement durable et de l'incidence sur la santé ;

- l'environnement et l'énergie : ce point intègre les industries de traitement de l'air et de l'eau, la réhabilitation des sols, le stockage du carbone, de même que les économies et les progrès récents dans le domaine des énergies renouvelables ;

- la maîtrise des risques et la sécurité, en incluant les risques pour l'homme et pour l'environnement ;

- la santé et l'alimentation, par la production industrielle de produits nouveaux et/ou mieux maîtrisés, destinés à répondre aux besoins croissants des populations.

La science du Génie des Procédés se caractérise par le lien qu'elle établit entre la démarche analytique et la démarche synthétique qui conduit à la vision systémique des problèmes. Par définition, elle a vocation à intégrer une approche multi-échelle, allant du processus au procédé, en prenant en compte les contraintes techniques, économiques et environnementales.

Le Génie des Procédés se positionne clairement dans un contexte d'interdisciplinarité. Si la thermodynamique et les cinétiques physiques, chimiques et biochimiques restent à la base de la discipline, les développements récents en mécanique des fluides numériques, en automatique, en méthodes de simulation, en analyse numérique, mais aussi en instrumentation et miniaturisation des systèmes, ont ouvert de nouvelles voies d'approche de la complexité des procédés, tout en permettant d'envisager une meilleure intégration des processus à des échelles multiples.

Le domaine de la méso-échelle, du micrométrique au millimétrique, qui correspond à l'échelle des interfaces et des processus de transfert, reste un domaine privilégié de la discipline. Ainsi, la compréhension et la quantification des processus physico-chimiques à cette échelle restent deux des éléments prépondérants dans la conception et l'optimisation des procédés conduisant à l'élaboration de produits ou de matériaux à qualité contrôlée. La simulation moléculaire, de plus en plus utilisée dans la prévision des propriétés thermodynamiques des corps purs et des mélanges, ouvre aussi des voies nouvelles pour l'optimisation des catalyseurs et des adsorbants. A l'échelle du procédé, les outils de simulation numérique en mécanique des fluides ont permis de nouvelles explorations des opérations unitaires du génie chimique. Le lien avec la réaction chimique ou la réaction biochimique en termes de mélange et de micromélange, le terme micromélange supposant ici obligatoirement une réaction chimique ou biochimique et faisant donc intervenir l'échelle moléculaire, reste un fort enjeu dans la maîtrise de la qualité des produits. De son côté, le génie des transferts et des séparations doit résoudre des problèmes complexes, en particulier dans les domaines des biotechnologies et du traitement des effluents. Le Génie des Biosystèmes intègre des défis qui lui sont spécifiques, liés, en particulier, au concept d'usine cellulaire vivante. Le Génie des Produits constitue aussi l'une des composantes récentes du Génie des Procédés par la prise en compte des interactions entre les conditions opératoires du procédé et les propriétés d'usage des produits générés. Cette démarche doit permettre une optimisation prédictive du procédé sur la base des propriétés recherchées, tout en intégrant les contraintes de développement durable.

2.2 Moyens d'action et d'organisation

Les pistes de recherche proposées en Génie des Procédés sont les suivantes :

- l'étude des interactions «hydrodynamique-transfert-réaction» : la compréhension des écoulements polyphasiques reste un grand enjeu pour l'étude des transferts entre phases en situation réelle (bulles, coalescence, rupture, suspensions, fluides rhéologiquement

complexes,...), et pour l'optimisation des équipements. Le Génie des Procédés doit adapter à ces préoccupations l'hydrodynamique expérimentale et les méthodes de la mécanique des fluides numériques.

– l'intensification des procédés : ce point intègre la conception et le dimensionnement de nouveaux réacteurs basés sur une approche multi-échelle, l'architecture des procédés intégrant les réacteurs micro-structurés et les réacteurs multi-fonctionnels. Un meilleur contrôle local de la réaction doit être recherché par : la micro- ou méso-structuration des réacteurs et séparateurs, la commande et le contrôle local, ou l'utilisation de matériaux à propriétés non isomorphes et de microsystèmes intégrés. Ce domaine s'appuie sur les travaux en microfluidique et l'intégration plus poussée des aspects physiques et chimiques dans les modèles.

– l'étude des cinétiques de réactions chimiques, biochimiques et photochimiques dans différentes phases (liquide, supercritique, gaz) par la simulation de schémas cinétiques et l'évaluation des constantes thermodynamiques et cinétiques. En particulier, la thermodynamique des équilibres entre phases est essentielle pour l'amélioration des modèles. La complexité des milieux et des systèmes réactionnels, tels que les produits naturels ou artificiels, les mélanges complexes, et les systèmes vivants, doit être prise en compte ;

– la commande, l'optimisation et la simulation des procédés, par le développement de méthodes spécifiques et l'instrumentation des réacteurs. Ces outils doivent intégrer, outre les objectifs de productivité et de contrôle de fonctionnement, les notions liées à la sécurité des procédés et à leur éco-conception ;

