



Livre blanc :

**La recherche en thermique,
enjeux et perspectives en 2005**

**document intégrant les contributions
au colloque du 12 janvier 2005**

version 3, 12 avril 2005

Avant-propos de la version 3 du 12 avril 2005

Cette version 3 du livre blanc de la recherche en thermique fait suite au colloque « *Enjeux et Perspectives de la Recherche en Thermique pour la Science, l'Industrie et l'Environnement* » du 12 janvier 2005. Par rapport à la version 3 provisoire du 15 novembre 2004 du document, qui a été distribuée aux participants à ce colloque, les modifications suivantes ont été apportées :

- insertion de deux paragraphes en section 4.3.1 (Transferts aux interfaces solide-solide fixes ou mobiles), sur la thermique du freinage et sur celle de l'usinage,
- extension de la section 4.3.2 (Echanges pariétaux fluide-solide),
- relecture et compléments de la section 5.8 (Thermique du bâtiment),
- explication des sigles utilisés et benchmarks effectués en section 6.2.1 (Modélisation et simulation en transfert convectif) et en Annexe 2 (Principe des méthodes de simulation en transfert convectif),
- insertion d'un nouveau chapitre 7 (APPORTS DU COLLOQUE DU 12 JANVIER) avant la synthèse et les conclusions, chapitre comprenant un compte-rendu détaillé du colloque (section 7.1) et quelques réflexions postérieures (section 7.2),
- modification et compléments en Annexes 3 (Liste des organismes, laboratoires et sociétés) et 4 (Liste des contributeurs de ce livre blanc).

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| 0. INTRODUCTION | 5 |
| 1. RAYONNEMENT THERMIQUE | 11 |
| 2. TRANSFERTS DE CHALEUR PAR CONVECTION DANS LES MILIEUX MONOPHASIQUES | 18 |
| 2.1 Etude et contrôle des instabilités, turbulence | 18 |
| 2.2 Manipulation des structures thermoconvectives | 19 |
| 2.3 Fluides complexes | 21 |
| 3. TRANSFERTS THERMIQUES AUX ECHELLES MICRONIQUES -ET SUB-MICRONIQUES | 24 |
| 3.1 Transferts aux micro-échelles | 24 |
| 3.1.1 Convection aux micro-échelles et microcaloducs | 24 |
| 3.1.2 Conduction dans les microstructures | 27 |
| 3.1.2.1 Thermique couches minces | 27 |
| 3.1.2.2 Micro-électronique | 29 |
| 3.2 Transferts aux échelles ultimes milieux continus: la nanothermique | 31 |
| 4. TRANSFERTS THERMIQUES DANS LES MILIEUX HETEROGENES | 37 |
| 4.1 Transferts de chaleur dans les milieux diphasiques | 37 |
| 4.1.1 Milieux diphasiques liquide-gaz, ébullition, condensation, évaporation | 37 |
| 4.1.2 Ecoulements particules-fluide | 39 |
| 4.1.3. Milieux diphasiques solides-liquides avec changement de phase | 41 |
| 4.1.4 Milieux diphasiques liquide-liquide | 44 |
| 4.2 Transferts dans les milieux poreux | 46 |
| 4.3 Transferts aux interfaces | 48 |
| 4.3.1 Interfaces solide-solide fixes ou mobiles | 48 |
| 4.3.2 Echanges pariétaux fluide-solide | 50 |
| 5. THERMIQUE DES SYSTEMES | 51 |
| 5.1 Echangeurs | 54 |
| 5.2 Machines thermiques | 54 |
| 5.3 Electronique et électrotechnique | 62 |
| 5.4 Les piles à combustibles et leurs périphériques | 65 |
| 5.5 Solaire thermique | 67 |
| 5.6 Thermique de quelques procédés industriels | 69 |
| 5.6.1 Agroalimentaire | 69 |
| 5.6.2 Les procédés de mise en forme et de mise en oeuvre des matériaux | 71 |
| 5.7. Gestion du froid et de la chaleur | 78 |
| 5.8. Thermique du bâtiment et de l'environnement | 83 |
| 5.9 Thermique du vivant | 88 |
| 5.10 Matériaux et fluides à hautes températures | 91 |
| 6. METHODOLOGIES SPECIFIQUES A LA THERMIQUE | 94 |
| 6.1 Mesures en thermique: propriétés et champs | 94 |
| 6.2 Techniques de modélisation et de simulation | 96 |
| 6.2.1 Modélisation et simulation en transfert convectif | 96 |
| 6.2.2 Modélisation et simulation en transfert radiatif | 99 |
| 6.3 Méthodes inverses | 101 |
| 6.4 Thermodynamique fondamentale | 107 |
| 6.5 Méthodes d'homogénéisation et processus stochastiques | 108 |

| | |
|--|-----|
| 7. APPORTS DU COLLOQUE DU 12 JANVIER 2005 | 111 |
| 7.1 Compte-rendu du colloque « Enjeux et Perspectives de la Recherche en Thermique pour la Science, l'Industrie et l'Environnement » | 111 |
| 7.2 Quelques réflexions suite au Colloque du 12 janvier 2005 | 128 |
| 8. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS | 130 |
| 8.1 Synthèse | 130 |
| 8.2 Conclusions | 133 |
| ANNEXE 1 – Nanothermique : Figures et bibliographie | 135 |
| ANNEXE 2 – Principe des méthodes de simulation en transfert convectif | 137 |
| ANNEXE 3 – Liste des organismes, laboratoires et sociétés | 140 |
| ANNEXE 4 – Liste des contributeurs de ce livre blanc | 145 |

0. INTRODUCTION

Pourquoi cette action, à qui s'adresse t-elle?

En ce début du XXI^{ème} siècle le contexte énergétique rappelle sous certains aspects celui des années 1980, qui ont vu les conséquences du second choc pétrolier et durant lesquelles la question énergétique a revêtu une importance cruciale. Comme à cette époque, les économies d'énergie sont à nouveau mises en avant, ainsi qu'une façon plus soucieuse de produire, transformer et utiliser celle-ci en respectant l'environnement.

Un facteur nouveau est apparu depuis : la nécessité de mettre sur le marché des produits dont la qualité et la haute valeur ajoutée permettent d'éviter une éventuelle délocalisation de leur production. Maîtriser les températures, par exemple dans un procédé de fabrication d'une puce en micro-électronique, devient un enjeu non négligeable dans l'environnement économique actuel.

Par ailleurs la prise en compte du facteur température dans l'analyse et l'interprétation de nombreux résultats, dans d'autres domaines scientifiques, apparaît comme incontournable : on peut penser par exemple aux procédés micro-biologiques qui sont extrêmement thermo-dépendants.

On imagine mal répondre aux questionnements actuels sur le réchauffement climatique par effet de serre sans analyser précisément les échanges de chaleur dans la « machine thermique » que constitue notre planète.

A côté des raisons économiques et sociétales dont on vient de citer quelques exemples, cette action s'inscrit dans la continuité d'une démarche entreprise par la communauté thermicienne depuis un quart de siècle, démarche qui a permis de faire émerger la thermique en tant que discipline reconnue mais ouverte. On peut ainsi citer les faits marquants suivants :

- le document du Groupement Universitaire de Thermique (GUT) « La thermique en 1980, enjeux et perspectives » qui a fait le constat d'une *disproportion entre les besoins et l'activité en thermique à cette époque et qui a proposé des axes de recherche prioritaires*,
- l'organisation les 6 et 7 décembre 1988 par le CNRS d'un colloque sous la présidence de J.L. Peube, intitulé « Thermique des systèmes et des procédés », colloque qui a constitué un point d'étape par rapport aux recommandations faites en 1980,
- la rédaction début 1997 du document « Enjeux et perspectives en physique des transferts » par J.B. Saulnier et J. Taine. Près de 20 ans après la réflexion de 1980, il apparaissait nécessaire de faire le point et d'indiquer de nouvelles pistes. Grâce à une réflexion menée avec le concours du Comité d'Objectifs Scientifiques et Technologiques « Thermique » du CNRS, du GUT, ainsi que des experts du Ministère, il a été possible d'élaborer un document recueillant un large assentiment de la communauté.

En 2005 il apparaît nécessaire de maintenir « vivant » le travail fait par nos collègues en ces différentes occasions, tout en le réactualisant afin de mobiliser la communauté universitaire, industrielle et sociétale sur des thèmes fédérateurs (susciter des programmes coopératifs).

Une motivation importante réside également dans des raisons intrinsèquement scientifiques liées à la recherche amont, théorique et expérimentale, en thermique et dont les retombées ne sont peut-être pas perceptibles aujourd'hui. Il est donc nécessaire de maintenir ou de faire progresser le niveau de la recherche française dont la production scientifique représente approximativement 9 % des articles publiés à la dernière conférence mondiale sur le sujet (IHMTG Grenoble, 2003).

Les destinataires du présent document sont :

- les chercheurs de la communauté thermicienne (voir en Annexe 3 la liste des organismes cités dans ce document: laboratoires CNRS, INRA, CEA) qui peuvent ainsi prendre conscience, à la lecture de celui-ci, de la richesse de la thématique. Cette action contribuera à renforcer leur identité et à l'élargir vers les communautés connexes.

- les décideurs des grands organismes scientifiques qui pourront identifier à partir de ce document les points forts, les enjeux et les perspectives ouvertes. Il faut préciser ici que le document représente une perception, peut-être subjective mais lissée par la transparence de la démarche (une trentaine de rédacteurs principaux et autant de « relecteurs » de la version provisoire, voir en Annexe 4). Celle-ci est en cours d'enrichissement par un appel à suggestions auprès d'une quarantaine de représentants de différents secteurs industriels ; leur contribution est également mentionnée en Annexe 4. C'est donc une source parmi d'autres d'aide à la décision.

- les industriels et les centres techniques qui disposent ainsi d'un panorama de l'offre de recherche de la communauté. Celle-ci vise à faire avancer les concepts de base qui pourront être ultérieurement intégrés dans les outils mis à la disposition des ingénieurs. Même si la demande industrielle constitue un excellent moteur de la recherche, il est ici nécessaire de prendre un peu de distance par rapport à une démarche industrielle qui n'a pas toujours une visibilité à long terme

Qu'est-ce que la thermique ?

Afin de mieux cerner le champ disciplinaire qui nous intéresse, il convient de préciser la définition de la thermique.

Une définition concise était proposée en 1980 dans le document édité par le GUT :

« 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 ». Une conséquence est sa finalité principale, la maîtrise des températures et des flux de chaleur.

Pour compléter cette tentative de définition, il faut préciser que la thermique (« Heat Transfer » en anglais) est une science qui intègre naturellement les interactions et les couplages entre mécanismes de transfert de chaleur d'une part et phénomènes étudiés dans d'autres champs disciplinaires d'autre part. On peut citer notamment la mécanique des fluides et des solides, le génie des procédés et la chimie.

L'analyse des phénomènes couplés requiert en effet une fertilisation réciproque des disciplines et technologies. Ceci est naturel car la chaleur apparaît souvent dans les bilans comme terme source résultant de transformations, réversibles ou non, de la matière ou de l'énergie et dont la description fine déborde du strict domaine de la thermique. L'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).

Nous considérons ici la thermique comme une spécialité à part entière et nous avons volontairement exclu de ce document des disciplines avec lesquelles le thermicien (voir la définition plus loin) a vocation naturelle à interagir, comme par exemple la combustion, discipline bien identifiée par ailleurs, au carrefour de la chimie, de la mécanique des fluides et du rayonnement.

D'une façon similaire, il est bien évident que la thermique correspond à une préoccupation des chercheurs d'autres domaines. On peut citer ici le génie des procédés ou le génie des matériaux, pour lesquels la température ou le flux de chaleur sont considérés comme des variables d'influence ou l'automatique pour laquelle ces grandeurs sont plutôt des variables de contrôle. De ce fait la thermique ne constitue pas l'objet principal de ces disciplines. Par ailleurs la mécanique des fluides et des solides sont omniprésentes dans le quotidien du thermicien mais ce dernier ne se définit pas par rapport à ces disciplines.

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.

La thermique est également omniprésente dans de nombreux domaines de l'activité humaine et le terme *thermique* s'est autrefois appliqué à la fois à un secteur industriel et à des branches d'entreprises. Ainsi l'appellation *thermicien* s'appliquait couramment à des ingénieurs ou des techniciens qui géraient de l'énergie thermique. De nos jours l'activité du thermicien a largement débordé de ce secteur traditionnel pour investir les domaines scientifiques et technologiques les plus variés. 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, étant d'avoir su préserver une place conséquente à l'expérimentation.

Les travaux qui ont permis ces développements ont été menés par une communauté dynamique, regroupant universitaires et industriels au sein de la Société Française de Thermique depuis l'an 2000, société savante résultant de la fusion de l'ancienne Société Française des Thermiciens et de l'ancien GUT et rassemblant actuellement de l'ordre de 300 membres. Cette communauté s'est structurée au plan international 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). Cette structuration est également présente au niveau national : participation importante au programme Energie du CNRS, dans laquelle la thermique joue un rôle-clé. De la même façon les thermiciens font partie des réseaux thématiques de recherche reconnus par le CNRS et /ou le MJENR : réseau AMETH (Amélioration des Echanges Thermiques) , groupe METTI (Métrologie Thermique et

Techniques Inverses) , ACRT (Action Concertée en Rayonnement Thermique), Congrès annuel de la SFT avec actes édités. La SFT est par ailleurs une société savante reconnue comme très active qui organise en outre chaque année une dizaine de rencontres scientifiques sur des thématiques ciblées, en collaboration avec d'autres sociétés savantes ou groupements professionnels.

La recherche académique en thermique compte environ 450 enseignants-chercheurs issus des 62^{ème} et 60^{ème} sections du Comité National des Universités et de l'ordre de 80 chercheurs de la section 10 du Comité national du CNRS. Il est très difficile d'estimer les chercheurs thermiciens dans les autres grands organismes et dans le secteur industriel. On peut néanmoins estimer que l'ensemble de la communauté thermicienne académique et industrielle française est de l'ordre d'un millier de chercheurs.

La communauté thermicienne française se situe naturellement sous le vocable « heat transfer » tel qu'il apparaît par exemple dans la section du même nom de l'American Society of Mechanical Engineering. La SFT a ainsi organisé la 12^{ème} Conférence Mondiale de Transfert de Chaleur (IHTC12) à Grenoble en 2003. Ceci est significatif de la reconnaissance internationale de la thermique française. Au niveau européen, il n'existe pas de « Société Européenne de Thermique ». A l'exception de l'Italie qui possède deux sociétés savantes (UIT et ATI), dans les autres pays, les communautés de thermiciens sont diffuses. Depuis la fin des années 1980 le comité Eurotherm (<http://termserv.casaccia.enea.it/eurotherm/>) agit pour structurer la communauté (Séminaires Eurotherm, European Thermal Science Conference tous les 4 ans, en alternance avec la Conférence Mondiale).

La thermique est évidemment présente dans les différents programmes du 6^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement Technologique européen, mais de manière diffuse, sans qu'il soit possible de chiffrer sa contribution. Par contre, pour les laboratoires universitaires les apports communautaires correspondent à environ 10 % des ressources.

Recherche en thermique et demande industrielle

L'équilibre entre la recherche amont et les applications peut aussi caractériser la thermique et correspondre à l'attente des milieux industriels. Confrontés à des applications concrètes, les laboratoires universitaires (ou du CNRS) ont pour rôle d'ouvrir des voies nouvelles. La mise en œuvre de leurs savoirs sur des systèmes industriels, les recherches à caractère plus technologique et la R&D, sont menées dans de grands organismes (CEA, CNES, ONERA, EDF, IFP, etc.), dans les centres de recherche de groupes industriels publics et privés (PSA, Renault, St Gobain, ARCELOR...) , dans des centres techniques (CETIAT, CETIM, par exemple), ou dans divers centres de ressources technologiques (GRETh par exemple) et sociétés de recherche sous contrat (ARMines, INSAVALOR,...). Ces différentes structures coopèrent fréquemment avec les laboratoires de l'enseignement supérieur, qui se situent en amont : ces derniers représentent à la fois une part de leur vivier en cadres et leurs sources de connaissances pour le moyen et le long terme.

Cette forte synergie entre industrie et recherche universitaire est une caractéristique de la thermique qui se situe donc naturellement au cœur du Département Sciences pour l'Ingénieur du CNRS.

La puissance publique, soucieuse d'apporter une réponse adaptée aux enjeux industriels et sociétaux a lancé différents programmes incitatifs tels que (sans être ici limitatif) PREDIT (Programme de Recherche et de Développement de l'Industrie des Transports), Programme Energie, réseau PACO (Pile à Combustible). Dans tous ces programmes, que le lecteur pourra retrouver dans les différentes sections du corps du texte, la thermique joue un rôle important (voire central), mais non exclusif.

Il existe donc une attente forte du secteur industriel permettant de lever des verrous technologiques par des avancées en sciences thermiques qui doivent émerger de ce document.

La participation à la préparation des normes constitue également un enjeu de taille pour l'industrie, en lui permettant d'acquérir une avance sensible sur ses concurrents. Si la recherche amont n'a pas vocation à intervenir au niveau des normes technologiques qui sont plus du ressort des centres techniques, il n'en est pas de même de la normalisation des méthodes de mesure ou de simulation, pour lesquelles l'appui scientifique des laboratoires est capital et doit être accru : organisation par exemple de campagnes d'inter comparaison de mesures ou de « benchmarks » de logiciels. Remarquons que la prise en compte économique de ces actions reste un problème ouvert.

Quelle méthodologie?

Le projet de ce livre blanc est issu d'une réunion d'analyse et de prospective thématique, tenue le 30 mai 2001, et organisée à l'occasion du congrès annuel de la Société Française de Thermique, à Nantes. Y ont participé une vingtaine de représentants de laboratoires associés ou propres au CNRS, universitaires, et de l'ONERA. Au cours d'une table ronde au Congrès de Vittel en 2002, un consensus a pu se dégager quant à la structuration des différents thèmes à aborder dans le document. Il a été alors décidé de faire appel à une trentaine de rédacteurs et de relecteurs pour chaque thème.

Le document a été soumis à l'appréciation et à la critique de la communauté sur le site web (<http://www.sft.asso.fr/>) de la SFT. Il a été enrichi par des consultations et des contributions complémentaires auprès de représentants de différents secteurs industriels.

Il s'agit donc d'une œuvre collective qui n'a pas la prétention à une objectivité absolue ni à une exhaustivité complète mais qui représente tout de même une photographie, que nous espérons assez fidèle, de la recherche en thermique et de ses attentes en France en 2005.

L'extension de ce travail à l'échelle de la thermique européenne constituerait une étape ultérieure souhaitable. Elle présente néanmoins des difficultés liées à l'absence de structuration aussi bien identifiable que dans notre pays.

Présentation du document

Le document est structuré en six chapitres correspondant aux thèmes identifiés et validés par la communauté thermicienne :

Chap. 1 : Le rayonnement thermique

Chap. 2 : Les transferts de chaleur par convection dans les milieux monophasiques

- Chap. 3 : Les transferts thermiques aux échelles microniques et submicroniques
- Chap. 4 : Les transferts thermiques dans les milieux hétérogènes
- Chap. 5 : La thermique des systèmes
- Chap. 6 : Les méthodologies spécifiques à la thermique

Chacun de ces chapitres est décliné selon plusieurs sous-thèmes dont les intitulés ont été largement discutés au sein de diverses instances pour être arrêtés par le Conseil Scientifique de la SFT.

Ces sous-thèmes abordent, d'une façon propre à chacun des rédacteurs initiaux, l'état de l'art, les enjeux et les perspectives correspondants.

1. RAYONNEMENT THERMIQUE

Les recherches en rayonnement thermique, interdisciplinaires par nature, sont connectées à la chimie-physique, la physique de l'atmosphère et l'astrophysique pour les gaz, au transport de particules élémentaires et à la physique de la matière condensée pour les milieux hétérogènes et les surfaces rugueuses. De plus, le rayonnement est généralement couplé aux champs mécaniques mais requiert des approches physiques et des techniques spécifiques, qui constituent une originalité forte par rapport aux sciences mécaniques.

Les équipes universitaires

Les laboratoires de physique des transferts impliqués en rayonnement constituent une communauté petite mais dynamique, qui a acquis une reconnaissance mondiale. Sa vitalité s'est traduite depuis la dernière décennie, par sa participation à l'organisation de congrès spécialisés d'audience européenne (Lisbonne - 1990, Lyon - 1992, Sicile - 1994, Mons - 2003) et par une représentation de premier plan dans les congrès d'audience mondiale (3^{ème} et 4^{ème} International Symposium on Radiative Transfer, Antalya – 2001, Istanbul - 2004). De façon complémentaire son action de communication et de formation a conduit à l'organisation d'écoles de printemps en Juin 1996 et Mai 2001, associant enseignants de DEA, chercheurs et industriels.

La recherche universitaire en rayonnement s'articule autour de pôles principaux à Lyon (CETHIL-INSA), Poitiers (LET-ENSMA et LCD-ENSMA), Nancy (LEMMA), Rouen (CORIA) ou Paris (EM2C-ECP), auxquels on peut également ajouter d'autres sites développant des travaux reconnus dans le domaine à Albi (CEE), Marseille (IUSTI), Toulouse (LE), Odeillo (IMP) et Orléans (CRMHT). Les travaux des différentes équipes impliquées ne traitent généralement pas exclusivement des aspects radiatifs et sont au contraire souvent associés à des pôles spécialisés dans les transferts combinés avec les autres modes de transfert de chaleur, le transfert de masse, voire avec les problèmes de combustion.

Les équipes concernées entretiennent un réseau assurant une diffusion des connaissances et suscitant les collaborations dans le cadre de l'ACRT (Action Concertée en Rayonnement Thermique). Initiée dans les années 90, l'ACRT conduit à l'organisation de rencontres plusieurs fois par an, permet l'évaluation et la comparaison de méthodes de travail et assure une veille permanente des activités et la mise en place d'actions communes. Le brassage des connaissances qui en résulte n'est d'ailleurs pas réservé à la communauté universitaire, puisqu'au contraire, des personnalités du monde industriel viennent régulièrement faire part de leur expérience des problèmes en grandeur nature, exposer leurs difficultés concrètes et susciter des collaborations industrie-laboratoires de recherche.

Les secteurs industriels

L'activité de ces laboratoires a été et est fortement soutenue par les industries aéronautiques et liées à la défense, les industries verrières et sidérurgiques, mais aussi par des organismes chargés de la prévention des feux et de la lutte contre les incendies. Dans le cadre de l'évaluation de la contribution radiative impliquée dans les transferts couplés, tous les procédés et systèmes, plus spécialement requérant des hautes températures, constituent des domaines d'applications potentiels.

Les avancées significatives

Les avancées de la communauté française de rayonnement thermique sont significatives dans trois directions : la caractérisation des *propriétés radiatives* des milieux, la *modélisation* des transferts radiatifs, généralement couplés aux autres modes de transfert, enfin la maîtrise et l'exploitation de *techniques expérimentales* fines, reposant notamment sur des techniques inverses.

- Propriétés radiatives

Dans le cas des **gaz**, la modélisation des transferts d'énergie et l'expérimentation requièrent la construction de **bases de données** de raies, validées à haute température, dans les domaines **infrarouge, visible et UV**.

En infrarouge, des avancées importantes émanent d'équipes de chimie-physique (Besançon, Dijon, Reims, Rennes,...), en particulier du LPMA (UPR-Paris VI) et d'une formation de physique des transferts (EM2C-ECParis), dont les bases de données conduisent à la prédiction, à moyenne résolution, d'un spectre complet, même à pression et température élevées, avec une précision de 10% environ dans le cas de CO₂, moindre dans le cas de H₂O. L'objectif visé à terme, qui nécessite études expérimentales et théoriques, est l'obtention de spectres précis à résolution et température élevées. Les soutiens sont liés à la furtivité des aéronefs et aux transferts dans des foyers d'aviation. Les retombées concernent tous les milieux en combustion (les foyers industriels mais aussi les feux accidentels) ainsi que la sûreté des réacteurs à eau pressurisée.

La modélisation des transferts d'énergie radiative dans les plasmas froids requiert aussi la constitution d'une base couvrant l'ensemble du spectre. Cet objectif visé, à EM2C notamment, rejoint les besoins généralement moins étendus spectralement des communautés de physique de l'atmosphère, d'astrophysique stellaire (DARC Meudon), de spectroscopie des plasmas (Orléans : GREMI, Orsay : LPGP, Toulouse : CPAT). Les applications visées concernent les arcs, les torches et les phénomènes de rentrée atmosphérique ou planétaire.

Si les bases de données précédentes et l'approche raie par raie conduisent à la modélisation la plus fine possible d'un spectre, des **modèles approchés** sont nécessaires pour les calculs répétitifs. Leurs validités doivent être contrôlées à partir de l'approche raie-par-raie dans tout type d'applications. De nombreux modèles ont été et sont essayés ou créés et validés, essentiellement par EM2C : pour la télédétection ckfg, actuellement couramment utilisé par l'industrie aéronautique, pour les transferts ck et les modèles statistiques à bandes étroites, dont les paramètres ont été largement diffusés (action FRT). Ces données aisément accessibles, accompagnées d'une description complète des techniques d'application et de cas tests, constituent une référence garantissant une qualité de travail et une homogénéité de résultats au sein du réseau ACRT et au-delà.

Dans les domaines cités précédemment, la communauté française est en pointe à l'échelle internationale.

Dans le cas des **matériaux**, les enjeux principaux ont trait à l'étude de milieux hétérogènes, donc susceptibles de diffuser du rayonnement. Il s'agit de caractériser globalement, à l'échelle du milieu continu, les propriétés radiatives de **surfaces rugueuses** (hétérogénéités interfaciales) ou de **milieux hétérogènes** en volume (hétérogénéité résultant soit de l'existence de plusieurs phases soit plus simplement de l'hétérogénéité de l'indice complexe sous l'effet de champs de température, de concentration, etc.), ou même de surfaces rugueuses

séparant des milieux hétérogènes en volume. Certaines de ces études reposent sur une approche électromagnétique du rayonnement; d'autres considèrent les phénomènes d'absorption, d'émission et de diffusion comme phénoménologiques. La théorie de Mie, dédiée à la caractérisation de particules sphériques est par exemple couramment utilisée (LEMTA-Nancy , CETHIL-Lyon, CORIA-Rouen). Elle est issue de la résolution des théories de l'électromagnétisme et son formalisme est bien maîtrisé pour établir les caractéristiques d'absorption et de diffusion de milieux comportant des sphères, des inclusions sphériques ou encore des fibres. Limitée au cas de milieux de faible densité, garantissant la situation de diffusion dépendante, elle n'est plus applicable au cas de milieux constitués de particules très proches, interagissant sur le plan électromagnétique. Les techniques numériques de résolution des équations de Maxwell peuvent alors prendre le relais pour caractériser les matériaux. Ce thème émergent fait l'objet de travaux prometteurs en particulier au CORIA, à l'EM2C et au LEMTA.

Divers travaux concernent les isolants poreux (fibres de verre, mousses...): leur caractérisation repose à la fois sur des approches expérimentales, généralement par technique inverse, et sur des modélisations (CETHIL-Lyon, LEMTA-Nancy). Un autre type de milieu divisé est constitué par une assemblée de particules, elles mêmes hétérogènes (sous l'effet des champs de concentrations et de températures). La diffusion par ce milieu est étudiée par des techniques optiques performantes et modélisée à partir de la théorie électromagnétique ; un des objectifs est de remonter aux champs à partir de l'indicatrice de diffusion (CORIA-Rouen). Les propriétés radiatives de lits fluidisés ou fixes sont également étudiées (IMP, Odeillo). Un autre groupe (EM2C-ECParis) développe des travaux sur la caractérisation de surfaces rugueuses (modèles de réflectivité), la conception de surfaces rugueuses à propriétés sélectives et les phénomènes de diffusion en volume, en considérant les effets de diffusion dépendante (peintures à forte densité de pigment pour la furtivité: AMDBA).

Les enjeux futurs des recherches sur les propriétés radiatives des matériaux sont, d'une part, la caractérisation de milieux poreux (en relation avec le thème correspondant) tels que mousses ou chargements de matière dans les fours industriels, (verriers par exemple), et d'autre part, la caractérisation de l'état de surface d'un matériau à partir de l'inversion de l'indicatrice du rayonnement diffusé par ce matériau.

De plus, l'extension de la métrologie vers les hautes températures demeure également une nécessité. Sur le plan expérimental, comme nous le verrons plus loin, le CRMHT-Orléans a mis en place un banc de caractérisation des émissivités de matériaux céramiques à haute température qui constitue la référence dans le domaine. Son exemple est suivi en particulier par le CETHIL-Lyon et le LEMTA-Nancy.

Si les recherches dans l'ensemble de ce domaine sont généralement d'un excellent niveau, il faut regretter l'absence en France de travaux sur le rayonnement des agrégats de particules, thème en plein développement à l'étranger (Mengüç, USA ; Carvalho, Lisbonne,...).

- Modélisation des transferts radiatifs

D'une manière générale, les modèles utilisés reposent sur l'Equation du Transfert Radiatif (ETR). Notons toutefois que la méthode de Monte Carlo simule les mêmes phénomènes associés à la propagation du rayonnement, mais sur la base de techniques probabilistes. Historiquement, de nombreux modèles approchés, utilisant des hypothèses très simplificatrices ont été largement appliqués (approximation de la diffusion, approximation P1, modèle deux-flux,...), certains parfois encore utilisés sur le plan industriel. Cependant, les

performances croissantes des moyens de calculs et le perfectionnement des techniques de résolution numérique ont largement contribué à l'amélioration de la simulation des transferts radiatifs. La faiblesse des modèles simplifiés en situation réelle (rarement 1D) apparaît fatalement: les comportements spectraux de matériaux présentant généralement des variations brusques, ou encore la diffusion s'avérant généralement loin d'être isotrope, les hypothèses de base de ces modèles sont rapidement mises en défaut et conduisent à des erreurs parfois conséquentes sur l'évaluation des flux et des températures.

Les **transferts tridimensionnels d'énergie radiative** doivent généralement être déterminés dans des systèmes de géométrie complexe, caractérisés par des champs thermiques et de concentrations très hétérogènes, avec des parois, des particules ou des milieux diffusants, ce qui conduit à des calculs très répétitifs, nécessitant itération ou inversion numérique. Les calculs doivent être menés avec **quatre niveaux de discrétisation** (temporel, spectral, spatial et directionnel) mettant en oeuvre sept dimensions. Trois classes de méthodes de transfert sont généralement utilisées (Monte Carlo, tracés de rayons, méthodes reposant sur une discrétisation directionnelle et spatiale). Notons que, dans le cas d'un gaz, la troisième classe de méthode n'est aisément utilisable qu'avec un modèle de propriétés radiatives fondé sur le coefficient d'absorption spectral (ck , par exemple). En pratique, les transferts radiatifs sont toujours **couplés** aux autres modes, conductifs ou convectifs. La technique habituelle consiste alors à introduire une résolution itérative de l'ETR et de l'équation de conservation de l'énergie jusqu'à convergence, à la fois sur le champ de température et sur les flux échangés. Un champ important est constitué par l'étude des interactions rayonnement-turbulence ou des interactions rayonnement-instabilités thermomécaniques, ce qui connecte le rayonnement au thème correspondant, traité par ailleurs.

Une utilisation originale de la méthode statistique de Monte-Carlo prenant en compte les corrélations spectrales dans un gaz a été développée par une équipe de Toulouse III (LE). Cette étude, relative au couplage avec la convection naturelle, a été appliquée à l'habitat. La méthode de Monte-Carlo fait actuellement l'objet d'efforts nourris aussi bien pour la simulation des échanges radiatifs que plus récemment pour la détermination de propriétés radiatives (CEE-Albi, LE-Toulouse, EM2C-Paris). Les progrès numériques accomplis, les puissances de calcul désormais accessibles et l'amélioration des traitements statistiques appliqués en font à présent une méthode de référence, qui quoique encore coûteuse en temps de calculs permet la validation des deux familles de méthodes qui suivent.

La seconde méthode, dite de tracés des rayons, repose sur un calcul, direct et indépendant en chaque point, du flux et de la puissance radiative. Un modèle tridimensionnel de ce type est couplé à une méthode d'éléments finis non structurés (LET-ENSMA Poitiers). Un autre, reposant sur des distributions de noeuds surfaciques et volumiques quelconques, correspondant à des géométries complexes avec charges internes, a été développé pour des milieux gazeux sans particules diffusantes avec des approches k ou ck (EM2C, ECParis : opération A3C, DRET-CNRS-SNECMA-ONERA) ; ce modèle est destiné à être couplé au calcul aérodynamique d'une chambre par le modèle NATUR (du LMFA-ECLyon).

De nombreuses études ont été menées avec le troisième type de méthodes (reposant sur une discrétisation spatiale). Dans cette famille, on trouve la Méthode aux Ordonnées Discrètes (MOD), les harmoniques sphériques (méthodes P_n), les méthodes multi-flux et plus récemment la méthode des volumes finis (MVF). La MOD reste très utilisée, d'autant que les progrès réalisés par exemple sur les relations de fermeture nécessaires ou les quadratures angulaires utilisées ont largement réduit les problèmes de diffusion numérique mentionnés

auparavant. La MOD est utilisée pour le couplage avec la convection naturelle dans différents types de milieux, y compris gazeux (CETHIL-INSA de Lyon et LET-Poitiers). Elle est également couplée à la conduction ou à la convection avec application dans les fours ou les sprays de gouttelettes d'eau (LEMTA-Nancy). Elle est encore utilisée dans le domaine de la combustion (IMP-Odeillo) ou de la simulation des feux (IUSTI-Marseille). Les soutiens sont liés à différentes industries, en particulier verrières. Le LET cité ci-dessus a aussi développé la MOD, y compris en coordonnées curvilinéaires, compatibles avec une méthode de volumes finis, en particulier en géométrie axisymétrique. EM2C a également mis au point une méthode de transferts spectralement corrélés, dite de directions discrètes, pour des systèmes axisymétriques quelconques avec charges internes.

La MVF devrait connaître un essor prochain, car son formalisme proche de celui de la MOD, est directement compatible avec les méthodes les plus couramment adoptées en mécanique des fluides numérique (CFD). Le couplage devient dès lors immédiat sans changement de maillage ni schéma d'interpolation préalable. Le passage à des maillages non uniformes et même non structurés, classiquement utilisés en CFD est également possible. À condition d'y associer un schéma de fermeture suffisamment précis, cette méthode conservative limite par ailleurs les problèmes de diffusion numérique.

L'avenir des différentes méthodes est évidemment tributaire du développement des moyens de calcul. Les calculs exigeant une certaine précision devraient être entrepris par les deux premières familles de méthodes. La dernière famille est caractérisée par des risques de diffusion numérique mais conduit à des calculs plus rapides (atout certain en particulier lorsque le couplage du rayonnement avec les autres modes de transfert nécessite une procédure itérative complexe avec l'équation de conservation de l'énergie voire les autres équations de bilan).

On notera que les méthodes P_n sont abandonnées par la communauté lorsque le transfert radiatif est prépondérant, à cause des problèmes posés par la réflexion par des parois, alors que la communauté des physiciens est en train de les "découvrir".

En conclusion, la communauté française a rattrapé dans le domaine des transferts son retard sur les USA ; les modèles de rayonnement sont au même niveau de finesse et de précision que ceux de thermomécanique avec lesquels ils sont maintenant couplés.

L'étude des effets de la turbulence sur les flux radiatifs et, réciproquement, du rayonnement sur les champs turbulents dans des mélanges gazeux radiativement actifs a été menée par EM2C avec des modèles à N équations supplémentaires, à bas nombre de Reynolds (transport des variances des fluctuations de la température, des concentrations et des dissipations correspondantes) et appliqué, en particulier au problème de refroidissement par film de chambres aéronautiques (SNECMA). Les effets de la turbulence sur la signature infra-rouge sont également étudiés (Plan Action Discrétion). Une thématique en émergence à EM2C a trait à l'étude de l'effet stabilisateur du rayonnement des gaz sur l'apparition de différentes instabilités thermomécaniques. Ces travaux s'inscrivent aussi, notons-le, dans le thème correspondant.

D'une manière générale, c'est le couplage du transfert radiatif avec les autres modes de transfert et son extension aux géométries complexes qui suscitera de nombreux travaux dans un proche avenir. En particulier, tous les niveaux de couplage font actuellement l'objet d'investigation : avec le transfert de masse, de quantité de mouvement, la turbulence, la chimie, les procédés de combustion... L'approche électromagnétique du rayonnement devrait

également se développer, compte tenu des applications qu'elle autoriserait dans le domaine des milieux hétérogènes denses.

- *Techniques expérimentales*

Des avancées importantes sont apparues récemment dans le domaine des techniques expérimentales radiatives, que l'objectif poursuivi soit de caractériser les propriétés radiatives d'absorption ou de diffusion d'un milieu ou de déterminer les champs de températures, de concentrations ou d'autres grandeurs. Pour accéder à la grandeur à mesurer, il est généralement nécessaire de recourir à des **techniques inverses**, fondées sur des modélisations directes des phénomènes réputées exactes : ce recours est une conséquence du caractère non local des lois du rayonnement.

En amont, pour caractériser les milieux et fournir des données de base aux codes de simulations, les techniques spectroscopiques permettent d'accéder à l'indice complexe des matériaux. La technique de Kramers-Kronig a notamment fait ses preuves pour la caractérisation des verres et autres milieux semi-transparents (en particulier au LEMTA-Nancy et au CRMHT-Orléans).

Dans les fluides, de nombreux travaux récents ayant pour but de reconstituer les champs thermiques ou de concentrations reposent sur la métrologie laser et des techniques fondées sur les propriétés des champs d'indice (déviation, EM2C; diffusion granulaire, LET, holographie interférométrique, LE, EM2C). Une autre voie repose sur l'exploitation des diffusions Rayleigh, Raman, Raman anti-Stokes Cohérente, de la Fluorescence Induite par Laser (laboratoires de combustion, en particulier CORIA- Rouen, mais aussi le LEMTA-Nancy). La très délicate métrologie thermique à l'intérieur d'un bain verrier, semi-transparent par nature, a été mise en oeuvre au LET. Ce même laboratoire a, par ailleurs, réussi à obtenir la restitution des champs thermiques dans une flamme laminaire de diffusion, à partir de l'inversion de données obtenues par spectroscopie à transformée de Fourier dans l'infrarouge (FTIR) tant en émission qu'en absorption, à moyenne résolution spectrale. Ce type de métrologie quantitative est à développer. Signalons enfin qu'un enjeu important, pour valider et améliorer les modèles des propriétés radiatives des gaz à haute température, est d'obtenir des spectres de référence, par spectroscopie FTIR. La précision la plus élevée est obtenue à haute résolution spectrale et à température intermédiaire (1000K) en cellule.

Des bancs de mesures utilisant la FTIR ont également été mis en place au CETHIL-Lyon et au LEMTA-Nancy, permettant la caractérisation de matériaux depuis l'UV jusqu'à l'infrarouge lointain. Citons encore le CRMHT-Orléans, pour ses mesures d'émissivités avec ce type de spectromètre en particulier. De ce point de vue les laboratoires ci-dessus possèdent l'équipement et le savoir-faire permettant une caractérisation allant des températures cryogéniques aux hautes températures.

De nombreux travaux sont consacrés à la caractérisation de milieux hétérogènes ou divisés extrêmement divers, qui sont souvent des milieux poreux (on rejoint à ce stade le thème transferts thermiques en milieux poreux) mais aussi des milieux fluides diphasiques. Les propriétés de diffusion et d'absorption de matériaux d'isolation (fibres, mousses,...) ont été étudiées par le CETHIL-INSA de Lyon et le LEMTA-Nancy. Toutes les techniques de mesures directionnelles ou hémisphériques ont fait l'objet d'investigation et offrent une large gamme de possibilités pour comprendre le comportement des matériaux et les caractériser (BRDF, BTDF, grandeurs directionnelles, hémisphériques, spectrales,...). Dans ces

laboratoires, les propriétés radiatives de milieux poreux isolants ont été identifiées à partir d'expériences de transmission et de rétrodiffusion spectrales et bidirectionnelles. Ces techniques ont également été étendues à la caractérisation de milieux fluides diphasiques utilisés pour l'atténuation de rayonnements intenses, en protection-incendie. Dans tous les cas cités, l'expérimentation est très dépendante d'une modélisation adaptée des propriétés radiatives. Dans des milieux en combustion, deux types de particules interviennent plus généralement : d'une part, les gouttelettes de combustibles, dont les champs de concentration et de température peuvent être extraits à partir de l'exploitation de l'indicatrice de diffusion et des informations sur la phase (CORIA-Rouen) ; d'autre part, des suies issues d'une combustion incomplète, dont la caractérisation radiative globale est délicate (LCD-ENSMA-Poitiers).