– le génie des séparations, particulièrement dans le cas des molécules biologiques, des aérosols, ou des gaz (CO₂, H₂). Il s'agit, en particulier, des procédés membranaires et chromatographiques ou des séparations liquide-liquide. L'architecture des procédés de séparations, le couplage des méthodes, leur intégration au sein des unités de production, restent à approfondir. Les enjeux sont très grands en purification de biomolécules, en préparation de produits pharmaceutiques ultra purs à l'échelle semi-industrielle, et en élimination de molécules polluantes ;

– le génie des produits, de plus en plus concerné par la production de milieux divisés, fluides complexes, nanoparticules, produits fonctionnalisés. Ces produits constituent de nouveaux défis pour l'étude des phénomènes interfaciaux et les relations entre procédés et propriété d'usage. A titre d'exemple, l'agglomération, le compactage ou le transport de solides pulvérulents restent à mieux maîtriser. Les travaux doivent permettre une optimisation prédictive du procédé sur la base des propriétés recherchées, tout en intégrant les contraintes de développement durable, liées à la sécurité et la santé. La Thermodynamique des Systèmes, incluant ces paramètres, est une discipline à développer ;

– le génie des procédés biologiques : la compréhension et la maîtrise de l'activité d'un organisme cellulaire vivant, placé dans l'environnement contraignant du réacteur,

nécessitent d'associer, dans une approche multi-échelle spatiale et temporelle, les mécanismes intracellulaires, les échanges avec le milieu (masse, enthalpie, entropie, rayonnement, quantité de mouvement), et les échanges du système avec l'extérieur ;

– le génie des procédés pour l'environnement, avec une approche pluridisciplinaire prenant en compte les interactions à l'échelle moléculaire et microscopique qui gouvernent la mise au point de procédés à grande échelle, propres et sûrs. L'analyse des cycles de vie des procédés et des produits ne doit pas être occultée, de même que la recherche de biosolvants, de biosorbants et la valorisation des ressources renouvelables et des co-produits des procédés ;

– le génie des procédés pour la production d'énergie, avec un effort important vers les énergies renouvelables, l'utilisation rationnelle de l'énergie, les procédés de séquestration du CO₂, les procédés pour les carburants de troisième génération, les procédés solaires hautes et basses températures, les procédés de stockage de l'énergie.

Les moyens d'action et d'organisation doivent être les suivants :

– poursuivre une forte structuration méthodologique de la discipline en s'appuyant sur la Société Française de Génie des Procédés et la Fédération Européenne de Génie Chimique, et maintenir un cœur de discipline fort ;

– faire émerger des centres spécialisés développant une interaction spécifique avec une discipline connexe ou une filière industrielle particulière ;

– encourager les démarches pluridisciplinaires avec les chimistes, les biologistes, les physiciens, mais aussi avec les spécialistes des matériaux, de la mécanique et de l'énergie ;

– renforcer les partenariats au niveau international ;

– mettre en place une démarche prospective sur les procédés du futur, en s'appropriant les découvertes de chimie/physique/biologie pour concevoir de nouveaux procédés, et en identifiant de nouvelles problématiques scientifiques à partir des questionnements industriels ;

– poursuivre les actions de soutien aux programmes pluridisciplinaires et aux plateformes, ciblés sur les axes prioritaires de la discipline, en s'appuyant sur des collaborations accrues entre organismes de recherche et universités.

3 PLASMAS FROIDS/LASER

3.1 Description de la thématique

Les plasmas froids sont des gaz ionisés, obtenus à des pressions de gaz allant du micro bar à plusieurs bars, voir même au-dessus, dans lesquels l'énergie électrique peut être couplée de façon continue,

impulsionnelle, radiofréquence, micro-onde, laser, etc.... Le couplage fort et non linéaire entre le plasma et les champs électromagnétiques nécessaires à sa création et à son entretien engendre une riche variété de phénomènes, particulièrement intéressants à étudier du point de vue physique, avec des développements importants vers la chimie des gaz et des surfaces.

Les plasmas froids hors équilibre thermodynamique ou thermiques, constituent une thématique de recherche importante en raison, d'une part, de la richesse des phénomènes physiques dont ils sont le siège et, d'autre part, de la très vaste gamme d'applications technologiques, industrielles ou sociétales, qui n'ont cessé de se diversifier depuis 40 ans. La pluridisciplinarité et la grande diversité d'applications des plasmas froids sont certainement une force de cette thématique au sein de la section 10 mais peuvent aussi nuire à son unité ou à sa visibilité. L'unité du domaine réside dans la physique des décharges électriques, étudiées autant par l'expérimentation que par la modélisation/simulation avec un couplage de plus en plus fort entre les équipes de modélisateurs et d'expérimentateurs, et les méthodes de diagnostic des plasmas générés par ces décharges, notamment les spectroscopies optiques et spectrométrie de masse, en constant développement. Le développement de nouvelles sources de plasma, de nouveaux concepts de décharges et leur optimisation en terme de couplage d'énergie électrique et de production d'espèces actives, est une préoccupation majeure des chercheurs de la section, en fonction des applications visées.