On mentionnera pour finir les efforts de caractérisation du LEMTA-Nancy et de EM2C dans le domaine spécifique des UV.

En conclusion, la communauté française impliquée en rayonnement thermique occupe dans le domaine de l'expérimentation une position avancée à l'échelle mondiale, en n'hésitant pas à innover et à entreprendre des expériences difficiles. Mais il est peut-être souhaitable que tous les laboratoires de la communauté renforcent leurs efforts dans ce domaine : il ne peut y avoir d'expérimentation numérique! Notons, par exemple, que la communauté traite peu de l'expérimentation associée au rayonnement des agrégats ni, on l'a vu, de leur modélisation (en dépit toutefois de travaux menés au CORIA-Rouen) et doit poursuivre ses efforts dans le domaine, de la caractérisation des phénomènes de diffusion.

On aura vu que la communauté radiatiste française, fédérée autour du réseau ACRT est particulièrement active et impliquée dans l'ensemble de la communauté des thermiciens. Elle développe des travaux de caractérisation et d'innovation dans le domaine des propriétés radiatives, de la simulation des échanges éventuellement couplés et bénéficie de compétences complémentaires sur le plan expérimental. A titre de perspectives il lui faut poursuivre ses efforts et entreprendre des recherches dans de nouvelles voies parmi lesquelles :

- l'étude de cas où les éléments diffusants sont de géométrie complexe ou encore lorsque la diffusion est dépendante (EM2C-Paris et LEMTA-Nancy);
- l'étude de l'interaction du rayonnement avec la cinétique chimique dans les milieux réactifs et les plasmas à l'équilibre et hors équilibre, et avec les différentes structures des écoulements turbulents (EM2C,...) ;
- le renforcement d'activités dans le thème émergent des transferts radiatifs et transferts couplés aux micro et nano-échelles (transferts phonons-photons et interactions en développement au LET-Poitiers) ou encore les études instationnaires à l'échelle de la femto-seconde (CORIA-Rouen), des thématiques qui affirment la volonté de la communauté radiatiste de repousser les limites actuelles rencontrées sur le plan expérimental et dans le domaine de la simulation.

2. TRANSFERTS DE CHALEUR PAR CONVECTION DANS LES MILIEUX MONOPHASIQUES

2.1 Étude et contrôle des instabilités, turbulence

Les phénomènes liés aux instabilités dans les processus de transfert de chaleur et de masse sont au carrefour de plusieurs disciplines, mais ils concernent tous des problèmes se produisant dans des systèmes non-linéaires. Les systèmes purement diffusifs ne peuvent être le siège d'instabilités. Il s'agit donc de phénomènes apparaissant dans des configurations dominées par la convection ou le rayonnement (bien que les exemples soient ici très rares), on commence à considérer des problèmes non linéaires en conduction en tenant compte de variations fortes des propriétés thermophysiques des corps avec la température.

D'un point de vue thermique, ces problèmes d'instabilité peuvent conduire à de grandes modifications des processus de transfert avec des conséquences pratiques qui peuvent être importantes dans certaines applications (déplacement de points chauds, blocages, modification des circulations de fluides...).

Tout d'abord il convient de distinguer les problèmes d'instabilité des problèmes transitoires. Alors que les problèmes transitoires examinent l'évolution temporelle provisoire d'un système soumis à une sollicitation donnée, en général, ce que l'on appelle problème d'instabilité, n'est en fait que le résultat du passage d'un état d'équilibre à un nouvel état d'équilibre du fait de perturbations du système, la turbulence ou plus exactement les turbulences ne constituant que la solution ultime proposée par la nature pour converger vers un état d'équilibre très macroscopique, mais en fait un état en permanence hors d'équilibre. Plusieurs types d'instabilités doivent alors être distingués et leur classement ou leurs caractéristiques peuvent être effectués suivant que l'on considère la nature de l'instabilité (hydrodynamique, thermique), l'ampleur du domaine affecté par l'instabilité (locale ou globale), son mode de survie (convective ou absolue), les variables spatio-temporelles mises en jeu (chaos Lagrangien, turbulence).

L'essentiel des problèmes thermiques relève de telle ou telle instabilité, avec des recouvrements constants entre les différents types. Il faut aussi avoir à l'esprit que les outils d'analyse sont réellement conditionnés par le type d'instabilité rencontré. Des outils appropriés doivent donc être développés en dehors des outils d'analyse de type statistique qui sont mis à contribution de façon trop souvent approximative.

Si l'on considère les problèmes de stabilité locale ou globale, autant les applications potentielles sont nombreuses, autant les études restent parcellaires. Dans le premier cas, les problèmes sont essentiellement relatifs aux transferts aux interfaces fluide – paroi, des problèmes de type couche limite, leur examen détaillé est à considérer dans le cadre des aspects convectifs ou absolus des instabilités, ils sont souvent catalogués comme relevant des instabilités hydrodynamiques. Les instabilités globales affectent tout le domaine étudié par des changements généraux des circulations de fluide et des transferts de chaleur associés, ce sont de véritables exemples d'instabilités thermiques. Ces modes d'instabilité sont observables dans des systèmes convectifs, ils sont couramment rencontrés dans les applications mais plus rarement étudiés. On ne dispose pas d'outils très performants

permettant des prévisions réalistes, aujourd'hui on effectue le plus souvent des simulations numériques fines (coûteuses en temps de calcul et en matériel) qui ne constituent que des cas d'espèce et n'apportent pas de réponse universelle à ce genre de problème. Les problèmes relevant d'instabilités convectives ou absolues sont le plus souvent mal abordés ou mal connus. Les méthodes utilisées sont spécifiques et surtout la façon de poser les problèmes est propre à chacun des 2 types. Un mode d'instabilité convective doit être entretenu pour perdurer et apparaître dans les bilans thermiques macroscopiques. Une instabilité absolue s'auto-entretient, elle apparaît spontanément. On peut aussi se poser la question de la validité des résultats de simulation, sachant que ces problèmes non linéaires se caractérisent par des solutions multiples, possédant des bassins d'attraction. Des outils permettant de s'assurer de la validité de la démarche entreprise pour traiter d'un problème non linéaire de thermique restent à trouver. Les recherches relatives au chaos spatial sont aussi très porteuses et des exemples de plus en plus nombreux apparaissent. Ces phénomènes sont générés dans des configurations géométriques qui permettent l'étirement et le repliement des filets fluides en écoulement le plus souvent stationnaire. Les applications relatives au mélange notamment sont particulièrement intéressantes.

La connaissance de ces phénomènes liés au développement d'instabilités doit contribuer à l'élaboration de stratégies de contrôle des transferts ou transport de chaleur et de masse. Quelques tentatives de réalisation ont été mentionnées dans différents laboratoires. Les principales questions concernent, pour une géométrie et un problème donnés, la forme de la perturbation (amplitude fréquence temporelle ou spatiale) et sa localisation pour profiter d'un taux d'amplification satisfaisant. Des outils, notamment de simulation numérique se mettent en place, mais les expériences sont encore très rares. Cette façon d'aborder les problèmes de thermique dépasse de loin l'approche traditionnelle basée sur les études statistiques turbulentes, elle devrait permettre de trouver des solutions nouvelles et originales et de mieux comprendre des disparités de fonctionnement ou des anomalies de systèmes thermiques, d'innover dans le domaine.

Encore diffuse, la communauté qui travaille dans le domaine des instabilités s'organise dans des laboratoires répartis sur le territoire : Marseille (IRPHE, IUSTI), Lyon (LMFA), La région parisienne (LIMSI, FAST, EM2C, LETEM), Nantes (LTI), Poitiers (LET), Bordeaux (MASTER), Toulouse (IMFT), Pau (LTT), Reims (UTAP)...

2.2 Manipulation des structures thermo-convectives

Le concept de manipulation des structures thermo-convectives réside dans le caractère chaotique des écoulements de convection. Ceux-ci sont, en effet, particulièrement sensibles à de petites variations des conditions initiales qui conduisent les écoulements à des comportements pouvant être très sensiblement différents pour des différences infimes dans les conditions aux limites. Pour le thermicien, c'est la multiplicité des solutions des équations de Navier-Stokes qui est mise en jeu pour réaliser des objectifs de maîtrise et d'amélioration des transferts de chaleur ou de masse dans des conditions optimales. Une autre idée qui oriente ces recherches est liée à l'existence de phénomènes de résonance ou des phénomènes d'accrochage de phase, souvent constatés en physique. La question posée alors est la suivante, peut-on profiter de la dominance de périodicités dans les structures convectives pour provoquer une résonance qui ferait exploser les performances du dispositif en termes d'échange de chaleur ou de mélange par exemple ? Enfin, cette notion de manipulation est à rapprocher des idées de contrôle, notamment actif, qui sont mises en œuvre dans divers systèmes pour les piloter.

En l'état actuel des recherches, il s'agit, tout d'abord, d'étudier différentes configurations de façon à mieux connaître les différentes bifurcations apparaissant à mesure que le ou les paramètres caractéristiques varient et mettre en évidence les différentes solutions possibles pour une même valeur des paramètres. Le cas d'école qui a été le plus étudié concerne le problème de la convection naturelle de Rayleigh – Bénard qui constitue un exemple très pédagogique, dans la mesure où les différentes solutions sont pour la plupart clairement identifiables. D'autres situations de convection naturelle ont été elles aussi étudiées attentivement, elles concernent notamment les écoulements se produisant dans des cavités fermées avec la présence de gradients horizontaux de température. Différents cas de convection mixte ont été testés ou sont en cours d'examen. Nous pouvons citer, en particulier, des situations dites de Poiseuille – Rayleigh Bénard qui combinent, dans des écoulements en conduits horizontaux ou d'inclinaison variable, les effets des forces de poussée d'Archimède aux gradients de pression motrice imposés par des pompes ou des ventilateurs pour générer l'écoulement forcé. D'autres types d'instabilités sont aussi envisagés dans des situations de convection forcée externe au voisinage de surfaces (tourbillons de Görtler, par exemple) ou dans des conduits de forme adaptée (conduites variqueuses par exemple).

Il s'agit encore d'étapes de connaissances des phénomènes avec des études qui sont surtout destinées à la description des différents modes apparaissant dans les écoulements instationnaires (mais pas forcément turbulent) ou en phase de chaos spatial.

L'aspect manipulation proprement dit est encore embryonnaire. Quelques tentatives plus ou moins fructueuses ont été évoquées récemment. Des recherches sont développées pour examiner les modifications apportées aux écoulements et transferts par un apport de chaleur volumique, dans des situations de type Poiseuille – Rayleigh Bénard. Dans le domaine de la convection naturelle en cavité différentiellement chauffée, des simulations numériques et une expérience exploratoire n'ont pas pu mettre en évidence de phénomène de résonance permettant des modifications acceptables des transferts de chaleur moyens. L'excitation thermique des couches limites produit seulement des modifications locales et périodiques de la densité de flux de chaleur pariétale. Le cas du jet libre en convection mixte a été examiné, la manipulation des couches de mélange a consisté à créer des allées de Karman dans le sillage d'un petit obstacle cylindrique placé à la source des instabilités dominantes aux frontières du jet plan. La fréquence temporelle des oscillations du sillage était accordée au mode dominant dans le jet. Si des modifications significatives de l'entraînement du jet et donc du mélange et du transfert convectif, ont pu être observées, aucun phénomène d'accrochage ni même d'amplification exponentielle des structures cohérentes présentes en bordure des jets n'a été identifié. D'autres types de forçage des instabilités sont utilisés dans les jets à partir d'excitations acoustiques. Là encore, les résultats ne sont pas très démonstratifs et les applications délicates à envisager (bruit de l'excitation).

Dans le domaine de la convection forcée externe ou dans les échangeurs de chaleur, si l'on peut intégrer ces problèmes dans cette thématique, de nombreuses tentatives sont opérées pour générer au voisinage des surfaces d'échange, des écoulements turbulents ou au moins tourbillonnaires. De très nombreux dispositifs sont testés : rugosités, ailettes diverses, obstacles variés. Les recherches sur l'augmentation du transfert de chaleur convectif au voisinage d'une paroi devraient être gouvernées par l'application d'au moins 2 principes simples : tout d'abord, créer une importante composante de vitesse normale à la paroi. C'est dans la direction parallèle à celle des gradients de température qu'il faut transporter le fluide pour rendre le transfert de chaleur efficace. Il ne faut donc pas laisser les couches limites se développer, elles deviennent très vite inefficaces dans le transfert. Le second principe

concerne l'analogie de Reynolds. Pour que le rendement du système soit intéressant il faut décorréler le transfert de chaleur pariétal du frottement et des pertes de charge associées à la présence de rugosités ou d'obstacles.

Ces exemples illustrent seulement des tentatives de manipulation passive des structures plus ou moins cohérentes, présentes dans un écoulement, pour modifier le transfert de chaleur.

Les régimes variables temporellement constituent l'un des outils possibles de manipulation. Ces régimes sont étudiés notamment à Reims (UTAP).

L'étape ultérieure consisterait à mettre en place des systèmes réalisant du contrôle actif. La réalisation de démonstrateurs devrait être encouragée mais le problème n'est pas simple, il nécessite la mise en place de capteurs susceptibles d'observer le comportement du système contrôlé, d'algorithmes rapides d'analyse de l'état de l'écoulement et de décision d'une action à l'aide d'un actionneur qui reste à définir. Nous ne connaissons pas d'exemples de réalisation dans le domaine des transferts thermiques. Tout ou presque reste à faire dans ce domaine.

Les laboratoires dans lesquels les chercheurs examinent ces problèmes sont pratiquement les mêmes que ceux qui traitent des problèmes d'instabilité, les problématiques étant finalement voisines. On retrouve donc Marseille (IRPHE, IUSTI), Lyon (LMFA, CETHIL), Grenoble (LEGI/GRETH), la région parisienne (LIMSI, FAST, EM2C, LETEM), Rouen (CORIA), Nantes (LTI), Poitiers (LET), Bordeaux (MASTER), Toulouse (IMFT), Pau (LTT),...

2.3 Fluides complexes

Les fluides complexes sont des fluides non newtoniens et/ou thermodépendants ; leur loi de comportement rhéologique, non linéaire, joue un rôle important sur la structure de l'écoulement et par là sur ses propriétés diffusionnelles et donc sur le transfert de chaleur et de matière. Ces fluides sont souvent des solutions ou suspensions de macromolécules, éventuellement agrégées et, à plus grande échelle, des suspensions de particules de tailles variables, liquides (émulsions) ou solides (suspensions) ; on a alors affaire à des écoulements diphasiques. Parmi ces fluides complexes, une catégorie doit particulièrement retenir l'attention par ses applications ; il s'agit des fluides thixotropes dont la loi de comportement évolue au cours du temps en fonction de l'histoire subie par ces fluides, histoire mécanique (champ des contraintes) ou histoire thermique (champ des températures) ; l'évolution des propriétés rhéologiques est alors liée soit à une modification microstructurale par agrégation-désagrégation des éléments constitutifs de la suspension, soit à une transformation physicochimique, en général très sensible au champ des températures.

Les domaines d'application de tels fluides complexes sont très variés :

- ils sont omniprésents dans les industries alimentaires (produits laitiers, épaississants, conserverie...) pour lesquelles les traitements thermiques jouent en rôle majeur en termes de sécurité alimentaire ;
- ils sont également très répandus dans les industries pharmaceutiques, cosmétiques, chimiques (polymères) et pétrolières (extraction), dans la mise en œuvre des ciments et bétons très sensibles au champ thermique imposé, et bien entendu dans l'industrie du verre ;
- l'environnement est souvent confronté à ce type de fluides (coulées de boue) ;
- enfin, ces fluides sont répandus en biologie (le sang en étant le meilleur exemple).

Parmi les fluides complexes, il faut mentionner les mélanges diphasiques en cours de changement de phase (fusion-solidification), très utilisés pour le transport et le stockage de l'énergie. Mais ils sont examinés par ailleurs.

- Métrologie

Le développement de nouvelles techniques de mesure, non intrusives, joue et continuera de jouer un rôle essentiel pour la caractérisation des fluides complexes à l'échelle microscopique. En effet, la connaissance de la structure des suspensions à l'échelle micronique est essentielle pour comprendre donc modéliser le comportement macroscopique de cette matière molle en écoulement. La caractérisation de l'évolution des propriétés micro-rhéologiques au cours du temps, sous l'effet des cisaillements donc du champ des contraintes imposées par le mouvement et sous l'effet d'un champ thermique donné, permettra de proposer des cinétiques de structuration-déstructuration et d'en déduire des modèles susceptibles de décrire le comportement macroscopique des fluides en écoulement réel non isotherme. Les méthodes optiques : diffusion de lumière, diffusion des rayons X, pinces optiques, mais aussi la diffusion de neutrons permettent en particulier l'analyse de cette microstructure : granulométrie, concentration de microgels et de particules, déformation-orientation sous champ cisailé, agrégation-désagrégation... Elles vont connaître un développement significatif, à côté de la rhéométrie classique, macroscopique.

Souvent, le champ thermique joue un rôle décisif par son incidence directe sur les propriétés rhéologiques (consistance, viscosité) ou par les transformations physico-chimiques qu'il induit. La caractérisation des propriétés physiques de ces fluides complexes et leur thermodépendance est donc une nécessité.

- Ecoulement et transfert thermique.

C'est une véritable mécanique des fluides complexes non isothermes qui se met en place depuis une quinzaine d'années.

Ces fluides ayant en général une forte consistance, les nombres de Reynolds sont faibles et les régimes d'écoulement laminaires. Or, on sait que l'efficacité du transfert thermique est directement liée à l'existence d'un champ turbulent ou pour le moins, à celle de zones de recirculation. Les études de stabilité sur les fluides complexes sont donc essentielles et tous les moyens de créer des tourbillons et de favoriser ainsi le mélange, y compris par des actionneurs dédiés (mécanique des fluides active) doivent être recherchés.

D'autre part, pour de tels fluides, la diffusivité de quantité de mouvement est très supérieure à la diffusivité thermique (nombre de PRANDTL très élevé) et les couches limites thermiques, minces, se développent très lentement. On se trouve donc en présence de régimes thermiques non établis, ce qui impose la recherche de lois de transfert locales.

Le résultat recherché est la maîtrise d'un champ thermique le plus homogène possible, garantissant un niveau de température adapté (stérilisation ou réfrigération pour la conservation), mais évitant les températures excessives susceptibles de dégrader des macromolécules fragiles. Cette même fragilité impose dans toute opération d'agitation-mélange, une prévision et une maîtrise du champ des contraintes, afin d'éviter la dégradation de la matière molle traitée.

La convection naturelle, liée à la thermodépendance de la masse volumique, peut induire des mouvements secondaires faibles mais suffisants pour générer des zones de surchauffe importantes ; il convient d'étudier ces mouvements secondaires. Dans le cas des suspensions solides, l'interaction fluide-particules peut être source d'instabilité qu'il convient d'étudier, ainsi que leurs conséquences sur les propriétés convectives et il est nécessaire de connaître le champ thermique jusqu'au cœur des particules de taille significative.

La difficulté d'obtenir un chauffage uniforme conduit à la recherche de nouveaux modes :

- chauffage (électrique) pariétal à densité de flux contrôlée, avec le risque de surchauffe ;
- chauffage volumique par effet Joule des fluides conducteurs, chauffage volumique par micro-ondes.

- Mesures thermiques - modélisation – simulation numérique.

La progression des techniques expérimentales permettant la caractérisation des champs dynamiques et thermiques a été étonnante et permet désormais des mesures fiables dans ces milieux complexes. Citons pour l'exemple :

- la vélocimétrie laser à effet Doppler, pour les fluides transparents.
- la vélocimétrie ultrasonore pulsée, pour les fluides opaques ; elle permet la mesure des vitesses de glissement fluide-particule.
- l'utilisation de la fluorescence induite par Laser multi-bandes, qui permet la caractérisation simultanée de champs thermiques et de champs de concentration d'une espèce diffusante et qui, couplée à la vélocimétrie laser, permet une mesure directe de la diffusivité turbulente d'un scalaire passif (température ou concentration).
- la conductivité électrique, qui permet maintenant la caractérisation de champs thermiques 2D, au cours de procédés industriels de thermisation.

La connaissance des propriétés fines de ces fluides complexes en écoulement et la puissance actuelle des ordinateurs permet de proposer des modèles et une simulation numérique 2D, voire 3D, qui reposent sur la résolution simultanée des équations du mouvement et de l'énergie, associées à une loi de comportement adaptée et le plus souvent, à une loi cinétique de structuration-destructuration du fluide. De grands progrès sont à attendre dans ce domaine pour les prochaines années.

3. TRANSFERTS THERMIQUES AUX ECHELLES MICRONIQUES ET SUB-MICRONIQUES

3.1 Transferts aux micro-échelles

3.1.1 Convection aux micro-échelles et microcaloducs

La recherche permanente de compacité et de performances des nouveaux produits amène des contraintes de refroidissement qu'il faut résoudre à des échelles géométriques jusqu'alors rarement rencontrées. Les écoulements de fluides peuvent être soit monophasiques, soit diphasiques (ébullition ou condensation). Les différents types d'échangeurs envisageables aux micro-échelles sont des microéchangeurs, des échangeurs microstructurés, des microcaloducs et des « spreaders » (diffuseurs) diphasiques. Les domaines industriels concernés couvrent une gamme large de produits allant d'appareillages très anciens qui doivent être améliorés pour répondre à de nouveaux besoins ou de nouvelles normes jusqu'à des produits totalement neufs pour lesquels des solutions de refroidissement très innovantes doivent être trouvées. On peut ainsi citer quelques domaines d'applications où les microéchangeurs présentent un intérêt certain :

- Climatisation et réfrigération

La recherche permanente de la diminution de la charge en fluide frigorigène des systèmes actuels de climatisation automobile ou de réfrigération amène les constructeurs à exercer une demande pressante sur les scientifiques afin de réduire la taille des évaporateurs et condenseurs, ce qui nécessite une meilleure prédiction des performances. De même, le durcissement de la réglementation sur l'effet de serre amène la communauté internationale à considérer l'emploi du CO₂ comme fluide frigorigène avec un cycle transcritique. En dehors des enjeux scientifiques liés à l'absence de connaissances sur les lois d'échanges thermiques en régime supercritique, la très haute pression amène les constructeurs d'échangeurs à considérer l'emploi de mini- ou micro-canaux pour des raisons de tenue mécanique.

- Biotechnologies, pharmacie, médical, chimie fine, ...

La faible quantité de fluide (fluides rare, toxique, dangereux, cher) et le faible temps de réponse thermique sont des atouts pour certaines applications.

- Piles à combustible

Le refroidissement des piles à hydrogène envisagées pour les prochaines générations de véhicules automobiles implique la circulation d'un fluide dans des canaux de très petite taille. La recherche d'une bonne homogénéité thermique sur l'ensemble des plaques bipolaires constituant la pile conduit à envisager l'utilisation d'un écoulement diphasique pour bénéficier du caractère isotherme du changement de phase. Se pose alors la question de la connaissance des échanges thermiques dans les spreaders diphasiques.

Electronique

Le refroidissement de composants électroniques (composants 3D, composants de puissance, cartes, etc.) toujours plus performants oblige à miniaturiser des procédés jusqu'alors employés pour des systèmes de plus grande taille. On voit ainsi l'émergence de microcaloducs en silicium et de spreaders (diffuseurs) diphasiques dans lesquels des

microcanaux ont été gravés. Pour de plus fortes puissances à évacuer, il est envisagée d'avoir recours à des microboucles diphasiques.

- *Aéronautique*

Amélioration du refroidissement des aubes de turbines par micro-jets fluides.

Situation actuelle

De nombreux Laboratoires français de Thermique ou de Mécanique des fluides sont impliqués dans ces recherches. La plupart sont des laboratoires universitaires, souvent associés au département SPI du CNRS, mais bien d'autres dépendent d'autres Directions Scientifiques de cet établissement ou alors font partie d'organismes de recherche tels que le CEA. Certains centres de recherche privés développent également des travaux dédiés aux échanges thermiques en minicanaux pour des applications variées telles que le refroidissement d'aubes de turbines dans l'aérospatiale ou encore la caractérisation d'équipements en présence de fluides frigorigènes nouveaux. Bien que la liste soit incomplète, on peut tenter d'identifier les thèmes actifs :

- écoulements monophasiques en micro- et *mini-canaux* : cette activité est développée expérimentalement dans plusieurs centres tels que Grenoble (LEGI), Marseille (IUSTI), Nantes (LTN), Nancy (LEMTA), etc. L'un des enjeux des recherches en cours est de déterminer la frontière en dessous de laquelle les lois usuelles de pertes de charge (coefficient de frottement et transition laminaire/turbulent) et de transferts thermiques ne sont plus prédites par les corrélations usuelles établies aux échelles macroscopiques ;

- écoulements avec changement de phase en micro- et mini-canaux : les études actuelles de l'ébullition en milieu confiné (CETHIL Lyon, IUSTI Marseille) ou de la condensation (Univ. Paul Sabatier, Toulouse) ont pour objectif de déterminer les conditions d'apparition des instabilités, les différentes configurations d'écoulement, etc. Ces études expérimentales visent aussi à avoir une meilleure connaissance des paramètres physiques qui pilotent la dynamique des écoulements et les transferts thermiques avec changement de phase (Laboratoire d'Electrotechnique de l'INPG et INSA de Lyon) ;

- la simulation numérique est un outil qui peut également apporter sa contribution à l'optimisation de systèmes de petite taille. Ainsi, l'emploi de méthodes modernes telles que la Simulation des Grandes Echelles s'avère un complément intéressant à des recherches expérimentales toujours délicates lorsqu'elles s'appliquent à des systèmes géométriques complexes. Cette activité est fortement développée à Grenoble, tant au LEGI qu'au CEA. Elle s'avère indispensable pour interpréter les mesures thermiques effectuées sur les microsystèmes du fait des échanges couplés conduction (paroi) – convection (fluide) ;

- études des micro-systèmes : différents types de micro-systèmes sont actuellement étudiés : microéchangeurs, microcaloducs et micro-boucles diphasiques. Les microéchangeurs, étudiés principalement au GRETh-CEA de Grenoble, ont été réalisés en polycarbonate ou en profilé extrudé (polymère). Les microcaloducs, envisagés pour le refroidissement des transistors IGBT (LEG à Grenoble et CETHIL à Lyon), des composants 3D, etc., sont réalisés en technologie silicium. Leur intégration dans les composants électroniques est un atout certain, surtout pour les applications spatiales. Plus récemment, les recherches portent sur les spreaders diphasiques dont l'intérêt majeur est d'éliminer les points chauds. Les microboucles

diphases, déjà apparues aux Etats-Unis, ne font l'objet de recherches en France que depuis ces dernières années. Elles sont également réalisées en technologie silicium ;

- une activité transverse et essentielle est le développement de micro-capteurs de pression, de température, de vitesse, etc. On peut ainsi citer le Centre de Recherche sur les Très Basses Températures (CRTBT, Grenoble) qui développe des micro-capteurs et micro-actionneurs gravés dans du silicium. A titre d'exemple, des sondes de température en platine ont ainsi été implantées sur les parois d'un canal de silicium de 25 microns d'épaisseur. Le CREST de Belfort réalise des micro-thermocouples en fils de diamètres variant entre 0,5 μm et 50 μm . Un nano-thermocouple Chrome/Nickel déposé sur pointe de fibre optique (diamètre : 200 nm) a également été mis au point.

Enjeux

Les membres de la communauté travaillant sur les problèmes thermiques à petite échelle sont déjà structurés puisqu'ils ont l'occasion de travailler dans différents cadres tels que les Projets de Recherche Intégrés (PRI) du Programme ENERGIE du CNRS : ainsi le thème microéchangeurs de ce Programme, dirigé par Monique Lallemand de l'INSA de Lyon regroupe les laboratoires LEGI, CRTBT, GRETh (Grenoble), CETHIL Lyon), LEMTA (Nancy), LTN (Nantes), IUSTI (Marseille).

Un projet de refroidissement de piles à combustible par spreader, piloté par le LET de Poitiers, est également en cours. Une partie est consacrée aux spreaders en silicium qui permettent des usinages précis et diversifiés (CETHIL, Lyon en partenariat avec le LAAS à Toulouse).

Cette thématique rencontre celle des milieux poreux puisqu'un ensemble de microcanaux traversant un massif solide peut être assimilé à un milieu poreux et être donc modélisé à l'aide des outils spécifiques de ce domaine.

On peut ainsi citer les transferts thermiques en milieux poreux qui prennent naissance lors du stockage réversible de l'hydrogène dans les hydrures métalliques ou les matériaux carbonés : on est également là dans le domaine des petites échelles.

Au moins un Projet de Recherche a été retenu au récent appel d'offres de l'Action Concertée « Energie, Conception Durable » du CNRS. Ces activités présentent l'intérêt d'un enjeu scientifique et technologique fort mais permettent aussi des rencontres et interactions fructueuses entre les communautés « thermique » et « matériaux » .

Les activités hydrodynamiques en microfluidique sont quant à elles coordonnées par le Groupe de Travail Microfluidique de la Société Hydrotechnique de France (SHF) <http://www.meca.insa-tlse.fr/microfluidique/index.htm>

Signalons aussi que le thème « Thermique et Microtechnologie » a été retenu pour la Conférence de la Société Française de Thermique qui s'est tenue à Grenoble en Juin 2003.

Les directions de recherche suivantes pourraient être abordées avec intérêt :

- développement d'une instrumentation fine : la divergence des résultats scientifiques annoncés ces dernières années montre qu'un effort important doit être consenti en direction de mesures soignées (micro-instrumentation pour les mesures de pression, de

température, de vitesse ou de taux de vide). D'autres méthodes telles que les mesures électrochimiques de frottement de paroi pourraient aussi être appliquées aux écoulements en mini-canaux ;

- le développement de méthodes de mesure de température apporterait aussi des progrès dans l'étude de l'ébullition en milieu confiné : ainsi, des méthodes telles que la mesure par cristaux liquides non encapsulés (voir par exemple les récents travaux réalisés en Grande-Bretagne par Kenning et al. 2001) permettraient un suivi et une mesure plus fiable de la température de paroi, toujours délicate à quantifier. Des mesures instantanées (par rapport aux temps caractéristiques des phénomènes) et locales doivent être développées puisque, en ébullition, les phénomènes sont souvent instationnaires ;
- le recours aux techniques inverses permettant de remonter aux flux pariétaux dans les microcanaux à partir de mesures soit internes dans la matrice solide ou en surface par thermographie infrarouge par exemple mériterait également d'être examiné ;
- pour le développement d'échangeurs à microstructures ou les micro-échangeurs il faut trouver des méthodes permettant de fabriquer des microstructures de grande précision à bas coût. Leur dimensionnement nécessite des modèles simples prenant en compte la conduction axiale en paroi et la mise au point de modèles physiques pour les écoulements diphasiques en microcanaux. La distribution du fluide dans les microcanaux et l'arrangement de ces canaux sont des points qui seront à aborder.

3.1.2 Conduction dans les microstructures

3.1.2.1 Thermique des couches minces

Situation actuelle

Les techniques de dépôts sous vide permettent de structurer la matière en couches extrêmement minces, de quelques nanomètres à quelques microns d'épaisseur. Ces couches possèdent des propriétés spécifiques qui sont à l'origine d'avancées technologiques considérables, en particulier dans les domaines de l'électronique, l'optoélectronique, métrologie et le stockage de l'information.

Les propriétés thermiques des couches minces sont très différentes de celles des matériaux massifs du fait de leur microstructure spécifique, de la présence d'interfaces (joints de grains, interface formée avec la surface de substrat...) et des limitations de libre parcours moyen introduites par les diverses hétérogénéité - la conductivité thermique de certains matériaux peut être jusqu'à 100 fois inférieure à celle du matériau massif.

L'étude des propriétés thermiques des couches minces est aujourd'hui nécessaire à l'optimisation d'une grande variété de systèmes. Parmi ceux-ci, on peut citer les matériaux et assemblages électroniques et optoélectroniques de puissance (semi-conducteurs à grand gap SiC-GaN, hétéro-structures, super-réseaux quantiques), les systèmes de détection infrarouge et commutateurs optiques, les matériaux de stockage (disques optiques), les barrières thermiques des chambres de combustion et composants pyrotechniques. Du fait des échelles considérées (10^{-9} à 10^{-6} m), ces études impliquent des approches théoriques et expérimentales

nouvelles. Plusieurs laboratoires françaises s'intéressent à cette thématique de recherche. On peut citer les Laboratoires de Thermocinétique et de Génie des Matériaux de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, le CPMOH de l'Université de Bordeaux, le laboratoire d'Optique Physique de l'ESPCI, le LETI du CEA de Grenoble.

On sait que le rôle de la microstructure et des caractéristiques de l'interface formée lors de l'adhésion d'une couche mince sur une surface est considérable. L'interface est en réalité une couche de transition hétérogène, siège de défauts (ruptures de périodicité du réseau cristallin, dislocations, lacunes, impuretés et composés d'inter diffusion). Bien que jusqu'à 10000 fois plus faibles que les résistances introduites dans de simples contacts, cette résistance d'interface, de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-8} K.m²/W, explique les fortes diminutions de conductivité observées sur la plupart des matériaux amorphes et poly cristallins (Si₃N₄, ZrO₂, SiO₂, Diamant, Al₂O₃...). Des changements de taille et de structure de cristallites peuvent être également à l'origine de variations importantes de conductivité (zircone stabilisée à l'yttria ZrO₂-Y₂O₃, Si₃N₄). Par ailleurs, l'effet du procédé d'élaboration et des conditions opératoires (pression résiduelle, température de dépôt) a été bien mis en évidence sur des films métalliques (cuivre, or, aluminium). Les propriétés thermiques des métaux apparaissent très liées au nombre de sites et liaisons inter-atomiques formées à l'interface avec le substrat d'une part et aux dislocations introduites par les contraintes internes d'autre part.

Enfin, des travaux mettent en évidence la possibilité de modifier les propriétés thermiques des couches minces en texturant, à différentes échelles, les surfaces et interfaces et en changeant la nature des matériaux en contact.

Enjeux

La maîtrise des propriétés thermiques des couches minces est un enjeu scientifique important tant au niveau fondamental que des applications. Il s'agit de comprendre les phénomènes de transfert aux différentes échelles afin d'optimiser la structure de ces matériaux en fonction des propriétés et fonctionnalités recherchées. Ces recherches doivent contribuer au développement de nombreux systèmes et à l'accroissement de leurs performances (composants électroniques et optoélectroniques, dispositifs de stockage de l'information, systèmes électromécaniques et pyrotechniques, capteurs etc....)

- développement d'outils de caractérisation et d'analyse microthermique

Il apparaît nécessaire de développer des outils de caractérisation et d'analyse micro-thermique performants associés à une modélisation multi-échelles des phénomènes afin d'étudier l'influence de la microstructure et des caractéristiques des interfaces. Ces outils devraient faire appel aux techniques de microscopie thermique permettant le sondage des champs de température à la résolution du micron (microscopie par photo-réflexion, spectroscopie Raman, microscopie à champ proche) et celles mettant en œuvre des résistances électriques thermosensibles en couches minces. La caractérisation de couches de quelques dizaines de nm doit être envisagée.

Parmi les besoins, on peut citer la caractérisation des matériaux pour le stockage de l'information (disques optiques), des matériaux à faibles constantes diélectriques des nouvelles générations de circuits intégrés où les problèmes d'échauffements sont cruciaux (organo-silicés, SOI...)

Dans tous les cas, il convient d'étudier l'influence des structures en s'appuyant sur des modèles de connaissances et des analyses micro-structurales (MEB, MET, AFM, Diffraction RX...).

- conception de matériaux micro et nanostructurés

Les procédés couches minces et les techniques de micro-fabrication permettent d'envisager la conception de liaisons métallurgiques et revêtements performants, conducteurs de chaleur ou isolants thermiques. Les techniques de dépôt et de texturation des surfaces sont en effet susceptibles de produire des modifications de conductivité et de résistance thermique de contact. Il y a intérêt à élaborer des interfaces et structures à couches minces, organisées selon deux ou trois dimensions de l'espace et de trouver les conditions permettant d'adapter leurs propriétés aux fonctionnalités recherchées.

On peut citer quelques perspectives d'applications:

- la mise au point de liaisons métallurgiques et recharges conductrices de la chaleur capables d'évacuer les très fortes densités de puissance dissipée par des composants électroniques et optoélectroniques. Ces travaux doivent contribuer à l'avènement des semi-conducteurs à grand gAP (Carbure de Silicium, Nitrure de Gallium) qui pose de sérieux problèmes thermiques.

- la conception de barrières thermiques structurées en couches minces de type céramique-métal pour l'isolation des chambres de combustion et composants pyrotechniques. La conductivité thermique du matériau en jouant sur différents paramètres (nombre et structure physique et chimique des interfaces, nombre de sites de nucléation, géométrie des surfaces, désorientation des structures colonnaires etc...).

- l'élaboration de matériaux à propriétés contrôlées améliorant les performances de capteurs.

3.1.2.2 Micro-électronique

Le contrôle thermique est un point clef de la conception des équipements électroniques. En effet les caractéristiques de fonctionnement des composants et la fiabilité des systèmes dépendent fortement de la température. La miniaturisation et l'accroissement des fréquences de commutation conduisent à des densités de puissance dissipées de plus en plus élevées. Celles-ci atteignent maintenant des valeurs de l'ordre de 400 Wcm^{-2} en électronique de puissance. Le facteur thermique est ainsi devenu, dans de nombreux cas, le facteur limitant la puissance commutable.

Un circuit IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), utilisé par exemple pour mettre en forme le courant alimentant le moteur dans un véhicule à traction électrique, est composé d'un empilement pyramidal de différents blocs. La dissipation thermique a lieu sur les puces en silicium situées au sommet de l'empilement et on cherche à refroidir celui-ci à l'aide d'un dispositif extracteur de chaleur (radiateur en cuivre refroidi par un circuit d'eau sous-jacent, caloduc,...) afin de minimiser sa température de travail. Le niveau de température sur la surface supérieure des puces ($120 - 140^\circ\text{C}$) s'accompagne de gradients de température extrêmement élevés, de l'ordre de 50°C sur 7 mm dans son plan, gradients qui contribuent à la fatigue thermomécanique et à la dégradation progressive du circuit en fonctionnement cyclé. Le fonctionnement de tels circuit est étudié par les laboratoires de Génie Electrique comme le GREEN à Nancy ou le LEG et le LETI à Grenoble.

Les logiciels de simulation des transferts thermiques conductifs dans un IGBT reposent pour la plupart sur la résolution de l'équation de la chaleur par des méthodes purement numériques

(éléments finis - ou volumes finis par exemple). Ces méthodes, qui nécessitent une discrétisation spatiale volumique effectuée à l'aide d'un maillage plus ou moins fin des couches et des blocs, sont relativement lentes lorsque l'on cherche une simulation précise des transferts de chaleur en régime transitoire : une dimension (l'épaisseur des couches) est faible devant les deux autres et une démarche itérative (en temps) est alors nécessaire. Cet aspect n'est pas trop grave lorsqu'on désire effectuer une simulation directe mais il peut se révéler pénalisant lorsque l'on désire utiliser le code en démarche inverse : optimisation du positionnement des composants, inversion de mesures thermographiques pour revenir au flux extrait par l'extracteur. D'autres méthodes existent, basées soit sur des transformations spatiales (logiciel LAASTHERM par exemple), soit sur un seul maillage surfacique (méthode des éléments de frontière). Ces dernières méthodes ne sont pas encore très bien adaptées au comportement transitoire de ce type de système thermique. La méthode des quadripôles thermiques (LEMETA), qui est une méthode spectrale conservant une direction d'espace et utilisant des transformations intégrales ne nécessitant pas de maillage spatial, est bien adaptée aux systèmes multicouches multiblocs correspondant géométriquement et thermiquement à ce type de circuit grâce à l'introduction de matrices de conversion de spectre à l'interface de deux blocs de dimensions latérales différentes et qui permettent d'éviter ainsi une démarche itérative. D'autres méthodes semi-analytiques sont développées au LTN (Nantes) pour modéliser les transferts dans les nappes d'alimentation de tels circuits et au LET (Poitiers) pour la modélisation et la réduction de modèle sur les circuits et systèmes électriques.