Depuis une dizaine d'années les travaux sur les plasmas froids en France peuvent être déclinés en quatre axes principaux, en liaison avec les applications des recherches et qui constituent des enjeux technologiques forts :

- matériaux : gravure en microélectronique, dépôt de couches dures, traitement de polymères, nitruration et implantation ionique dans les métaux, soudure et découpe en métallurgie, synthèse de poudres, de nano tubes, et de matériaux micro- et nano structurés, nettoyage de surfaces ;

- énergie : synthèse de l'hydrogène, physique et technologies pour ITER, dépôt de couches photovoltaïques, lasers à gaz, sources lumineuses à basse consommation, écrans plasmas, dépôt de couches actives pour membranes à combustibles ;

- environnement : conversion des polluants atmosphériques (NO_x et COV), combustion propre, destruction des agents bactériologiques, stérilisation des surfaces, vitrification des déchets ;

- transport : contrôle d'écoulement, déclenchement et contrôle de la combustion, propulsion spatiale.

Une part importante des travaux de la communauté est liée à l'élaboration ou au traitement des matériaux, par des procédés mettant en œuvre les plasmas hors équilibre, les plasmas thermiques, ou les lasers. Bien que certains des procédés concernés soient déjà utilisés dans le monde industriel, leur optimisation n'est pas toujours acquise. La

conception de nouveaux procédés est un aspect important de la recherche. Les chercheurs appartenant à des disciplines différentes travaillent ensemble aux interfaces plasmas/matériaux/génie des procédés, ce qui donne une dynamique certaine à cette thématique.

Le développement de nouvelles sources de plasmas, dans différentes gammes de pression, est également un axe fort : plasmas homogènes sur de grandes surfaces pour les applications en microélectronique ou pour le traitement des matériaux, micro plasmas à densité d'énergie élevée comme sources d'espèces réactives ou de photons, plasmas magnétisés pour la propulsion, plasmas impulsions pour un contrôle de la réactivité chimique ... La connaissance de cette réactivité et son contrôle, notamment dans les mélanges de gaz moléculaires complexes, motive de nombreux travaux avec diverses finalités telles que les matériaux, la conversion de polluants, le contrôle de la combustion. La réduction des coûts énergétiques des procédés plasmas est en filigrane de ces recherches. La nécessité de développer de nouveaux diagnostics expérimentaux est par ailleurs une préoccupation constante de la communauté des chercheurs plasmas/laser.

3.2 Laboratoires

La communauté plasma/laser en France est de taille modérée mais elle est répartie sur l'ensemble du territoire. Les laboratoires de la section 10 entièrement dédiés à la thématique, et de taille substantielle, sont assez peu nombreux, situés à Orléans, Orsay, Palaiseau, Toulouse. Des équipes à effectifs plus limités, et de taille variable, sont réparties dans un nombre important de laboratoires à Châtenay-Malabry, Grenoble, Limoges, Marseille, Nancy, Nantes, Paris, Perpignan, Rouen, Villetaneuse. Des laboratoires universitaires (non UMR ou UPR) jouent également un rôle important dans la communauté (Clermont-Ferrand, Paris, Pau). Plusieurs GDR du CNRS structurent certaines des activités de recherche.

Des chercheurs de la section s'impliquent dans les travaux de la Fédération ITER, qui est un exemple pertinent de rapprochement entre les communautés « plasmas froids » de la section 10 et « plasmas chauds » de la section 04. Le « Réseau Plasmas Froids », rattaché à la Mission des Ressources et Compétences Technologiques (MRCT) du CNRS, créé en 2002, est devenu au fil des années un élément structurant et qui contribue à maintenir l'unité de ce domaine scientifique malgré la diversité de ses applications. Il concerne tous les laboratoires de la communauté plasma/laser, CNRS et/ou Universités, et a pour but de favoriser les échanges de compétences et de moyens entre les équipes.

3.3 Recherches actuelles et axes de développement

Les recherches actuelles en section 10 sur les plasmas froids et leurs applications peuvent grosso modo

se décliner en trois catégories : 1/ les travaux de fond, sur le long terme et qui constituent le « cœur de discipline », concernant la physique des décharges et la réactivité des plasmas générés, la cinétique chimique dans les plasmas réactifs, les données de base pour la compréhension de la physico-chimie hors-équilibre ou à l'équilibre thermodynamique, les interactions entre plasmas et surfaces (chimiquement inertes ou catalytiques) ; 2/ les sujets non très récents mais toujours d'actualité. Parmi ceux-ci, citons par exemple, mais de façon non exhaustive : nouveaux propulseurs, modification d'écoulement, sources de rayonnement énergétique ou à basse consommation, contrôle et déclenchement de combustion, conversion des polluants atmosphériques et réduction des émissions polluantes de l'industrie et des transports, production d'hydrogène et de gaz de synthèse, valorisation de la biomasse, croissance et organisation de poudres, nouvelles chimies pour les procédés de la microélectronique, dépôts de couches minces nano structurées, films d'alliages métalliques amorphes et alliages de haute entropie, ... ; 3/ les thématiques en forte expansion à l'heure actuelle : matériaux pour l'énergétique et la transformation de l'énergie, nanomatériaux, interactions des plasmas avec la matière vivante,