Une modélisation crédible des transferts thermiques de ce type de circuit nécessite de caractériser thermiquement les matériaux en couches et les interfaces constitutives de ces empilements. On est alors dans le domaine de la caractérisation thermophysique des matériaux, caractérisation qui est actuellement effectuée au LTN (Nantes), au LEMETA (Nancy) et au laboratoire IXL (Bordeaux). Cette caractérisation est délicate du fait des faibles épaisseurs des différentes couches (couches minces, dépôts), de leurs conductivités thermiques élevées et du caractère non stable des graisses thermiques qui assurent le couplage thermique entre la base du circuit et le système extracteur de chaleur sous-jacent.

Le fonctionnement des circuits électroniques de puissance est étudié expérimentalement au Laboratoire des Technologies Nouvelles de l'INRETS (Arcueil). La mise au point d'outils de caractérisation d'empilements, de métrologie de température sur les IGBT est cruciale pour une bonne compréhension des phénomènes impliqués. Ceci passe par des techniques efficaces de mesure de température de tels circuits. Les mesures par thermocouples sont inapplicables du fait de l'environnement électrique défavorable (haute tension, induction électromagnétique) et les méthodes de contrôle et de mesure sont actuellement effectuées par mesure d'une tension de diode inverse qui constitue un paramètre thermosensible. Il s'agit de la température de jonction du transistor par la mesure de la chute de tension directe, entre la source et le drain, lorsqu'un faible courant constant traverse le transistor. D'autres techniques sont en cours de développement : mesure par phosphorescence induite U.V. réalisée au travers d'une fibre optique par exemple.

La thermographie infrarouge, avec les résolutions thermiques de quelques centièmes de degrés Celsius offertes par la dernière génération de caméras, constitue un formidable outil d'investigation du champ de température en face avant sur de tels circuits électroniques de puissance, si l'on accepte de désencapsuler le circuit et de le débarrasser du gel le recouvrant. La principale difficulté est liée à la nécessaire cartographie préalable du champ des émissivités et de la température équivalente de l'environnement radiatif, grandeurs qui sont loin d'être uniformes et qui peuvent être estimées par étalonnage et estimation de paramètres.

Un des verrous actuels du refroidissement des composants porte sur la base du système IGBT où l'on doit disposer un circuit fluide extracteur de puissance (échangeurs solide/liquide). La perspective d'utiliser le composant électronique lui-même comme fluxmètre est également envisagée : les mesures de la température et de la densité de flux en face avant permettent l'estimation de la densité de flux en face arrière. Ceci pourrait permettre de caractériser divers « extracteurs » de chaleur comme des radiateurs, des diffuseurs, des caloducs, ou des systèmes à micro-canaux, systèmes qui sont de plus en plus couramment utilisés en électronique et dont il est difficile actuellement de quantifier précisément les performances.

3.2 Transferts aux échelles ultimes des milieux continus : la nanothermique

Avertissement au lecteur : Toutes les figures citées dans cette section sont reportées en Annexe 1.

Etat des lieux

Les nanotechnologies constituent actuellement l'un des axes majeurs de l'activité économique. Elles sont au coeur des développements récents dans les domaines de l'information et de la biotechnologie. Ceci a été pris en compte dans les politiques scientifiques de la plupart des pays avancés technologiquement. Aux Etats-Unis, une initiative nationale de grande ampleur a été lancée en 2002. L'Europe a également lancé plusieurs programmes thématiques sur ce sujet. De nombreuses actions incitatives ont été mises en oeuvre en France : appel à propositions ACI 'Action Concertées Incitatives', mise en place du Réseau ministériel de recherche en Micro et Nano Technologie -www.rmnt.org, Club Nanotechnologie, projet Micro-NANoTEchnologies MINATEC à Grenoble dans le cadre d'un plan état-région -www.minatec.com.

Pour la plupart des applications, les échanges de chaleur posent des problèmes qui doivent être maîtrisés. Or les phénomènes physiques mis en jeu dans les problèmes thermiques changent de nature aux courtes échelles de longueur et de temps. La nanothermique ne peut se traiter que par la remise en cause des modèles utilisés traditionnellement en thermique. En effet :

- la conduction thermique est habituellement modélisée par une loi de diffusion : la loi de Fourier. Cette loi traduit le comportement diffusif des phonons. Elle n'est valable que pour des distances supérieures au libre parcours moyen des phonons qui varie entre 5 et 100 nm suivant les matériaux. Dès lors que les échelles de longueur mises en jeu deviennent plus petites, la loi de Fourier n'est plus valable et de nouveaux modèles s'imposent.

- la modélisation habituelle de la convection repose sur l'utilisation de la mécanique des fluides. Dès lors que les échelles de longueur mises en jeu sont inférieures au libre parcours moyen des molécules, la modélisation habituelle n'est plus adaptée. Par exemple, les échanges thermiques entre deux surfaces séparées de 50 nm se font par l'intermédiaire de molécules qui effectuent des vols balistiques entre les surfaces sans qu'il y ait de collisions moléculaires. Cette situation est caractérisée par un faible nombre de Knudsen, l'hypothèse de

milieu continu est abandonnée et l'on doit avoir recours aux approches statistiques, intervenant par exemple dans l'étude des gaz raréfiés, telle l'équation de Boltzmann pour la densité de particules.

- les échanges radiatifs sont eux aussi profondément modifiés aux courtes distances. Deux interfaces séparées d'une centaine de nanomètres peuvent échanger de l'énergie par le biais d'ondes de surface. Ces modes électromagnétiques sont confinés près des interfaces et ne participent pas du tout aux flux lorsque les distances sont supérieures aux longueurs d'onde typiques. Ils deviennent alors les modes principaux aux courtes échelles de longueur.

Au-delà des domaines dans lesquels les concepts de base de la thermique doivent être remis en cause, une autre thématique apparaît : celle de la métrologie à haute résolution spatiale ou temporelle. Il existe de nombreuses situations où les lois macroscopiques classiques restent valables mais dont l'application est compliquée du fait de la présence d'hétérogénéités locales: joints de grain, interfaces, charges de divers types dans les matériaux composites, défauts structurels... La détermination et le contrôle des propriétés thermiques requiert le développement de techniques permettant une mesure locale avec de très bonnes résolutions spatiale et temporelle.

La thématique possède trois caractéristiques fortes :

- Elle nécessite des études fondamentales : le développement des modèles nécessaires à l'ingénieur pour concevoir des systèmes à l'échelle du nanomètre implique un retour aux lois de base de la physique.
- Elle est intrinsèquement pluridisciplinaire : la conduction doit se traiter avec une approche reposant sur la physique statistique et la physique du solide, la convection fait appel à la physique des gaz raréfiés, le rayonnement ne peut se traiter correctement qu'avec l'optique électromagnétique.
- Elle est incontournable : de très nombreux systèmes nanométriques existent d'ores et déjà sans que leurs propriétés thermiques soient maîtrisées.

Au niveau national, des équipes universitaires et/ou CNRS de diverses provenances (SPI 10, SPM 4,5,6, STIC 8) se sont intéressées à cette thématique. Certaines d'entre elles se sont regroupés depuis deux ans au sein d'un groupe thématique de la Société Française des Thermiciens¹ et une dizaine d'entre elles ont constituées un Groupement de Recherche CNRS sous l'intitulé 'Micro et Nanothermique' (GDR 2503 : EM2C de L'Ecole Centrale de Paris, Laboratoire d'Optique de l'ESPCI, CETHIL de Lyon, Laboratoire d'Energétique et d'Optique/UTAP de l'Université de Reims, LPMO de l'Institut des Microtechniques de Franche-Comté, Laboratoire d'Etudes thermique de l'ENSMA Poitiers, Laboratoire de Thermocinétique de l'Ecole Polytechnique de Nantes, CPMOH de l'Université de Bordeaux, le LMDH de l'Université Pierre et Marie Curie, CEA Le Ripault et DGA Arcueil).

Au niveau international, les travaux effectués dans les laboratoires tels que le 'NanoHeat Transfer and Thermoelectrics Laboratory' au MIT, le 'NanoEngineering Laboratory' à UC Berkeley, le 'MicroHeat Transfer Laboratory', à Stanford, ainsi que la création récente par des personnalités de la communauté des transferts thermiques d'un Institut des Nanotechnologies (www.nanotechnologyinstitute.org) labélisé 'American Society of

¹Site internet à consulter :

http://www.em2c.ecp.fr/PAGES_CHERCHEURS/SEBASTIANV/index.htm

Mechanical Engineering' attestent de la vitalité de cette thématique aux Etats-Unis. A noter encore l'activité engagée depuis plusieurs années à l'université de Tsinghua ('Thermal Science Division', Pr. Z. Guo, Beijing, P.R. China) tant dans le domaine de la microfluidique que dans celui des transferts conductifs aux nanoéchelles. En Europe, il convient de citer les équipes anglaises dont celles de Glasgow et de Lancaster (www.lancs.ac.uk/users/spc-research/condmatt/micro/micro.htm) et, allemandes incluant celle de Wuppertal (www.electronics.uni-wuppertal.de) qui, bien que n'appartenant pas à la communauté des thermiciens, ont néanmoins contribué au développement des techniques de métrologie thermique locale.

- le transfert conductif

Lorsque les échelles étudiées diminuent, l'approximation de régime diffusif tombe, les réflexions par les surfaces du système et l'inertie thermique deviennent prédominantes. D'une part, la conductivité thermique n'est plus intrinsèque mais dépend de la géométrie et d'autre part la loi de Fourier n'est plus valable, il faut la corriger d'un terme d'inertie. Le premier effet conduit à une forte réduction de la conductivité thermique effective (figure 1), jusqu'à deux ordres de grandeur dans une nanostructure en fil comme l'indique la figure 2. C'est précisément ce phénomène qui a récemment permis de fabriquer des matériaux aux facteurs de mérite thermoélectriques inégalés. Le second effet se traduit par une estimation à la hausse des champs de température proches de la source thermique dans les premiers instants, c'est-à-dire ceux précédant quelques temps de LPM (Libre Parcours Moyen). Par exemple, la conductance équivalente d'un substrat de silicium décroît de deux ordres de grandeurs lorsque les fréquences d'excitation passent de 10 GHz à 1 THz. Les problèmes d'évacuation de la chaleur dans les futurs circuits nanoélectroniques apparaissent clairement.

Les phénomènes de confinement des porteurs d'énergie se manifestent lorsque la taille caractéristique du système devient inférieure à la longueur d'onde de ces porteurs. Leur impact en conduction n'est notable qu'aux dimensions extrêmement faibles puisque la longueur d'onde dominante des phonons ne vaut que quelques nanomètres. Leur contribution n'a pas encore été clairement distinguée de celle de la diffusion de surface.

Des outils de la physique statistique doivent être mis en œuvre pour décrire ces comportements: l'équation de Boltzmann écrite pour les phonons lorsque les dimensions sont supérieures à la longueur d'onde, et les équations de l'élasticité lorsque ce n'est plus le cas. Des approches de simulation directe telles que les techniques de la dynamique moléculaire et de Monte-Carlo peuvent aussi être utilisées.

- le rayonnement thermique

Le transfert radiatif est traité dans la plupart des problèmes d'ingénierie dans l'approximation de l'optique classique : la longueur d'onde dominante du rayonnement reste très inférieure aux dimensions du système. Dans cette hypothèse, l'équation de transfert radiatif permet le calcul des champs de luminance. Lorsque cette approximation tombe, les équations de Maxwell permettent le calcul du vecteur de Poynting et des flux thermiques échangés. Le coefficient d'échange entre deux surfaces d'or et d'arseniure de gallium parallèles vaut pour les grands écartements, la valeur classique du coefficient d'échange. Mais lorsque l'écartement approche la longueur de cohérence, des effets d'interférence apparaissent. Enfin, en deçà du centième de la longueur d'onde, les contributions des champs confinés deviennent

prédominantes. Le point à noter est l'augmentation considérable du flux échangé pour les valeurs les plus faibles de l'écartement. Des valeurs de coefficients de six ordres de grandeur supérieures à celles connues classiquement peuvent alors être obtenues: il y a apparition d'un nouveau canal de transfert. Cet effet est lié à la contribution du terme en r^{-3} dans l'expression du champ rayonné par un dipolaire élémentaire. Le spectre de la densité d'énergie au voisinage d'une surface de carbure de silicium devient quasi-monochromatique pour les faibles distances. Ce phénomène apparaît pour tout matériau polaire ou métallique comportant des phonons-polaritons ou des plasmons de surface. Cette propriété spectrale, liée à l'existence d'une grande cohérence temporelle, est prévue d'être exploitée pour la conversion d'énergie photovoltaïque en redistribuant toute l'énergie thermique sur la longueur d'onde du gap de la jonction. Certaines équipes tentent actuellement d'utiliser les propriétés d'émission des cristaux photoniques à des fins identiques. Enfin, la forte cohérence spatiale et temporelle qui existe au voisinage de la surface peut être projetée en champ lointain par le biais de réseaux diffractant : il devient possible de fabriquer des sources thermiques cohérentes!

- la convection

En convection, la physique est elle aussi modifiée lorsque les dimensions considérées sont inférieures à quelques LPM des particules. Cette quantité vaut environ 100nm dans l'air à pression ambiante et quelques angströms dans les liquides. L'équation de Boltzmann pour la densité de particules s'applique pour décrire ces transferts en régime de gaz raréfié déjà bien connus dans les domaines spatial et aéronautique. Alors que le coefficient d'échange vaut en convection naturelle dans l'air $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ lorsque les gradients sont inférieurs à la centaine de degrés Celsius, une valeur d'environ $10^6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ est obtenue dans le cas de deux plans parallèles distants d'une longueur inférieure au LPM. La microfluidique dont l'objet est essentiellement l'étude des écoulements en microcanaux est un domaine aux applications extrêmement prometteuses (biochip, lab-on-chip)

Thermique et nanotechnologies : Les enjeux

Les propriétés thermiques des nanomatériaux

La fabrication de nano-matériaux tient une place centrale dans la plupart des applications thermiques des nanotechnologies. Il s'agit de structures que nous avons en partie déjà évoquées incluant des briques élémentaires de taille nanométrique, tels les superréseaux (superpositions de films ultra-minces), les nanofils, les nanoparticules, ou les pores. Mais les structures aux propriétés les plus surprenantes sont les fullerènes et en particulier les nanotubes (figure 3). Ces nanotubes sont connus pour leurs propriétés électrique ou mécanique mais ils sont aussi les meilleurs conducteurs thermiques au monde avec une conductivité mesurée de $3000 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Les applications au domaine de l'énergie

La compréhension et le contrôle des nano-transferts ont déjà permis des progrès extrêmement sensibles dans le domaine de la conversion d'énergie thermoélectrique et semblent prometteurs concernant le thermophotovoltaïque. La nano-structuration de matériaux permet en effet d'inhiber ou d'exacerber certains canaux de transfert. Comme il l'a été illustré dans les figures 1 et 2, les mécanismes de diffusion des phonons sur les surfaces conduisent à une forte réduction de la conductivité thermique effective de structures en fils, films, ou multicouches. Cet effet a été exploité pour améliorer le facteur de mérite thermoélectrique ZT de matériaux, ce facteur étant proportionnel au rapport entre la conductivité électrique et la

conductivité thermique. En utilisant des super-réseaux d'alliages de tellure, de bismuth et d'étain, il est possible d'obtenir un matériau se comportant quasiment comme un verre vis-à-vis des phonons et comme un cristal pour les électrons. Ainsi, le ZT a récemment pu être augmenté à 2.3 (figure 4) à température ambiante alors qu'il est resté confiné au voisinage de l'unité pendant plusieurs décennies. Ce gain est essentiellement imputable à la chute de la conductivité thermique.

Les applications au domaine du stockage de données

L'utilisation d'un chauffage ultra-localisé est aujourd'hui considéré comme une approche prometteuse pour l'intégration de l'écriture sur support magnétique. Le seuil d'inversion de l'aimantation est en effet dépendant de la température comme l'indique la figure 5. En localisant un échauffement, il devient possible de réduire la taille des zones marquées. Les figures 6a et 6b montrent l'inversion d'aimantation de 'bits' carrés de 700nm de côté. Cette inversion a été réalisée en plongeant le substrat dans une champ magnétique alors qu'une pointe de microscope à force atomique chaude est mise en contact avec le plot.

La fiabilité et la durabilité des circuits intégrés électroniques dépend des niveaux et des gradients de température atteints. L'analyse thermique à toutes les échelles (de la carte à la structure de composant) est indispensable à leur élaboration. Les densités de flux autorisaient jusqu'à maintenant une approche à l'échelle du boîtier, choisi simplement en fonction de la dissipation de la puce. Mais la nécessité d'éliminer les gradients de température au sein de la puce oblige à intégrer dans la conception, la répartition des charges thermiques. Le développement de logiciels gérant ces contraintes doivent s'appuyer sur les données de dissipation propres à chaque module du circuit intégré. Actuellement, les dimensions minimales des pistes en technologie CMOS étant de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, des outils de modélisation et de métrologie non conventionnels doivent être utilisés. Dans l'outillage mis à la disposition des concepteurs de MEMS (systèmes microélectromécaniques), les effets thermomécaniques ou thermoélectriques (Joule, Thomson, Peltier et Seebeck) sont souvent utilisés ou apparaissent de manière colatérale. Pourtant, de nombreuses inconnues existent concernant les paramètres thermiques permettant d'établir les bilans thermiques. Les coefficients d'échange convectif, par exemple, ne sont pas donnés dans la littérature pour des surfaces de dimensions submillimétriques.

Les techniques de métrologies thermiques aux nanoéchelles

Différentes métrologies thermiques à haute résolution spatiale sont en cours de développement. Les plus confirmées, s'appuyant sur les techniques de photothermie, sont assez répandues en France. Les méthodes optiques de photo-réflexométrie utilisant des sources pico et femtosecondes modulées sont à l'étude mais produisent principalement des informations qualitatives du fait des incertitudes sur les coefficients de réflexion. Alors que ces dispositifs optiques restent limités par la diffraction, les microscopies à force atomique ou optique à sondes locales semblent prometteuses mais se confrontent aux problèmes des nanosondes thermiques : faisabilité, fragilité, reproductibilité. Depuis quelques années, beaucoup d'efforts sur le plan international sont consacrés à la conception de nouvelles sondes, en utilisant en particulier les techniques les plus avancées de la microélectronique, pour permettre une analyse fiable aux nanoéchelles. Un exemple de nanothermocouple à l'extrémité d'une pointe AFM est donnée dans la figure 7.

Conclusion

La compréhension des transferts thermiques aux nano-échelles est en train de bouleverser les technologies de la conversion d'énergie et celle des matériaux à haute performance (superisolants/superconducteurs). Cette compréhension reste aussi indispensable à la maîtrise de l'intégration des MEMS ainsi que de celle des puces électroniques ou biologiques. La thématique 'nanothermique' est appelé à apparaître comme un fort point d'accroche sur un grand nombre de projets de développement des nanosystèmes.

4. TRANSFERTS THERMIQUES DANS LES MILIEUX HETEROGENES

4.1 Transferts de chaleur dans les milieux diphasiques

4.1.1 Transferts dans les milieux diphasiques liquide-gaz, ébullition, condensation, évaporation

Lors de l'ébullition ou de la condensation d'un fluide, les transferts de chaleur augmentent considérablement par rapport à des situations analogues sans changement de phase. Ces phénomènes interviennent dans de nombreux domaines tels que l'électronique, l'aéronautique, le spatial, l'automobile, les échangeurs de chaleur, les réacteurs, les piles à combustibles ... Les échelles d'applications varient considérablement, depuis celles relatives à la production de vapeur de process et de l'électricité dans les centrales (à combustion, nucléaires) jusqu'à celles du refroidissement des piles à combustible et des composants électroniques. Un autre type de problème concerne celui des transitions rapides de phases. Celles-ci peuvent conduire à des explosions, provoquées par le changement de phase liquide-vapeur. Des accidents ont eu lieu dans les fonderies, les industries du papier, lors de l'étalement de gaz naturel liquéfié sur l'eau ... Dans l'environnement naturel, c'est par exemple, l'explosion catastrophique du Perbuatan à Krakatoa (île d'Indonésie) partiellement détruite en 1883 ou plus récemment celle du mont St Hélens (Etats Unis).

Problématiques

Les phénomènes de transferts associés au changement de phase liquide-vapeur relèvent de mécanismes physico-chimiques, de la mécanique des fluides et de phénomènes interfaciaux.

Au niveau de la recherche, il existe de très nombreux travaux menés depuis plusieurs décennies à des fins de compréhension des mécanismes mis en jeu, de modélisation et de dimensionnement des appareils. La complexité des phénomènes mis en jeu n'a pas permis d'accéder à un degré de connaissance suffisant. De nombreux aspects demeurent actuellement non élucidés et difficiles à prédire. Depuis la dernière décennie, les techniques de calcul associées au développement des moyens de diagnostics permettent d'aborder, de manière originale ces phénomènes.

Les phénomènes de transferts mettant en jeu l'évaporation, l'ébullition ou la condensation sont très répandus dans de nombreux domaines de l'énergie (centrales thermiques classiques, nucléaires, ...), l'industrie de transformation (agroalimentaire, sidérurgie, plasturgie, pétrochimie, ...), le bâtiment (conditionnement d'air, ...) et l'environnement naturel (géothermie, climats, ...). Il existe aussi un regain d'intérêt, dans les nouvelles technologies où le changement de phase est mis en jeu pour intensifier et contrôler les échanges thermiques. Les techniques de dimensionnement des appareillages sont souvent issues d'approches empiriques et restent de ce fait très limitées. Elles demeurent inapplicables à de nombreuses situations. Bien que présentant des avantages indéniables pour les performances d'échanges de chaleur, ces phénomènes peuvent, dans certaines conditions, provoquer des dommages importants (explosions, instabilités de fonctionnement, vibrations...). Il est de ce fait impératif de les maîtriser pour toute application dans un procédé.

Les technologies existantes s'appuyant sur les échanges diphasiques sont très nombreuses et on peut ainsi mentionner les échangeurs diphasiques (bouilleurs, condenseurs, caloducs, ...), les Séchoirs ainsi que plus généralement le séchage (boues, agro-alimentaires, bois ...), l'industrie électro-nucléaire (sûreté, stockage des déchets), les réacteurs gaz-liquide en génie chimique ou encore la fabrication d'air liquide (Liquéfaction des gaz purs)

Des technologies faisant appel aux échanges diphasiques émergent. On peut citer les piles à combustible, les micro échangeurs et les micro caloducs, les boucles diphasiques en aérospatial, le mélange de fluides non azéotropiques et enfin les pompes capillaires.

Enjeux scientifiques

Les principaux enjeux scientifiques peuvent être regroupés suivant trois axes :

Le premier concerne la physique du changement de phase et des interfaces avec en particulier la compréhension des phénomènes de nucléation, des transitions rapides de phase, des transferts aux interfaces et des instabilités. De même les phénomènes de coalescence et de fragmentation, de mouillage et de ligne triple (interface solide-liquide-vapeur) et de changement de phase aux mini et micro-échelles méritent des approfondissements. Plus généralement l'étude de la convection en diphasique, et celle des effets transitoires spécifiques associés, constitue un enjeu scientifique majeur.

Le second axe est lié aux outils de simulation/prédiction à développer : les lois de transfert de chaleur, les cartes d'écoulement, les transferts aux mini et micro-échelles, les lois de fermeture dans les équations de bilan, les modèles d'écoulements et d'interfaces.

Le dernier axe est celui de la métrologie, de l'instrumentation et des techniques de mesure. On peut citer la mesure des taux de vide, et les mesures locales, par exemple celle des transférés entre fluide et paroi aux micro-échelles.

Cette thématique est très vaste. Elle s'inscrit par exemple au cœur de l'action concertée « ENERGIE » du CNRS et du Ministère de la Recherche et Nouvelles Technologies (MRNT). Dans le cadre du réseau AMETH (AMélioration des Echanges Thermiques) plusieurs sujets concernent cette thématique et différents laboratoires contribuent actuellement au développement de ces recherches.

Les principaux laboratoires recensés à ce jour à l'échelle nationale ainsi que leurs domaines de recherches sont précisés ci dessous :

| | |
|--------------------------|--|
| CETHIL (Lyon) | Ebullition et micro caloducs |
| CREST (Belfort) | Condensation |
| IMFT (Toulouse) | Ebullition convective, pompe thermo capillaire |
| IUSTI (Marseille) | Ebullition et évaporation |
| LE (Toulouse) | Condensation – Pompe thermo capillaire |
| LEGI (Grenoble) | Ebullition et condensation |
| LEMTA (Nancy) | Ecoulements diphasiques et ébullition |
| LET (Poitiers), | Caloduc |
| LIMSI (Orsay) | Ebullition, |
| MASTER (Bordeaux) | Interface , changement de phase |
| Ecole des Mines de Douai | Condensation |
| LME (Valenciennes) | Evaporation, Caloducs |

On peut également citer le CEA (Grenoble), et le GRETh (Grenoble).

4.1.2 transferts de chaleur dans des écoulements particules / fluide

Situation actuelle (en France)

Les écoulements chargés de particules (particules solides ou gouttelettes) se rencontrent dans de nombreux procédés industriels ou situations naturelles. Parmi les cas où les transferts de chaleur doivent être pris en compte, on peut citer à titre d'exemples :

- les écoulements gaz-solide confinés en régime dilué (transport pneumatique, séchage pneumatique) ou dense (échangeurs à lits fluidisés, chaudières à charbon pulvérisé) ;
- les écoulements gazeux à grande vitesse autour d'obstacles (véhicules spatiaux en atmosphère chargée de particules) ;
- les écoulements gaz-gouttelettes (sprays et rideaux d'eau, zones de régime dispersé des condenseurs et évaporateurs, combustion diphasique) ;
- les écoulements liquide-solide (généralement avec changement de phase, comme dans les applications du type frigoporteurs diphasiques traitées au CETHIL, évoquées par ailleurs dans ce document)

Dans les écoulements gaz-solide confinés à faible ou moyenne concentration (transport pneumatique, échangeurs à lits fluidisés), on observe une modification non monotone du coefficient d'échange gaz-paroi. En effet, à faible concentration (rapports des débits massiques phase dispersée/phase gazeuse inférieurs à 1 environ), la plupart des études expérimentales (peu nombreuses et malheureusement non françaises) indiquent une diminution du coefficient d'échange, suivie d'une augmentation, et donc d'une amélioration du transfert de chaleur, à plus fort chargement en matière dispersée. Des équipes françaises (LEMMA, IMFT) s'intéressent depuis plusieurs années à la modélisation et à la prédiction numérique de tels effets dûs aux changements provoqués par la phase dispersée dans la dynamique de l'écoulement, et particulièrement à la modulation de la turbulence, encore difficile à modéliser tant dans les approches eulériennes-eulériennes (« modèles à deux fluides ») qu'eulériennes-lagrangiennes. A cet égard, les études plus fondamentales menées par simulation directe de la turbulence (DNS et LES) peuvent conduire à de précieuses avancées. Du point de vue expérimental, les données acquises restent trop peu nombreuses et les études existantes, relativement anciennes, insuffisamment documentées, la seule contribution française résultant d'une collaboration franco-japonaise impliquant le LPMMH (ESPCI).

D'autres applications, telles que la protection d'incendie par rideau d'eau ou les chaudières à charbon pulvérisé par exemple, mettent en jeu des phénomènes de transferts couplés convectifs-radiatifs, qui font l'objet d'études au LEMMA pour ce qui concerne les rideaux d'eau.

Les transferts combinés de chaleur et de masse apparaissent dans les problèmes de dispersion turbulente de gouttelettes en cours d'évaporation, qui ont suscité des travaux au LESP-CORIA, ou de séchage pneumatique ou à vapeur d'eau surchauffée (TREFLE). Les transferts de masse en écoulements gaz-particules en conduite sont également abordés au LEMMA.

Concernant les écoulements gaz-particules réactifs, l'application la plus importante est la combustion diphasique, dont la modélisation et la simulation numérique font l'objet de recherches dans différents laboratoires tels le CORIA où sont menées des études expérimentales par PDA (Phase Doppler Anemometry), FIL (Fluorescence Induite par Laser) et par des techniques arc-en-ciel auxquelles s'associent des études numériques par LES et DNS, l'IMFT (instabilités et contrôle actif de la combustion), le laboratoire EM2C-ECP (modélisation, simulation numérique), l'IRPHE et le LEMTA (FIL).

Applications : secteur aérospatial, production d'énergie (nucléaire, pétrole, charbon), environnement (rejets industriels, traitement des déchets, protection incendies,...), séchage, échangeurs, chaudières à charbon pulvérisé, plasmas, génie chimique (réacteurs gaz-solide).

Partenaires: industries énergétiques, métallurgiques, aéronautiques, agroalimentaires, GRETh.

Connexions : mécanique des fluides, turbulence, combustion, aérosols, physique statistique, géophysique, recherches biologique et médicale, électromagnétisme (pour le développement de la métrologie optique sur la phase dispersée).

Autres pays fortement impliqués : Japon, USA, G-B., Allemagne, Canada, Russie.

- Enjeux scientifiques et technologiques

Parmi les perspectives s'ouvrant à court et moyen terme en vue de l'optimisation des procédés industriels ou de la maîtrise de l'environnement et des phénomènes naturels, et compte tenu de l'émergence de nouvelles idées ces dernières années, on peut citer :

- le contrôle actif du transfert de chaleur (« fluides multiphasiques intelligents ») ;
- l'optimisation des transferts thermiques et la meilleure prise en compte des modifications induites dans les procédés par différents types de particules en suspension (exemple : endommagement et modification du transfert chaleur dans les turbines à gaz ou les tuyères de moteurs fusées, maîtrise des transferts dans les propulseurs spatiaux à ergols solides) ;
- la maîtrise du traitement des rejets, la protection contre les incendies par rideaux d'eau ;
- la production d'énergie thermique (en relation avec combustion : brûleurs, foyers, ...), l'amélioration des échangeurs (encrassement,...), la réduction des émissions polluantes sur les foyers (CO, CO₂, NOx...).

- Enjeux scientifiques

Bien que les progrès réalisés dans la connaissance et les moyens de prédiction des écoulements gaz-particules aient été considérables depuis une dizaine d'années, de nombreux enjeux liés à l'acquisition de données expérimentales et à la modélisation se dégagent actuellement. On peut relever, plus précisément :

- le manque de données expérimentales précises et complètes sur les propriétés thermiques locales des écoulements chargés de particules ;
- le besoin de techniques expérimentales non intrusives (température locale de phase dispersée par exemple) ;

- pour ce qui concerne la prédiction des écoulements et des transferts, l'amélioration des simulations passe surtout par une meilleure modélisation des interactions particules-turbulence, et une maîtrise des diverses échelles mises en jeu.

Les avancées attendues, tributaires également des perfectionnements à venir des techniques de calcul, seront sans aucun doute bénéfiques à d'autres domaines scientifiques plus éloignés du cadre strict de la thermique (océanographie, météorologie,...).

4.1.3 Milieux diphasiques solides-liquide, avec changement de phase

Les transferts thermiques avec changement de phase solide-liquide interviennent dans un grand nombre de procédés industriels et de situations naturelles ou environnementales dont les exemples foisonnent. L'une des particularités de ces problèmes est de toujours se situer à l'intersection de plusieurs disciplines, où les transferts thermiques à proprement parler sont associés à d'autres mécanismes (physique des interfaces en solidification, mécanique des fluides en glaciologie, transfert de masse dans les procédés d'élaboration, etc.) tout en constituant un aspect clé de ces couplages. L'autre caractéristique - assez classique dans les transferts en milieu diphasique solide-liquide, mais ici essentielle - est celle de la diversité des échelles spatiales et temporelles où ces transferts interviennent, rendant particulièrement aiguë la définition des niveaux de modélisation pertinents.

Champs d'application

Les domaines appliqués où ces problèmes se manifestent sont très variés. Il s'agit par exemple de la métallurgie et de la plasturgie (élaboration et mise en forme de matériaux), des sciences de la terre, du génie des procédés, de la thermique de l'habitat, et également du domaine de l'énergie, à travers les systèmes de stockage "chaud" ou "froid". Dans tous ces champs d'application des compétences spécifiques en physique des matériaux, en chimie et en transferts thermiques sont requises pour analyser les couplages.

Enjeux scientifiques

Au-delà du caractère spécifique de chaque problème de changement de phase solide-liquide, ce champ de recherche fait émerger des enjeux très actuels qui relèvent des problématiques scientifiques détaillées ci-dessous.

- La *modélisation multi-échelle* concerne le développement de modèles macroscopiques prenant en compte la microstructure. Un premier exemple réside dans le domaine de la solidification d'alliages où la prise en compte de cette dernière constitue un enjeu important. Un deuxième exemple porte sur les transferts interfaciaux dans le cas de la solidification d'un matériau sur une surface rugueuse : la modélisation microscopique est incontournable pour interpréter l'évolution des résistances thermiques de contact à l'échelle macroscopique. La mise au point de techniques appropriées (homogénéisation,...) doit être simultanée.
- Le développement de techniques de *modélisation d'interfaces mobiles* est particulièrement critique pour la simulation de ces processus. Au-delà des techniques classiques (suivi de front, formulation enthalpique), on assiste au développement de techniques alternatives (champ de phase, Boltzmann sur réseau) qui peuvent ouvrir certaines perspectives à la modélisation des transferts.

- La *physique couplée* présente dans la plupart de ces processus (double diffusion, thermomécanique, solidification hors équilibre, etc.) conduit à aborder la modélisation de ces couplages de façon plus fine que par le passé. Le thermicien doit donc faire appel à des compétences complémentaires (science des matériaux notamment). L'inverse est évidemment vrai.
- Par ailleurs un besoin transversal à tous les secteurs d'activité mentionnés ci-dessous concerne les problèmes de *métrologie et de mesure* en présence de changements de phase, domaine où les techniques dites inverses d'identification et d'optimisation trouvent un champ de développement très actif.

Situation actuelle

De nombreux laboratoires de la discipline sont impliqués dans des travaux sur le changement de phase solide-liquide.

Dans le domaine de la *Thermique du bâtiment*, des études anciennes, maintenant abandonnées, ont été consacrées au stockage par chaleur latente, aussi bien pour le tertiaire ou l'habitat résidentiel que pour des locaux agricoles (serres, élevage). Ces travaux ont été conduits en général dans le cadre du développement des applications de l'énergie solaire, où l'effet de lissage de la chaleur latente semblait constituer une réponse adaptée à l'intermittence de la source. Des études expérimentales et numériques de composants à chaleur latente pour le stockage dans le sol ou les parois, pour des systèmes passifs (captation-stockage) ou actifs (échangeurs), ont été menées au LTN ou au FAST, entre autres.

Les matériaux à changement de phase (MCP) utilisés dans ces travaux sont pour l'essentiel des paraffines ou des sels hydratés, produits qui posent des problèmes de sécurité ou de stabilité. Ces applications pourraient susciter de nouveaux développements *via* la recherche de composants à forte inertie thermique pour le bâtiment: il s'agit de développer de nouveaux matériaux (composites à base graphite, eutectiques, etc...) et de les intégrer dans des éléments de paroi. Plusieurs projets dans ce sens pourraient s'inscrire dans le Programme Energie du CNRS (IMP, TREFLE, LaTEP, etc..).

Les applications en *thermique industrielle*, toujours essentiellement liées au problème du stockage d'énergie, autrefois développées pour le stockage à moyenne température au CENG, se développent actuellement autour du stockage froid (conservation d'aliments, entre autres). L'étude du conditionnement, la modélisation et la mise en œuvre de nodules de stockage utilisant l'eau comme MCP, encapsulée dans des polymères ou des gels physiques, font l'objet d'études actuelles (LBHP, LaTEP, CETHIL, UR GPAN du Cemagref, GRETH/CEA). Dans la même optique, notons le développement de travaux consacrés à l'étude de frigoporteurs utilisant le changement de phase solideliquide à des températures négatives (applications frigorifiques) ou positives (application à la climatisation) pour augmenter la capacité calorifique du fluide: coulis de glace ou suspension de capsules ou de particules de gels poreux contenant des matériaux à changement de phase (LBHP, LTN, LaTEP, CETHIL, UR GPAN, GRETH/CEA,...). Pour l'ensemble de ces opérations, un enjeu important consiste à développer des outils de dimensionnement, en particulier pour les échangeurs utilisant ce type de fluides.

Les procédés d'*élaboration et de mise en forme de matériaux* sont pour une large part concernés par les problèmes de ce type. On peut citer l'étude et la modélisation de la solidification d'alliages métalliques, couplant transferts thermiques, mécanique des fluides et science des matériaux. Ces applications sont à l'origine d'une activité de recherche expérimentale et numérique très intense (EPM-MADYLAM, TREFLE, FAST, ainsi que le LSG2M et le CEMEF).

Dans le domaine de la plasturgie et de l'élaboration de matériaux polymères, les transferts thermiques sont couplés avec des cinétiques complexes de changement d'état hors équilibre sous haute pression (LTN, CETHIL,...).

On trouve aussi de nombreuses applications de ces mécanismes de transfert dans différents procédés de purification (EPM) ou de traitement de surface par projection thermique (SPCTS, LERMPS, ...). Là encore les problèmes de solidification hors équilibre se posent.

Les applications en *sciences de la terre* (rappelons que les travaux pionniers de Lamé et Clapeyron (1830) ou Štefan (1890) portaient sur la fusion de la banquise) sont aussi importantes en glaciologie (problèmes de permafrost ou d'érosion de vallées glaciaires), voire en planétologie (formation de structures sur Mars). Un intérêt ancien pour la fusion du manteau dans les zones de subduction ou pour les chambres magmatiques a motivé de nombreuses études expérimentales assez proches de celles développées pour l'étude de la solidification d'alliages. La percée des méthodes de simulation numérique dans ces domaines peut être l'occasion pour les laboratoires thermique de valoriser leurs acquis. Des collaborations avec l'Institut de Physique du Globe, Orsay-Terre ou le LGGE par exemple, sont envisageables sur ces thématiques.

D'autres applications en biologie (cryochirurgie), en agro-alimentaire (cryoconservation, élaboration de crèmes glacées) ou en sécurité nucléaire (études de la solidification du corium à l'IRSN) doivent être mentionnées. Elles sont à l'origine de problèmes nouveaux dans le domaine de la compréhension et du contrôle des mécanismes couplés de transferts de chaleur et de masse avec changement de phase solide-liquide.

En résumé, les différents laboratoires ayant des compétences sur ces sujets sont les suivants:

| | |
|--------------------------|--|
| CEMEF (Sofia) | modèles de solidification |
| CETHIL (Lyon) | systèmes de stockage froid, coulis de glace, frigoporteurs diphasiques, plasturgie |
| EPM (INP Grenoble) | expérience et modèles de solidification |
| FAST (Orsay) | expérience et modèles de solidification, projection thermique |
| IMP (Perpignan) | matériaux nouveaux |
| IUSTI (Marseille) | modélisation d'interfaces mobiles |
| LaTEP (Pau) | systèmes de stockage froid, coulis de glace, frigoporteurs diphasiques |
| LAGEP (INSA Lyon) | solidification de produits agro-alimentaires |
| LBHP (Paris) | matériaux nouveaux, frigoporteurs diphasiques |
| LSG2M (Nancy) | solidification, élaboration d'alliages |
| LTN (Nantes) | plasturgie, solidification, coulis de glace |
| TREFLE (Bordeaux) | modélisation du changement de phase, étude de composants |
| GRETH/CEA (Grenoble) | frigoporteurs diphasiques |
| URGPAN/CEMAGREF (Antony) | frigoporteurs diphasiques |

4.1.4 Transferts dans le milieu diphasiques liquide-liquide

- Transfert de chaleur et mélange

L'état des connaissances sur le transfert de chaleur et/ou le mélange d'un adjuvant liquide dans des liquides très visqueux et en continu par le phénomène qu'on appelle couramment advection chaotique a fait un spectaculaire bond en avant pendant les trois dernières années. Dans ce type de liquide il est hors de question de promouvoir la turbulence pour accroître la vitesse de transfert, d'une part, parce que le coût énergétique serait prohibitif et d'autre part parce que souvent ce type de liquide est composé de grosses molécules qui auraient tendance à casser sous l'effet d'un fort cisaillement. Les liquides en question sont, par exemple le propergol liquide (SNPE), les pâtes, ainsi que les produits rencontrés dans l'industrie agro-alimentaire (confitures, chocolat liquide, etc).

Dans le phénomène d'advection chaotique une particule suit une trajectoire chaotique (comme dans un écoulement turbulent) alors que l'écoulement est laminaire. En continu, ceci est possible soit par une modification de la géométrie du tube soit par un mouvement périodique des parois. Le premier cas concerne l'écoulement dans un tube hélicoïdal «twisté», étudié par le LTN (Nantes). Simple à réaliser, sans pièce tournante, le dispositif ne permet cependant pas de contrôler le mélange par une action de l'opérateur. Le second cas, pour lequel l'état de l'art s'est bien développé, concerne des appareils tubulaires, le fluide s'écoule dans l'espace annulaire entre deux cylindres en rotation. L'inconvénient réside dans la nécessaire mise en rotation des deux cylindres. Le LEMTA (Nancy) a montré que si la géométrie (l'excentricité d'un cylindre par rapport à l'autre), et le débit sont fixés, il est possible de mélanger un adjuvant ou accroître sensiblement la vitesse de transfert en modulant correctement la vitesse de rotation des cylindres. Une autre voie étudiée par l'équipe de Nantes est de rajouter une dépendance temporelle à l'écoulement de Dean alterné, en le pulsant, ce qui permet d'avoir un paramètre de contrôle.

Actuellement le plus gros obstacle dans l'industrialisation de ce type de mélangeur est la réticence des industriels à tester ce type de procédé innovant. Une augmentation éventuelle du prix du pétrole dans les années futures pourrait changer cet état de fait.

- Echangeurs multifonctionnels

Chaque application industrielle correspond à un problème spécifique en termes de quantité à produire, de type de liquide visqueux, de produit qui doit être mélangé, ce qui nécessite l'examen d'autant de solutions potentielles. Le CNRS, dans le cadre d'un Programme de recherches Intégrés « Echangeurs multifonctionnels » examine actuellement les applications potentielles du micro-mélange généré par l'advection chaotique

D'une manière générale la tendance globale dans les procédés industriels demeure l'amélioration de l'efficacité énergétique, une production propre, un impact réduit sur l'environnement, une sécurité maximale, des installations plus compactes et multifonctionnelles. Ces préoccupations industrielles sont la force de motivation pour progresser sur *l'intensification des transferts thermiques* dans les procédés et les systèmes qui reposent sur le couplage de la mécanique des fluides et de la thermique dans les procédés avec réaction chimique. Un autre objectif est d'améliorer la sélectivité et de réduire les produits secondaires non désirés.

Au cours de l'élaboration d'un produit, un certain nombre d'opérations unitaires sont effectuées. Ces opérations dans l'industrie des procédés sont:

- le mélange,
- la réaction,
- le transfert de chaleur,
- la séparation.

Actuellement, la plupart des opérations sont réalisées dans des appareils séparés. Le principe d'un échangeur multifonctionnel est de combiner au moins deux opérations de base au sein du même appareil. On citera par exemple les échangeur-réacteurs (échange de chaleur + réaction chimique) ou les condenseurs à reflux (échange de chaleur + séparation). De plus, des fonctions de récupération de chaleur peuvent être intégrées. La combinaison de plusieurs fonctions au sein d'un même équipement permet d'augmenter l'efficacité énergétique, de réduire la taille des appareils et de réduire les inventaires en fluide, ce qui permet un meilleur contrôle du procédé et réduit les impacts environnementaux en cas de défaillance.

L'échangeur multifonctionnel constitue une rupture technologique, notamment par le fait que certaines opérations qui sont actuellement réalisées en discontinu pourraient l'être en continu. On peut dans certain cas envisager des productions décentralisées avec des unités de taille nettement réduite. En effet, la tendance actuelle des unités de production chimique s'oriente vers l'augmentation de l'efficacité énergétique, tout en réduisant leur impact sur l'environnement et leur taille. Les procédés à base de STR (Stirred Tank Reactor ou cuve agitée), bien que couramment utilisés, ne permettent pas de traiter des réactions à cinétique rapide à cause de leur faibles performances de mélange et d'échange thermique. Ainsi, ces réactions sont actuellement « désoptimisées » en ralentissant chimiquement leur cinétique, ce qui engendre une surproduction de sous-produits qui nécessitent des coûts importants de retraitement. L'utilisation d'un échangeur, non plus en tant qu'auxiliaire statique, mais en tant que réacteur à part entière, constitue une évolution importante vers une nouvelle approche des procédés chimiques. En effet, disposer en un même lieu de capacité de mélange et de transfert de chaleur conduit à un meilleur rendement du procédé, à une meilleure qualité du produit final et à une meilleure sécurité du site (réduction significative de la taille). Malheureusement, à cause du manque de données de dimensionnement et de développement de prototypes démontrant l'avantage d'unités multi-fonctionnelles, ce genre de dispositif est actuellement peu utilisé industriellement. Ceci constitue une voie intéressante pour le thermicien.

Parmi les échangeurs multifonctionnels conçus pour les milieux diphasiques liquide-liquide en régime turbulent, actuellement en cours d'investigation et proche d'aboutir, on peut énumérer :

- l'échangeur multifonctionnel compact à « mousse métallique », et à « ailettes à pas décalé » (Offset Fins - OSF) étudiés conjointement au Greth-CEA (Grenoble) et au Laboratoire de Thermocinétique-LTN (Nantes). Cet appareil est bien adapté aux réactions exothermiques et aux réactions catalytiques.
- l'échangeur-réacteur HEV (High Efficiency Vortex) développé au LTN (Nantes). Cet échangeur-réacteur a montré une efficacité énergétique pour le mélange des liquides non-miscibles cent fois plus importante que les mélangeurs statiques actuellement sur le marché.

En régime laminaire, l'échangeur-réacteur à affect d'advection chaotique (Ecoulement de Dean Alterné) en cours d'investigation au laboratoire LMFA de l'Ecole Centrale de Lyon et au LTN semble être suffisamment étudié et proche de l'application.

Le Programme de Recherche Intégré « échangeurs multifonctionnels » dans le cadre de l'ACI Energie du CNRS a pour objectif le développement des échangeurs réacteurs mentionnés ci-dessus. Ce programme coordonné par le LTN est un programme de recherche collaborative commune entre six laboratoires du CNRS et du CEA: Greth, LMFA, Coria, LEMTA, LGC et LTN.

Mentionnons ici le programme de recherche européen (6^{ème} PCRDT) IMPULSE (Integrated Units with Locally Structured Elements), portée par l'industrie chimique européenne, dont le CNRS est le coordinateur et qui concerne les réacteurs multifonctionnels.

4.2 Transferts dans les milieux poreux

Etat des lieux

Les milieux poreux sont un cas particulier de systèmes multiéchelles, hétérogènes. On les rencontre dans de nombreux domaines, impliquant des échelles souvent différentes de plusieurs ordres de grandeurs (exemple : espace poral dans une roche comparé à celui dans une forêt !). De ce fait, les chercheurs dans le domaine des milieux poreux se rencontrent dans de nombreux secteurs : industriel, hydrologie, science des sols, bâtiment, biologie, ... Ils sont, de ce fait également, souvent organisés dans des organismes ou associations scientifiques très diverses (plusieurs sections du CNRS ou du CNU, divers organismes, nombreuses sociétés savantes...).

La modélisation des transferts s'appuie sur :

- la simulation numérique directe qui a fait beaucoup de progrès du fait de l'amélioration des méthodes de calcul, et, surtout, des progrès technologiques dans le domaine des calculateurs,
- la modélisation macroscopique, s'appuyant sur des techniques de changement d'échelle (homogénéisation, moyennes volumiques, ...). Le cas de l'équilibre local est bien connu, et des estimations de propriétés effectives peuvent être envisagées sur des analyses microscopiques, ou en déployant l'arsenal de la reconstruction de milieux. Il n'en est pas de même pour de nombreux problèmes en cours d'investigation : changement de phase, rayonnement, non-équilibre local, grand nombre de Reynolds, problèmes couplés de transfert de chaleur et de masse, transport réactif...
- le développement de techniques expérimentales appropriées. Là encore, le cas classique de l'équilibre thermique local, en transfert principalement diffusif, a été traité avec succès (méthodes instationnaires, utilisation de caméras infrarouges, etc...). Des progrès ont été faits pour le transfert par rayonnement. Le cas du changement de phase pose des problèmes spécifiques. Le cas du séchage (caractérisé ici par une évaporation assez lente) a été traité avec un relatif succès par la communauté française, notamment lors des actions de l'ancien GRECO « Séchage ». Le cas d'ébullition intense reste très largement ouvert, et a justifié les actions engagées dans le cadre du réseau AMETH.

Les propriétés des modèles macroscopiques sont aujourd'hui assez bien connues, notamment en ce qui concerne les instabilités thermoconvectives. De même, de nombreux algorithmes et schémas numériques ont été étudiés. Cependant, des avancées sont encore nécessaires, notamment dans la prise en compte des couplages (écoulements multiphasiques, transport réactif).

De nombreuses applications ont pu être abordées : matériaux de l'isolation, séchage de produits agroalimentaires, géothermie, sûreté nucléaire, biologie, stockage de déchets, incendies, filtration avec couplage à la thermique, réacteurs de génie chimique, piles à combustibles, combustion, pyrolyse, ...

Enjeux

(les applications évoquées ci-dessus correspondent à des problématiques très actives. Elles ne seront pas répétées dans ce paragraphe)

Les problèmes à traiter mettent l'accent sur les aspects couplages, ou le caractère très instationnaire (par exemple flash thermiques, protection des moteurs fusées, sûreté nucléaire, comportement hydrothermal au voisinage de volcans, etc...). Ils ont été peu ou prou déjà identifiés, mais posent des problèmes loin d'être résolus. On en trouvera ci-dessous une liste, probablement non-exhaustive :

- Rayonnement : l'existence de modèles macroscopiques locaux, la question des propriétés effectives, développement de méthodes numériques et expérimentales adaptées, etc...
- Changement de phase : problème du couplage écoulement diphasique et de la thermique, estimation des propriétés effectives si elles existent, métrologie, méthodes numériques, développement de méthodes de résolution directe, ...
- Transport réactif : problème des modèles macroscopiques pour des systèmes couplés, notamment tenseurs de dispersions, méthodes numériques adaptées, métrologie, ...
- Couplage transport réactif et évolution du milieu poreux : combustion et pyrolyse des milieux (incendies, couches ablatives de protection, chaudières, régénération des filtres à particules, ...)
- Couplages thermo-hydro-mécaniques (THM) pour la modélisation des sites de stockage profond de déchets nucléaires ou encore l'estimation de la qualité des produits au cours du séchage
- Application à des matériaux s'éloignant du milieu granulaire classique (mousses métalliques, matériaux fibreux, gels, etc...)
- Thermique très instationnaire : tir de fusées, injection de fluides chauds dans des structures à grande échelle (géothermie et milieux fracturés), sûreté nucléaire, ...
- Application de l'approche milieu poreux aux échangeurs compacts

4.3 Transferts aux interfaces

4.3.1 Interfaces solides-solides fixes ou mobiles

Quelques Mots Clés : Résistance Thermique de Contact, Constriction, Interfaces, Tribologie, Couplages Thermomécaniques, Conduction, Usure.

La thématique des transferts de chaleur aux interfaces solide-solide se situe au carrefour de nombreuses disciplines scientifiques : la mécanique, la tribologie, la métallurgie, la physique des solides, la physico-chimie, etc. Les applications industrielles concernées par cette thématiques sont aussi diverses que les assemblages et collages mécaniques, le refroidissement des composants électroniques, les mécanismes de transmission de puissance (engrenages, roues de friction ...), les systèmes de freinage automobile et ferroviaire, la problématique de l'usinage, classique ou à grande vitesse, les procédés de mise en forme (forgeage à chaud, formage à froid, laminage ...) etc. On mesure aux travers ces exemples tout l'intérêt d'une bonne maîtrise des mécanismes thermiques et mécaniques mis en jeu à l'interface de deux milieux en contact statique ou dynamique.

Les travaux de recherche dans ce domaines sont très nombreux, tout au moins pour ce qui est des contacts statiques aux échelles micro- et macroscopiques. On les trouve pour l'essentiel dans les revues de thermique (RGT, IJTS, Int. JHMT, Int. CHMT, ASME-JHT, AIAA-JTHT) de Tribologie (ASME-JOT, WEAR, TRIBOLOGY INTERNATIONAL) et en moindre quantité dans quelques revues de Mécanique (Applied Mechanics, CRAS Mécanique) ou de physique (Applied Physics D ...). Les premiers travaux au plan de la thermique datent des années 60 avec une régularité des publications depuis cette date. La France est très bien placée dans ce domaine à l'échelle internationale.

Parmi les Laboratoires Français où la Thermique des Interfaces solides constitue un axe de recherche principal, on peut citer : le Laboratoire de Thermocinétique (Nantes), le LEMTA (Nancy), le CETHIL (INSA-Lyon), le LEEE (Paris 10). Au plan de la tribologie, on peut citer : le LMC (INSA-Lyon), le LMS (Poitiers), Laboratoire de Tribologie (ISMCM), ECL, etc.

Nous présentons dans ce qui suit une liste, non exhaustive, de quelques points de blocage et des pistes d'investigations à explorer :

(i) il est difficile d'accéder à une interface pour effectuer des mesures de température ou de flux, sans perturber le processus mis en jeu : les investigations à mener doivent être aussi bien d'ordre expérimentale (fluxmètres, fibres optiques, thermographie) que numérique (développement d'outils d'inversion de mesures tenant compte des problèmes d'échelle : aspérités à l'échelle de la fraction du micron vis-à-vis des mesures effectuées à l'échelle du millimètre).

(ii) il est nécessaire de disposer d'états de surface les moins rugueux possible et présentant le moins d'ondulations : ceci pose le problème de l'usinage, du traitement et de la caractérisation des surfaces.

(iii) les milieux interstitiels doivent être maîtrisés : la nature du milieu interstitiel et ses dimensions peuvent avoir une influence très importante sur le transfert de chaleur à travers

une interface. Cet aspect du problème devient beaucoup plus complexe lorsqu'il s'agit du frottement, où des débris ou lubrifiants (solide ou liquide), dits troisième corps, s'intercalent entre les solides posant ainsi les difficultés de déterminer la puissance dissipée par frottement, le rôle au plan thermique de ce troisième corps (ses dimensions, sa rhéologie, ses propriétés thermiques) ...

(iv) le cas particulier des films minces constitue un problème assez complexe car la valeur de la résistance thermique de contact film-substrat est dans ce cas extrêmement faible, et le flux de chaleur transmis peut être très élevé. Le saut de température à l'interface devient significatif. Souvent ces problèmes exigent une caractérisation thermique in-situ du film. Nous renvoyons ici le lecteur à la section 3.1.2.1.

L'interaction avec les autres disciplines est indispensable : une véritable synergie entre les différentes disciplines concernées par cette problématique permettra d'avancer dans la compréhension des mécanismes mis en jeu dans le transfert de chaleur à l'interface de deux solides, qu'ils soient statiques ou mobiles. Quelques actions allant dans ce sens ont été menées au cours de ces dernières années en France. Des journées thématiques (SFT-AFM et STF) ainsi que les activités du GETTI (Groupe d'Etude des Transferts Thermiques aux Interfaces) ont vu se réunir différents acteurs thermiciens et mécaniciens des interfaces. Des collaborations ont pu être établies à l'occasion de ces rencontres. Du fait des enjeux industriels, il convient de poursuivre ces rencontres et de leur trouver une structure soutenue par les instances scientifiques nationales dans un cadre de réseau transversal par exemple. Une perspective européenne mérite également d'être examinée.

Nous n'avons pas présenté dans ce qui précède les aspects nano-thermiques liés à la notion de résistance thermique de contact. Ces aspects sont encore peu abordés par la communauté thermicienne. Le lecteur peut trouver quelques références dans des revues de physique (Applied Physics D ...) et nous le renvoyons à la section 3.2.

La thermique des interfaces solides trouve également de nombreuses applications dans le domaine de la thermique de l'usinage. Ce domaine d'application a fait l'objet d'un regain d'intérêt ces dernières années du fait de :

- l'apparition des procédés d'usinage à très grande vitesse (UTGV),
- le développement de revêtement d'outils mono- ou multicouches destinés à diminuer les efforts de frottement à l'interface entre la pièce usinée et l'outil (dépôts nitrures notamment) ou bien à prolonger la durée de vie des outils (revêtement de type diamant),
- la variabilité croissante des matériaux à usiner, principalement dans le domaine des matériaux composites,
- les contraintes importantes sur les états de surface de pièces usinées ou de dimensionnement des pièces obtenues (contraintes très présentes dans le domaine de la réalisation des pièces en aéronautique).

Des équipes de recherche se sont largement investies dans ce secteur de recherche. Nous pouvons répertorier les laboratoires suivants ainsi que leur domaine de compétences dans ce domaine (les laboratoires dont le nom est en italique dans la liste apportent des compétences en thermique):

CEMEF (ENSMP, Sophia Antipolis), *CROMEPE* (EMAC, Albi), *LTDS* (ENI, Saint-Etienne), *GeM-LMM* (ECN, Nantes), *GPM2* (INPG, Grenoble), *LABOMAP* (ENSAM, Cluny), *LTN*

(Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes), LAMCoS (INSA, Lyon), LAMEFIP (ENSAM, Bordeaux), LAMIH (Université de Valenciennes), LASMIS (Université de Troyes), LMARC (ENSMM, Besançon), LMS (Ecole Polytechnique, Palaiseau), LMSP (ENSAM, Paris), *LMT* (ENS, Cachan), *LPMI* (ENSAM, Angers), LPMM (ENSAM - Université de Metz), LSG2M (ENSMN, Nancy), PECM (ENSMSE, Saint-Étienne), 3S (INPG, Grenoble), CdM (ENSMP, Evry), *TREFLE* (ENSAM, Bordeaux), LMPF (ENSAM, Chalons en Champagne).

Au niveau national, des efforts ont été développés pour fédérer ces différentes compétences. On notera en particulier le : PPF Usinage, L'action **OPTIMUS** et plus récemment le Projet de PNIR CNRS PGVE (Procédés à Grande Vitesse et en Emergence).

Au niveau international, on remarque que la France occupe une place de leader dans ce domaine de recherche (nombre croissant de publications et de thèses depuis 10 ans).

Les travaux actuels sont plus particulièrement orientés vers les phénomènes thermomécaniques (incluant bien sûr la tribologie) aux interfaces. On notera que plusieurs thèses ont été soutenues sur ces aspects mais qu'il reste encore de nombreuses zones d'ombre notamment vis-à-vis de la validation expérimentale. Plusieurs thèses traitent aussi de l'influence de certains types de revêtement d'outils sur la durée de vie des outils, la qualité des états de surface obtenus, les puissances mises en jeu.

De nombreux travaux restent aussi à accomplir concernant la formulation de lois de comportement prenant en compte les aspects mécaniques (déformation, vitesse de déformation et contrainte) et thermiques. De nombreuses lois ont été évoquées mais aucune observation expérimentale n'est encore venue corroborer la théorie. La difficulté majeure rencontrée ici est la rapidité des phénomènes observés, la taille du domaine dans lequel prene lieu ces phénomènes et la difficulté à atteindre cette zone pour y disposer des capteurs. Néanmoins de nombreuses thèses sont en cours dans quelques laboratoires qui devraient permettre d'aboutir à des résultats pertinents dans les cinq prochaines années.

4.3.2 Echanges pariétaux fluides-solides

Nous nous limitons ici au cas des fluides monophasiques..

Problématique de la modélisation de la convection forcée en canal

Les échanges paroi-fluide en convection forcée sont étudiés depuis plus d'un siècle avec les notions de coefficient d'échange dont le calcul est rendu possible par l'utilisation de corrélations semi-empiriques de Nusselt (1915). Ces corrélations permettent un dimensionnement rapide des systèmes thermiques (échangeurs, machines thermiques, habitat,...) avec des précisions raisonnables pour l'utilisateur. Cependant la qualité de cette approche n'est pas parfaite (10 % d'incertitude au mieux) ; en effet ces corrélations sont employées dans des conditions qui ne correspondent pas forcément aux conditions dans lesquelles elles ont été établies. Un autre imprécision provient de la thermodépendance des propriétés thermophysiques qui sont présentes dans les nombres adimensionnels concernés (Nusselt, Reynolds, Prandtl,...).

Généralement le couplage est effectué à l'aide d'une double hypothèse :

i) la paroi est supposée mince et on suppose que la densité de flux de chaleur qui quitte (algébriquement) la paroi en direction du fluide est perpendiculaire à cette paroi ; on suppose généralement en outre que l'interface est à température ou à densité de flux uniforme (pour pouvoir utiliser les corrélations)

ii) l'équation de la chaleur dans le fluide en mouvement n'est pas résolue mais est remplacée par un coefficient de transfert h qui présuppose une proportionnalité locale entre la composante *normale* à la paroi de la densité de flux et la différence entre la température *locale* de la paroi et une température représentative du fluide, c'est à dire soit la température moyenne débitante (écoulement interne en conduite) soit la température *locale* du fluide à l'extérieur de la couche limite (écoulement externe).

Applications et verrous

Du point de vue des applications l'amélioration des transferts de chaleur fluide-solide représente un souci permanent dans de nombreuses situations industrielles pour lesquelles on cherche à extraire des hauts flux dans des situations de plus en plus complexes. Cet aspect des transferts est évidemment relié aux échangeurs thermiques (voir section 5.1).

L'utilisation du changement de phase (voir section 4.1) peut représenter une solution intéressante lorsqu'elle est possible. En restant dans le domaine monophasique, on peut citer les trois secteurs de recherches et d'applications suivants :

Dans le domaine du transport aérien, le refroidissement de paroi dans le domaine des moteurs aéronautiques

Parmi les techniques de refroidissement de paroi concernées, il s'agit plus particulièrement du refroidissement par film (*film cooling*), de l'impact de jets (*impingement cooling*) et de la multiperforation (*full coverage film cooling*).

Bien que ces techniques soient déjà utilisées dans la pratique technologique, les transferts thermiques mis en jeu sont peu ou mal connus. Leur dépendance à l'égard de nombreux paramètres tant géométriques, qu'aérodynamiques ou thermiques rend leur optimisation par les codes de calcul encore difficile à ce jour. Il est nécessaire d'améliorer la connaissance concernant ces transferts thermiques par le biais d'expériences de base sur plaque plane et plus récemment en mini canaux à géométries variables, en conditions aérothermiques bien définies (LET, Poitiers).

La compréhension fine des phénomènes d'interaction d'écoulements complexes et de leur influence sur les transferts thermiques pariétaux doit permettre de dégager des lignes directrices portant sur la conception des dispositifs de refroidissement, en vue d'améliorer la maîtrise et l'intensification de ces transferts. L'objectif final est de proposer des modélisations des échanges convectifs dans ces problèmes de refroidissement. Ces modèles pourraient être ensuite introduits dans les codes de calcul industriels. L'optimisation complète d'un point de vue géométrique et d'un point de vue aérothermique d'une configuration complète de refroidissement pourrait être alors envisagée numériquement. Pour traiter ces problèmes de convection dits « à trois températures », le LET cherche à caractériser les transferts à l'aide d'un modèle à deux paramètres, globalisant les transferts à l'aide d'un coefficient d'échange et d'une température de référence représentative des écoulements ; ou bien à l'aide d'un modèle s'appuyant sur la connaissance des températures des deux écoulements mis en jeu, et induisant la recherche de deux coefficients d'échange associés.

D'une façon générale, il est nécessaire de maintenir une action forte avec les mécaniciens des fluides sur le contrôle de la turbulence (actif ou passif) pour agir sur les transferts.

Cette mouvance aérothermique est développée dans les différents laboratoires suivants: LET, LEA, LCD (Poitiers), LMFA (Lyon), LaTEP (Pau), IMFT (Toulouse), ONERA (Toulouse), Institut von Karman (Rhodes St Genèse, Belgique)...

Dans le domaine du transport terrestre

On retrouve ici notamment le problème du refroidissement des composants électroniques, en utilisant par exemple le refroidissement par jet avec des techniques proches de ce qui vient d'être détaillé pour le transport aérien, ou à l'aide de techniques que le lecteur pourra retrouver en section 3.1.2.2.

Dans les domaines de la pile à combustible, du génie chimique et de l'électronique

Les hypothèses précédemment décrites plus haut – i) et ii) - ne sont plus adaptées pour la modélisation thermique des microéchangeurs (tailles des canaux de quelques micromètres au millimètre, avec des épaisseurs de paroi du même ordre que le diamètre des canaux) ou des boucles fluides extractrices de chaleur, utilisées dans de nombreuses applications industrielles - refroidissement ou chauffage des réacteurs chimiques microstructurés (voir le programme européen IMPULSE du 6^{ème} PCRDT) , refroidissement des composants en électronique de puissance, contrôle de la température en cœur de pile à combustible. Ces nouvelles technologies vont toutes dans le sens d'une intégration volumique croissante du micro-circuit fluide dans la matrice solide qui lui sert de support. Il devient alors nécessaire de *prendre en compte les couplages thermiques entre conduction dans les parois et convection forcée dans les canaux*. On peut ainsi montrer qu'au fur et à mesure que le nombre de Reynolds de l'écoulement diminue, le coefficient d'échange devient très fort et c'est la conduction dans les parois, avec en particulier une composante axiale qui peut devenir importante (parallèle à la direction de l'écoulement), qui se met à contrôler les échanges. Ceci signifie que l'emploi du seul coefficient h ne constitue plus une bonne réduction de modèle pour représenter les flux échangés entre la paroi et le fluide et ce d'autant plus que les dimensions du système étudié deviennent petites (avec des écarts entre température pariétale du solide et température à cœur du fluide tendant alors vers zéro).

Une des idées qui vient naturellement à l'esprit est de considérer l'extracteur comme *un milieu poreux* traversé par un fluide qui échange de la chaleur avec celui-ci. On peut alors tester le modèle dit « à une température », obtenu grâce à une prise de moyenne englobant à la fois la température de la phase solide (fixe) et celle de la phase fluide (fluide « extracteur de chaleur ») mobile. Il s'agit alors d'un modèle de *dispersion thermique en milieux poreux* caractérisé par un tenseur local de dispersion et une vitesse moyenne locale. Evidemment l'homogénéisation de l'extracteur produit nécessairement, par prise de moyenne locale, un champ de perméabilité qui n'est plus uniforme (avec présence éventuelle de « fractures ») et une caractérisation de ce champ est nécessaire (modèles de perméabilité).

Ce type de modélisation est étudié actuellement par le LEMTA (micro-extracteur et dispersion thermique), par le LET et l'IUSTI (approche inverse pour remonter aux flux pariétaux en monophasique) et par le CREST (micro-échangeur compact) ainsi que par le Département Energétique de l'Ecole des Mines de Douai.

Cas des régimes variables

Les régimes variables, étudiés notamment à l'UTAP (Reims), et qui sont engendrés par des conditions aux limites dépendant du temps présentent plusieurs intérêts :

- fondamental : les structures engendrées par des régimes variables en convection naturelle ou mixte (voir section 2.1), ou dans les fluides fortement thermodépendants (voir section 2.3), peuvent posséder un caractère instable ou fortement instationnaire (en particulier dans la paroi) et peuvent modifier ainsi les échanges pariétaux par rapport aux régimes quasi-statiques,
- métrologique : que représente la mesure de coefficients d'échange en régime instationnaire ?
- applicatif, par exemple dans les échangeurs, les transformateurs électriques de puissance, les systèmes thermiques (moulage de pièces en plasturgie par exemple).

Notons qu'on retrouve ici les problèmes de régulation et contrôle actif et de manipulations des structures convectives déjà abordées en section 2.2.

5. Thermique des systèmes

5.1. Echangeurs

La gestion rationnelle, efficace, économique de l'énergie sous forme thermique, constitue un enjeu considérable, tant à l'égard de l'approvisionnement énergétique qu'à celui de la validation des performances de nombreuses technologies ou procédés, ou celui de la préservation de l'environnement. En effet, plus de 80% de nos usages des combustibles fossiles et plus de 40% de nos usages de l'électricité se font en fait sous forme de chaleur.

Les enjeux visent à augmenter l'efficacité énergétique dans les différents secteurs industriels et tertiaires, par l'optimisation des échangeurs de chaleur et le développement de nouveaux concepts, par une meilleure intégration de ces composants dans les systèmes énergétiques.

Les objectifs techniques

La demande industrielle est très forte dans le domaine énergétique et particulièrement variée ; elle s'exprime de manière quasi-exhaustive pour les échangeurs thermiques par l'intermédiaire du club des industriels du CEA-GRETh, par les centres techniques industriels des fabricants (CETIAT, CETIM) et par le réseau de contacts industriels des équipes du CNRS, ou des Ecoles des Mines (Département Énergétique de l'Ecole des Mines de Douai, Centre d'Énergétique de l'Ecole des Mines de Paris).

Cette thématique bénéficie naturellement des progrès réalisés ou attendus dans d'autres domaines abordés dans l'ensemble de ce document

Les développements technologiques et les produits innovants visés dans le cadre de ce programme sont :

- des équipements thermiques plus compacts et à meilleur rendement, mieux intégrés dans les systèmes énergétiques (échangeurs de chaleur innovants à changement de phase pour les procédés, des échangeurs à mini-canaux pour la climatisation automobile ou l'habitat).
- des échangeurs multifonctionnels pour la chimie, la pétrochimie et les industries pharmaceutiques (échangeurs réacteurs, unités de captation et séparation de solvants)
- des micro-systèmes thermiques (refroidissement en électronique de puissance ou de composants électroniques, gestion thermique des micro-sources d'énergie)
- des échangeurs de chaleur à haute performances mieux intégrés dans les nouveaux systèmes de production d'énergie (récupérateurs de chaleur à mini-canaux pour des applications à haute température)
- des pompes à chaleur et des machines frigorifiques fonctionnant avec des fluides « naturels » : hydrocarbures ou CO₂ (évaporateurs et condenseurs compacts pour hydrocarbures, échangeurs de chaleur pour cycle transcritique au CO₂)

Perspectives

Il est possible de dégager cinq pistes de recherche et développement qui sont détaillées ci-dessous :

L'optimisation des échangeurs de chaleur, composants essentiels pour la récupération et l'utilisation rationnelle de la chaleur, nécessitent :

- des études fondamentales sur la physique de l'ébullition en présence de convection, pour les applications aux échangeurs compacts, au refroidissement à haute température et à l'ébullition en milieu confiné (micro-échangeurs).
- l'étude des écoulements diphasiques (en particulier liquide-vapeur) dans les échangeurs à plaques, en évaporation et en condensation : régimes, lois d'échange, avec un effort particulier sur la modélisation, la simulation numérique, la métrologie. Les problèmes de distribution des fluides et d'encrassement nécessitent un effort d'étude particulier.

La conception et la modélisation des échangeurs multifonctionnels, dont le développement est essentiel en génie des procédés (chimie, agro-alimentaire, etc...), réclame l'identification des phénomènes qui contrôlent le couplage, le mélange, les transferts de masse et de chaleur et les réactions. Les points suivants peuvent être dégagés :

- modélisation des micro et macro mélanges
- modèles avancés de turbulence, de transfert de chaleur et de masse.
- métrologie fine (écoulements, transferts de chaleur et de masse)
- couplage mécanique des fluides-cinétique de réaction

Le développement des micro-composants thermiques.

On devra aborder les problèmes liés aux changements d'échelle dans les échangeurs (macro-micro-nano). Il faut consacrer des études spécifiques aux micro-échangeurs et micro-caloducs (diamètres hydrauliques sub-millimétriques) : identification des phénomènes associés au confinement lors de l'ébullition et de la condensation, effets de la tension superficielle, de la rugosité relative... Les applications concernent le refroidissement des composants électroniques, des systèmes électroniques de puissance intégrant ces composants, les piles à combustibles, les systèmes hybrides en applications transports.

La résolution des problèmes thermiques associés aux nouvelles technologies de l'énergie.

Les thèmes à aborder concernent :

- le conditionnement des fluides et la gestion de la chaleur dans les piles à combustibles (transferts simultanés de chaleur et de masse dans les milieux poreux, modélisation des régimes transitoires). Ce point intéresse l'INRETS,
- la modélisation des réformeurs (phénomènes de transfert dans les mousses, couplages mécanique des fluides-cinétique de réaction),
- l'optimisation des systèmes de cogénération de faible puissance (modélisation dynamique),
- les récupérateurs de chaleur compacts à haute température (mini-canaux: intensification des échanges, encrassement-corrosion, problèmes thermo-mécaniques),

- l'intensification des échanges dans le cas des écoulements de Stokes (très bas nombre de Reynolds). Ceci concerne les nouveaux échangeurs à fluides très visqueux ou à confinement important (micro-canaux). On peut alors envisager le développement des systèmes d'advection chaotique ou faire appel à l'action de champs extérieurs (électrique, MHD ...). Une interaction forte avec la thématique du contrôle actif des transferts semble utile ici.

La mise au point de composants thermiques fiables et écologiques.

La minimisation de l'impact environnemental des systèmes et procédés industriels, notamment la nécessaire limitation des émissions de gaz à effet de serre, requiert l'amélioration de la fiabilité et de l'efficacité énergétique de ces derniers. Les voies envisagées sont:

- l'utilisation de nouveaux fluides (notamment les mélanges fluorocarbonés, le CO₂ et les hydrocarbures) dans les machines à froid et les pompes à chaleur (caractérisation des performances de ces fluides, étude de nouveaux cycles, en particulier à sorption, optimisation des régimes de fonctionnement transitoires, avec fonction stockage intégrée, amélioration et miniaturisation des composants, réduction des charges),

- l'étude des réseaux de transport du froid (mise au point et caractérisation de fluides frigo-porteurs mono et diphasiques, stockage).

Ces thèmes pourront être développés en concertation avec les laboratoires universitaires et de CNRS qui ont une activité dans le domaine ainsi que le CEMAGREF, le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines et le Laboratoire du Froid du CNAM.

5.2. Machines thermiques

Situation actuelle

Sur le plan conceptuel, les machines thermiques trouvent leurs racines plus dans la thermodynamique que dans la thermique. En effet, leur fonctionnement global s'explique en mettant en œuvre les deux principes de la thermodynamique et, pour la plupart d'entre elles, la notion de cycle d'évolution d'un fluide.

En réalité, ces machines ne sont pas nées de considérations théoriques, mais plus d'observations expérimentales (par exemple : Denis Papin en 1673, puis James Watt en 1764), voire de considérations semi-empiriques qui faisaient suite aux réflexions de Carnot sur la "puissance motrice du feu" (1824). Si on considère aussi les machines proposées par Stirling (1816) ou par Ericsson (1833 puis 1853), on peut affirmer que les machines thermiques (moteurs en particuliers) ont précédé la thermodynamique.

Cependant, aujourd'hui, il apparaît inconcevable de pouvoir faire des progrès dans ce domaine sans mettre en œuvre les lois de la thermodynamique, ce qui se traduit notamment par l'établissement de bilans (enthalpiques, entropiques et, de plus en plus, exergétiques), la prise en compte de la nature des fluides, de leurs caractéristiques thermophysiques et de leurs transformations physico-chimiques. La thermique est bien sûr omniprésente dans l'étude et le développement de ces machines où ont lieu d'importants transferts, thermiques notamment. Partant de la "machine de Carnot", ou plus exactement du cycle correspondant, tout

thermodynamicien des machines base son raisonnement sur l'évolution cyclique des paramètres d'état du fluide qui est indispensable au fonctionnement de ce type de machine (même dans le cas de machines dites à "cycle ouvert" pour lesquelles on définit, au stade initial de l'analyse, un pseudo-cycle). Deux grands types de machines apparaissent alors selon le sens d'évolution sur le cycle : les machines à cycle direct ou motrices (moteurs thermiques divers) ; les machines à cycle inverse ou génératrices (machines frigorifiques et pompes à chaleur). Ces deux cycles sont couplés dans certains cas : ce sont les machines trithermes ou quadrithermes.

En matière de moteurs, on distingue aussi deux classes : les moteurs à cycle ouvert ou à combustion interne, soit alternatifs (moteurs à allumage commandé MAC et moteurs diesels MD), soit à flux continu (turbines à gaz ou à combustion TAC, turboréacteurs TR) et les moteurs à cycles fermés représentés essentiellement par les installations motrices à vapeur (IMV – flux continu), mais également par des moteurs moins répandus et alternatifs comme le moteur de Stirling, voire, le moteur d'Ericsson.

Si les **moteurs alternatifs** ont subi des évolutions notoires depuis leurs premières mises au point, les recherches dans ce domaine et au cours des dernières années ont été extrêmement nombreuses et porteuses de résultats fondamentaux pour l'amélioration de leurs performances et de la qualité de leur fonctionnement en vue de minimiser leur impact sur l'environnement (réduction des émissions de CO₂, des NO_x, des COV, des particules, etc.). Si des études expérimentales fines sont menées hors moteur et in situ, on note aussi de très nombreuses analyses basées sur des modèles de plus en plus performants tant au niveau de la chimie de la combustion que de la cinématique et de la dynamique des écoulements ainsi que des transferts de chaleur aussi bien dans le cylindre que dans les tubulures et ou dans les systèmes de suralimentation. Une métrologie extrêmement fine a été développée pour les études expérimentales. La complexité et le couplage des phénomènes physiques mis en jeu ont contribué, d'une manière forte, au développement de techniques de mesure (optiques notamment, mais aussi capteurs de température et fluxmètres à temps de réponse rapide) et à la modélisation des phénomènes de base, comme par exemple la turbulence et la cinétique chimique. Sur un autre plan encore on note la réalisation d'études visant à adapter le fonctionnement des moteurs à des combustibles considérés comme non conventionnels (biogaz par exemple). Toutes ces études ont conduit à une très nette amélioration du fonctionnement des moteurs alternatifs, tant sur le plan de leur rendement que sur celui de leurs émissions de matières polluantes.

Dans ce domaine, les laboratoires universitaires sont le plus souvent associés avec des laboratoires industriels (ceux des constructeurs automobiles et de certains de leurs sous-traitants) ou des laboratoires d'organismes comme l'IFP ou l'INRETS dans le cadre de collaborations directes ou de groupements comme le Groupe Scientifique Moteur ou des ACR. Parmi les laboratoires universitaires ou équivalents, on peut citer : le LD et le LET à Poitiers, le CORIA à Rouen, le LCSR et le LME à Orléans, le LMP à Saint Cyr, l'Ecole des Mines de Nantes, le LMFA et le CETHIL à Lyon, le LC3 à Lille, le LTN à Nantes, etc.

Une problématique analogue quant au développement durable se retrouve dans les recherches conduites dans le domaine des **turbines et turboréacteurs** (TAC et TR). Beaucoup de phénomènes physiques fondamentaux présents dans les moteurs alternatifs se retrouvent dans les machines à flux continu (avec des caractères transitoires moins forts cependant). Pour l'essentiel, les recherches concernent la combustion (transferts de masse et de chaleur dans les foyers, cinétique de la combustion, stabilité des flammes, interaction flamme/paroi, etc.) et

l'adaptation des moteurs à divers combustibles (biogaz, gaz de synthèse, hydrogène, mélanges hydrocarbures-hydrogène, etc.), le refroidissement des parois des foyers et des aubages de turbine (circulation interne avec impacts de jets, film cooling, etc.) et l'injection de vapeur ou d'eau afin de gérer au mieux la combustion "propre". Dans certains cas, il s'agit aussi de se prémunir contre le givrage dans les étages de tête des TR. Dans ce domaine encore, les études sont autant expérimentales que théoriques avec le développement de codes de calculs de plus en plus perfectionnés et basés sur des modèles de turbulence de mieux en mieux adaptés au processus physique.

Comme pour les moteurs, les recherches ont lieu dans le cadre de groupements ou de relations bilatérales entre les laboratoires universitaires (LD Poitiers, CORIA Rouen, LMFA et CETHIL Lyon, IRPHE Marseille, EM2C Paris, etc.), les organismes comme l'ONERA par exemple et les industriels (Groupe SNECMA, GE, Air Liquide,...).