Les recherches en développement ou les plus émergentes concernent en particulier (sans préjuger de leur importance relative)

- les microdécharges et microplasmas, pour différentes applications ;
- les plasmas impulsions de différents types dans les gaz ou au voisinage de surfaces (décharges nanosecondes et décharges de surface à pression atmosphérique, décharges dans les capillaires, décharges RF pulsées, ...)
- les plasmas à pression atmosphérique (ou proche) appliqués à la médecine et à la biologie : les interfaces plasmas/biologie seront probablement amenés à se développer fortement dans l'avenir (thématique en forte évolution au niveau international) ;
- les sources de lumière dans le domaine des courtes longueurs d'onde (UV, VUV) pour les traitements de polluants (eaux et air, photo-catalyse), certains procédés industriels et des applications biomédicales, traitement des biofilms ;
- les décharges dans les milieux di-phasiques (procédés aérosols, décharges dans les liquides, dans les structures alvéolaires) ;
- les plasmas atmosphériques pour le contrôle de combustion ou d'écoulement ;
- les nouvelles applications des plasmas à pression atmosphérique telles que la synthèse de molécules, le nettoyage et la fonctionnalisation de surfaces, l'élaboration de nano matériaux ;
- les sources d'ions positifs ou négatifs et la génération de plasmas ion-ion, les phénomènes de transport dans les

plasmas magnétisés (application à la propulsion, la fusion, la microélectronique) ;

– les plasmas de bord dans le réacteur ITER, et l'injection de neutres ;

– les plasmas pulsés à basse pression pour un meilleur contrôle des procédés de dépôt et de gravure des matériaux ;

– la synthèse de nano objets, fonctionnalisation, métrologie et détection de nano poudres ;

– la nano structuration des matériaux et des surfaces : obtention de couches minces nano composites multifonctionnelles pour différentes applications, contrôle des propriétés de surfaces (adhésion, mouillabilité, ...) pour application à la métallurgie ;

– l'électronique de grande surface, la micro- et nano-optoélectronique : les cellules solaires (silicium amorphe, microcristallin, à hétérojonction, à nanofils, couches épitaxiées), les écrans plats utilisant le silicium monocristallin, les dépôts de films nano structurés et les nano cristaux pour les diodes électroluminescentes.

Quelques exemples de travaux méritent également d'être cités pour ce qui concerne les utilisateurs de sources laser pour le développement de procédés innovants : la modification des propriétés de matériaux (dopage, recuit, cristallisation, modification d'indice), la création de nouveaux matériaux tels que les films minces, nano structurés, la production de nano agrégats fonctionnalisés en milieux gazeux ou liquide. La nano/micro structuration de surface est actuellement très étudiée, ainsi que le LIFT (Laser Induced Forward Transfer) permettant des dépôts sélectifs (structures, spots, lignes de matériaux métalliques et/ou organiques) avec une résolution micrométrique. Des procédés de micro/nano usinage sont également étudiés, notamment par renforcement local du champ laser.

3.4 Valorisation

Les grands organismes tels que l'ONERA, le CEA, le CNES, l'ADEME, ... ainsi que des centres de recherche de groupes industriels publics ou privés sont fortement impliqués dans les recherches à finalité des différents laboratoires ou équipes. Les chercheurs sont souvent sollicités par des PME/PMI pour des collaborations ponctuelles et ciblées. On peut également remarquer une forte implication des équipes dans des programmes subventionnés par l'ANR, en réponse aux appels d'offre « programmes blancs » ou plus ciblés. Le nombre de dossiers soumis à l'Agence dans le cadre de ces appels est important, avec une bonne synergie entre les laboratoires sur l'ensemble du territoire.

3.5 Recommandations

La communauté des plasmas froids française est caractérisée par une longue tradition d'études fondamentales, mais aussi par des acquis technologiques

réels et son implication dans une large gamme d'applications industrielles. Elle doit veiller à conserver un bon équilibre entre recherches amont s'appuyant sur des diagnostics et des modèles de plus en plus performants et sophistiqués, et leurs applications. Cet équilibre pourra être aidé par le recrutement en section 10 de chercheurs sur des programmes liés au « cœur de discipline » mentionné plus haut. L'enseignement joue à ce stade un rôle majeur et il est apparu important de maintenir la spécificité et la qualité des formations universitaires françaises en physique des plasmas froids.

Cette communauté est bien reconnue au niveau international et elle possède une réelle spécificité, de plus en plus à l'interface avec d'autres disciplines, en premier lieu celles de la section 10. Elle doit continuer à maintenir son unité malgré la diversité de ses applications, par des actions structurantes telles que celles du réseau national « Plasmas Froids » de la MRCT, et en continuant une politique active de GDR. Les synergies avec d'autres sections du CoNRS, essentiellement 04 (par exemple sur les plasmas de fusion) et 08 (sur les nanotechnologies, l'électromagnétisme, l'énergie électrique), méritent d'être soutenues ou approfondies.