Dans le domaine industriel, les TAC sont de plus en plus intégrées aux Installations motrices à vapeur pour améliorer le fonctionnement de ces dernières en pratiquant un couplage dans ce qu'il est convenu d'appeler les "centrales à cycles combinés". C'est essentiellement dans ce cadre que les Installations Motrices à Vapeur sont concernées par l'effort de recherche. En effet, le cycle à vapeur se prête bien à la récupération de l'enthalpie des gaz sortant d'une TAC. Des recherches ont lieu sur les modes de couplage eux-mêmes (niveaux de pression par exemple), sur l'efficacité des chaudières de récupération (architecture des échangeurs et amélioration des échanges thermiques) et surtout sur l'intégration de divers procédés et combustibles : IGCC (cycles combinés à gazéification intégrée), Centrales à lits fluidisés sous pression (PFB – lit fluidisé sous pression non circulant, PCFB – lit fluidisé circulant sous pression). Outre la recherche de rendements de plus en plus élevés, les études portent beaucoup sur la réduction des émissions nocives pour l'environnement et la santé, notamment en travaillant sur des procédés de combustion en mélange pauvre (on retrouve alors le problème de stabilité des flammes).

L'ensemble des moteurs thermiques étant soumis aux lois de la thermodynamique, ils ne peuvent avoir un rendement de conversion d'énergie thermique (ou chimique)/mécanique que relativement faible, cependant améliorable par le couplage vu ci-dessus par exemple. Mais on peut aussi chercher à valoriser la chaleur transmise, *in fine*, à la "source froide". C'est la cogénération, pratiquée depuis fort longtemps, mais dont on a vu un développement accéléré au cours des dernières années. Les recherches effectuées dans ce domaine sont surtout des recherches d'optimisation thermo-économique des divers procédés (cogénération par MACI, TAC ou Installations Motrices à Vapeur). Les procédés sont de plus en plus variés, voire complexes (cycles combinés avec cogénération par exemple). Les études d'intérêt font appel à des simulations numériques et aux théories d'optimisation sous contraintes.

Les **machines frigorifiques** (et pompes à chaleur) à compression de vapeur ont été, parmi les machines thermiques, les premières "victimes" des préoccupations environnementales à l'échelle planétaire avec le problème de l'attaque de la couche d'ozone par le chlore libéré par les fluides frigorigènes. Les recherches pour changer les fluides utilisés alors majoritairement, CFC et HCFC, ont été nombreuses et ont touché pratiquement tous les aspects de la machine : fluide, huile de lubrification, échangeurs, compresseurs et détendeurs. De nouveaux fluides ont été étudiés tant quant à leurs propriétés toxicologiques que thermodynamiques, thermiques ou de transport et à leur adaptation aux matériels existants. La problématique des Gaz à Effet de Serre est venue renforcer la nécessité de ces recherches qui se poursuivent actuellement surtout dans le sens d'une utilisation massive des fluides dits naturels

(ammoniac, CO₂, hydrocarbures, eau, air). L'amélioration des performances des évaporateurs et condenseurs par divers moyens techniques jouant sur les états de surface ou le confinement par exemple a aussi été une préoccupation constante en matière de recherche dans ce domaine. Le contrôle et la commande des machines industrielles ont aussi fait l'objet de nombreuses études au cours des dernières années en partant, notamment, de modèles de comportement et de simulations informatisées.

Les recherches faites dans ce domaine l'ont été essentiellement dans des laboratoires d'entreprises privées (ATOCHEM, CIAT, Carrier, etc.) et Centre Techniques (CETIM, CETIAT) en collaboration avec des laboratoires d'Universités ou d'EPST (CETHIL Lyon, LEMTA Nancy, LaTEP Pau, École des Mines Paris, CNAM Paris, CEMAGREF Antony, GRETH-CEA Grenoble, etc.) et souvent le soutien de l'ADEME.

Les **machines trithermes**, particulièrement celles qui utilisent les phénomènes physiques d'adsorption ou d'absorption ou chimiques de réactions renversables, ont été étudiées dans un certain nombre de laboratoires universitaires (IMP Perpignan, LIMSI Orsay, CNAM Paris, LEMTA Nancy, LSGC Nancy, etc.). Les recherches concernent aussi les fluides, mais surtout les matériaux et les transferts de masse et de chaleur. La particularité des systèmes à adsorption nécessite aussi de maîtriser leur comportement essentiellement transitoire. Le développement de ces machines est cependant toujours très limité et ne concerne pratiquement (en France) que des grandes ou moyennes puissances et presque exclusivement des applications à températures positives.

Enjeux et perspectives

Malgré les nombreux et remarquables progrès faits aux cours des années récentes et considérant l'augmentation forte du parc automobile mondial, des actions importantes doivent être poursuivies en matière de recherches dans le domaine **des moteurs**.

En particulier, la combustion doit être mieux maîtrisée, notamment au moment de l'allumage de la charge qui a lieu de plus en plus selon le type homogène en régime pauvre (moteurs HCCI ou IDE). La stabilité de ces combustions, en particulier avec des carburants reformulés, est essentielle pour le développement de tels moteurs propres. Les problèmes de cliquetis et d'auto-inflammation des carburants sont aussi à travailler dans la mesure où les moteurs devront accepter des carburants divers. Les connaissances en matière d'aérodynamique interne et externe aux cylindres doivent encore être améliorées comme celles des transferts thermiques interne et sous capot. Le développement de modèles simples et efficaces pour l'ensemble du fonctionnement du moteur est de plus en plus indispensable à une bonne gestion du moteur. Il n'est pas envisageable de faire un contrôle/commande efficace du moteur sans cet apport. De même il devient impératif de développer des capteurs ultra-rapides destinés au contrôle en temps réel de très nombreux paramètres et en particulier de ceux qui sont liés à l'alimentation en carburant et à la combustion. A ce sujet, la gestion du fonctionnement à froid du moteur devient préoccupante du fait que le moteur doit, dans certains cas, être un système de cogénération dédié en partie au chauffage de l'habitacle des véhicules. Des travaux sur l'optimisation de la gestion des flux énergétiques sur un véhicule deviennent indispensables.

Pour les **turbines à combustion**, la course aux hautes températures est toujours d'actualité pour améliorer les rendements. Cela suppose cependant d'agir sur deux points essentiels : la tenue des matériaux des étages de tête de la turbine grâce, notamment à la recherche de refroidissement des aubages de plus en plus efficaces et à une meilleure gestion de la

combustion de manière à éviter, entre autres produits indésirables, la formation des NOx thermiques. Dans le premier cas, les études de transferts thermiques sont compliquées par les effets dynamiques dus aux mouvements d'entraînement. Le second point concerne essentiellement les problèmes de cinétique de la combustion avec des combustibles divers et de stabilité des flammes, l'ensemble étant sous la dépendance forte de la nature des écoulements et des transferts de masse et de chaleur. Des recherches importantes sont donc à poursuivre dans le domaine de la modélisation complète et à diverses échelles des transferts en milieu réactif hors équilibre.

Les recherches dans le domaine des **moteurs à flux continus** doivent de plus en plus être orientées vers les études d'intégration des systèmes. C'est par des couplages optimisés que l'on pourra obtenir de bons rendements d'installations à partir de rendements relativement faibles de chacun des composants. Des améliorations importantes peuvent encore être faites en matière d'échangeurs et récupérateurs de chaleur, notamment par une meilleure connaissance des phénomènes d'encrassement (sur le plan théorique comme sur le plan expérimental – mise au point de capteurs,...), la recherche de solutions à ce problème et par la mise au point d'échangeurs compacts à haut potentiel de transfert. Pour permettre le développement de tels systèmes dans le milieu industriel, il devient capital de développer des logiciels performants d'aide à la décision et au dimensionnement optimisé de ces systèmes intégrés. Ces logiciels devront être capables de rendre compte du fonctionnement de ces installations hors de leur fonctionnement nominal et notamment sur des périodes longues et en régimes variés. Enfin, des efforts doivent être faits pour trouver de nouveaux cycles ou pour en coupler d'autres. Les études thermodynamiques de base, s'appuyant sur les concepts exergetiques, doivent être encouragées.

Certains concepts anciens de moteurs pourraient certainement bénéficier d'un regain d'intérêt dans la perspective du développement durable. Ce sont les moteurs alternatifs à utilisation de chaleur externe ou à **combustion externe** comme les moteurs de Stirling et d'Ericsson. Ils présentent l'avantage sur les moteurs alternatifs à combustion interne de permettre un meilleur contrôle de la combustion (à la pression atmosphérique) et l'utilisation relativement plus facile de combustibles variés : hydrocarbures, gaz de synthèse, biogaz, hydrogène, mélanges. Ils nécessitent de développer des études fondamentales sur les transferts thermiques en régime périodique.

Dans le domaine de la **production de froid**, les enjeux ne sont pas moins considérables que dans celui des moteurs. En effet, les réseaux de l'agroalimentaire ont recours de plus en plus massivement aux procédés de conservation, réfrigération ou congélation, voire cryo-conservation des produits. La climatisation se développe très fortement dans le secteur automobile et maintenant dans celui de l'habitat. Il s'agit là encore d'améliorer fortement les systèmes existants, de manière intrinsèque et dans leur fonctionnement, et, si possible, en concevoir d'autres. Le champ d'études concerne toujours les fluides et plus particulièrement, dans le cadre du développement durable, les fluides naturels. Parmi eux, le CO₂ paraît devoir s'imposer, mais il nécessite des recherches quant à ses qualités de transport et de transferts en zone supercritique. En effet, les lois d'échange et de transport dans un échangeur soumis aux hautes pressions d'un fluide en évolution au voisinage du point critique sont très mal connues. Par ailleurs, ce fluide a la particularité de mettre en œuvre un cycle transcritique ce qui a une incidence sur l'optimisation du fonctionnement de la machine.

Pour ces machines **génératrices**, il convient aussi de poursuivre les efforts entrepris pour minimiser la taille des échangeurs de chaleur (minimisation de la charge en frigorigène) et

améliorer leur efficacité. Les échangeurs compacts posent encore de nombreux problèmes surtout, comme c'est le cas dans les machines frigorifiques, quand ils ont un rôle de condenseur ou d'évaporateur. Dans ce dernier cas, le problème lié à la distribution du fluide diphasique n'est toujours pas réglé, ce qui constitue un verrou en matière de dimensionnement de ces échangeurs de chaleur.

Avec le développement de l'énergie solaire, il ne fait aucun doute que les machines **trithermes** (adsorption, absorption et réaction chimique) devraient connaître un fort développement. Si les systèmes sont déjà disponibles sur le marché mondial, ils nécessitent encore des perfectionnements, particulièrement en matière d'optimisation des transferts de masse et de chaleur (véritable verrou dans le cas des machines à adsorption et à réaction chimique), de charges et de conduite. Les systèmes destinés à la production de froid négatif tout en utilisant des capteurs solaires sans concentration sont encore dans une phase d'études. Leur mise au point est indispensable pour pouvoir envisager le développement de l'habitat "zéro énergie".

Plus généralement, les machines trithermes présentent un très fort potentiel de couplage entre diverses versions, d'une part, entre elles et les machines à compression, d'autre part. De nombreuses études ont déjà eu lieu sur ce thème, mais le sujet n'est pas épuisé. Elles se prêtent aussi à la revalorisation des rejets thermiques, c'est à dire au "relevage" de la température de ces rejets qui sont alors utilisables plus facilement. Peu de développements ont eu lieu dans ce domaine qui doit bénéficier d'une exploration plus systématique.

Dans l'optique d'une poursuite de la baisse des coûts des cellules photovoltaïques, les systèmes trithermes pourraient cependant être concurrencés dans le secteur de l'habitat par les machines à compression dont les performances restent meilleures. On pourrait ainsi envisager un couplage photovoltaïque/machine à CO₂ parfaitement respectueux de l'environnement. Mais cela pose la question d'une gestion du système non maîtrisée du fait de l'utilisation d'un courant continu avec des variations importantes en fonction de l'ensoleillement, donc un couplage fort avec des systèmes de stockage et de distribution du froid dans le cas de la climatisation. Outre des études sur les matériels et les matériaux, cela entraînera des études conséquentes en matière de modélisation et de développement de logiciels destinés au contrôle/commande de ces systèmes.

On doit noter aussi que, bien qu'encore actuellement non compétitives sur le plan de l'efficacité, mais intéressantes pour de faibles puissances et les basses ou très basses températures, les machines frigorifiques du type Ranque ou thermoacoustique, etc., devront bénéficier d'un effort de recherche supplémentaire.

Quelles qu'elles soient, les machines génératrices n'ont très souvent été étudiées et utilisées que dans des fonctionnements continus ou en tout ou rien. Ces fonctionnements ne sont pas optimisés. Les progrès dans ce domaine sont conditionnés par des recherches expérimentales et des modélisations de leur comportement en régimes transitoires et surtout variés. Beaucoup de choses restent à faire dans ces deux domaines.

Enfin, il convient de noter, en matière de machines thermiques que leur emploi à des échelles millimétriques, voire peut-être micrométriques, est de plus en plus envisagée. Ce changement d'échelle doit s'accompagner de conceptions tout à fait nouvelles pour ces machines.

Actuellement quelques rares études ont lieu au niveau mondial dans ce domaine. Il sera indispensable que nos laboratoires se préoccupent davantage à l'avenir de ce champ d'investigation.

5.3 Electronique et électrotechnique

La technologie développée par l'industrie consiste à trouver le meilleur compromis entre les différents matériaux, solutions de construction et solutions de production. C'est l'assemblage des différents éléments, matériaux et phénomènes physiques qui permet d'obtenir des produits industriels. Cependant, ces produits constituent intrinsèquement des systèmes thermiquement complexes à la fois par les géométries 3D, l'hétérogénéité des matériaux et les phénomènes physiques impliqués.

Des compétences et savoir-faire pluridisciplinaires sont nécessaires à l'intégration de plus en plus poussée des produits industriels dans l'objectif de réduire les différents coûts au niveau de la matière, des bureaux d'études et de la production tout en offrant le maximum de fonctionnalités et de fiabilité.

L'étude des systèmes repose sur la possibilité d'analyser les phénomènes couplés intervenant dans des situations industrielles qui par nature sont complexes et ne relevant pas de simples études menées en laboratoire (analyse tridimensionnelle, conditions limites variées et variables, association avec d'autres branches de la physique, etc.). Elle nécessite un développement très important des études physiques à mener en utilisant l'approche de réduction de modèle qui est ici cruciale.

Les entreprises ont la nécessité de rester industriellement compétitives au niveau international. Notons à ce niveau une accélération des cycles de vie des produits industriels (étude et mise en production). L'image de marque d'une entreprise peut être gravement atteinte en cas de défaillance avérée, et les clients sont de plus en plus exigeants au niveau de la qualité, de la fiabilité et de la sécurité des produits toujours plus performants et complexes.

La thermique des systèmes électroniques et électrotechniques fait appel à des compétences pluridisciplinaires. Au niveau national cet axe de recherche s'est développé par la collaboration et l'association de compétences locales (IXL – CPMOH – TREFLE à Bordeaux, LEG – LEGI à Grenoble, L2ES – IGE à Belfort, GREEN – LEMTA à Nancy, LET à Poitiers, etc.).

L'électronique et l'électrotechnique deviennent de plus en plus omniprésentes dans notre environnement, comme par exemple l'automobile où capteurs, actionneurs et intelligence électronique s'intègrent dans un système à l'origine purement mécanique. Un certain nombre de thèmes de recherches en électronique et électrotechnique sont très étroitement liés à la thermique :

Enjeux en électrotechnique

La supraconductivité fait lentement son chemin. Nous sommes passés de prototypes de laboratoire à des démonstrateurs industriels. Cependant les solutions classiques et éprouvées ont toujours la préférence des clients.

L'utilisation de caloducs est initiée au niveau des machines électrotechniques, des prototypes d'alternateurs avec refroidissement par caloducs sont actuellement étudiés et testés par des industriels.

La fiabilité des machines électrotechniques passe par la meilleure connaissance du vieillissement des isolants qui est très fortement lié à la température de fonctionnement et au refroidissement du matériel.

Les dissipations dans les différentes parties des matériaux magnétiques constituant les machines électrotechniques ne sont pas actuellement connues de manière suffisamment précises pour se passer de l'instrumentation thermique de prototypes. Les recherches sur les matériaux magnétiques sont toujours d'actualité.

Le comportement thermique et les dissipations dans les nouveaux matériaux magnétostrictifs ne sont pas à l'heure actuelle suffisamment bien connus.

Les composants passifs tels que les condensateurs sont actuellement l'objet d'études thermiques visant à améliorer leur fiabilité et leur durée de vie. De même les accumulateurs électrochimiques, dont l'énergie massique stockée est toujours croissante, sont soumis à des contraintes de charge et de décharge de plus en plus sévères et laissent apparaître des limitations thermiques.

Enjeux en électronique

Nous ne revenons pas ici sur les enjeux spécifiques des très petites échelles qui sont détaillés dans la section 3 de ce document.

La densité d'intégration au niveau des circuits électroniques atteint un niveau tel que les problèmes thermiques de leur refroidissement doivent être pris en compte dès leur conception. Le refroidissement par jets (monophasique) permettrait d'atteindre des densités de puissance de l'ordre de 100 W/cm² ; l'utilisation de micro-canaux permettrait d'assurer des densités de l'ordre de 700 W/cm² et des jets en convection diphasique un niveau de l'ordre de 2000 W/cm². Des systèmes à micro-canaux de refroidissement et micro-caloducs sont actuellement à l'étude.

Actuellement des recherches portent également sur la thermique des composants à haute température (170 °C) pour les applications grand public.

La fiabilité des composants est en grande partie liée aux contraintes thermiques et thermomécaniques subies au cours des cyclages en fonctionnement. Ces contraintes sont supportées au niveau des brasures, mais aussi au niveau des interconnexions, et des soudures. D'autre part sous l'effet combiné d'un champ électrique et d'un niveau élevé de la température certaines réactions chimiques peuvent avoir lieu et conduire à une dégradation des oxydes isolants. Une récupération partielle des caractéristiques isolantes peut être effectuée par application combinée d'un niveau de température et d'un champ électrique inversé.

Les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) présentent de par leur fort niveau d'intégration d'importantes contraintes thermiques limitant actuellement les performances.

Notons également un redémarrage des recherches sur les couches minces supraconductrices qui présentent forcément d'importants problèmes thermiques pour maintenir et stabiliser la température nécessaire à un bon fonctionnement.

Enfin, l'assemblage de circuits de puissance et de circuits de commande sur le même support comme dans les ASD (Applications Spécifiques Discrètes) nécessite également une approche système.

Nous retrouvons au niveau de l'électronique des problèmes similaires à l'électrotechnique mais dont l'étude doit prendre en compte la physique aux micro-échelles (microthermique, microfluidique, forces de Van der Waals).

Perspectives

Il apparaît deux principaux axes de recherches qui répondent à une demande et à un besoin de l'industrie pour améliorer l'étude et la conception des nouveaux produits :

La connaissance des phénomènes physiques

Il apparaît important d'intégrer, dès la conception d'un système, son contrôle thermique, ce qui nécessite d'avoir une très bonne connaissance des dissipations internes liées à sa physique et des transferts thermiques possibles, et en utilisant par exemple des caloducs, microcanaux, ou jets pour le refroidissement.

Les outils d'analyse et de contrôle des systèmes thermiques

De plus en plus de systèmes industriels sont équipés de microprocesseurs pour assurer le contrôle ou la commande et les communications entre les différents organes. Ces mêmes microprocesseurs peuvent à terme piloter le contrôle thermique d'un système.

Il est nécessaire de développer des outils et méthodes permettant de passer de *modèles thermiques fins* (éléments finis, différences finies, intégrales de frontières, méthode nodale, ...) à des *modèles thermiques réduits* (fonction ou matrice de transfert) permettant des simulations transitoires très simples et rapides (boucle ouverte) et réutilisables par les automaticiens souhaitant développer un contrôle thermique (boucle fermée).

Pour des raisons de fiabilité des systèmes, il n'est pas concevable de multiplier le nombre de capteurs mais plutôt de disposer de modèles numériques d'estimation de l'état thermique. A ce niveau une divergence entre un capteur et un modèle numérique de comportement pourrait servir au diagnostic et à la maintenance préventive.

Industriellement, une modification d'un des éléments d'un système devrait être facilement répercutée au niveau du modèle réduit global modélisant son comportement et assurant son contrôle.

D'autre part, les systèmes peuvent être contrôlés de manière thermique par des débits variables au niveau d'une boucle fluide, d'une convection forcée, d'un système diphasique et du rayonnement. A ce niveau les apports de l'automatique non linéaire et de la commande optimale paraissent incontournables.

Les problèmes industriels à résoudre présentent une très forte transversalité entre de nombreuses disciplines (thermique, mécanique, microélectronique, chimie, physique, automatique, etc.). La réelle difficulté consiste à rassembler pour arriver à faire travailler ensemble des personnes de cultures différentes dans le cadre de projets ou de programmes de recherches.

5.4 piles à combustibles et leurs périphériques

Situation actuelle

La pile à combustible est vraisemblablement un des convertisseurs d'énergie propre du futur. Elle permet de répondre à des préoccupations liées à l'environnement et à la maîtrise de la consommation d'énergie, tout en présentant un rendement très satisfaisant. Alimentée en hydrogène, elle participe à la diversification des sources d'énergie et à la réduction des émissions de polluants. Objet technologique sophistiqué, la pile à combustible suscite un intérêt grandissant dans le monde entier. Le développement des piles à combustibles suppose nécessairement la maîtrise et l'optimisation préalables de leur fonctionnement.

Parmi les différents types de pile existants, les piles PEMFC à membrane échangeuse de protons, ont été retenues dans le domaine des transports, pour les applications portables et la cogénération. Pour ces applications, il est nécessaire de maîtriser le fonctionnement de la pile en mode statique et surtout en mode dynamique.

Le système pile à combustible est centré autour du système de conversion électrochimique appelé cœur ou cellule de pile. Une cellule est constituée, en allant de l'anode à la cathode, de l'assemblage suivant : plaque bipolaire – diffuseur anodique – membrane – cathode – diffuseur cathodique – plaque bipolaire. Plusieurs cellules sont associées en série pour former le stack. Autour du stack, on trouve l'ensemble des équipements assurant le conditionnement des gaz (compresseurs, humidificateur, ...) et les sous-systèmes électriques.

La puissance d'un système pile à combustible est proportionnelle à la surface des électrodes et au nombre de cellules associées en série.

Actuellement, la température de fonctionnement optimale d'une PEMFC est d'environ 80°C. A cette température, la densité surfacique d'énergie totale disponible est de l'ordre de 0.5W.cm⁻² dont environ 60% est dégradée en chaleur.

L'étude du fonctionnement de la pile revient fondamentalement à prédire la variation de la tension disponible aux bornes d'une cellule élémentaire en fonction de l'intensité qui la traverse. Ce problème est extraordinairement complexe car il est influencé de manière absolument non triviale par la gestion simultanée des transferts de réactifs (hydrogène et oxygène), de l'eau (nécessaire au fonctionnement de la membrane, produite par la réaction et apportée par les gaz) et de la chaleur dans le cœur de la pile. Bien que la chaleur soit produite au sein du cœur de pile par :

- effet Joule notamment dans la membrane,
- chaleur et irréversibilités des réactions chimiques au niveau des électrodes,
- évaporation - condensation de l'eau,

il convient d'envisager sa gestion jusqu'à l'échelle du système.

Outre le fait avéré qu'elles sont un élément limitant du développement de la pile en termes de poids, volume et coût, les plaques bipolaires jouent un rôle fondamental pour les transferts thermiques : une de leurs faces sert à la distribution des réactifs et à l'évacuation de l'eau tandis que l'autre face est gravée de mini-canaux dans lesquels circule le fluide caloporteur du circuit de refroidissement.

Enjeux et perspectives

- L'optimisation des transferts thermiques du cœur de pile est nécessaire pour assurer un contrôle précis de sa température. Cette température doit être suffisamment élevée pour favoriser la cinétique des réactions électrochimiques aux électrodes tout en restant inférieure à la température de saturation de l'eau afin de prévenir l'assèchement de la membrane. Sur une cellule de petite surface, le contrôle de la température est assez aisé ; sur des cellules de plus grandes dimensions, en revanche, il est plus difficile de limiter les fluctuations du champ de température. Ces variations peuvent conduire à un assèchement local de la membrane suivi d'une augmentation de sa résistivité électrique et de l'effet Joule qui provoqueront une augmentation supplémentaire de la température, et dans le pire des cas, la dégradation de la membrane.
- La thermique de l'assemblage en série de cellules élémentaires (stack) doit être étudiée. Sur un banc test de 500W, une différence de température allant jusqu'à 5°C a été observée entre l'entrée et la sortie du circuit de refroidissement. Le comportement d'une cellule en fonction de sa position dans un assemblage de cellules doit être considéré en termes de puissance disponible, température, eau produite ... et surtout par l'examen de la répartition des flux de matière et de chaleur.

Sa température de fonctionnement, idéale pour les applications portables et embarquées est aussi un point faible de la pile et de son système : elle ne permet pas d'optimiser le poids et l'encombrement des échangeurs permettant de dissiper la chaleur extraite de la cellule électrochimique.

- Une pile et tout spécialement une pile embarquée pour les transports a vocation à fonctionner en régime transitoire (démarrage à froid, transitoire rapide). Ces points particuliers du fonctionnement du générateur en régime transitoire sont à examiner du point de vue de la dynamique des échanges thermiques internes mais aussi du point de vue du fonctionnement global du système pris dans son environnement (en particulier en fonction des conditions extérieures). L'analyse du système pile à combustible placé dans des conditions réelles de fonctionnement est l'objet d'une analyse approfondie en termes de bilans énergétiques ou exergétiques, qualité de la chaleur évacuée et sa valorisation, fonctionnement des auxiliaires et minimisation de leur demande énergétique, étude de leur comportement en régime variable ou hors nominal.

Un examen attentif des transferts thermiques au sein de la pile à combustible doit permettre de proposer des solutions d'optimisation.

L'uniformisation du champ de température d'une cellule pourrait par exemple être améliorée par la mise en place de l'évaporateur d'un caloduc. Et puisque les chaleurs latentes sont plus à même de filtrer les variations de puissance que les chaleurs sensibles d'un refroidissement convectif, le caloduc pourrait réduire les variations temporelles de température liées à des variations de la demande de courant.

Actuellement, les travaux entrepris dans le domaine de la conception des piles PEMFC visent à augmenter leur température de fonctionnement jusqu'à atteindre environ 120°C. Avec un cœur fonctionnant à 120°C et intégrant donc de nouveaux matériaux, la pile à combustible pourrait voir ses performances augmenter son coût et l'encombrement des auxiliaires (échangeurs) diminuer.

Les équipes de recherche travaillant sur la thermique de la pile à combustible sont essentiellement :

- Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
- Laboratoire de Thermocinétique de Nantes
- Laboratoire d'Etudes Thermiques de Poitiers

5.5 solaire thermique

Définition : systèmes à concentration

De façon générale le terme « solaire thermique » est associé aux applications de l'énergie solaire qui mettent en œuvre des dispositifs destinés à collecter le rayonnement solaire direct et à l'absorber pour transformer cette énergie en chaleur sensible. Les systèmes dits « capteurs plans » relèvent des applications de la thermique du bâtiment, traitées par ailleurs. Ce chapitre sera donc délibérément restreint aux dispositifs dont le collecteur est un système optique à concentration. On parlera alors de « solaire thermique à concentration », ou encore de « solaire thermique haute température ». Typiquement, les systèmes utilisés sont les fours solaires et les centrales solaires.

Situation actuelle

Trois laboratoires français disposent d'installations solaires à concentration :

- L'Institut de Science et Génie des Matériaux et Procédés du CNRS possède à Odeillo (Pyrénées-Orientales) des fours solaires à forte concentration dont les puissances couvrent une gamme de quelques kilowatts à un mégawatt².
- Le Groupe des Hauts Flux Thermiques de la DGA abrite aussi à Odeillo (Pyrénées-Orientales) un four solaire de 45 kW.
- Le Laboratoire de Sciences du Génie Chimique à Nancy possède un four à image qui simule un four solaire de quelques kilowatts.

Les travaux de recherche conduits grâce à ces installations recouvrent une large palette thématique, dont voici une liste non exhaustive :

- Pyrolyse de la biomasse
- Métallurgie solaire (réduction d'oxyde de zinc, d'alumine, de silice)
- Production de nanophases d'oxydes (ZrO_2 , ZrO_2 - Y_2O_3 , Al_2O_3 , MgO ...)
- Production de silicium de qualité photovoltaïque (purification, vapo-déposition)
- Production de fullerènes, noirs de carbone, nanotubes de C
- Production de matrices vitreuses pour confinement de radio-nucléides
- Réactivité chimique de surface de matériaux à vocation spatiale
- Propriétés thermoradiatives de matériaux en environnement sévère
- Traitement thermique superficiel de matériaux métalliques

² L'IMP possède 12 fours solaires : le « grand four » de 1 MW, 1 four de 6 kW, 6 fours de 2 kW et 4 fours de 1,5 kW.

- Comportement sous sollicitations sévères thermiques, thermomécaniques, thermochimiques
- Métrologie des flux et des températures
- Spectroscopie par fluorescence induite solaire

Pour les besoins de ces travaux de recherche il est nécessaire de maîtriser de nombreuses disciplines scientifiques au premier rang desquelles figurent les transferts thermiques. L'interdisciplinarité est forte avec l'optique, la mécanique des fluides, la physico-chimie des milieux ionisés, la science des matériaux. Les transferts par rayonnement occupent une large place: l'énergie solaire est radiative et les températures atteintes dans les systèmes étudiés sont élevées. Une approche multi-échelle est fréquemment rencontrée dans les recherches sur les procédés à haute température. Les transferts s'opèrent sur une échelle allant du mètre au centimètre entre les parois de récepteurs et de réacteurs, du millimètre à la dizaine de micromètres aux interfaces entre surfaces actives et milieu environnant, et l'échelle est submicronique lorsqu'on étudie les transferts aux joints de grains ou encore les phénomènes de dissociation et recombinaison moléculaires.

Les enjeux

Les engagements pris par la France au sommet de Kyoto en 1997 pour lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre dès l'horizon 2010 modifient le contexte dans lequel les modes de production et de consommation d'énergie sont encouragés ou au contraire combattus. Le recours de plus en plus massif aux énergies renouvelables et la recherche de vecteurs d'énergie capables de répondre aux besoins de stockage et de transport de l'énergie issue de ces ressources intermittentes constituent des enjeux majeurs pour l'avenir énergétique à moyen terme. L'utilisation de l'énergie solaire concentrée pour produire de la chaleur primaire à haute température puis la stocker et enfin la convertir en énergie mécanique –dans un cycle combiné ou avec un moteur Stirling, par exemple- est une voie qui, abandonnée au milieu des années quatre vingt, ouvre à nouveau des perspectives de recherche. La recherche d'une meilleure efficacité des échangeurs thermiques et de meilleures performances des dispositifs de transport et de stockage de chaleur -sensible ou latente- est une des clés de la réponse à ces nouvelles préoccupations énergétiques. L'utilisation de la chaleur primaire pour piloter des réactions chimiques et ainsi stocker l'énergie solaire offre également des voies de recherche, parmi lesquelles la production d'hydrogène est sans doute la plus explorée. Plusieurs approches sont suivies :

- Craquage de l'eau par voie thermique à très haute température
- Pilotage d'une (ou plusieurs) étape de cycles thermochimiques de décomposition de l'eau
- Craquage thermique de méthane ou de gaz naturel et immobilisation du carbone sous forme de noirs de carbone (zéro émission)
- Reformage à l'eau du gaz naturel (ou d'hydrocarbures)

Ces nouvelles applications constituent pour les thermiciens un champ de recherche dans lequel il faudra poursuivre et approfondir les travaux sur le rayonnement des gaz, sur les transferts dans les milieux semi-transparentes, sur les propriétés thermiques et thermo-optiques des matériaux et sur les transferts et le stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase.

5.6 Thermique de quelques procédés industriels

5.6.1 Agroalimentaire

Situation Actuelle

Les procédés thermiques utilisés en agroalimentaire visent à transformer, ou au contraire à maintenir, les propriétés sensorielles (organoleptiques, texturales) et/ou hygiénique d'un produit. Les produits étant biologiques, leur état (fluide, liquide voire gazeux) et leurs caractéristiques (composition, forme, dimension ...) varient énormément d'un cas à l'autre. De plus, dans une situation donnée, le matériau est souvent très hétérogène.

Le transfert de chaleur est en général couplé à un transfert de matière (eau, solutés ...) et fait intervenir simultanément plusieurs modes d'échange (convection, conduction, rayonnement). Le transfert s'effectue dans des conditions fortement instationnaires et s'accompagne souvent d'une modification des propriétés rhéologiques des produits fluides et des propriétés mécaniques des produits solides. Il peut s'effectuer sous haute ou basse pression.

Les recherches sont souvent très liées au type d'opération et de produit.

De nombreux traitements thermiques de produits liquides ou pâteux sont réalisés dans des échangeurs ou dans des appareils d'extrusion. Les recherches sur les échangeurs ont pour but d'analyser le couplage entre le transfert de chaleur et la modification de l'écoulement liée au comportement rhéologique du produit et à l'encrassement du système. Dans le cas de l'extrusion les effets thermomécaniques deviennent prépondérants.

La plupart des traitements thermiques de produits pâteux ou solides sont réalisés en présence d'un gaz (air, vapeur ...). L'écoulement de gaz qui existe dans l'appareil est en général de faible vitesse mais fortement turbulent. Ses propriétés sont fortement modifiées par la présence des produits solides qui sont le plus généralement regroupés en grand nombre dans des ensembles irréguliers (chariots, palettes, bandes transporteuses...) quand ils ne sont pas constitués de grains ou de poudres. L'échange convectif s'accompagne le plus souvent de transfert par rayonnement (cuisson, séchage, réfrigération) et par conduction (contact avec une paroi chaude ou froide, bandes transporteuses ...). Le transfert d'énergie par changement d'état est souvent très important : qu'il s'agisse d'ébullition en surface du solide (séchage sur cylindre), d'évaporation (séchage, cuisson) de condensation (fumage, brumisation, cuisson ou décontamination à la vapeur) ou de congélation. Les produits solides peuvent aussi être traités par contact direct avec un liquide (friture).

Les recherches entreprises en thermique sur ces procédés visent essentiellement : (1) à faire le lien entre les écoulements qui existent à l'échelle de l'appareil et à l'échelle du produit (aérodynamique, hydrodynamique), (2) à déterminer les coefficients de transfert convectifs ou effectifs (incluant les échanges par conduction et/ou rayonnement) et (3) à calculer les échanges par conduction dans des produits de formes complexes et hétérogènes (importance de la détermination des propriétés thermophysiques). La description des phénomènes thermiques doit ensuite être couplée à la modélisation des transferts de matière et aux variations qualitatives du produit. La recherche publique s'effectue essentiellement dans les écoles d'ingénieurs, dans les universités présentant une spécialité en Génie des Procédés Agroalimentaire (ENSIA, INAPG, ENITIAA, ENSAIA...) ou dans des EPST (INRA, CEMAGREF, CNRS). La formation en thermique agroalimentaire dépend en général, et souvent aux travers d'UMR, de formations plus larges en Génie des Procédés (UMR-Génial, GEPEA, LAGEP, LGPP, GPSA...). La recherche privée s'effectue essentiellement au travers

des grands groupes agroalimentaires (Nestlé, Danone..) ou au travers d'industriels travaillant pour le secteur (EDF, Air-liquide...). Il convient également de mentionner la plate-forme technologique ERICA du CETIAT qui permet de simuler des procédés thermiques sur des produits agroalimentaires.

Comme dans d'autres domaines, la tendance générale en thermique alimentaire va : (1) vers une augmentation de l'utilisation des modèles numériques souvent inclus dans des codes commerciaux, (2) vers une prise en compte des échelles locales, et (3) vers le couplage des modèles de thermique avec les modèles de contrôle-commande.

Perspectives et Enjeux

L'exigence du consommateur pour des produits de meilleure qualité demande de mieux maîtriser les procédés de fabrication et de réduire l'hétérogénéité de traitement. Un plus grand développement des modèles thermiques et leur couplage avec les modèles décrivant la qualité du produit est donc incontournable.

Le milieu de l'agroalimentaire s'est structuré historiquement autour d'opérations (séchage par exemple) qui s'exprime souvent au travers de la SFGP (Société Française de Génie des Procédés). Les études thermiques horizontales visant simultanément plusieurs procédés sont plus rares et difficiles à réaliser (grande diversité des situations rencontrées).

Une structuration plus horizontale pourrait être envisagée au travers : (1) de la métrologie, (2) de l'évaluation des potentialités et des limites des modèles numériques commerciaux et des voies possibles de réduction de ces modèles, (3) de la détermination des paramètres inclus dans les modèles (coefficients de transfert, propriétés thermophysiques des produits).

Les mesures s'opèrent en agroalimentaire dans des conditions d'accès et d'environnement particulièrement difficiles. De nouvelles méthodes de mesure applicables dans ces conditions intéressent donc l'ensemble de la communauté scientifique.

Des codes numériques en mécanique des fluides et en thermique, de plus en plus complexes, sont mis à la disposition des utilisateurs. Mais il apparaît clairement que les progrès attendus sont limités par la difficulté de coupler les modèles inclus dans ces codes à des fonctions utilisateurs plus spécifiques décrivant les transferts aux interfaces, les changements de phases, les transferts de matières, qui ne sont à l'origine pas, ou mal pris en compte.

D'autre part, comme les situations rencontrées lors des procédés agroalimentaires sont particulièrement complexes, l'utilisation de l'approche par la réduction des modèles s'avère indispensable pour aller vers une prise en compte de l'ensemble des phénomènes thermiques et qualitatifs et vers de la modélisation efficace du contrôle-commande. Des travaux ont déjà fait dans certains domaines (modèles compartimentaux en séchage par exemple), mais une approche plus générale et plus formalisée pourrait rassembler l'ensemble des chercheurs du secteur.

Enfin, si la mesure directe des coefficients de transfert en convection a donné lieu à plusieurs travaux récents, la détermination des valeurs des coefficients lors de changements de phase, ou les résistances thermiques de contact solide-solide n'ont été abordées que de manière ponctuelle. D'autre part la résolution de problèmes inverses est assez peu utilisée en agroalimentaire. Le développement de cette approche pour mesurer des grandeurs

caractéristiques du flux de chaleur ou des propriétés thermophysiques d'aliments serait à entreprendre.

5.6.2 Les procédés de mise en forme et de mise en œuvre des matériaux

Situation actuelle

La maîtrise des transferts thermiques joue un rôle de verrou pour de nouvelles avancées dans de nombreux procédés de mise en forme des matériaux ainsi que dans les procédés qui ne modifient pas la forme des matériaux mais qui sont nécessaires à leur mise en œuvre (par exemple séchage de colle ou de produit enduit, polymérisation, dépôt et séchage de peinture, chauffage pour mise en œuvre). L'enjeu est double : gains de productivité d'une part, mais aussi gains de qualité. Ce dernier enjeu est fondamental pour nos économies avancées dans lesquelles le coût de la main-d'œuvre limite l'impact des gains de productivité. Par contre, la fabrication de produits nouveaux aux propriétés finement contrôlées (produits pour l'électronique ou l'optique) ou aux tolérances exceptionnelles (connecteurs) rendue possible par un traitement thermique optimisé, crée des marchés nouveaux générateurs d'emplois souvent qualifiés.

Parmi les grands secteurs industriels sont particulièrement concernés ici la métallurgie, la mécanique, la chimie, la plasturgie, le textile, la pharmacie.

Les technologies de mise en œuvre associées à ces matériaux et qui sont d'importance stratégique sont notamment :

- la solidification en lingotière,
- la coulée continue,
- le laminage,
- la trempe,
- l'extrusion (polymères ou métaux),
- l'injection ou l'injection réactive (aluminium, polymères, composites),
- la solidification dirigée (élaboration de superalliages ou silicium monocristallin),
- le dépôt chimique en phase vapeur,
- le traitement des poudres et des gels
- le séchage,
- la polymérisation des colles,
- les procédés de peinture.

Quant aux matériaux proprement dits, on peut les classer en deux rubriques, dans lesquelles les avancées sont vitales :

- Les matériaux de structure : métaux et alliages, verres , cartons ...,
- Les matériaux pour l'électronique et l'optique.

Métaux et alliages

Il existe en effet une forte corrélation entre la morphologie du produit final et les conditions de solidification. La modélisation du milieu au voisinage de l'interface liquide-solide implique des échelles multiples (microscopique au niveau de la dendrite, macroscopique au niveau de la pièce). La modélisation des cinétiques de germination et de croissance et de leurs

effets thermiques, ainsi que les couplages avec les transferts posent des problèmes non résolus.

Les contacts entre le matériau se solidifiant et son environnement (moule, filière, rouleaux de refroidissement, substrat et couche déjà déposée en projection thermique) et leurs implications sur le développement des contraintes lors de la stratification, constituent un champ de recherches très ouvert. Il en est de même de la détermination des propriétés thermophysiques, au cours des transformations, incluant les effets endo- ou exothermiques (rôle des méthodes d'estimation des paramètres).

La modélisation des couplages thermomécaniques intervenant lors de l'usinage à grande vitesse par outil de coupe constitue un thème d'étude générique particulièrement intéressant sur les plans fondamental et industriel.

Les problèmes liés aux procédés de traitement thermique et aux traitements de surface des pièces mécaniques font intervenir des couplages entre les échanges surfaciques, les transferts internes dans les pièces et leur transformation métallurgique. Des besoins récurrents de recherche constituent une forte préoccupation industrielle (CETIM).

Verres et céramiques

Les transferts thermiques, y compris à distance par voie radiative et les phénomènes physico-chimiques sont fortement couplés dans les fours de verre en fusion. Leur complexité très grande s'ajoute à celle des géométries. Les relations entre les procédés de mise en oeuvre et les phénomènes thermomécaniques sont là encore déterminantes sur la qualité du produit notamment la distribution des contraintes résiduelles.

On doit aussi noter la nécessité d'avancées des connaissances sur la nature des transferts en milieux poreux sièges de transformations exothermiques, justifiées par les problèmes posés par l'élaboration de pièces en céramique à partir de gels ou de suspensions aqueuses ou de poudres frittées.

Matériaux polymères

Pour ces matériaux également, les conditions d'élaboration des pièces sont cruciales pour leur aspect (microstructure) leurs performances mécaniques, leurs tolérances dimensionnelles (retraits et déformations). Il est indispensable de savoir calculer les contraintes « piégées » lors de la solidification ainsi que les retraits. Cela n'est possible que si l'histoire thermique est précisément décrite, ce qui constitue aujourd'hui un enjeu très important pour l'industrie de la plasturgie, en termes de qualité de produits.

Parmi les points durs, citons :

- la modélisation correcte des transferts de chaleur et de masse lors du moulage : prise en compte de la solidification, de la thermo-dépendance, des échanges aux parois (influence de la rugosité ,...), des interactions éventuelles avec des renforts...,
- l'analyse des couplages thermomécaniques (modèles et caractérisation),
- la modélisation de la solidification des thermoplastiques semi-cristallins, et notamment

le couplage entre l'échelle microscopique (sphérolite) et macroscopique (pièce),

- le couplage des cinétiques de réticulation avec les transferts de chaleur et le contrôle des procédés d'élaboration de pièces épaisses (échauffement interne).

Matériaux pour l'électronique et l'optique

Les avancées dans ce domaine sont exigées par l'évolution des éléments à semi-conducteurs. La connaissance des processus de transport conditionne les morphologies et donc les propriétés électriques. Les procédés évoluent vers des niveaux de température de plus en plus élevés et ont des exigences d'automatisation de plus en plus grande. Une étape préalable à la commande des procédés est leur simulation. Elle est faite actuellement dans des situations idéalisées très éloignées des conditions industrielles et un grand chemin reste donc à parcourir.

La croissance cristalline et le dépôt en phase vapeur sont les technologies principales.

Les points durs dans les technologies de croissance cristalline concernent les aspects suivants :

- la modélisation des transferts de chaleur et de masse couplés, multi-composés (solutés, oxygène et impuretés), par convection qui peut être naturelle ou assistée par des champs magnétiques,
 - les phénomènes à l'interface de solidification, surfusion, instabilités, influence de la vitesse du front et du gradient thermique sur la composition,
 - la prise en compte de situations proches de la réalité, notamment au niveau des conditions aux limites. La prise en compte des parois et le couplage avec la conduction dans celles-ci est indispensable,
 - la détermination des paramètres thermiques des procédés et des matériaux.(émissivité du fondu, variation avec la température,...),
- les techniques de mesure et notamment la mesure des flux locaux

L'objectif du dépôt en phase vapeur est de déposer un film sur un substrat, à partir d'une phase vapeur de plusieurs espèces réactives. Le contrôle des propriétés du film passe par la compréhension des phénomènes dans le plasma mais aussi de leur interaction avec les substrats et les limites du réacteur. Les aspects essentiels dont la maîtrise est indispensable sont les suivants :

- la connaissance des écoulements. Ils sont très complexes et résultent d'interactions multiples: convection forcée, convection naturelle avec interaction avec les parois froides du réacteur, les substrats à très haute température, dans des milieux réactifs semi-transparentes,
- les transferts thermiques dans les substrats, les couches déposées et à l'interface,
- la diffusion des espèces,

- les réactions chimiques dans le plasma et leurs cinétiques, ainsi que le couplage avec les transferts thermiques,
- la caractérisation des propriétés thermophysiques, notamment des couches minces.
- le développement d'instrumentation non-intrusive pour la validation des modèles théoriques.

Des besoins patents apparaissent au plan de la métrologie et de la modélisation.

Instrumentation, capteurs et commande

Le développement d'instrumentation et de capteurs spécifiques se situe à deux niveaux :

- celui de l'augmentation des moyens d'analyse des phénomènes physiques.
- le développement de capteurs capables en temps réel de prendre les informations pertinentes sur un procédé en vue de sa commande.

Sans prétendre être exhaustif, on peut citer pour le premier niveau :

- des capteurs non intrusifs capables de déterminer les distributions de température dans l'épaisseur de matériaux en cours de mise en forme (extrusion de profilés ou de tôles, injection de pièces),
- des techniques de mesure de distribution d'espèces,
- une technique de mesure de vitesse sur des matériaux opaques (métaux, plastiques),
- des techniques de mesure des porosités et des perméabilités directionnelles dans les zones de solidification des métaux ou dans les composites.

Méthodes et techniques de calcul

La grande complexité des phénomènes physiques avec notamment l'existence d'échelles multiples couplées, l'interdépendance entre les champs (température, contrainte, transformation), les très fortes non-linéarités, les géométries complexes, imposent de travailler sur les techniques de calcul. On peut citer :

- les techniques spécifiques pour les multi-domaines, multi-échelles, de temps et d'espace (dendrite, pièce, moule par exemple),
- les techniques de simulation de champs couplés,
- les techniques d'homogénéisation,
- les techniques inverses.

Des codes de plus en plus complexes ont été mis à la disposition des utilisateurs. Mais il apparaît clairement que les progrès attendus dans la compréhension de la physique des transferts et leurs couplages limitent aujourd'hui l'efficacité de logiciels très coûteux, par l'absence de modèles et de données fiables, notamment thermiques. Les exemples à cet égard sont nombreux. On pourrait citer des logiciels de simulation de plasturgie, de métallurgie

(fonderie, forgeage) disponibles sur le marché, pour lesquels une modélisation approximative des transferts thermiques conduit dans certains cas à des performances médiocres

Les laboratoires ont engagé ces dernières années de nombreux travaux de recherche amont visant à une meilleure connaissance des phénomènes physiques mis en jeu dans les procédés de mise en forme des matériaux. Ces études concernent les trois modes de transfert de la chaleur qui, bien qu'ils soient souvent couplés, peuvent servir de base à la classification.

Les équipes

Elles sont relativement nombreuses dans la communauté : CETHIL (Lyon), FAST (Orsay), LEMTA (Nancy), LET (Poitiers), LTN (Nantes), TREFLE (Bordeaux), IUSTI (Marseille) et LSG2M (Sciences chimiques,...).

Conduction

Plusieurs équipes travaillent sur l'évolution des résistances thermiques de contact entre le matériau mis en oeuvre et son environnement (LTN Nantes, CETHIL, FAST), que ce soit lors de la solidification d'un métal sur un autre métal, d'un verre sur un métal ou d'un polymère sur un métal. Les applications concernent d'abord les métaux : fonderie, forgeage, soudage, collage, élaboration de tôles etc... Ces études ont également des applications dans l'élaboration de verre en feuille ou de bouteilles. L'industrie des polymères est également concernée, l'injection des thermoplastiques notamment. Le dépôt de céramiques à partir d'un plasma (FAST) est également à évoquer.

Ce thème est très ouvert et la prise en compte des phénomènes de surfusion et la modélisation correcte des premiers instants de la solidification nécessite encore des travaux. Le couplage entre les transferts thermiques et une cinétique de solidification, notamment dans les thermoplastiques, doit être modélisé. Par ailleurs, l'influence de fortes pressions sur les cinétiques de solidification doit être examinée.

Le couplage entre l'évolution des résistances thermiques de contact et la distribution des contraintes internes dans un matériau en cours de solidification constitue un enjeu majeur dans la description des phases de refroidissement des métaux et des polymères (couplage thermomécanique). Ce point est également crucial dans le dépôt de couches minces (métaux ou céramiques), la morphologie de celle-ci en dépendant.

L'interaction renfort/matrice dans les matériaux composites doit également être examinée, notamment au cours de l'élaboration de pièces.

L'interaction thermomécanique entre un outil de coupe et une pièce métallique est étudiée au TREFLE. Les industries métallurgiques sont très concernées et manifestent leur intérêt (CETIM).

Convection

La prise en compte des effets de la convection dans les métaux en phase fondue fait l'objet de travaux de recherche importants dans la Communauté, élargie aux métallurgistes. On peut citer sans être exhaustif, l'IUSTI, TREFLE, FAST, LSG2M (Sciences Chimiques). Les

phénomènes sont très complexes et les efforts doivent être poursuivis, notamment dans les domaines suivants :

- la prise en compte des transferts couplés chaleur/espèces pendant la solidification (convection thermosolutale) et l'analyse des instabilités,
- la description des transferts dans la zone interdendritique d'un métal en solidification,
- le couplage convection/changement de phase/conduction dans les parois au voisinage de l'interface mobile.

Les échanges entre un polymère fondu et une paroi font déjà l'objet de travaux importants (LEMTA). Néanmoins, on ne sait pas encore prendre en compte de manière satisfaisante les effets de la rugosité de paroi et du comportement rhéologique très complexe des polymères fondus. Les effets de dissipation visqueuse et les anisotropies induites par les très forts cisaillements doivent être finement examinés (notamment au niveau des fronts de solidification). L'impact de l'ajout de renforts (fibres courtes) sur les échanges thermiques est à préciser.

Le remplissage des moules de matériaux composites ne pourra être correctement maîtrisé que si les transferts thermiques à l'intérieur de ceux-ci sont mieux analysés, en particulier l'interaction entre la matrice et le renfort fibreux (fibres très conductrices notamment).

Rayonnement

Ce mode de transfert joue un rôle qu'il convient de mieux appréhender dans les procédés de mise en forme. Le LET et le CETHIL ont développé des études couplant changement de phase et transferts radiatifs. L'enjeu est important dans les procédés de traitement du verre mais également dans les polymères. Ces derniers sont semi-transparents et peu de travaux concernent cet aspect. La modification des conditions de contact du fait du rayonnement devrait également être examinée. Notons que la plate forme technologique ERICA du CETIAT permet de simuler des procédés thermiques associant énergies radiantes et air chaud.

Les enjeux

Une *métrologie* thermique adaptée aux problèmes particuliers de transformation des matériaux doit être développée, afin de permettre le calage des modèles. Ceci implique de mettre également au point des méthodologies particulières de caractérisation. Quelques laboratoires ont engagé des travaux dans ce domaine : LTN, LET, LEMTA, CETHIL. Il existe néanmoins quelques points bloquants :

- la détermination des variations d'émissivité des verres fondus en fonction de la température,
- le développement d'instrumentations non intrusives, notamment pour la mesure de la température et celle des flux locaux,
- la mesure des vitesses dans les milieux non transparents,

- la détermination des propriétés thermiques en cours de transformation (conductivité thermique, chaleur spécifique,
- la détermination des sources thermiques volumiques (cristallisation des thermoplastiques, réticulation des thermodurcissables), notamment en situation anisotherme.

Les aspects *modélisation* et techniques de calcul doivent également être développées et, sans être exhaustif, on peut citer :

- les méthodes spécifiques aux problèmes multi-échelles qui sont fortement couplées dans les matériaux (techniques fractales, homogénéisation,...),
- la simulation numérique des phénomènes couplés,
- les techniques inverses.

5.7 gestion du froid et de la chaleur

La gestion de la chaleur et du froid recouvre : la production, le stockage et le transport de cette énergie thermique. C'est donc sous cet aspect qu'est faite la présentation qui suit.

Situation actuelle

L'énergie thermique est utilisée dans tous les secteurs de la vie économique, voire de la vie courante. Le secteur industriel produit et utilise aussi bien de la chaleur que du froid. C'est le cas des industries du génie chimique et de celui de l'industrie agroalimentaire, par exemple. Le secteur de l'habitat et du tertiaire est un grand consommateur de chaleur et de plus en plus de froid, pour la climatisation essentiellement. Le secteur de la distribution alimentaire en magasin ou pour le transport des denrées est plus orienté vers la production et la consommation du froid, essentiellement pour la conservation (à divers niveaux de température) des aliments. Enfin, le transport devient aussi un producteur et un consommateur de froid qui prend une très grande importance par la climatisation des véhicules industriels et de tourisme. Or, dans tous ces secteurs, la gestion de l'énergie n'est toujours pas optimisée.

Les réflexions sur la situation de la recherche dans le domaine de la gestion du froid et de la chaleur ainsi que sur les actions à conduire en matière de recherches futures font l'objet d'un Groupe d'actions thématique, le GAT 9, du Programme Energie lancé par le CNRS et le MRNT. Les laboratoires et organismes participant à cette action sont : le CETHIL (Lyon), le LaTEP (Pau), le LEMTA (Nancy), le CENERG de l'EMP (Paris), l'UR GPAN du CEMAGREF (Antony), le GRETh-CEA (Grenoble), l'IMP (Perpignan), le FAST (Orsay), le LTN (Nantes), et le TREFLE (Bordeaux).

Dans le même Programme Energie, on peut signaler la réalisation de cinq Projets de Recherche (PR) : sur le transport de froid par frigoporteur diphasique (CETHIL, LaTEP, CEMAGREF, GRETh et LBHP (Paris VII)), sur le transport d'énergie à grande distance (IMP et LSCG (Nancy)), sur les coulis d'hydrates (CEMAGREF, LIMHP (Villetaneuse)), sur le stockage à hautes température et puissance (LEPT (Bordeaux), IMP, LaTEP, CERTES (Créteil)), sur la modélisation des machines frigorifiques en régime transitoire ou hors nominal (LEMTA, CETHIL, CENERG-EMP, LaTEP, CEMAGREF).

Outre les laboratoires participant à ces projets, il convient de citer d'autres laboratoires qui travaillent dans le secteur de la production et de la distribution du froid. Il s'agit du LIMSI (Orsay), du LF du CNAM (Paris) et du LT (Nantes).

Production de la chaleur

La production de la chaleur découle de trois procédés différents :

- la combustion,
 - la transformation d'une autre forme d'énergie (mécanique ou électrique),
 - la récupération.
- Combustion

La plupart des combustions ont lieu actuellement à partir de *combustibles fossiles*. Bien qu'anciens, les travaux réalisés dans ce domaine sont encore nombreux, notamment dans tous les problèmes de combustion en situation spécifique (moteurs alternatifs, foyers de turbo

réacteurs, combustion en mode supersonique, etc.). Les problèmes proviennent de nombreux couplages, notamment entre cinétique chimique et transferts de masse et de chaleur.

Les combustions à partir de *déchets* divers et de la *biomasse* se développent. Les problèmes rencontrés concernent non seulement la combustion elle-même, mais les divers traitements des fumées, voire les matériaux soumis à des contraintes inhabituelles, de corrosion par exemple.

Les études correspondantes sont essentiellement du domaine des combustionnistes, des chimistes, voire des spécialistes des matériaux.

- Transformation

La production de chaleur peut être faite à partir d'énergie mécanique (ou électrique) dans les *pompes à chaleur* à compression, avec un coefficient multiplicateur d'énergie. On met à profit ce coefficient pour utiliser au mieux de l'énergie thermique dans les *machines à sorption*. Les machines et les études correspondantes sont analogues à celles du domaine de la réfrigération (voir ci-après).

- Récupération

La récupération thermique se fait, soit sur des énergies "gratuites" (énergie solaire), soit sur des "déchets" thermiques provenant de procédés industriels ou de systèmes thermiques producteurs d'énergie mécanique ou électrique. Les techniques utilisées sont diverses. Les fonctionnements correspondants sont connus. Le développement de ces techniques mérite cependant des études d'optimisation, voire dans certains cas une meilleure compréhension phénoménologique.

Cette production par récupération est actuellement peu mise en valeur.

Elle concerne les techniques diverses de collecte de *l'énergie solaire* (capteurs plans, à concentration, ...). Depuis les années 70 et 80, les études correspondantes ont été à l'état de veille.

Les *rejets thermiques des procédés industriels* sont maintenant bien valorisés dans des complexes où les "cascades énergétiques" peuvent être mises en valeur. Les études concernent alors essentiellement *l'optimisation de ces cascades*, notamment sur la base du deuxième principe de la thermodynamique (minimisation de production entropique ou de destruction d'exergie). Les rejets ultimes doivent être revalorisés quant à leur niveau de température pour être utilisés. Cela peut être fait par des pompes à chaleur (avec emploi d'énergie "noble" complémentaire ou, mieux, par des *thermotransformateurs* (machines à trois sources), toujours en phase de développement mais peu étudiés actuellement (une ou deux équipes en France).

La *cogénération* correspond à la méthode de récupération des rejets thermiques issus des moteurs thermiques quels qu'ils soient. Cette technique, utilisée depuis fort longtemps sur les sites industriels, notamment ceux utilisant des turbines à vapeur, est encore peu développée en France, contrairement à ce qui se passe dans d'autres pays. Ainsi, les activités de recherche dans ce domaine sont aussi restées faibles. Seuls quelques développements ont été réalisés.

Production de froid

La grande majorité des machines à produire du froid (voire des pompes à chaleur) sont actuellement les *machines à compression de vapeur*. Elles ont fait l'objet, au cours des

dernières années de très nombreuses études du fait de leur impact sur l'environnement (destruction de la couche d'ozone et effet de serre). Ces études ont porté sur la recherche de *nouveaux fluides frigorigènes "respectueux"* de l'environnement (caractéristiques thermodynamiques et de transport) et sur l'adaptation des *technologies de compresseurs et d'échangeurs de chaleur*. Parallèlement, les *modélisations* se sont développées afin de mieux concevoir les machines et d'optimiser leur fonctionnement par des systèmes de contrôle-commande adaptés. Les études sur *les fluides dits "naturels"* sont nombreuses, en particulier celles qui sont relatives à l'emploi des hydrocarbures et du CO₂.

L'ammoniac, les hydrocarbures et le CO₂ commencent à être utilisés dans le domaine du froid alimentaire mais nécessitent de nombreuses améliorations pour être compétitifs vis-à-vis des réfrigérants HCFC ou HFC : au niveau du développement du matériel lié à la production de froid - compresseurs, échangeur - mais aussi au niveau des connaissances des propriétés physiques des gaz, notamment le CO₂.

La nécessité de la minimisation des charges en fluide dans les machines a conduit à développer des études sur le comportement des systèmes utilisant des *minicanaux*.

Si les *machines à sorption* (absorption, adsorption, réaction chimique,...) ne connaissent pas le même développement que les machines à compression, leur intérêt suscite toujours des recherches, notamment du fait de leur grande souplesse d'emploi théorique en matière de niveaux de température et de récupération énergétique (cf ci-dessus). Les études concernent essentiellement la recherche de *nouvelles combinaisons de fluides* ou de *réactifs*, l'amélioration des transferts de masse et de chaleur, ainsi que les *différents couplages* à des *niveaux thermiques variés* ou avec des *machines à compression*. Le champ d'étude est encore vaste. Il faut noter que ces machines semblent davantage adaptées aux moyennes et aux grandes puissances.

Il existe également des procédés naturels de réfrigération alternatifs aux machines à compression de vapeur qui pourraient supplanter les systèmes de réfrigération actuelle sous réserve que leur compétitivité économique soit avérée : la thermoacoustique ou la réfrigération magnétique ou les cycles à air...

Stockage et transport du froid et de la chaleur

Dans la très grande majorité des cas, la chaleur ou le froid produits sont utilisés sur place et en temps réel. Cette situation induit actuellement un manque majeur de préoccupation en matière de recherche sur les problèmes liés au stockage et au transport de l'énergie thermique, même si des actions existent dans ce domaine.

- Stockage

Des études sur le *stockage de la chaleur* ont été réalisées, il y a une vingtaine d'années, en vue de l'utilisation à diverses températures de l'énergie solaire, pour gommer son caractère intermittent. Divers types de stockages ont été étudiés sur la base de la *chaleur sensible* des stocks ou de leur *chaleur latente*. Au cours des années plus récentes on ne s'est occupé quasiment que de *stockage du froid*, soit pour des raisons de sécurité alimentaires, soit pour régulariser la consommation énergétique. Dans la plupart des cas, les *stocks sont statiques* quant au système stockeur (matériau à chaleur sensible ou matériau à changement de phase).

Les problèmes traités concernent essentiellement : l'architecture des stocks, leur stratification, le choix et la caractérisation des matériaux en fonction des niveaux de température et de leurs performances énergétiques, les problèmes de surfusion, l'amélioration des puissances de stockage et de déstockage liée essentiellement aux phénomènes de transferts, le conditionnement des matériaux (contact direct, encapsulation, rétention, etc.). Une orientation plus récente de ces recherches concerne les *stocks dynamiques* dans lesquels le matériau stockeur est aussi utilisé pour véhiculer le froid dans un réseau de transport (ou de distribution). C'est le domaine des *frigoporteurs diphasiques* qui font actuellement l'objet de recherches très diversifiées.

- Transport - Distribution

Si les réseaux *de transport de la chaleur* existent depuis fort longtemps en milieu industriel et en milieu urbain (dans ce dernier cas, en quantité relativement faible en France par rapport à certains autres pays), ils ne font actuellement l'objet d'aucun développement scientifique important. On note tout de même quelques directions de recherche récentes en matière de *transport sur de très longues distances* par l'intermédiaire de processus utilisant la notion de dipôles thermiques et des réactions chimiques renversables solide-gaz (l'élément transporté est alors le gaz, pas la chaleur).

En revanche, depuis quelques années, la *distribution du froid* suscite plus d'intérêt compte tenu des enjeux environnementaux qui imposent de minimiser les quantités de frigorigènes utilisés. L'emploi de frigoporteurs s'imposant, des recherches ont été entreprises sur les *frigoporteurs diphasiques* qui associent l'effet *transport* avec un effet de *stockage* par chaleur sensible et surtout par *chaleur latente*. Les recherches portent sur l'étude des performances d'un certain nombre de fluides à travers la caractérisation de leurs propriétés thermophysiques, de transport et de transferts thermiques. Elles concernent des fluides très différents comme les coulis de glace, les MCP encapsulés portés par un fluide adapté, les MCP retenus dans des matrices poreuses portées par un fluide non mouillant, les émulsions, etc.

Enjeux

Les recherches à développer, voire à initier, en matière de gestion de la chaleur et du froid doivent s'inscrire dans la perspective du *développement durable*. Elles sont nécessaires à une meilleure utilisation de l'énergie en général, notamment par le biais de l'utilisation des énergies renouvelables, d'une récupération maximum des divers rejets thermiques, une meilleure gestion des systèmes de production et une optimisation de l'adaptation entre la production et l'utilisation de la chaleur et du froid.

On peut citer ici l'exemple des meubles frigorifiques de vente dont le parc français représente un peu plus de 1% de la consommation électrique totale du pays. Le principe de fonctionnement de ces meubles réside dans la protection des denrées par un rideau d'air refroidi. Approfondir les connaissances sur les transferts de chaleur dans les couches de mélange est essentiel : il existe donc un champ d'investigation autour des phénomènes d'instabilités rencontrés dans ces écoulements. De même, l'interaction entre le meuble et son environnement est également très mal connue, ce qui aboutit quelquefois à des mauvaises conceptions de magasins. L'exemple le plus paradoxal est l'installation de plancher chauffant devant des meubles frigorifiques en plein été pour respecter le confort des personnes !

La cogénération doit devenir un objectif majeur dans le développement des systèmes de production de force motrice. Associé à ce concept, celui de *trigénération* (production de froid associée) doit percer. Quand on note que le rejet thermique de ces systèmes est, en pratique, toujours supérieur à l'énergie mécanique (ou électrique) produite, l'enjeu est considérable. Cependant, la récupération de cette chaleur, pour une utilisation directe ou pour y associer une production de froid, nécessitera, dans bien des cas, le *transport* (parfois sur de longues distances) et le *stockage* de la chaleur (en général, le besoin en chaleur ne coïncide ni dans le temps, ni dans l'espace avec la production de force motrice). La poursuite des études sur l'ensemble des éléments de la chaîne et sur la conception, puis la gestion optimisée de ces systèmes apparaît donc comme capitale.

Les *rejets thermiques* industriels représentent aussi un potentiel énergétique considérable à l'échelle d'un pays. Dans la très grande majorité des cas, ils ne sont pas valorisés, soit du fait de leur trop bas niveau en température, soit à cause d'un environnement immédiat peu propice à cette récupération. Le niveau thermique peut être corrigé par des pompes à chaleur ou par des *thermotransformateurs* dont le développement pourrait alimenter des recherches fécondes qui elles-mêmes accéléreraient leur utilisation. La poursuite des recherches sur les systèmes de *stockage de la chaleur* et les études sur les méthodes et moyens de *transport énergétique* sur les moyennes et longues distances seraient aussi de nature à améliorer la situation.

L'accélération de l'utilisation du froid à des fins de conservation alimentaire et surtout de *climatisation* résidentielle et automobile rend absolument indispensable le soutien d'une activité de recherche forte dans ce domaine. Cela concerne aussi bien les recherches en matière de *fonctionnement optimisé et compatible avec l'environnement des machines frigorifiques* de quelque nature que ce soit, que celles qui sont en prise plus directe avec *l'utilisation du froid* et son *couplage avec la production*.

Les recherches sur la connaissance et une meilleure maîtrise du *fonctionnement des machines en régime variable* est nécessaire afin d'optimiser leur conception et de mieux gérer leur conduite. La généralisation des systèmes de *stockage* dans les installations frigorifiques (même embarquées sur des véhicules) serait de nature à permettre des fonctionnements de machines à leur régime nominal, donc à leur meilleur rendement, voire d'utiliser l'énergie électrique à des périodes intéressantes. Le *transport* du froid par des systèmes performants basés sur les *frigoporteurs diphasiques*, et donc associé au *stockage*, serait de nature à permettre l'emploi de systèmes de production centralisés de plus grande puissance, donc à plus haut rendement, dans le domaine de la grande distribution et de la climatisation dans le secteur résidentiel.

Dans ce contexte de développement accéléré de la climatisation, il apparaît urgent de focaliser aussi une partie des activités de recherche sur les *systèmes de climatisation solaire* (il s'agit alors de "produire du froid à cause et à l'aide du chaud subi").

Dans tous les cas de *stockage*, comme dans ceux du fonctionnement des machines et plus généralement des systèmes, la *connaissance du comportement dynamique* est capitale. Les efforts de recherche dans ce domaine doivent être soutenus, comme ceux qui concernent les études sur *l'intégration des fonctions de production et de stockage*, voire de *distribution*. Avec

leur développement nécessaire, il deviendra quasi obligatoire de mettre l'accent sur *l'optimisation de la conception des réseaux de transport et de distribution* de l'énergie thermique (chaud et froid). Les nouvelles méthodes, basées sur des approches thermodynamiques, comme la *théorie constructale* devraient être développées.

De même, considérant les inconnues qui demeurent sur les filières de productions énergétiques de forte puissance, électrogène par exemple, une reprise des recherches sur la *production thermodynamique d'énergie noble* à partir de *l'énergie solaire* est nécessaire.

Enfin, dans le but d'améliorer l'impact des recherches sur le développement économique, il conviendra de coupler les optimisations techniques avec les optimisations économiques faites pour la conception et pour le fonctionnement des systèmes. Cet enjeu du couplage technico-économique pourra trouver une réponse dans le cadre d'un concept relativement nouveau : celui de la *thermo-économie* ou encore de *l'exergo-économie*.

5.8 Thermique du bâtiment et de l'environnement

Les enjeux

Le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaires est le premier poste de demande énergétique en France avec 46 % de la facture énergétique (en croissance moyenne de 1,4% par an), le premier producteur de déchets avec environ 40%, et une des principales sources d'émission de gaz à effet de serre avec 22% de la production. De plus, l'énergie utilisée n'est pas nécessairement la mieux adaptée (par exemple, l'électricité, énergie noble, est gâchée lors d'usages basse température). On estime aujourd'hui que pour agir de manière significative sur l'effet de serre, il est nécessaire de diviser par quatre les émissions d'équivalent CO₂ d'ici 2050 ce qui signifie pour les bâtiments une réduction des trois quarts de leur demande énergétique. Il est donc nécessaire, d'une part, de limiter cette consommation énergétique en réduisant les besoins et en améliorant de manière significative l'efficacité énergétique des bâtiments et, d'autre part, d'améliorer de façon substantielle l'intégration des énergies renouvelables dans l'habitat et le tertiaire. L'habitat s'entend ici pour tout ce qui concerne les espaces couverts ou l'homme vit : le logement, les lieux d'éducation de culture, de soins, de commerce, les bureaux, éventuellement les ateliers. Les objectifs pour les 25 ans à venir sont de développer à grande échelle des bâtiments auto suffisants en énergie, voire à utiliser le secteur du bâtiment comme une source potentielle d'énergie. Au vu de ces enjeux, les résultats attendus ne peuvent être le fait d'une politique incrémentale, mais de réels verrous technologiques doivent être levés.

Pour atteindre ces objectifs énergétiques, des développements technologiques sont nécessaires, aussi bien au niveau de la conception globale des bâtiments, de celle de leurs enveloppes et des matériaux qui sont mis en œuvre que des systèmes énergétiques eux-mêmes et de leur gestion, qu'ils utilisent ou non des énergies renouvelables.

Ces développements doivent s'appuyer sur des résultats de recherche à caractère plus fondamental touchant tout d'abord les aspects connaissance et compréhension des phénomènes, en particulier ceux relatifs aux transferts de chaleur (radiatifs, conductifs et convectifs, aux échelles de l'habitat), de masse (espèces chimiques, odeurs, particules...), à la qualité des ambiances (éclairage, acoustique, confort hygrothermique, qualité de l'air), aux modèles réalistes, à l'instrumentation et au contrôle intelligent, et aux moyens d'investigation adaptés.

Des recherches sont aussi à entreprendre :

- concernant les méthodes (algorithmes issus de l'intelligence artificielle, analyse – système, méthodes inverses) d'analyse, de gestion optimisée et d'intégration de l'énergie dans l'habitat et son environnement à différentes échelles allant du quartier urbain à l'appareil d'usage domestique, prenant en considération les situations transitoires.
- pour imaginer, concevoir, tester des systèmes innovants valorisant les énergies renouvelables dans l'habitat (solaire passif et actif, stockage thermique, pompes à chaleur de petite puissance couplées à des systèmes solaires ou au sol, géothermie, eaux usées)

Les perspectives

Il convient de proposer des solutions pour réduire la consommation énergétique de l'habitat et du tertiaire en *réduisant les besoins*, en *visant l'efficacité énergétique optimale* et en *recherchant des sources énergétiques nouvelles*, en particulier renouvelables, à intégrer dans l'habitat et le tertiaire. Les thèmes scientifiques privilégiés participent à l'une (au moins) des trois propositions suivantes :

- Améliorer nos connaissances des phénomènes physiques à différentes échelles de l'habitat.
- Faire sauter des verrous technologiques par l'introduction de connaissances, procédés, matériaux nouveaux pour l'habitat,
- Appréhender le problème du bâti avec une approche environnementale globale (impacts et conséquences à long terme).

C'est une stratégie de recherche à moyen et long terme, structurée autour de 4 groupes thématiques qui ont été identifiés et désignés sous les intitulés : intérieur – enveloppe – environnement – systèmes.

Groupe thématique « Intérieur »

La conception d'un bâtiment résulte d'une analyse multicritère dans un contexte de haute qualité environnementale (HQE). Le domaine concerné est donc centré sur l'étude de l'environnement intérieur, afin d'analyser la propagation des différentes formes de l'énergie en espace fini ou semi-infini, mono zone ou multi zones. Dans un contexte de réduction drastique des puissances installées, une profonde modification des systèmes actuels de distribution énergétique est à attendre dans les bâtiments futurs, le vecteur air devenant alors essentiel à la maîtrise de la qualité des ambiances intérieures. Comme support de cette activité de recherche sur la qualité de l'air et le confort thermique, visuel et acoustique, la démarche traite les aspects conceptuels de la modélisation et de la simulation des phénomènes physiques et fait appel à l'expérimentation sur site ou en laboratoire. Ces travaux doivent apporter des éléments de réponse aux exigences du législateur (PNLCC 2000, PNAEE 2000, directive 2002/91/CE...). Dans ce contexte, les recherches à encourager concernent :

- L'étude détaillée des phénomènes thermo aérauliques, du transport et de la diffusion d'énergie et de polluants, du couplage avec les parois (en particulier en conditions estivales et hivernales) et l'application au conditionnement de l'air intérieur,

- L'amélioration des performances des équipements climatiques et leur adaptation à une demande accrue de puissance installée réduite, et la qualité des ambiances intérieures,
- Le contrôle local des écoulements d'air, notamment dans les grands volumes.
- L'optimisation multicritère des techniques de ventilation, naturelle, hybride ou mécanique sous contraintes extérieures en milieu urbain.
- Le développement de techniques de mesure et de capteurs adaptés au contrôle local de la qualité des ambiances.
- Le développement des techniques de pilotage multicritère (ou intelligent) d'installations appliquées à l'efficacité énergétique et à la maîtrise de la qualité des ambiances.

L'incidence du couplage entre la paroi de l'enveloppe et le milieu ambiant intérieur est à considérer lors des approches du confort thermique en conditions estivales et hivernales.

Les thématiques envisagées s'inscrivent dans la suite des travaux développés lors de divers programmes tels que le programme ECODEV (ARC Ventilation et qualité de l'air), le programme du Groupe de Pilotage de la Qualité des Ambiances (groupe Ventilation et qualité de l'air, groupe Approche globale du confort), et de diverses actions de collaboration réalisées dans le cadre européen ou dans le cadre de programmes de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie).

Ces problématiques se posent dans des termes très voisins dans le domaine des habitacles de véhicule : automobile, ferroviaire, naval, aéronautique, secteurs dans lesquels les constructeurs ont à traiter des problèmes de qualité globale des ambiances intérieures.

L'action principale porte ici sur la compréhension, la modélisation et l'utilisation des transferts thermo aérauliques pour maîtriser et optimiser la qualité des ambiances intérieures.

Groupe thématique « Efficacité énergétique des enveloppes »

Le but est de contribuer à l'efficacité énergétique par optimisation de la conception des enveloppes. Les enjeux sont énormes puisqu'il s'agit d'augmenter les niveaux de performance d'isolation et de contrôle de la demande énergétique d'un facteur cinq. Des matériaux nouveaux (hyper isolants) et de nouvelles techniques (effet diode, transistors thermiques, vitrages intelligents, façade double peau...) sont à développer pour rendre les enveloppes très performantes. Leur comportement *dynamique* couplé à un objectif de récupération ou à la minimisation suivant la demande des apports solaires actifs ou passifs, ainsi que leur couplage intelligent avec des systèmes innovants doivent faire l'objet d'études spécifiques. Des outils détaillés de simulation doivent être développés et adaptés au contexte du bâtiment. La transmission de ces connaissances au secteur aval constitue un enjeu majeur : il faut que celles-ci puissent être intégrées à des outils de dimensionnement et de simulation destinés aux professionnels, afin de permettre l'optimisation des différentes fonctions de l'enveloppe (isolation renforcée en hiver, limitation des apports solaires en été, optimisation de l'inertie, de la ventilation et de la qualité de l'air, de l'éclairage naturel, protection acoustique ...) pour chaque configuration réelle. Ainsi, les secteurs de recherche à mettre en avant doivent :

- Prévoir l'impact de l'enveloppe sur l'ambiance intérieure, à l'échelle du bâtiment,
- Permettre l'intégration de techniques innovantes dans la façade,
- Contribuer au développement de nouveaux matériaux et techniques performantes d'isolation et d'optimisation énergétique,
- Développer des outils de simulation pertinents permettant tout d'abord l'analyse physique détaillée des phénomènes mis en évidence, puis la prédiction des performances en termes

d'efficacité énergétique, d'impact environnemental et de qualité des ambiances intérieures, à l'échelle du bâtiment.

L'action principale doit porter sur le développement et l'optimisation de nouveaux matériaux, composants et systèmes intégrables aux parois. Elle doit être accompagnée d'un effort de modélisation important pour aboutir à de réels modèles prédictifs.

Groupe thématique « Environnement »

En site urbain, les bâtiments subissent les effets des productions anthropiques de façon sévère par l'augmentation parfois importante des charges climatiques dues aux îlots de chaleur et par l'augmentation des contraintes environnementales liées à la qualité de l'air ou aux nuisances sonores.

Dans un premier temps, l'essentiel de l'effort à fournir dans les prochaines années porte sur le développement d'une méthodologie permettant d'analyser les interactions entre les microclimats urbains et le bâti. La démarche est à compléter par la mise au point d'outils permettant d'évaluer la pertinence d'actions menées sur l'un ou l'autre de ces deux milieux sur la demande énergétique globale et la qualité des ambiances habitées, dans le cadre d'une évaluation globale de la qualité environnementale des projets de construction ou de réhabilitation. Ces outils évolutifs et utilisables à toutes les étapes de la recherche doivent permettre d'évaluer la pertinence des solutions choisies. Les enjeux sont de taille car il s'agit à terme de la gestion des îlots de chaleur urbain.

La prise en compte des contraintes locales des microclimats urbains locaux est une nécessité pour optimiser les solutions techniques de gestion énergétique et environnementale applicable à un bâtiment. Celles-ci supposent une bonne connaissance du microclimat urbain (atmosphère urbaine, ensoleillement, thermo aéraulique urbaine,...) et de son impact sur le bâti (morphologie urbaine, matériaux) et le non bâti (espaces viaires, végétation...). Cette analyse peut se faire à différents niveaux d'échelle : le logement, le bâtiment, le fragment urbain (quartier, place, rue), jusqu'à la ville entière.

L'action doit porter sur une méthodologie d'analyse des interactions entre microclimat urbain et bâtiment et le développement d'outils permettant d'évaluer la pertinence des actions menées.

Groupe thématique « Systèmes et réseaux adaptés aux bâtiments HQE »

Il s'agit du développement de modèles détaillés de systèmes énergétiques pour la couverture des besoins des bâtiments, non plus sur le seul critère du rendement énergétique mais à différentes échelles, en prenant en compte l'impact global sur l'environnement. Ce travail doit, d'une part, permettre d'améliorer les systèmes énergétiques existants du point de vue de leur consommation et, d'autre part, d'étudier des systèmes innovants qui, demain, permettront l'autonomie énergétique du bâtiment, voire d'un quartier tout entier, dans le respect de l'environnement (démarche HQE – Haute Qualité Environnementale - et bâtiments « zéro énergie »). L'enjeu est de développer des outils qui permettront de choisir et combiner librement les matériaux de construction et les systèmes de chauffage, ventilation, éclairage... en vue d'obtenir une optimisation du couple enveloppe - systèmes pour le confort des occupants. Les évolutions de ces systèmes pourront servir à la réglementation thermique des bâtiments neufs et réhabilités par la prise en compte de leur efficacité énergétique et environnementale.