4 COMBUSTION

4.1. Présentation

La combustion : une science multidisciplinaire

Les phénomènes de combustion sont très complexes et impliquent la mécanique des fluides, la thermodynamique, les phénomènes de transport et la cinétique chimique. La combustion pose aussi de nombreux problèmes de couplage avec les modes acoustiques du système, ainsi qu'avec le rayonnement. Par ailleurs, la combustion s'effectue au travers d'une cinétique chimique complexe faisant intervenir un grand nombre d'espèces impliquées dans plusieurs centaines de réactions élémentaires, et dont les vitesses de réaction ont un comportement fortement non-linéaire en fonction de la température. Ceci conduit au fait que les problèmes de combustion sont mathématiquement « raides ». Il en résulte des configurations comportant une grande variété d'échelles spatiales et temporelles et un caractère multi-échelles très marqué.

Des modes de combustion variés

Les modes de combustion peuvent prendre des formes très variées (déflagrations, détonation, flammes turbulentes...). De plus, les phénomènes doivent être envisagés en configuration géométrique tridimensionnelle très souvent d'une grande complexité dans les applications pratiques, dans des conditions instationnaires et, dans beaucoup de cas, dans des milieux hétérogènes ou en présence de plusieurs phases. Dans certains cas la géométrie elle-même varie dans le temps comme dans les moteurs à piston. La combustion est aussi souvent effectuée sous pression, la pression pouvant prendre des valeurs extrêmes comme dans les moteurs aéronautiques les plus avancés, les moteurs fusées ou les moteurs à piston. Lorsque l'injection de l'un des réactifs est effectuée

à basse température mais dans un environnement à très haute pression (cas de l'oxygène liquide dans les moteurs cryotechniques par exemple), les conditions sont transcritiques et il faut tenir compte des effets de gaz réel et des anomalies des phénomènes de transport. Une telle complexité nécessite de mener de pair des études sur des problèmes très fondamentaux dans des configurations simples et d'autres plus appliquées sur des systèmes plus proches de la réalité pratique.

De larges domaines d'application

Les domaines d'application concernent les moteurs à piston, les foyers aéronautiques, les chambres de combustion des lanceurs spatiaux ; les systèmes de production d'énergie, tels que les foyers industriels, les turbines à gaz, les fours, les procédés d'élaboration de matériaux ; les explosions (accidents industriels ou applications militaires) et la sécurité (conception de procédés chimiques) ; les incendies et les feux (en milieu industriel ou forestier) ; la formation, la dispersion et le traitement de polluants.

Participation de la communauté combustion au défi énergétique et climatique

Les processus de combustion doivent être largement améliorés et optimisés afin de répondre aux problèmes environnementaux et économiques que représentent les émissions de polluants et l'épuisement des réserves des énergies fossiles. La recherche en combustion a ainsi pour objectifs principaux la diminution de la consommation de combustibles et la réduction des émissions polluantes, avec en particulier les gaz à effet de serre.

La recherche en combustion doit bien sûr développer des technologies et des procédés innovants pour pallier l'épuisement des réserves énergétiques mais elle doit également contribuer au développement de solutions afin de préserver de façon durable la qualité de l'environnement, réduire les impacts sur la santé et relever le défi du changement climatique.

4.2 Les axes de recherche en cours et à venir

La complexité des processus de combustion nécessite le développement conjoint d'analyses théoriques, d'expérimentations, de modélisations et de simulations numériques, impliquant souvent différents champs disciplinaires. Les thèmes à développer sont très vastes :

- développement de nouveaux modes de combustion, de nouveaux carburants, de nouveaux modèles (cinétiques, numériques) ;
- modélisation de la dynamique de la combustion ; les instabilités, les couplages et les régimes transitoires (allumage, extinction, variations cycliques, démarrage à froid, flashback...) ;
- contrôle de la combustion et des systèmes réactifs (par ex, combustion assistée par plasma, laser, micro-onde) ;

- bruit de combustion, effets mécaniques et acoustiques générés par les flammes ;
- les systèmes d'injection ; la combustion diphasique ;
- les systèmes de combustion avancée ; la combustion à haute pression, l'injection et la combustion transcritique, les nouveaux modes de propulsion (combustion supersonique, propulsion par onde de détonation), les agents propulsifs ;
- détonation, prédiction de la transition déflagration/détonation dans des installations industrielles complexes ;
- combustion aux interfaces. Echanges et transferts dans les matériaux hétérogènes, poreux. Modélisation associée ;
- schémas cinétiques pour des espèces et des combustibles de plus en plus complexes avec l'utilisation des méthodes de tabulation et de la mécanique quantique ;
- traitement des déchets, propagation des feux de forêts, initiation et propagation des détonations, etc.

Sur le plan expérimental

On assiste à un développement permanent de techniques de diagnostics optiques en vue de l'étude du couplage combustion/turbulence.

Ils'agit d'effectuer des mesures instantanées non intrusives, multidimensionnelles, multiscalaires et en temps réel (PIV et LIF essentiellement). L'essor de diagnostics quantitatifs comme le CRDS ont contribué au développement de mécanismes chimiques détaillés. Dans l'avenir, il faudrait favoriser, par exemple par le biais de plateformes ou d'écoles thématiques, le transfert de compétences et de matériel au sein de la communauté combustion mais aussi « plasmas » et « mécanique des fluides ». Un autre besoin concerne le développement d'installations de combustion représentatives des conditions de température, pression, etc. rencontrées en particulier dans les moteurs aéronautiques, spatiaux et automobiles, mais aussi dans les chaudières, et l'application de mesures quantitatives et de méthodes de traitement permettant une comparaison détaillée avec les simulations numériques, en particulier aux grandes échelles.

Sur le plan simulation

Des simulations numériques de plus en plus complètes permettent de représenter des systèmes de complexité croissante en profitant des possibilités nouvelles offertes par les codes et méthodes de calcul, par l'augmentation constante des puissances unitaires des processeurs et par les progrès réalisés dans le domaine des architectures des ordinateurs rendant possible la parallélisation des méthodes de résolution. Les recherches concernent principalement le développement de simulations aux grandes échelles, et leur application à l'analyse de la dynamique de la combustion dans des configurations simples, mais aussi de façon croissante dans des géométries réelles. La simulation aux grandes échelles permet désormais

d'aborder des problèmes difficiles d'interaction et de couplage avec l'acoustique dans des turbines à gaz réelles, ou d'étudier les variabilités cycliques et leurs origines dans les moteurs à piston. De façon générale ce type de simulation trouve un large champ d'application pour l'étude de flammes turbulentes en interaction avec des phénomènes tels l'acoustique, le rayonnement ou les pulsations, rencontrées dans les moteurs fusées ou les centrales nucléaires. L'effort en recherche pour le développement des simulations numériques concerne également les mathématiques appliquées pour la mise au point de méthodes numériques précises et performantes. L'objectif est maintenant de développer des modélisations améliorées des phénomènes cinétiques, de la combustion solide, de l'injection liquide, des méthodes de couplage avec le rayonnement, et d'aboutir à des outils de calcul utilisables au stade de la conception et de l'optimisation de systèmes de combustion avancée. Un élément clef à cet égard sera l'accès à des moyens de calcul dédiés: calculateurs massivement parallèles, machines hybrides CPU/GPU. Un autre aspect central pourrait être l'émergence de codes de simulation communautaires, permettant de mettre en commun les développements réalisés, facilitant les collaborations interdisciplinaires ainsi que la mutualisation des efforts de développement et de maintenance. A cet égard il apparaît indispensable d'associer aux moyens matériels sophistiqués les moyens humains qualifiés en matière de calculateur et de développement et maintenance de codes.

Répondre aux enjeux sociétaux

- nouveaux modes de combustion (combustion sans flamme, oxycombustion...) pour la séquestration du CO₂ ;
- combustion de solides (notamment le charbon) et processus de gazéification du charbon avec intégration de la capture du CO₂. Carburants alternatifs aux combustibles fossiles (biomasse, déchets organiques, carburants de 2ème et 3ème génération ...) solides, liquides ou gazeux (filiales CTL coal-to-liquid et BTL biomass-to-liquid), combustibles hydrogénés. A ce niveau, il faut favoriser les collaborations avec les chimistes, pétroliers, et l'Institut Ecologie et Environnement (INEE) en vue de la formulation de ces nouveaux carburants, de leur intérêt écologique et de leur test en condition réelle, de leur modélisation cinétique et thermophysique ;
- développer les moyens expérimentaux de caractérisation des émissions polluantes et les outils de simulation numérique associés. A ce niveau la collaboration avec la communauté « Chimie atmosphérique » est cruciale ; elle concerne à la fois la détermination de constantes de vitesse d'intérêt combustionnel et atmosphérique, la métrologie de molécules traces en général et le devenir (modélisation) des polluants dans l'atmosphère ;
- rattraper le retard en matière de caractérisation des nanoparticules à la source et en champ proche. Favoriser les interactions avec d'autres champs disciplinaires (santé, chimie atmosphérique...) et les collaborations avec les laboratoires étrangers avancés dans le domaine.

– sécurité des installations industrielles et nucléaires, incendies et feux de forêt. Risques incendie/explosion/détonation. Favoriser le travail interdisciplinaire avec les communautés géoscience, météorologie, sciences sociales (interface forêt/habitat)...

4.3. Moyens d'action et d'organisation

La communauté française en combustion est de taille modeste, mais bien identifiée, et sa reconnaissance internationale bien établie dans plusieurs domaines clés.

Les unités de recherche dans lesquelles le CNRS a un poids important (UPR ou UMR) jouent un rôle décisif qu'il convient absolument de préserver et de développer. Le CNRS a dans le domaine de la combustion une responsabilité stratégique particulièrement importante. Le renforcement significatif de la communauté en moyens humains est toujours l'objectif prioritaire. Il est motivé par trois raisons principales : (1) permettre à la communauté française en combustion d'assumer sa place dans la communauté internationale, car le nombre de ses chercheurs est déséquilibré par rapport à sa reconnaissance et ses potentialités ; (2) faire face aux demandes croissantes de l'industrie, dont la résolution de problèmes de plus en plus difficiles nécessitent des recherches fondamentales, des expériences bien contrôlées et des simulations complexes ; (3) traiter suffisamment à l'avance le problème du renouvellement des chercheurs, ingénieurs et techniciens, car la pyramide des âges laisse présager des situations difficiles qui, dans le cadre d'une communauté à effectifs réduits, peut conduire à l'arrêt de thématiques d'importance si ces situations ne sont pas traitées à temps. En conséquence, le CNRS doit privilégier une politique de recrutement de chercheurs et d'ingénieurs et techniciens.