La modélisation et la simulation des systèmes sont des composantes essentielles à l'estimation de la consommation énergétique des bâtiments. Cette simulation repose sur une modélisation précise des phénomènes physiques pris en compte. L'échelle de précision doit être micro puis macroscopique, avec la possibilité d'étendre le système énergétique à la notion de réseau de chaleur ou de froid, voire d'électricité.

Il convient de dynamiser les recherches sur les systèmes eux-mêmes, cela présuppose des études plus transversales, avec l'interaction de différents domaines d'activités pour :

- Faire évoluer les systèmes en vue d'une véritable intégration dans le bâti,
- Optimiser les systèmes intégrés.

Ainsi les sujets à aborder, propres à la thermique, concernent:

- Les systèmes de ventilation (ventilation naturelle, hybride ou mécanique : conception et consommations).
- La cogénération (production simultanée de chaleur et d'électricité) ;
- Les systèmes thermiques à énergies renouvelables pour la production de chaleur et / ou de froid : systèmes solaires actifs pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire ou la climatisation (climatisation solaire par adsorption, absorption, « desiccant cooling ») , PAC et systèmes combinés de petite puissance, bois énergie et biomasse, stockages thermiques associés,
- Les systèmes hybrides ou combinés (solaire thermique / photovoltaïque, éolien / photovoltaïque/thermique, géothermie / PAC à absorption, cogénération à sources d'énergie renouvelables (biomasse, biogaz, EMHV...), l'intégration de piles à combustible, systèmes qui permettent d'augmenter le rendement énergétique d'une seule filière ou de la cogénération,
- La mise en œuvre des concepts d'architecture bioclimatique et de techniques passives et l'évaluation de leur pertinence sur le bilan énergétique et environnemental global.

Dans les travaux prospectifs sur l'énergie, on envisage déjà une production énergétique des systèmes intégrés au bâti, supérieure aux besoins (concept de bâtiment à bilan énergétique positif) grâce à une diminution des besoins (appareils économiques, éclairage performant, protection solaire, inertie des bâtiments...), une meilleure gestion de la demande en énergie (stratégies de groupement de maisons voire de quartier), et une production thermique ou d'électricité par des systèmes actifs couplés aux bâtiments.

L'action principale porte ici sur une véritable optimisation énergétique globale des bâtiments à l'échelle individuelle ou à celle d'un quartier. Le développement de méthodes et de modèles d'évaluation énergétique et environnementale globale est ici une priorité.

Les partenaires concernés, notamment dans le cadre du programme énergie du CNRS, GAT Habitat sont : IMP Perpignan, LET Poitiers, LEPTAB La Rochelle, LIMSI Orsay, CETHIL Lyon, Laboratoire des Sciences de l'Habitat Vaulx en Velin, LOCIE Chambéry, CENERG, EM Paris et Sophia-Antipolis, Laboratoire d'Énergétique Toulouse, LEMTA Nancy, BRGM Orléans, LEEVAM-LMSC Cergy Pontoise. Le CETIAT en fait également partie en tant que centre technique des fabricants des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air.

5.9 Thermique du vivant

Spécificité de la thermique du vivant

La thermique du vivant est caractérisée par la complexité et la multiplicité de ses composantes et des domaines avec lesquels elle interfère. Depuis les milliers de types de molécules en passant par les cellules et les organes, le vivant existe dans une gamme dimensionnelle très étendue. Deux spécificités fortes limitent et complexifient l'investigation et la créativité pour la thermique du vivant :

- Les considérations éthiques et associées. Les méthodologies employées ne doivent pas induire de danger, de douleur, de risque, etc., pour tout ce qui est relié à l'humain et plus largement au vivant. La loi « Hurriet », les comités d'éthique, etc. encadrent ce domaine.
- Les limitations méthodologiques. Les tissus vivants ont une plage de fonctionnement en température très limitée. Les méthodes employées ne doivent pas modifier le phénomène à étudier. Pour le corps humain, les principaux tissus (cerveau, cœur, foie, etc.) travaillent correctement autour de 37°C. Au-delà de 43°C les tissus commencent à être dégradés et une baisse de température de 5°C induit des réductions d'activités métaboliques, enzymatiques, de conduction électrique nerveuse, etc., très importantes et incompatibles avec une activité normale. De même, la puissance spécifique des tissus vivants est faible : de l'ordre de 9 à 10 mW / cm³, et toute déperdition de puissance dans un tissu ne devra pas être excessive et rester dans le même ordre de grandeur.

Orientations méthodologiques, tendances.

Rappelons que les méthodes thermiques présentent de grands avantages :

- Large spectre d'investigation : presque toutes les réactions générées au sein des tissus vivants (chimiques, physiques, etc.) ont une signature thermique.
- Plus de 150 paramètres thermiques (non dimensionnels) ont été listés, la chaleur est un marqueur naturel non ionisant, pouvant être généré localement, modulé, régulé, etc.
- La mesure directe de paramètres thermiques n'est pas toujours possible, la recherche d'indicateurs pertinents (parfois très indirects) est nécessaire, aussi les méthodologies s'orientent très fortement vers :
 - les méthodes non-invasives, où le capteur est placé à la surface du corps ou à distance.
 - les méthodes mini-invasives, où le capteur ou l'actionneur sont introduits dans le corps humain avec le minimum d'intrusion.
 - les micro-technologies apportent de nouvelles possibilités : réalisation de micro-dispositifs pouvant être introduits dans les vaisseaux et dans les tissus avec le minimum de perturbation.
 - la réduction de consommation permettant une augmentation d'autonomie.
 - le développement des télécommunications et des transmissions.

- Tous ces éléments se conjuguent pour permettre la conception et la réalisation de microdispositifs implantables, miniatures, ambulatoires, à finalité bio-médicale mais aussi à d'autres fonctions utilisables pour le vivant et pour l'homme.

Capteurs, vêtements, habitats intelligents en santé

Une nouvelle génération de moyens de mesure est en train d'émerger, permettant des mesures sur l'homme de façon aisée sans nécessiter la pose de capteurs par des spécialistes. Ce sont les mesures citoyennes. Une action spécifique CNRS est dévolue à ce thème. Les mesures de paramètres thermiques sont bien adaptées pour répondre à cette évolution et à la demande sociétale. La complexité et la sophistication des nouvelles possibilités en micro technologies et en traitement des signaux est particulièrement bien adaptée à la complexité de l'investigation thermique du vivant.

Nouvelles tendances : des exemples concrets des besoins

- Mesures endo-vasculaires thermiques sur les plaques d'arthrose.
- Mesures des risques d'infection pour les porteurs.
- Mesures de réactions allergiques cutanées.
- Mesures de température centrale, cérébrale, de façon non-invasive.
- Mesures de signature thermique de produits cosmétiques et dermatologiques.
- Mesures du « confort thermique ressenti » par mesure de paramètres thermiques sur l'homme.
- Thermographie infrarouge à haute résolution et haute définition.
- Monitoring thermique per et post opératoire.
- Caractérisation tissulaire et cutanée.
- Mesures des paramètres vitaux chez l'homme par vêtements intelligents, température cutanée, centrale, pertes thermiques.
- Médecine professionnelle : étude de possibilité de dangerosité de tache et étude de tenues de protection en relation avec l'activité.
- Etude de paramètres thermo-vasculaire pour la surveillance de la réactivité sensorielle et émotionnelle, lors de tâches cognitives, sportives, professionnelles (conduite de process, de véhicule, etc.)
- Signature thermique de la réactivité aux afférences sensorielles.
- Hypothermie : contrôle de l'hypothermie cérébrale lors d'intervention chirurgicale de longue durée de type cardio-vasculaire.
- Hypothermie : mesure et contrôle lors de traitement des tumeurs.
- Mesure en néo-natalité : contrôle et monitoring thermique du prématuré ou du nouveau-né en réanimation.
- Microthermique d'empreinte digitale.
- Signature thermique, biométrie.
- Sécurité d'accès et de locaux.
- Microthermique des matériaux poreux (silicium poreux).
- Etude de la biocompatibilité des processus thermiques pour le vivant.
- Micro-cycleur thermique pour la duplication de l'ARN.

Modélisation physique et mathématique

L'éthique relative aux mesures ou actions sur le vivant impose de prendre toutes les précautions pour ne pas induire de risques dans l'utilisation des dispositifs bio-médicaux. La

modélisation des tissus et organes vivants ainsi que la modélisation des capteurs est une nécessité pour la recherche, la conception et la validation de nouveaux dispositifs. La modélisation physique est en développement particulièrement important car elle permet de tester en conditions quasi-réelles les capteurs et systèmes (cas des simulateurs de vol).

Micro thermique bio-inspirée

L'homme est certes une machine thermique, mais il est surtout une accumulation de phénomènes et de mécanismes de microthermique. L'échangeur thermique du vivant de base est un capillaire de huit microns de diamètre, pourvu d'un sphincter (micro-diaphragme) pouvant être commandé individuellement. L'organisation en trois dimensions du système microvasculaire tissulaire est un champ d'étude très riche en promesses. Les échangeurs thermiques de la peau en sont un exemple.

Générateur thermoélectrique du vivant

Comment extraire de l'électricité à partir de la production et des pertes thermiques humaines ? La faiblesse de ces possibilités est de plus en plus compensée par la réduction de consommation des micro-dispositifs. Ce thème quitte le domaine de l'utopie pour entrer dans celui du réel.

Conclusion

Les nouvelles connaissances que nous avons du vivants, les progrès en microtechnologie, nouveaux matériaux, traitement des signaux, modélisation physique et numérique, la demande sociétale d'améliorations en santé et en sécurité font que la thermique du vivant est bien placée dans cette évolution. Il faut bien être conscient que cette nouvelle thermique est par essence multidisciplinaire. Le thermicien du vivant possède des outils nombreux et utiles ... pour qui ? La recherche d'expression de besoins, de nouveaux besoins, fait partie dorénavant des recherches du thermicien du vivant.

Une étude récapitulative des intervenants en recherche dans le domaine de la thermique du vivant a été effectuée par A. Dittmar (INSA de Lyon). Le lecteur intéressé est invité à prendre contact avec lui.

5. 10 Matériaux et fluides à hautes températures (> 1500 K)

Situation Actuelle

Parallèlement aux développements liés à une approche relativement académique ou aux applications industrielles classiques, les thermiciens se sont intéressés à des phénomènes plus complexes dans lesquels d'autres phénomènes physiques ou chimiques intervenaient sous forme de couplages plus ou moins forts ; parmi ces phénomènes, on peut citer : la mécanique du solide, le comportement des matériaux (métaux et/ou céramiques), l'électromagnétisme, la physique nucléaire ou encore les réactions chimiques. Les couplages sont généralement d'autant plus forts que le ou les fluides en présence sont à des températures relativement élevées, disons dans une échelle 1500 à 3500 K. En effet, dans cette gamme de température, non seulement la plupart des solides passent à l'état liquide mais aussi et surtout au dessus de 2500 K, la plupart des corps réagissent chimiquement entre eux.

Ce type de fluide n'est pas aussi rare qu'on pourrait le penser a priori. Il se rencontre relativement souvent dans certains domaines industriels où il est généralement le résultat d'un processus de fabrication : sidérurgie, industrie des verres, industrie des céramiques. Dans ce cas, l'objectif sera la plupart du temps d'aboutir à un produit aussi " propre " que possible (élimination des laitiers en sidérurgie par exemple) tout en ayant certaines qualités (propriétés mécaniques ou aspect) que peuvent lui donner certains additifs (aciers et verres spéciaux par exemple). Pour atteindre cet objectif, certaines étapes du processus font l'objet d'études relevant de la thermique des fluides à hautes températures, citons par exemple: la coulée continue, le dégazage d'un acier, le moulage, l'élaboration de réfractaires électro-fondus... Dans le domaine aérospatial, on rencontre aussi des hautes températures dans de nombreux processus : dans les moteurs, lors de la rentrée atmosphérique, etc...

Il existe aussi un fluide à haute température à l'état naturel: le magma terrestre qui fait l'objet de nombreuses études en volcanologie et en géomorphologie sous des aspects relativement différents: la projection et la coulée de laves, la convection dans les chambres magmatiques, la propagation des ondes sismiques et la tectonique des plaques.

Des processus accidentels tels que la perte de circuits de refroidissement d'une installation peuvent conduire dans certains cas à la fusion de produits habituellement à l'état solide. Ce type de situations peut se rencontrer dans la plupart des processus industriels mettant en oeuvre une source chaude et un fluide caloporteur; il n'a toutefois, semble-t-il, fait l'objet d'études systématiques que dans l'industrie nucléaire où elles se poursuivent encore aujourd'hui pour atteindre une meilleure fiabilité et une sûreté accrue.

Jusqu'à présent, étant donné les difficultés rencontrées, tant sur la compréhension des phénomènes que pour leurs modélisations, les approches suivies par les spécialistes pour traiter ces problèmes relevaient plus d'évaluations d'ordres de grandeurs que de descriptions fines, les phénomènes étaient regardés à une échelle très macroscopiques.

Pour demain, la réduction des marges dans les processus industriels ou l'amélioration de la prédiction des phénomènes naturels (l'éruption d'un volcan et l'écoulement de la lave par exemple) nécessitent qu'un pas en avant soit fait dans la connaissance et la description des phénomènes afin qu'ils puissent être pris en compte dans les outils de simulation.

Un séminaire parrainé par la SFT en 2002 et intitulé « Mécanique des Fluides à Hautes Températures » a permis à la communauté française travaillant dans ces domaines de se

rencontrer (en novembre 2002). Devant le succès de cette manifestation, il a été décidé de poursuivre régulièrement ces rencontres.

Enjeux, Perspectives

Les enjeux de la thermique des fluides à hautes températures sont nombreux tant sur les aspects expérimentaux que sur la modélisation des modèles couplés:

- Développement de moyens de mesure fonctionnant à hautes températures

Dans ce domaine, on peut citer le développement de thermomètres à ultrasons, l'étude en cours (avec le LNE) d'étalons primaires et secondaires de températures qui seraient basés sur des points eutectiques et non sur la fusion de corps purs, ainsi que l'amélioration des techniques de mesures pyrométriques. Les apports des techniques inverses seront vraisemblablement importants car cela permettra dans de nombreux cas d'éloigner des capteurs des zones les plus chaudes. L'enjeu majeur est de pouvoir obtenir un nombre suffisant de point de mesure et de diminuer significativement les incertitudes de mesures (de ± 50 K actuellement à 3000 K, on souhaiterait passer à des incertitudes de l'ordre de ± 5 K) afin de pouvoir valider les modèles de plus en plus précis qui sont développés.

- Fonctionnement des moyens expérimentaux à hautes températures

Des fours de diverses techniques (fours solaire à lampes, à arc plasma, à micro-ondes, à induction, à effet Joule, chauffage par réaction chimiques exothermiques, par laser ou faisceau de particules,) sont utilisés dans plusieurs laboratoires. Ces installations d'essai mettent en jeu un grand nombre de techniques (thermique, électrotechnique, science des matériaux, instrumentation) dans des configurations qui sont généralement aux limites des capacités techniques actuelles. La mise en place d'une structure d'échange au sein de la SFT permettrait aux opérateurs de ces dispositifs très complexes de bénéficier des acquis et des expériences d'autres domaines d'activité et d'améliorer l'offre de moyens d'essais disponible en France.

- Données thermophysiques et thermodynamique à hautes températures

La modélisation des phénomènes nécessite l'emploi de données thermodynamiques et thermophysiques. Or, contrairement aux fluides classiquement étudiés en thermique, il n'y a que très peu de données thermodynamiques (enthalpie, entropie, diagrammes de phases) et thermophysiques pour les matériaux au delà de 1500 K. De plus, du fait de la forte réactivité chimique à haute température, il s'agit généralement de solutions solides ou liquides pour lesquels les lois de mélanges restent généralement à établir ou à valider. La compilation et l'analyse critique des données thermodynamiques et thermophysiques et la détermination expérimentale des données manquantes sont un enjeu important pour lequel le travail a été partiellement entrepris depuis quelques années dans le domaine de la sûreté nucléaire, entre autres.

- Modélisation des phénomènes couplés

A hautes températures, les phénomènes thermiques, mécaniques, thermodynamiques et physico-chimiques sont généralement couplés. Des modèles sont en cours de développement et de transposition sous forme de codes de calcul pour diverses applications. L'enjeu est de

valider les modèles et à terme de pouvoir modéliser les différents phénomènes couplés avec un maillage et une précision compatible avec les besoins industriels.

- Matériaux pour les réacteurs nucléaires de 3^{ème} et 4^{ème} générations

Les réacteurs nucléaires du futur devront atteindre des températures supérieures à 1000°C (voire davantage). Ce niveau de température conduit à remplacer les matériaux métalliques par des céramiques (carbone, SiC, TiC, ZrC) qui seront le siège de transferts de chaleur entre le combustible et le fluide caloporteur. Ces matériaux étant généralement assez mauvais conducteurs de la chaleur, il sera indispensable de dimensionner les installations en prenant en compte les couplages thermomécaniques et l'évolution de leurs propriétés sous irradiation.

La thermique des matériaux est donc appelée à une ouverture sur ce type d'applications. Plus généralement, il existe un besoin prioritaire dans ce domaine, exprimé par les industries mécaniques (CETIM), et lié à l'élaboration et la mise en œuvre de matériaux utilisés dans ces conditions extrêmes, que ce soit à très haute ou à très basse température.

6. METHODOLOGIES SPECIFIQUES A LA THERMIQUE

6.1 Mesures en thermique (propriétés et champs)

Situation actuelle

La mesure des propriétés thermophysiques consiste à exploiter des signaux de température répartis dans un milieu et souvent en régime transitoire. On peut citer des exemples classiques tels que la mesure de la conductivité thermique, de la chaleur volumique ou de la chaleur latente de fusion ou de solidification. On peut aussi admettre que la recherche de propriétés concernant les phénomènes couplés au transfert thermique ou à des problèmes plus généraux de « physique des transferts » (chaleur, masse, quantité de mouvement), fait aussi partie de cette rubrique (viscosité, coefficient d'élasticité, diffusivité massique....).

Dans les années 50, ce type d'activité consistait, au prix de précautions expérimentales lourdes, à se placer dans des conditions physiques les plus pures (régime permanent, transfert 1D, milieu homogène, monophasique) en évitant une modélisation poussée (exemple : la méthode de la plaque chaude gardée pour la mesure de la conductivité thermique).

Depuis les années 60, les *progrès de l'électronique et de l'informatique*, non-seulement pour le calcul, mais aussi pour *l'acquisition et le traitement des données* ont fait évoluer considérablement les méthodes et les mentalités. Progressivement, *la modélisation de la mesure* a permis d'envisager des situations expérimentales plus complexes mais plus simples à modéliser (prise en compte des échanges parasites, régimes transitoires, ...etc).

En France, le groupe METTI (Métrologie Thermique et Techniques Inverses) de la SFT a largement contribué au succès des méthodes d'estimation de propriétés thermophysiques en permettant de traiter des situations physiquement complexes (transferts couplés, non-linéaires, avec pertes, milieux composites, milieux hétérogènes...), en liaison étroite avec la technique expérimentale. La communauté française a su largement bénéficier des avancées initiées aux Etats-Unis et a développé un réseau de laboratoires universitaires dont les manifestations régulières assurent le dynamisme.

Il est indispensable de citer, en parallèle, les *progrès accomplis et en cours sur les mesures de température* (voir par exemple le numéro spécial de la Revue Générale de Thermique Mai-1996, 2 tomes) :

- de surface par contact
- par analyse du rayonnement émis
- au sein des milieux semi-transparentes
- dans les flammes et les plasmas thermiques
- dans les ambiances cryogéniques
- dans les pièces en mouvement
- ainsi qu'à l'échelle microscopique

Ces progrès sont dus en grande partie au *rôle croissant pris par les méthodes optiques* dans les domaines infrarouges ou visibles dans lesquelles on inclura entre autres l'imagerie, la microscopie ou la spectroscopie. On peut, par exemple, souligner le développement de méthodes basées sur les lasers dans de nombreuses équipes françaises (photoréflexivité,

interférométrie, lasers nano ou femtoseconde...) ou encore le développement des caméras infrarouges (à matrices de détecteurs quantiques ou bolométriques ou encore multi-spectrales).

La mesure de propriétés thermophysiques est toujours une activité classique de laboratoire visant à compléter des bases de données sur les matériaux et à fournir des paramètres pour les codes numériques. De nombreux travaux sont poursuivis pour explorer les conditions extrêmes d'utilisation des nouveaux matériaux (comportement aux très hautes températures, microéchelles, conditions de couplages, changements de phase). Cependant, la métrologie des propriétés thermophysiques est aussi devenue un moyen de contrôle industriel. Le caractère non-intrusif de certaines techniques et la possibilité de traitement rapide d'un grand nombre de données militent pour une *installation en usine des dispositifs de métrologie* (développement de capteurs associés à des traitements de données en temps réel).

La caractérisation expérimentale des transferts paroi/fluides ou solide /solide, par l'intermédiaire de modélisation réduite utilisant un coefficient de transfert et une température fluide de référence ou une résistance thermique de contact constitue un important domaine d'étude. On peut citer ici par exemple les mesures de coefficients d'échange par méthodes impulsionnelles qui associent thermographie IR et modélisation du régime variable dans la couche limite et dans la paroi (UTAP, Reims). Un autre champ important concerne la mesure des distributions de flux pariétaux sur les solides en utilisant des capteurs spécifiques associés ou non à des méthodes inverses.

Les enjeux scientifiques et technologiques

La situation actuelle montre que, de toute évidence, on est passé d'une activité de mesure localisée ou globale (mono-capteur) avec un faible nombre de données à une mesure issue d'un *grand nombre de capteurs répartis spatialement* ou balayant rapidement une scène ou un *champ* de température (« full field » en anglais).

Cette révolution déjà entamée avec l'avènement des caméras infrarouges est accélérée par la diminution des coûts d'appareillages, la variété de nouvelles méthodes de mesure des champs 2D ou 3D de température (optiques, RMN, fluorescence, microscopie en champ proche etc...) ou encore le développement des accessoires liés à l'imagerie vidéo (électronique et logiciels d'acquisition et de traitement des images).

Le thermicien-mécanicien des milieux continus, par sa connaissance des modèles physiques, se doit ici de relever le défi de l'interprétation et de l'analyse de ce nouveau type d'information au côté du traiteur d'images classique, de l'opticien ou même de l'électronicien-technologue des caméras. Ce rôle du physicien des milieux continus au sein d'équipes pluridisciplinaires se retrouve dans d'autres domaines de la mécanique (en mécanique du solide avec la mesure de champs de déplacements et de déformations ou en mécanique des fluides avec la mesure de champs de vitesse et de taux de déformation). Ainsi, on voit déjà apparaître en France des études sur le *couplage thermomécanique* (mesure simultanée de champs de déformation par imagerie vidéo et estimation de termes sources thermiques par thermographie IR, liés à la dégradation de l'énergie mécanique). A quand la « fusion » de champs de température et de vitesse analogue à celle pratiquée en médecine (couplage d'informations entre les données obtenues par caméras à émission de positons et les données RMN pour l'imagerie du cerveau) ?

Ces méthodes de mesure de champ constituent un progrès incontestable dans l'étude et la détection *d'hétérogénéités*, causées par une répartition spatiale de propriétés (défauts, fractures, délaminages), ainsi que dans la détermination des termes sources ou des conditions limites. Dans le domaine des milieux hétérogènes (*milieux poreux, milieux composites*), ces données sur les champs de température et de vitesse devraient permettre la *validation d'hypothèses de modélisation* (changement d'échelle, comparaison de propriétés macroscopiques et locales) en liaison avec les données morphologiques de ces milieux.

Des progrès restent à faire pour la maîtrise des conditions extrêmes, en particulier vers la microthermique (températures et transferts sur des surfaces inférieures au micromètre au carré) avec le développement de techniques de mesures dans l'ultraviolet, vers la thermique ultrarapide (transfert dans des temps inférieurs à 10 nanosecondes) et, avec des techniques qu'il reste à inventer vers les très hautes températures (supérieures à 3000 Kelvin) pour la sécurité nucléaire et la maîtrise des futures sources d'énergie.

De même, il est nécessaire que le thermicien revisite les techniques de caractérisation, en particulier la calorimétrie différentielle utilisée en routine pour caractériser les transformations des matériaux. L'analyse fine des températures et des sources devraient permettre de mieux discriminer dans les résultats les effets de régulation et de transfert thermique.

Sur le plan industriel, outre le caractère non-intrusif, la grande quantité de données obtenues en un temps court (thermographie infrarouge par exemple) devrait entraîner une *diminution du nombre d'expériences ou de tests* (diminution de cycles d'essais de fatigue dans l'industrie automobile, rétroconception et prototypage rapide par exemple).

En contrepartie de ces perspectives, ces méthodes présentent un « défaut de jeunesse » dû à un *grand nombre de limitations* liées aux difficultés d'analyse des données obtenues (physique du capteur, résolution, fonction de transfert de l'appareillage, techniques d'inversion, modèles adaptés...). Il reste de *nombreux progrès à réaliser en direction des méthodes de traitement* (robustesse, rapidité, fiabilité, stockage mémoire). Des efforts sont aussi à effectuer dans la fiabilisation, la mise au point de matériaux ou de méthode de référence et d'évaluation de la précision (imagerie quantitative).

L'aspect pluridisciplinaire de ces méthodes entraîne aussi une difficulté de gestion, de recherche et de partage de l'information, l'élargissement à des champs scientifiques très différents : thermique, mécanique des milieux continus, optique, traitement du signal et de l'image, électronique, mathématiques, statistique. Ceci nécessite une ouverture vers de très nombreuses revues scientifiques associées au couplage de ces disciplines.

6.2 techniques de modélisation et de simulation

6.2.1 Modélisation et simulation en transfert convectif

Etat de l'art

Toutes les méthodes de résolution des équations de Navier-Stokes écrites sous leur forme générale ou sous diverses formes approchées, en particulier en introduisant des hypothèses de couches limites ou en les parabolisant en négligeant les termes de diffusion axiale, sont

applicables pour résoudre des problèmes de convection thermique et/ou de convection massique. Elles le sont aussi pour traiter des problèmes de convection en milieux poreux lorsque des modèles de type Darcy-Brinkman-Forschheimer sont introduits après avoir moyenné les équations de Navier-Stokes dans des volumes d'étude représentatifs de la matrice poreuse.

Les méthodes utilisées sont pratiquement toutes issues des travaux théoriques et numériques effectués au cours des dernières décennies en mécanique des fluides et sont extrêmement variées. Il n'est donc pas question de faire ici un bilan exhaustif de toutes ces méthodes qui ont fait l'objet de nombreux ouvrages mais de centrer l'exposé sur celles qui sont actuellement les plus utilisées, que ce soit dans les codes de calcul développés au sein des laboratoires de la communauté des thermiciens ou dans les codes commercialisés.

Les méthodes de résolution des formes simplifiées des équations de conservation : en dehors des configurations pour lesquelles l'équation de quantité de mouvement peut être linéarisée (régimes dynamique et thermique établis dans des géométries simples), des solutions exactes n'existent pas en général. Cependant, si, par exemple, le couplage vitesse-pression peut être traité analytiquement ou si les termes de diffusion axiale peuvent être négligés (écoulements en conduites à grands nombres de Reynolds et de Péclet, écoulements de couche limite externe...), il est préférable d'employer des méthodes de résolution spécifiques qui sont nettement moins coûteuses et plus précises que des méthodes plus générales. C'est pourquoi les transformations, similaires ou non similaires, qui ramènent les équations de conservation à un système d'équations différentielles ordinaires non-linéaires restent très utilisées.

Les méthodes numériques : parmi les nombreuses méthodes numériques qui ont été développées pour simuler les transferts convectifs au cours des dernières années, les plus couramment utilisées sont les méthodes de différences finies (les plus anciennes), la méthode d'éléments finis dont l'essor (en mécanique des fluides) date du milieu des années 70, la méthode des volumes finis qui est certainement la plus couramment utilisée aujourd'hui et, dans une moindre mesure, les méthodes spectrales. Les principes de ces méthodes reposent sur des bases qui sont présentées en **Annexe 2**. Le lecteur intéressé y trouvera une synthèse très utile pour la compréhension des atouts et limitations de ces méthodes.

Enjeux – Perspectives

Dans la plupart des applications, les transferts de quantité de mouvement, de chaleur ou de matière sont turbulents. Les modèles basés sur des moyennes statistiques des équations de conservation (RANS : « Reynolds Averaged Navier-Stokes ») permettent d'obtenir des solutions de précision acceptable dans certaines conditions (turbulence homogène et isotrope, forts taux de turbulence ...) en utilisant des maillages relativement grossiers et en introduisant des lois de parois. Par contre, les comparaisons avec les expériences pour des écoulements de convection naturelle ou pour des écoulements en rotation montrent qu'il faut utiliser des modèles plus sophistiqués. En effet les simulations sans modèle de turbulence (DNS : « Direct Numerical Simulation ») resteront limitées au cours des prochaines années à de très faibles taux de turbulence. Dans ce contexte, il importe de favoriser les approches de type modélisation de sous-maille (LES : « Large Eddy Simulation ») et de mieux comprendre l'interaction entre le modèle et la nature de l'approximation numérique, dans la perspective de pouvoir simuler de façon économe des écoulements pleinement turbulents. Compte tenu de la

très faible épaisseur des couches pariétales, la question de l'introduction de lois de parois dans les modélisations de type LES peut être une voie qu'il importe d'explorer.

Un autre enjeu est de disposer d'outils de prédiction pertinents et validés, afin d'appréhender les couplages avec d'autres phénomènes : conduction dans les parois, transferts radiatifs et phénomènes de condensation/évaporation surfacique ou volumique dans des géométries complexes. Cet aspect concerne principalement les transferts par convection naturelle ou mixte dans des espaces confinés remplis de fluides ou de milieux poreux saturés par des fluides à plusieurs constituants. Cette approche s'inscrit dans la perspective de développer des outils de modélisation capables de traiter numériquement des modèles multi-physiques voire multi-échelles. La problématique est multiple : d'une part développer des modèles faisant intervenir des phénomènes physiques différents et formaliser leur couplage, vérifier le caractère mathématiquement bien posé du problème et enfin, développer des algorithmes de couplage efficaces mis en oeuvre dans des environnements logiciels adaptés.

Il paraît aussi nécessaire d'évaluer la sensibilité des solutions numériques à des incertitudes de modélisation (incertitudes dans les équations constitutives, variabilité ou thermo-dépendance des propriétés thermophysiques, incertitudes dans les données géométriques, dans les conditions aux limites, ...). Ceci doit être effectué à l'aide de méthodologies appropriées, comme par exemple l'utilisation de polynômes de chaos. Ce type de méthodologie consiste à considérer les quantités incertaines comme des variables aléatoires, de caractéristiques connues, que l'on développe sur des bases de fonctions appropriées, et à rechercher la solution sous forme de variables aléatoires dont les caractéristiques sont les inconnues. Ces méthodes, qui commencent à être opérationnelles en stationnaire lorsque les données et les inconnues présentent des caractéristiques voisines, doivent être étendues lorsque les inconnues présentent des comportements discontinus de type catastrophique (existence d'un écoulement ou non par exemple suite à de petites variations de l'écart de température pour prendre un exemple concret) et à des situations instationnaires où les effets cumulatifs peuvent devenir importants.

Le développement de ces modèles multi-physiques, au delà de leur intérêt comme outil de connaissance, est aussi motivé par les besoins industriels car ces modèles constituent des aides à la conception et à l'optimisation des systèmes complexes

Ces méthodologies d'optimisation peuvent relever du contrôle optimal, lorsque le nombre de paramètres est limité, ou faire appel à des méthodes du type algorithme génétique, plus appropriées aux situations multi-physiques et à l'exploration de situations où les fonctionnelles de coût peuvent présenter de nombreux minima locaux.

A mesure que l'on progresse vers des modèles numériques multi-physiques multi-échelles, la question de la validation des codes devient une étape de plus en plus délicate. Il convient d'accompagner cette progression par la mise en place d'exercices de comparaison (ou « benchmarks ») pertinents par rapport aux situations ou configurations envisagées. L'objectif de ces benchmarks est de fournir des solutions de référence qui font l'objet d'un consensus et de quantifier les performances des algorithmes d'un point de vue précision/coût. Ils permettent également de quantifier la dépendance de la solution au degré de finesse de la discrétisation. La communauté nationale est bien positionnée dans ce domaine puisqu'elle a organisé plusieurs benchmarks internationaux. Nous pouvons citer en particulier les benchmarks suivants :

- Instabilités convectives de fluides à faible nombre de Prandtl (1988),
- Couplage convection et changement de phase (1999),
- Convection naturelle non-Boussinesq (2000, 2004),
- Convection turbulente et transport de polluant entre deux pièces (2000),
- Mixed Convection and Condensation (MICOCO benchmark, CEA) (changement de phase, 2002)

Finalement, l'enjeu des développements futurs est tout d'abord lié à l'accroissement des performances des codes de modélisation, et donc de celles des calculateurs. Ces développements sont également conditionnés à la résolution de problèmes complexes de parallélisation de codes et de décomposition de domaines. Le développement de nouveaux schémas devrait permettre la prise en compte des petites échelles (couches limites au voisinage des bords du domaine) et des grandes échelles (conditions aux limites lointaines). Ces nouvelles techniques d'approximation font généralement appel à des méthodes de discrétisation sur des grilles non-structurées (par exemple, les grilles de Voronoï).

Les quelques perspectives qui viennent d'être présentées constituent un vaste programme de recherche, aux enjeux scientifiques et techniques considérables pour la thermique convective numérique. On aura également compris que les thermiciens, s'ils sont incontournables sur les questions de modélisation, ne peuvent prétendre mener seuls tous ces développements pour lesquels des synergies avec des mathématiciens appliqués et des informaticiens sont nécessaires.

Nous terminons cette section en donnant une liste, probablement non exhaustive, des laboratoires actifs dans le domaine des transferts convectifs :

CEA-DEN/DTP/SMTH Grenoble (changement de phase, convection mixte), CEA-DEN-SFME Saclay, CETHIL, EPM (Grenoble, écoulements thermoconvectifs avec champ magnétique), EM2C, FAST, IMFT, IUSTI, LEGI, LEMTA, LEPTAB, LET, LETEM, LMFA, LIMSI, LMSNM, LTN, TREFLE.

6.2.2 Modélisation et simulation en transfert radiatif

Etat de l'art

Dans le cas des milieux semi-transparents plusieurs méthodes numériques existent pour simuler le transfert radiatif.

La méthode de Monte Carlo propose une solution originale dans la mesure où elle repose sur un suivi de photons effectué de manière probabiliste, suivi d'un traitement statistique donnant accès aux grandeurs énergétiques.

La méthode des zones est basée sur un ensemble de bilans entre zones et surfaces isothermes. Dans la plupart des méthodes utilisées, le transfert de chaleur par rayonnement est modélisé à l'aide de l'Equation du Transfert Radiatif (ETR) qui permet de déterminer le champ de luminance dans le milieu. Le flux radiatif est donné en intégrant le champ de luminance dans toutes les directions de l'espace et sur toutes les longueurs d'ondes. L'ETR, prise sous sa forme complexe, n'a pas de solution analytique. Il apparaît alors nécessaire d'employer une

méthode numérique pour résoudre l'équation. Sur le plan pratique, l'une des difficultés essentielles dans la résolution numérique de l'ETR, réside dans le calcul d'une fonction de sept variables (trois coordonnées de position, deux coordonnées angulaires, une variable temporelle et un paramètre spectral). Par ailleurs, l'ETR étant de type intégral-différentiel, l'autre difficulté majeure pour la résoudre provient du terme intégral (problèmes de discrétisation angulaire) et du terme non homogène où intervient la température et qui nécessite généralement de coupler l'ETR à l'équation de conservation de l'énergie. Différents auteurs ont publié des ouvrages concernant la résolution de l'ETR, notamment Chandrasekhar (1960), Ozisik (1973) et Modest (1993). Parmi les différentes méthodes existantes, il y a les solutions formelles (utiles pour la compréhension mais peu adaptées au cas de milieux réels), les méthodes dites « approchées » et les méthodes numériques.

Les méthodes approchées : il s'agit généralement de méthodes donnant des formes simplifiées de solutions formelles parmi lesquelles les méthodes connues sous le nom de : l'approximation de Rosseland ou approximation de la diffusion et le modèle à deux flux. Dans certains cas, ces deux méthodes permettent d'approcher les solutions exactes. Elles ont en outre l'avantage de permettre de représenter le transfert radiatif comme un phénomène diffusif et de définir une **conductivité radiative** par analogie avec la conductivité thermique.

Les méthodes numériques : elles sont relativement nombreuses ; sont notamment utilisées :

- La méthode de Monte Carlo : cette méthode se distingue des autres par le fait qu'elle ne passe pas par la résolution de l'ETR. Elle est basée sur une approche statistique pour résoudre le transfert radiatif en utilisant une description probabiliste des processus d'échanges radiatifs.
- La méthode des zones : cette méthode consiste à diviser le milieu en un nombre fini de zones volumiques isothermes et les surfaces entourant le milieu en un nombre fini de zones surfaciques isothermes. Le transfert radiatif est alors modélisé en écrivant un bilan d'énergie pour chaque zone.
- Les méthodes multiflux : le principe de ces méthodes repose sur une discrétisation de l'espace angulaire et, dans les différents angles solides formés, la luminance est considérée uniforme.
- La méthode des ordonnées discrètes (également appelée MOD ou méthode S_N) : elle consiste à approcher le terme intégral dans l'équation par une formule de quadrature. En écrivant l'ETR pour chaque direction, on obtient alors un système d'équations aux dérivées partielles qui se résout en utilisant une discrétisation spatiale, par une méthode aux différences finies par exemple.
- La méthode des harmoniques sphériques : cette méthode consiste à développer la distribution angulaire de la luminance en une série d'harmoniques sphériques. La série peut être tronquée arbitrairement à N termes. On parle de méthode P_N et l'ETR se réduit, comme dans la méthode S_N , à un système d'équations aux dérivées partielles.
- La méthode des transferts discrets : cette méthode privilégie la discrétisation angulaire du rayonnement aux parois. L'idée est de suivre un rayon (i.e. une luminance) à la fois, plutôt que de résoudre tout le champ de luminance à travers le domaine.
- La méthode des volumes finis : la résolution des transferts radiatifs par la méthode des volumes finis est relativement récente. C'est une méthode dans laquelle on exprime que les flux d'énergie radiative entrant et sortant au travers des faces d'un volume de contrôle sont compensés (en équilibre) par l'atténuation et l'augmentation d'énergie radiative dans ce même volume et ce pour un angle de propagation donné. L'angle solide total 4π est discrétisé en un nombre fini d'angles solides (angles de contrôle) d'une manière qui dépend du problème traité. La méthode des volumes finis est

conservative car elle assure la conservation globale de l'énergie, pour chaque composante discrète de la luminance ainsi que pour les flux radiatifs.

Signalons qu'un soin tout particulier doit être apporté à chaque niveau de discrétisation. Le choix de la quadrature angulaire pour la discrétisation directionnelle, du mode de discrétisation spectrale (modèles par bande, modèles ck, SNB,...) et de la discrétisation spatiale (différences finies, éléments finis, volumes finis,...) conditionne la qualité du résultat.

Chacune des méthodes citées plus haut présente ses avantages et ses inconvénients. Quoi qu'il en soit, aucune de ces méthodes n'est considérée comme étant la plus adaptée à tout type de problème. Les problèmes industriels que l'on peut rencontrer sont très diversifiés, notamment par la nature du milieu à étudier et par la variété des conditions aux limites qui peuvent être traitées. Aussi, le choix d'une méthode est le plus souvent conditionné par le type d'application et c'est généralement un compromis entre les exigences de l'utilisateur en termes de difficulté de mise en œuvre, de précision et de coût en place mémoire et temps de calcul.

Nous commencerons en situant à part le problème spécifique de la transmission du rayonnement à travers une atmosphère gazeuse. Cet exercice particulier nécessite une finesse extrême pour décrire la réponse en fréquence du milieu. Des solutions spécifiques à ce problème sont apportées par le modèle référence dit raie-par-raie et les modèles simplifiés qu'il a permis de valider (ck, ckfg, modèle statistiques à bandes étroites).

Les travaux récents portent sur la résolution des transferts radiatifs dans des géométries multidimensionnelles (voir complexes) utilisant un maillage non structuré, dans le but de coupler le transfert radiatif avec d'autres modes de transferts (conduction, convection, combustion, transfert de masse,...). Parmi les méthodes que nous avons citées plus haut, la méthode de Monte Carlo, la méthode des transferts discrets et la méthode des volumes finis sont celles qui présentent une adaptation aisée aux maillages non structurés.