Les actions permettant la fédération et la structuration de la communauté en combustion, en liaison avec les partenaires industriels et les autres organismes doivent être poursuivies. C'est réellement pour cette communauté à effectifs réduits que des instruments tels que GDR ou autres (plateformes expérimentales, écoles thématiques, outils numériques communautaires) doivent être mis en œuvre. Dans ce but il faut faciliter les collaborations aux interfaces avec d'autres communautés, par exemple : - la communauté « chimiste », en ce qui concerne les moyens de production de combustibles de nouvelle génération, biocombustibles, micro-algues etc, l'utilisation de la mécanique quantique dans la cinétique ; - les communautés « santé » et « chimie atmosphérique » pour des études d'impact des nanoparticules, et polluants gazeux ; - la communauté « géosciences » pour les problèmes liés à l'impact des feux ; - la communauté « procédés » pour l'étude des systèmes hybrides (solaire - turbine, pile à combustible - turbine).

5 TRANSFERTS THERMIQUES

5.1 axes de développement

La thermique est la branche de la physique relative à l'une des formes les plus usuelles de l'énergie : la chaleur. Elle traite de tous les phénomènes liés à son transfert, entre milieux matériels ou en leur sein, sous l'action de différences de températures ou de sources de chaleur. Tout en ayant sa propre spécificité à travers les différents mécanismes de transferts, la thermique est une science très souvent associée à d'autres champs disciplinaires. On peut effectivement souligner ses interactions et ses couplages avec la mécanique des fluides, la mécanique des solides, le génie des procédés, la chimie, la science des matériaux, la combustion, les sciences de la terre, la biologie, ou la médecine. La thermique peut se définir comme la science des couplages, entre différents modes de transferts, à différentes échelles spatiales et temporelles

La prise en compte d'une interdisciplinarité s'impose alors, comme par exemple pour la description des sources chimiques (combustion, polymérisation), électrochimique (cœur de pile à combustible), physique (trempe, élaboration de matériaux), mécanique (frottement, dissipation visqueuse), biologique (croissance bactérienne, hyperthermie), médecine (brûlures)....

Les recherches menées dans le domaine des transferts thermiques sont motivées par de nombreux enjeux de société : solaire concentré, émissions polluantes dans les systèmes combustifs, imagerie médicale, climatologie, planétologie, systèmes embarqués (refroidissement de l'électronique dans le transport ferroviaire, automobile, aéronautique et spatial), procédés industriels, biologiques, lutte contre les feux, intensification des transferts, efficacité énergétique, thermique des bâtiments, nouvelles énergies, ITER... D'une façon générale, la thermique devient un facteur incontournable pour gérer l'énergie, optimiser et contrôler les systèmes industriels, concevoir des matériaux nouveaux...

Il s'agit également d'une science particulièrement propice au développement de nouveaux concepts théoriques ou méthodologiques, tels les méthodes de changement d'échelles, les méthodes inverses, les outils stochastiques et la réduction de modèles.

Lors de ces dix dernières années, on a ainsi assisté à un développement très important de l'analyse et de la compréhension de processus thermiques très divers, grâce aux progrès combinés de la modélisation et des techniques expérimentales : l'un des points forts de la thermique, en France tout particulièrement, est d'avoir su préserver une place conséquente à l'expérimentation.

Différents axes de recherche peuvent être identifiés :

– les transferts dans les milieux complexes : Un grand nombre de situations pratiques où se posent des problèmes de transferts concernent des milieux complexes : milieux hétérogènes, poreux, divisés, granulaires, avec changement de phase, fluides supercritiques, écoulements

diphases bouillonnants, couches limites diphases, transferts de chaleur à hautes températures et hauts flux dans les fluides et les matériaux etc... Les transferts de chaleur et de masse aux interfaces et aux discontinuités (solide-fluide, solide-solide, ligne de contact, ...) ont eux aussi de nombreuses applications. Du point de vue de la modélisation cela conduit à développer des méthodes de changement d'échelle élaborées permettant de conserver des informations sur la physique fine lors du passage à un niveau plus macroscopique. Du point de vue expérimental, il faut développer des méthodes globales et non intrusives ;

– les transferts à micro- et nano- échelle : en parallèle aux développements de la micro-fluidique s'ouvre tout un domaine impliquant les transferts à petite échelle : micro-mélange, micro-caloducs, micro-échangeurs de chaleur, impliquant en particulier de revisiter les transferts avec changement de phase dans un contexte où les phénomènes surfaciques peuvent dominer les phénomènes volumiques ;

– le développement rapide des techniques de fabrication d'objets nano-structurés (processeur, NEMS, lab-on-a-chip, ...) a provoqué l'émergence de nouvelles thématiques de recherche, telle la nanothermique. En effet, aux petites échelles spatiales, les processus physiques mis en jeu ne sont plus les mêmes qu'à échelle macroscopique. Les échanges de chaleur doivent être appréhendés et mesurés avec des outils et concepts adaptés.

Des simulations originales décrivant le transfert d'énergie par conduction et par rayonnement (dus respectivement aux phonons et aux photons de champ proche) sont développées ainsi que des moyens d'investigation spécifiques (microscopie AFM, SThM). Ce domaine ouvre de nouvelles perspectives pour le contrôle des résistances thermiques de contact par nanostructuration d'interfaces, pour l'exaltation des transferts de chaleur à échelle sublongueur d'onde, le contrôle des flux rayonnés/absorbés par une surface ou encore l'optimisation d'absorbants et de filtres pour la conversion d'énergie thermophotovoltaïque.

– les transferts couplés à échelles multiples : La modélisation fine des transferts (de chaleur, de masse, de charges électriques) dans des milieux ou des systèmes de plus en plus complexes, éventuellement en mouvement (milieux poreux, circuits micro/mini fluidiques, multimatériaux, matériaux composites, nouveaux matériaux pour l'énergie, cœurs de pile à combustible, sprays interagissant avec des parois, échangeurs multifonctionnels...) exige de repousser de plus en plus loin les conditions aux limites (conjugaison des transferts) et de prendre en compte les couplages. Le spécialiste des modèles de transport doit donc revisiter l'écriture de ces derniers, en cohérence avec l'échelle d'observation retenue.

Les verrous précédents peuvent être levés par l'emploi d'approches de changement d'échelle (homogénéisation, prise de moyenne,...) ou de réduction physique de modèle. Le développement de nouveaux capteurs multiphysiques multi spectraux (UV, fluorescence, ...) et de techniques de dépouillement associées doit permettre de multiplier les moyens d'investigation des phénomènes de transfert

étudiés. La mise en œuvre de techniques analytiques de modélisation permet la caractérisation expérimentale structurelle (paramètres thermophysiques) de nouveaux matériaux, fonctionnant à des niveaux de température de plus en plus élevés (applications nucléaires, turboréacteurs,...) ou ayant des caractéristiques extrêmes (super-isolants). Le développement des techniques inverses permet d'identifier également ces paramètres, mais autorise aussi la mesure de grandeurs «à distance» (fluxmétrie, caractérisation de sources thermiques ou massiques, contrôle non-destructif par voie thermique, débitmétrie,...) ainsi que l'identification/réduction de modèles, permettant d'envisager des stratégies de contrôle thermique en temps réel.

Le rôle de la communauté thermicienne va augmenter dans les années à venir dans un certain nombre de domaines :

– la fusion thermonucléaire, particulièrement dans la récupération et la conversion de la chaleur dans le projet ITER ;

– la production le transport et le stockage de l'énergie, le développement des nouvelles énergies (carburants alternatifs, solaire, hydrogène et pile à combustible, systèmes hybrides) ;

– l'optimisation de la consommation énergétique dans les procédés industriels et dans l'habitat.

5.2 Moyens d'action et d'organisation

Les laboratoires de la section dans le domaine de la thermique en France émergent dans les réseaux thématiques de recherche reconnus par le CNRS et /ou le MESR : participation importante au programme Energie du CNRS, GDR AmETh (Amélioration des Echanges Thermiques), GDR Nanothermique, GDR SYREDI, groupe METTI (Métrologie Thermique et Techniques Inverses). Cette structuration interne, permet de cultiver des relations fortes entre laboratoires du domaine. Il faut également souligner la pérennisation et le développement des sciences thermiques à travers la Société Française de Thermique qui regroupe des universitaires et des industriels. La SFT est une société savante reconnue comme très active : elle organise un Congrès annuel avec actes édités, ainsi qu'une dizaine de rencontres scientifiques sur des thématiques ciblées, en collaboration avec d'autres sociétés savantes ou groupements professionnels.

Au niveau international, la communauté thermique s'est également structurée grâce au développement de certaines conférences et comités : International Heat Transfer Conference (IHTC), International Center for Heat and Mass Transfer (ICHMT), Comité Eurotherm, European Conference on Thermal Properties (ECTP).

Au plan national, la structuration interne des laboratoires de thermique doit s'accompagner d'un rapprochement encore plus fort vers d'autres disciplines (physique statistique hors équilibre et de la physique non linéaire, science des matériaux, biologie...). Il faut renforcer le recrutement de personnels dédiés à la pérennisation des travaux méthodologiques menés à l'interface entre

différentes disciplines (par exemple à l'interface de la thermique avec la physique, l'électronique, les matériaux, les sciences de l'univers). Il faut aussi veiller au maintien des compétences et des savoirs des laboratoires que ce soit en instrumentation et système de mesures (personnels techniques), mais aussi en modélisation et analyse fine des phénomènes locaux.

La collaboration avec les acteurs industriels ou institutionnels, concrétisée par une activité contractuelle traditionnellement importante dans nos laboratoires, doit être maintenue et aller vers des champs d'application de la maîtrise des transferts de plus en plus larges.