6.3 Méthodes inverses

Les *méthodes* de résolution des problèmes *inverses* et leurs applications sont actuellement en plein développement dans différents secteurs de la physique et notamment dans le domaine des transferts de chaleur. En pratique, les outils développés permettent d'accéder à des grandeurs non mesurables directement. La possibilité de reconstruire une distribution spatiale ou une évolution temporelle de densité de flux de chaleur à la frontière d'un domaine ou à l'interface entre deux solides, ou celle d'estimer une propriété thermophysique d'un matériau le plus souvent thermodépendante, constitue une aide précieuse dans l'analyse des transferts de chaleur.

Plus généralement, ces techniques sont développées par des spécialistes des mathématiques appliquées, des statistiques, de l'automatique et du traitement du signal. Les développements de ces méthodes dans le champ de la thermique se situent au carrefour de thématiques qui combinent à la fois des aspects théoriques, numériques et expérimentaux.

Les *travaux* dans ce domaine font l'objet d'une importante activité scientifique, comme en témoignent les nombreux séminaires et conférences internationales organisées aujourd'hui sur

ce thème, ainsi que le grand nombre de publications à la fois dans des revues dédiées et dans des journaux de thermique. Ces travaux concernent :

- La formulation des problèmes inverses, l'analyse de leur caractère « mal-posé », les techniques de régularisation
- Le développement d'algorithmes spécifiques à leur résolution, et leur validation numérique
- La conception optimale d'expériences, l'analyse d'erreurs, les métrologies adaptées intrusives ou non intrusives...
- Les applications aux problèmes d'estimation et de contrôle

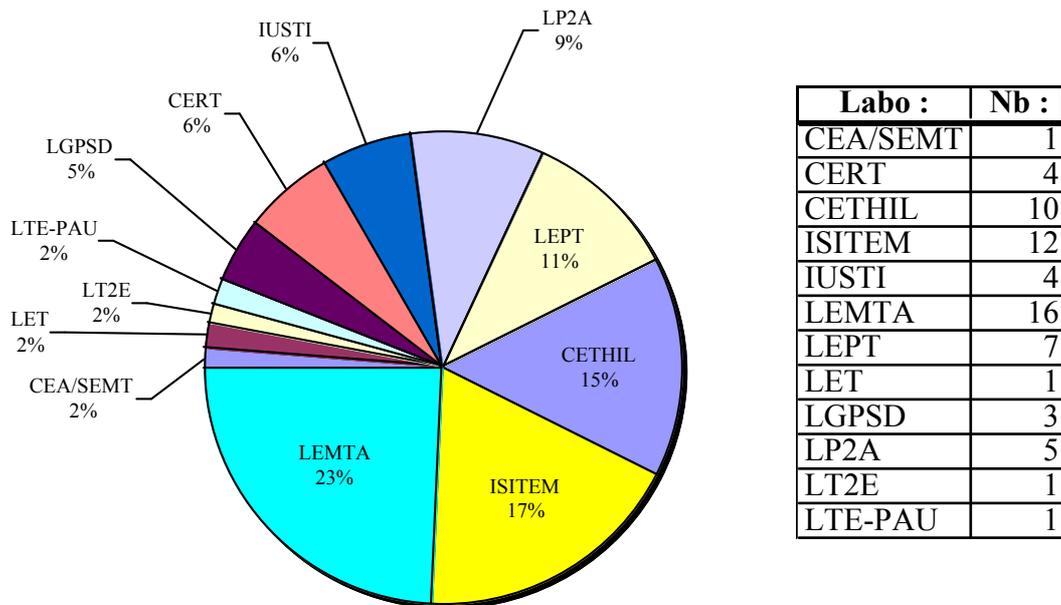
Les *applications* concernées par la résolution des problèmes inverses en thermique sont très variées. On peut distinguer :

- celles (les plus nombreuses) qui portent sur « l'inversion » de données expérimentales en vue d'estimer des conditions aux limites, des paramètres thermophysiques, des sources de chaleur, des conditions initiales, des formes de domaine, des défauts (contrôle non destructif)...
- celles qui visent à optimiser soit la conception, soit les conditions de fonctionnement d'un système thermique
- celles qui ont pour objet la « réduction » de modèles de ces systèmes

Cette problématique a connu un essor important dès la fin des années 60, quasi simultanément aux USA (travaux d'inversion expérimentale de J.V. Beck) et en URSS (technique de régularisation des problèmes mal-posés de A. Tikhonov). En France, le *groupe METTI* : Mesures en Thermique et Techniques Inverses, a été créé pour contribuer à la promotion de ces méthodes en thermique. Ce groupe qui s'est constitué informellement au début des années 90, d'abord au sein du Groupe Universitaire de Thermique, constitue depuis 2000 un groupe horizontal de la Société Française de Thermique. Sa spécificité résidait initialement dans le constat suivant : « Le développement de modèles thermiques pertinents et l'emploi conjoint de moyens d'acquisition performants, associés à une métrologie de qualité, permet de déterminer les grandeurs inconnues introduites dans les modèles ». Cette approche, qualifiée par J.V. Beck de « nouveau paradigme », vise prioritairement à développer une *méthodologie pour les expérimentateurs-inverseurs*. Ces derniers se trouvent en effet de plus en plus confrontés à une surabondance d'informations issues des chaînes modernes d'acquisition (caméras infrarouges par exemple) et de simulations numériques d'ordres paramétriques de plus en plus élevés rendues possibles par la puissance des moyens actuels de calculs (calcul « direct »). Ces deux phénomènes les amènent à adopter des *concepts spécifiques* : sensibilité des mesures à un paramètre (problème de caractérisation thermophysique) ou à une fonction (problème d'estimation d'une excitation thermique, température ou flux pariétal), et celui de son éventuelle identifiabilité. D'autres problèmes en découlent naturellement : par exemple celui de la conception optimale une expérience en fonction de l'objectif recherché (positionnement des capteurs, durée de la mesure, ...), celui du pilotage optimale d'un système (forme spatio-temporelle de l'excitation....) Les gains de temps rendus possibles par l'utilisation des techniques inverses, qui permettent de court-circuiter la répétition des cycles essais-erreurs et de ne pas reposer entièrement sur l'expertise de l'expérimentateur, expliquent le succès de la méthodologie proposée. Celle-ci nécessite que les différents acteurs en inversion, en modélisation et les expérimentateurs partagent une culture commune.

Situation actuelle

Le groupe METTI contribue activement au développement et à la promotion de ces concepts et outils spécifiques d'inversion, dans plusieurs *laboratoires français* de thermique et dans certains centres de recherche industriels. Deux écoles thématiques ont été organisées en 95 et en 99, ainsi qu'une conférence internationale (ICIPE 2) en 96 et un séminaire Eurotherm en 2001. L'enquête réalisée par C. Le Niliot en mars 2002 a recensé 65 thèses issues d'une douzaine de laboratoires faisant appel à ces thématiques depuis la création de METTI.



Répartition des thèses par laboratoire (Journée d'étude SFT du 6 Mars 2002)

Les *domaines d'application* de ces travaux de thèse concernent principalement le mode de transfert par conduction qui a été le premier et le plus largement développé. Ceci réside dans la robustesse de la loi de Fourier. Sa validité locale aux échelles habituelles en fait un terrain de jeu idéal pour les inverseurs-expérimentateurs, au delà même du caractère utilitaire de leur démarche. Les résultats acquis en conduction inverse pour les transferts 1-D au début des années 90, ont été étendus aujourd'hui à des configurations 2-D, voire 3-D permanent ou transitoire, lorsque le matériau support est homogène et depuis peu hétérogène (multicouche). Des cas tests linéaires existent et ont déjà permis des intercomparaisons de techniques d'inversion. Les cas non-linéaires, c'est à dire pour lesquels une propriété thermo-physique varie par exemple avec la température commencent à être abordés.

Les outils d'inversion privilégiant l'étude des coefficients de sensibilité et l'analyse des erreurs d'estimation ont permis de *revisiter des problèmes plus anciens* de caractérisation thermophysique de matériaux (méthode flash, méthode du fil chaud en conduction, de la plaque chaude gardée, estimation de résistances de contact...). Soulignons que la diffusion de ces outils au sein de la communauté scientifique dont l'activité est centrée sur la caractérisation thermophysique semble spécifique à la France, elle n'apparaît pas très sensible au niveau international, ainsi qu'en témoignent notamment les travaux présentés au dernier congrès européen ECTP (Mesures de Propriétés Thermophysiques), à Londres (2002). Il en est de même au niveau mondial pour la thermique, en particulier au travers de la dernière

Conférence Mondiale de Transfert de Chaleur (IHTC 12) dans laquelle la thématique inverse est restée encore très peu présente.

Au delà de leur efficacité en estimation de grandeurs, ces nouvelles techniques d'inversion ont contribué à faire ressortir de *nouveaux concepts en modélisation*. On soulignera par exemple l'intérêt du « *principe de parcimonie* ». En effet à la différence des problèmes directs dans lequel la qualité de la simulation augmente avec le nombre de paramètres pris en compte dans le modèle, dans les problèmes inverses paramétriques l'erreur d'estimation augmente généralement exponentiellement avec le nombre de paramètres recherchés, à quantité de mesures, c'est à dire d'information, constante. Ceci fait ressortir l'intérêt de l'utilisation de modèles pertinents, vis à vis de l'objectif recherché, c'est à dire vis à vis du niveau de résolution recherché ou de l'endroit où le système va être observé. Ceci est intimement lié à la construction de *modèle réduit*, soit à partir de mesures (identification de modèle) soit à partir d'un modèle plus détaillé sur des excitations données. Ce type de réduction est particulièrement utile lorsqu'on cherche à coupler des modèles diffusifs avec d'autres phénomènes se produisant simultanément dans un même milieu ou dans des milieux différents. En sciences pour l'ingénieur, ceci présente un intérêt certain pour modéliser non plus seulement des milieux mais également des systèmes (couplages conduction/rayonnement en milieu semi-transparent, couplage paroi/écoulement en micro-fluidique, transferts chaleur-masse en milieu poreux...). Un autre enseignement issu de l'usage de ces techniques est de relativiser l'importance du choix de la technique de minimisation de la fonctionnelle des moindres carrés des écarts mesures/modèle en privilégiant la réduction du modèle pour initier la recherche de ce minimum. De même en modélisation, *l'observation des résidus* (écarts modèle-expérience) s'est révélée une étape obligée dans l'analyse de la validité de certains modèles et de leur caractère éventuellement intrinsèque ou, plus rigoureusement leur non mise en défaut dans une situation donnée.

Enjeux - Perspectives

La communauté française des « expérimentateurs-inverseurs » en thermique regroupe plusieurs dizaines de chercheurs issus de laboratoires universitaires (une douzaine) et industriels (ONERA, CEA, ..) qui se réclament de cette thématique transverse. Elle organise en 2005 une école européenne EUROTHERM sur l'inversion de mesures en physique des transferts pour tenter de fédérer cette thématique au niveau européen. Au niveau international, elle fait preuve de son dynamisme à travers sa forte participation aux Conférences Internationales organisées sur ce thème, ainsi qu'à leur organisation notamment au cycle de conférences ICIPE, sur les Problèmes Inverses en Sciences pour l'Ingénieur, initiée par J.V. Beck au début des années 90.

Compte tenu de la culture acquise par cette communauté, et de l'orientation actuelle des travaux en cours dans le domaine de la thermique, indiquons parmi les nombreuses perspectives celles qui se dégagent tout particulièrement.

1.- L'analyse des *transferts conductifs couplés à un phénomène thermodépendant* ouvre des domaines d'applications très riches, notamment pour étudier les transferts avec changement de phase, en milieu poreux, dans un matériau en cours de transformation,...l'approche inverse est insuffisamment présente en caractérisation des transferts couplés conduction-rayonnement en milieux semi-transparentes denses. Un gros effort reste à faire sur la réduction de modèles : les modèles utilisés restent encore ou trop détaillés ou trop grossiers et leur niveau de résolution doit être adapté aux possibilités de mesures pour pouvoir être utilisés et intégrés

dans des modélisations de systèmes. Les besoins industriels sont très importants (thermique du bâtiment, mise en forme des matériaux, imagerie et visualisation d'écoulements thermoconvectifs,...). Des cas tests (benchmarks) seraient très utiles.

2.- Les travaux sur le thème de la *convection inverse* démarrent depuis 2000. Les équations du système thermique étudié décrivent alors un écoulement et les mesures sont issues de sondes de température en paroi ou dans le fluide. Des applications très variées existent et sont d'un intérêt applicatif certain. On peut citer l'établissement de lois de comportement thermo-mécanique en plasturgie, la dispersion thermique dans un milieu poreux, la mesure de flux échangé dans des microéchangeurs, la convection naturelle en cavité différentiellement chauffée. Les techniques inverses utilisées sont extrêmement variées (inversion par méthode de gradient au LTN Nantes, logique floue à l'UTAP Reims, réseaux de neurones au LME Valenciennes,...).

3.- Un autre secteur en devenir est l'*élaboration de modèles réduits* ou identifiés permettant de transformer les capteurs thermiques en capteurs de température « intelligents », capables d'être couplés indirectement au phénomène qu'ils sont censés mesurer ou détecter (source thermique) par l'équation de l'énergie en convection ou par des corrélations. On peut citer ici des capteurs pour caractériser les feux de forêt, ou les débuts d'incendie. Une même approche concerne, en transfert d'espèces et non plus thermique, la mise au point de capteurs de pollution, mesurant des concentrations, pouvant permettre de remonter par une équation de transfert convectif donné à l'intensité et à la position des sources (domaine de la sécurité du travail, détection de fuites, pollution urbaine).

4.- Plus généralement, ces techniques sont bien adaptées à l'*identification expérimentale de modèles*, dans des situations où une représentation d'état est difficile à mettre en place, du fait de la géométrie ou de la structure des systèmes. C'est le cas par exemple en thermique des outils lors de l'usinage, en contrôle des températures dans des systèmes électriques embarqués, ou en caractérisation thermique de caloducs.

5.- Des techniques spécifiques sont en cours de développement pour traiter l'information surabondante due à l'énorme accroissement des performances des *caméras infrarouges* de dernière génération dont la résolution spatiale approche maintenant les 100000 pixels pour des résolutions thermiques de quelques centièmes de Kelvin. Au niveau des applications, on peut citer le contrôle non destructif de fissures par exemple.

Pour conclure il faut souligner le *caractère fédérateur* intrinsèque à la thématique « inverse ». Au delà de l'aspect simplement thermique des transferts, les thermiciens de METTI travaillent de plus en plus à la résolution de problèmes se situant à l'interface de plusieurs communautés : avec les tribologues sur la thermique du contact, avec les chercheurs du Génie des Procédés en caractérisation de la dispersion thermique en milieu poreux ou en mise en forme de thermoplastiques, avec ceux du Génie Electrique en thermique des composants de puissance et des moteurs notamment. Depuis quelques années on assiste également à une démarche analogue dans des communautés « voisines » (organismes académiques et industries) qui sont utilisateurs des mêmes techniques d'inversion, par exemple dans le secteur agro-alimentaire, la sidérurgie, etc...

6.4 Thermodynamique fondamentale

Avancées récentes de la thermodynamique et défis à la thermique

La recherche et le choix de systèmes, en particulier nouveaux, étaient basés jusqu'à présent sur une *structure* devant répondre au mieux au **premier principe**, c'est à dire au rapport de la quantité de l'énergie ou matière utile recherchée pour laquelle le système est conçu, et de celle issue d'une ressource matérielle ou énergétique de quantité donnée. Une telle structure, avec ses variables ajustables est habituellement optimisée en fonction de sa robustesse aux risques économiques et technologiques, (multicritères au sens de Pareto). Les éléments de tels systèmes, liés à la maîtrise de la thermique, sont alors choisis et optimisés pour répondre à ces critères.

L'analyse exergetique, développée à partir du deuxième principe, permet d'adopter un barème d'analyse basé sur la valeur des entrants et sortants du système (en termes de quantité et la qualité), en particulier de celle sortante recherchée prioritairement. Le rapport classique des exergies sortantes et entrantes, le rendement exergetique, est toutefois à présent substitué par l'effectivité exergetique, rapport entre les exergies des seules énergies ou matières utiles et les exergies entrantes : l'effectivité exergetique, une base plus réaliste de comparaison de systèmes réels.

Plus récemment, c'est au niveau *du système idéal* au sens de la thermodynamique, c'est-à-dire sans irréversibilités, qu'un critère exergetique nouveau dénommé « facteur exergetique de conversion » a été caractérisé : il conduit à minimiser, dès l'édification de la structure idéale, la part de l'exergie qui ne fait que transiter à travers le système, sans subir de conversion ou de transformation. L'application d'un tel critère de comparaison de systèmes idéaux entraîne des conséquences importantes aux niveaux des éléments du système, échanges et rejets thermiques en particulier : il s'agit en effet d'effectuer le choix des éléments structuraux devant conduire à la minimisation de cette exergie de transit.

A partir du système idéal optimal, le choix concret de la *configuration* passe à présent par *l'analyse de la thermodynamique en temps fini*, ou de préférence *de dimensions finies*. Pour cela le système global appelé alors endoréversible est structuré en deux parties : l'ensemble des éléments internes au système supports de conversion ou transformation d'énergie ou de matière d'une part ; les éléments externes à cet ensemble assurant les transferts d'énergie depuis des sources (ou vers des puits) externes d'autre part. L'ensemble des éléments retenus en interne au système est supposé fonctionner sans irréversibilités C'est ainsi qu'il est possible de caractériser, pour une puissance maximale de production de l'ensemble, ou d'autres critères comme une surface d'échange donnée, les performances du système endoréversible en fonction de la nature des échanges thermiques, conduction, convection ou rayonnement. C'est ainsi qu'a priori des échanges par rayonnement conduisent à des performances de systèmes endoréversibles de puissance maximale les plus intéressants. Dans le cas de la conduction, la formulation de la loi phénoménologique de transfert, de type Fourier ou dite d'Onsager issue de la thermodynamique des processus irréversibles linéaires, conduit à des résultats différents au niveau des performances, objets de discussions actuelles.

L'analyse des irréversibilités dans l'ensemble, cette fois, des éléments du système fait l'objet de travaux actuels, ayant des conséquences importantes au niveau de la thermique. La

recherche à priori des *structures réelles optimales* implique l'analyse de la distribution, dans l'espace et/ou le temps de la création d'entropie, ou destruction d'exergie. Pour une tâche finie bien spécifiée, *la minimisation de la production d'entropie implique sa répartition optimale*. Le défi à la science liée à la thermique est important : l'intensification des transferts, conduisant à la maximisation de la productivité, soit du produit du coefficient de transfert et de la force motrice, implique des recherches, d'une part au niveau matériaux, micro-mélanges, micro-échanges..., d'autre part au niveau de la répartition de la force motrice. Le choix des paramètres comme l'aire d'interfaces de faibles dimensions, leur géométrie (avec ses influences sur le coefficient de transfert local), ont des conséquences en retour sur l'organisation du procédé dans le temps et/ou l'espace. De nouveaux outils sont à élaborer, comme ceux de *l'analyse constructale* en développement récent.

La conduction aux temps courts, en particulier à faible échelle, implique un terme inertiel dont le comportement est a priori en opposition avec les fondements de la thermodynamique. Une réelle interconnection de spécialistes sur ce type de sujet est fondamental pour lever des verrous devant conduire à de nouveaux procédés .

Les sciences : thermique, mécanique des fluides, matériaux, génie des procédés sont vraiment à développer avec l'appui de la thermodynamique, et de ses évolutions récentes . L'enjeu pour des thèmes actuels comme le développement d'énergies durables et acceptables, en est un exemple concret et urgent : le stockage dynamique du futur vecteur hydrogène, la gestion thermique des piles à combustibles, le transport du froid et/ou de la chaleur à longue distance, la séquestration du CO₂ en conditions supercritiques sont des exemples nécessitant l'interdisciplinarité de tels spécialistes .

La validation des choix devra alors être reprise à partir des critères cités au départ : optima économiques, technologiques, et à présent écologiques : production de CO₂, cycle de vie, bruit...

6.5 méthodes d'homogénéisation et processus stochastiques

Quelques considérations générales sur la notion de « milieu hétérogène »

La détermination des propriétés de transport (ou du comportement) macroscopique des milieux hétérogènes est un domaine auquel la thermique ne peut manquer de s'intéresser qu'il s'agisse d'hydrodynamique, de thermomécanique, de transfert de chaleur ou de masse voire de charge électrique... Il convient d'emblée de souligner que bien souvent ces différents aspects sont couplés, que l'on songe par exemple au couplage hydrodynamique/transfert de chaleur pour l'étude de la dispersion thermique dans un milieu poreux traversé par un fluide en écoulement de convection forcée, au séchage, à l'électro-hydrodynamique des milieux poreux (membranes par exemple)...

L'archétype des milieux hétérogènes est bien sûr le milieu poreux constitué au moins d'une phase solide et d'une phase fluide mais une telle méthodologie d'approche peut s'appliquer à bien d'autres types de milieux : milieux présentant des variations de propriétés, matériaux composites par exemple.

Un milieu poreux pourra présenter des hétérogénéités à diverses échelles de longueur, de l'ångström au kilomètre si l'on va des feuillets d'argile aux couches géologiques d'un

réservoir pétrolier, l'idéalisation par un milieu fractal faisant même apparaître toutes les échelles de longueur. C'est pourquoi l'on parlera généralement de problèmes multiéchelles et bien souvent multiphysiques pour indiquer à la fois la multiplicité des phénomènes à prendre en compte et le fait que la physique des processus peut changer avec l'échelle de longueur considérée (par exemple les interactions de nature électrique à la base de la physico-chimie des milieux sont à prendre en compte uniquement aux petites échelles).

Limitons notre changement d'échelle au cas simple d'un milieu à deux échelles de longueur « microscopique » et « macroscopique » et supposons que l'on puisse définir un *Volume Élémentaire Représentatif* (VER) : suffisamment grand pour être *représentatif* de la complexité d'origine géométrique du milieu à l'échelle microscopique ; et suffisamment petit pour être perçu comme *élémentaire* à l'échelle macroscopique. Cette notion de VER est équivalente à la notion de *séparation des échelles* qui permet de supposer que le repérage d'un point de l'espace dépend maintenant de deux systèmes de coordonnées indépendants aux échelles microscopique et macroscopique.

La description du milieu hétérogène peut être fondée soit sur une connaissance précise de la microstructure pour les méthodes de type déterministe (milieux périodiques spatialement), soit sur un ensemble de données plus ou moins complet (par exemple pour un milieu à deux phases : porosité, fonction de corrélation spatiale...) pour les méthodes de type stochastique.

Les méthodes de changement d'échelle

Les méthodes ad hoc – Les relations phénoménologiques

La recherche de relations phénoménologiques pour décrire les transferts en milieux hétérogènes naît peut-être avec DARCY dont la loi très célèbre date de 1856. Même si aujourd'hui le fondement rigoureux des relations macroscopiques est un travail utile et important, on ne saurait négliger l'intérêt de ces approches intuitives fondées sur un empirisme bien maîtrisé qui, dans des situations parfois compliquées, permettent de formuler une description efficace des processus.

La méthode thermodynamique

La méthode thermodynamique est classiquement utilisée pour fonder les lois de transport. Pour initier la démarche, les lois de conservation peuvent être directement écrites à l'échelle macroscopique (le changement d'échelles étant contourné) ou exprimées d'abord à l'échelle microscopique puis moyennées sur un VER dont l'existence est postulée dans *la théorie des mélanges hybrides*. L'analyse de la source d'entropie à l'échelle macroscopique permet alors de déduire les relations phénoménologiques macroscopiques satisfaisant la restriction thermodynamique.

L'homogénéisation périodique ou la méthode de prise de moyenne volumique avec fermeture

Si la description des phénomènes est complète à l'échelle microscopique, propager la physique de la microéchelle vers la macroéchelle est l'objectif de l'homogénéisation périodique ou de la méthode de prise de moyenne avec fermeture. Ces deux méthodes sont assez fortement apparentées. La première d'essence plus mathématique procède avec un

maximum de rigueur en exigeant le contrôle en permanence des ordres de grandeur des différents termes exprimés en puissance de ε ($\ll 1$) qui est le rapport entre les longueurs microscopique et macroscopique ; la seconde, plus intuitive et plus physique, homogénéise les grandeurs en prenant leurs moyennes sur un VER. Ces deux méthodes fournissent d'une part les équations macroscopiques que vérifient les grandeurs moyennes à l'échelle du milieu vu comme un milieu continu équivalent et, d'autre part, les problème de fermeture à résoudre sur une cellule-unité représentative du milieu réel pour calculer les coefficients apparaissant dans les équations macroscopiques. Signalons, pour conclure, qu'une variante stochastique (milieux définis en terme de fonction de corrélation) existe de l'homogénéisation périodique.

Les méthodes stochastiques

Si l'on considère maintenant que la corrélation des propriétés spatiales est l'élément essentiel qui gouverne, par exemple, la dispersion d'un traceur dans un milieu poreux (pour lequel n'existe plus nécessairement un VER si la *longueur de corrélation* diverge), une vision non déterministe mais *stochastique* s'impose. Le milieu est alors la réalisation d'un champ corrélé d'une variable aléatoire. Chaque processus de transport pourra alors être analysé au moyen d'une méthode de Monte-Carlo et l'on s'intéressera à la moyenne et à la variance d'un ensemble de réalisations. Ce nouveau champ d'investigation a connu dans les toutes dernières années des développements considérables.

Les enjeux

Au delà des problèmes de transport en milieux poreux, il est manifeste que les méthodes d'homogénéisation sont appelées à se développer compte tenu de la forte demande de caractérisation des transferts dans les systèmes extrêmement hétérogènes étudiés dans une grande variété d'applications (de la membrane d'une pile à combustible au composite aéronautique à base de tissu en passant par les mousses métalliques).

Un point dur concerne les méthodes stochastiques, méthodes dont le potentiel d'application est énorme mais qui bute encore sur de redoutables problèmes de modélisation : comment par exemple calculer les propriétés stochastiques d'un champ, de température par exemple (espérance probabiliste et matrice de variance-covariance), à partir des mêmes propriétés d'un champ aléatoire de coefficients (conductivité thermique par exemple) dont ce champ est solution et ce, sans faire appel à des simulations (statistiques), de type Monte Carlo, sur un grand nombre de réalisations de celui-ci suivies du calcul de la solution en température ?

Ce type d'approche est développé actuellement par les pétroliers, en particulier pour la perméabilité des réservoirs.

Les laboratoires de thermique actifs dans ce domaine sont l'IUSTI (Marseille), le TREFLE (Bordeaux), le FAST (Orsay), l'IMFT (Toulouse) et le LEMTA (Nancy).

7. APPORTS DU COLLOQUE DU 12 JANVIER 2005

7.1 Compte-rendu du colloque « Enjeux et Perspectives de la Recherche en Thermique pour la Science, l'Industrie et l'Environnement »

Contexte : Cette manifestation, qui s'est tenue au Ministère de la Recherche, Amphithéâtre Poincaré, à Paris, le 12 janvier 2005, a été organisée par la Société Française de Thermique sous le parrainage du Ministère délégué à la Recherche. La précédente édition datait de 1988. Il était donc très important pour la communauté thermicienne d'utiliser ce colloque pour préciser le positionnement de la recherche en thermique dans le paysage scientifique, universitaire et économique français et européen. Un autre objectif était de dégager des pistes de recherche pour les dix années qui viennent, en formalisant - via le livre blanc - les attentes des différents acteurs de la recherche et les enjeux correspondants. Enfin il s'agissait également de contribuer à l'avenir de la recherche dans nos spécialités, en pesant en particulier sur les décisions ministérielles,

Avertissement : Le compte-rendu qui suit a été rédigé à partir des notes prises par Paul Kuentzmann que nous tenons particulièrement à remercier. Les différents intervenants ont eu connaissance de ce document et leurs corrections et remarques ont été intégrées dans le compte-rendu qui suit.

Ce colloque a réuni 201 personnes pour d'abord présenter la version 3 provisoire du Livre Blanc de la Recherche en Thermique et ensuite débattre sur la prospective et les perspectives de la recherche dans cette discipline. On peut donc considérer que ce colloque a connu un indéniable succès d'audience pour une société savante riche de seulement 300 membres cotisants.

La journée a été présidée successivement par *Jean-Jacques Gagnepain*, Directeur de la Technologie au Ministère de la Recherche et par *Michel Lebouché*, Chef de la Mission scientifique technologique et pédagogique au Ministère de la Recherche. Elle a été animée par *Fabienne Chauvière*, journaliste scientifique (France Inter et France-Info).

Elle a comporté un exposé de présentation du Livre Blanc (*Didier Delaunay*, LTN et *Denis Maillet*, LEMTA) ainsi que quatre exposés sur les thématiques suivantes : « Quelles solutions pour une politique énergétique respectueuse de l'environnement ? » (*Bernard Tamain*, IN2P3), « Transport, Economie et Thermique » (*Alain Le-Douaron*, Renault), « Siderurgie et refroidissement diphasique à haute température » (*Pascal Gardin*, Arcelor) et enfin « Les enjeux de la micro-thermique » (*Jean-Pierre Joly*, CEA-LETI).

Deux tables rondes ont également eu lieu sur l'offre de recherche et la demande industrielle et sur la concrétisation de la relation recherche-industrie. Elles ont rassemblé une quinzaine d'industriels et de scientifiques. Une synthèse de cette journée et les planches de tout ou partie des présentations vont être prochainement mises sur le site de la SFT (<http://www.sft.asso.fr/>). La version 3 du livre blanc, intégrant les principaux points de cette journée et quelques contributions ultérieures seront également mises sur ce site web.

Fabienne Chauvière présente *Jean-Claude Bouchter*, Président de la SFT.

Jean-Claude Boucher remercie les différents auteurs du Livre Blanc et introduit brièvement la journée. Les objectifs de celle-ci sont de rassembler la communauté thermicienne et d'accroître la connaissance mutuelle des différents acteurs de la recherche afin de développer une synergie pour l'innovation technologique, dans le contexte de la mondialisation. Il rappelle en outre que 2005 est l'année de la physique.

Jean-Jacques Gagnepain prononce une brève allocution d'introduction. L'année 2005 sera marquée par la loi sur la recherche. La thermique constitue un thème très général. On peut considérer la chaleur comme la forme ultime de l'énergie. A l'échelle de l'infiniment petit, les transferts thermiques sont interprétés en termes de phonons, qui représentent des modes de relaxation. A ce niveau, les potentiels des forces inter-atomiques sont non-linéaires, ce qui explique à la fois la diffusion de la chaleur, la dilatation thermique et plus généralement la thermomécanique.

La thermique est utile dans de nombreuses applications mais elle peut également constituer une cause de limitations, c'est à dire une contrainte, que cela soit en instrumentation, pour le futur réacteur de fusion (ITER), pour les réacteurs nucléaires à haute température de 4^{ème} génération, pour les aubes de turbine, pour l'habitat,...

La modélisation des transferts thermiques requiert la prise en compte du couplage de différents phénomènes.

A la question « *La thermique est-elle une discipline ?* », *Jean-Jacques Gagnepain* répond « *oui* ». La thermique constitue un terrain général d'applications et tous les secteurs industriels sont concernés. Il existe donc une demande de l'industrie et il est nécessaire d'accentuer le partenariat recherche publique/recherche privée.

Didier Delaunay et *Denis Maillet* présentent ensuite le Livre Blanc de la Recherche en Thermique.

« *Pourquoi un livre blanc ?* ». Comme en 1980, le monde est actuellement confronté à une crise de l'énergie. Un autre fait est apparu depuis : le besoin de procédés plus performants. Quelques jalons antérieurs sont évoqués : en 1980, un document « *La thermique en 1980, enjeux et perspectives* » du Groupement Universitaire de Thermique (GUT), rédigé à l'initiative de *Jean-Pierre Bardon* et de *Michel Combarnous*, a été à l'origine d'une Action Thématique Programmée du CNRS et a permis le développement de l'enseignement de la thermique. En 1988, un Colloque CNRS, « *Thermique des systèmes et des procédés* », initié par *Jean-Laurent Peube*, a constitué un point d'étape. Plus récemment, en 1997, *Jean-Bernard Saulnier* et *Jean Taine* ont coordonné un document du Ministère de la Recherche intitulé « *Enjeux et perspectives en physique des transferts* ». Celui-ci a servi à lancer différentes actions, telles le Réseau AMETH (AMélioration des Echanges Thermiques) ou le GdR (Groupement de Recherche) sur le Rayonnement.

« *A qui est destiné le Livre Blanc ?* ». Il s'agit d'abord d'une démarche identitaire à destination de la communauté thermicienne. Elle concerne également les partenaires industriels, le CNRS, au travers prioritairement de son Département Sciences pour l'Ingénieur (SPI) et également les décideurs des grands organismes.

« *Quelle méthodologie ?* » Après plusieurs réunions de prospective aux congrès annuels de la SFT de Nantes (2001) et de Vittel (2002), la structure du document a été fixée et il a été fait appel à une trentaine de rédacteurs initiaux et à autant de relecteurs essentiellement universitaires ou CNRS. La version 1, du 12 mai 2004, du document a été mise sur le site web de la SFT. Elle a été ainsi soumise à la critique de la communauté et une version 2, du 22

juin 2004, plus complète, a pu être communiquée pour enrichissement et critiques à une quarantaine d'industriels. Une version 3 provisoire, du 15 novembre 2004, intégrant tout ou partie de ces remarques a été diffusée par les mêmes canaux. Ce colloque doit permettre de l'enrichir pour arriver à une version 3.

« *Qu'est-ce que la thermique ?* ». C'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. Cette définition, tirée du document du GUT de 1988, est toujours valide, mais un point nouveau est apparu depuis : l'interdisciplinarité naturelle de la thermique est maintenant intégrée par la prise en compte des différents couplages. L'exemple de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons est présenté (couplage chaleur/espèces/charges électriques). Les disciplines « clientes » (génie des procédés, des matériaux, électrique, agro-alimentaire, l'automatique) et les disciplines « d'appui » (mécanique des fluides et des solides, physico-chimie) sont ensuite recensées. Le thermicien, à l'exemple de Joseph Fourier, est également un promoteur de nouveaux concepts méthodologiques (les méthodes de changement d'échelle, les méthodes inverses, les méthodes de réduction de modèle et les outils stochastiques).

« *Qui sont les thermiciens ?* ». La communauté thermicienne française compte environ 450 enseignants-chercheurs et 80 chercheurs CNRS, regroupés dans une vingtaine de laboratoires universitaires et/ou CNRS ainsi que de l'ordre de 500 chercheurs industriels ou des grands organismes. Elle organise des rencontres depuis 1961 (fondation de la SFT).

« *Quelques exemples de recherches en thermique* ». Quatre exemples illustrés de recherches ou de problématiques en thermique sont ensuite présentés : la thermique des composants électroniques de puissance, le refroidissement de composants par caloducs, le problème de détermination de propriétés thermophysiques équivalentes (grains nano-poreux de catalyseur) et la nanothermique et ses applications, qui constitue une rupture par rapport aux modèles classiques.

« *Recherches en thermique et demande industrielle* ». Ce sujet concerne l'équilibre recherché entre recherche amont (laboratoires CNRS, université) et applications industrielles. L'accent est mis sur le rôle des laboratoires qui forment les cadres de R & D, qui sont chargés également de créer et, on l'oublie trop souvent, de pérenniser les savoirs transférables et qui enfin développent les méthodes de l'ingénieur de demain. Le thermicien développe donc des synergies importantes qui le placent au cœur de l'action du SPI du CNRS.

Neuf autres exemples de recherches en thermiques sont ensuite présentés : l'injection de polymère sur renfort, les milieux poreux et la dispersion thermique, la caractérisation thermomécanique de fibres de carbone à haute température, la convection inverse en extrusion, la caractérisation des transferts thermiques transitoires en ébullition libre, la détection de l'encrassement des échangeurs in-situ, le futur solaire dans l'habitat et les composants multi-fonctionnels photo-voltaïque-thermique, la congélation solaire à sorption, et enfin la biothermique avec le confort thermique du cycliste sous son casque.

« *Perspectives* ». Celles-ci sont de deux ordres. Les *perspectives d'ordre thématique* doivent être examinées d'abord, avec un enjeu très fort pour la ou les prochaine(s) décennie(s) qui porte sur les production, distribution, conversion et utilisation de l'énergie. Il s'agit de la

filière carburant qui va devoir passer progressivement du pétrole pour les transports à quelque chose d'autre.

Ce premier enjeu concerne en premier lieu la filière hydrogène (production, stockage, la pile à combustible) mais aussi les énergies renouvelables et ensuite les centrales nucléaires de 4^{ème} génération et le projet ITER sur la fusion. Ce dernier projet va concerner le thermicien pour la mise au point de matériaux résistant aux hautes températures et aux hauts flux (thermique, neutronique,...) et pour concevoir la meilleure façon de récupérer la chaleur.

Un deuxième enjeu concerne les mini- et micro-équipements électroniques dissipant de faibles puissances, mais aussi de hautes densités de flux du fait de leur faible taille (problèmes drastiques de refroidissement). Sont également concernés ici les développements des nano-technologies et le délicat problème de la liaison du micro-monde au macro-monde (la connectique). A la même échelle on peut parler des besoins en thermique de la biologie, dont les problèmes associés sont encore (trop) peu abordés par la communauté thermicienne.

Enfin un troisième enjeu est constitué par la thermique des plus grandes échelles pour laquelle la transposition des méthodologies du thermicien est tout à fait possible (problèmes de convection, réduction de modèle). On peut en particulier penser au bâtiment et à sa consommation (approche système) ou même à la thermique du globe en collaboration avec les spécialistes des Sciences de l'Univers. De façon plus générale, un des objectifs du thermicien est de répondre aux défis de la haute technologie, avec la recherche de la qualité extrême des produits, car la thermique constitue souvent un verrou. Là encore la connaissance créée à domicile peut constituer une assurance anti-délocalisation.

Les *perspectives organisationnelles* méritent également d'être abordées ici, c'est-à-dire qu'il faut examiner le « *comment* ». Un premier dilemme concerne le délicat équilibre entre une pratique quotidienne de la recherche en équipes-projets ou au sein de laboratoires constitués autour de thématiques précises. On peut ainsi se poser la question de la position idéale du curseur : dans l'environnement industriel et économique actuel fluctuant, la pérennisation des savoirs devient en soi un enjeu et il n'est pas sûr qu'un fonctionnement généralisé en équipes-projets constitue véritablement un optimum si l'on vise les moyen et long termes.

Un deuxième point, en liaison directe avec le précédent, concerne l'affaiblissement préoccupant des équipes « thermique » dans les grands groupes, en particulier en caractérisation thermique des matériaux : la disparition des personnes « ressources » risque de pénaliser l'innovation de demain.

Cette innovation future doit également concerner les PME qui n'ont que rarement une expérience de recherche: les laboratoires ont très souvent conscience qu'un chaînon manque pour traiter la demande de ce type d'entreprises: pourquoi ne pas mutualiser d'une certaine façon ce type de demandes, au travers par exemple de syndicats interprofessionnels, ou même de centres techniques qui seraient autant de « go-between » et qu'il conviendrait d'activer davantage?

Une autre question qui est remontée de nos partenaires industriels à la lecture du livre blanc est celui de l'importante question de la préparation des normes : les laboratoires, même s'ils sont compétents, manquent cruellement de moyens humains (voir la remarque plus haut sur le chaînon manquant).

Un effet néfaste et paradoxal de l'évolution actuelle des publications est le lent glissement qui tend depuis une à deux décennies à les convertir en outils de gestion de carrière pour les chercheurs, ce qui provoque un bruit de fond peu propice au partage des savoirs.

Enfin, en parallèle, on constate un évident désinvestissement de la veille technologique des industriels, qui se traduit par exemple par leur faible participation à la dizaine de journées thématiques organisées chaque année par la SFT et dont les thématiques devraient pourtant les intéresser (Amélioration des échanges thermiques,...). Un effet « cost-killer » est probablement responsable de cette situation : même si ce type de manifestation coûte une journée-ingénieur à l'entreprise et que souvent le retour sur investissement n'est pas immédiat, les opportunités provoquées par des contacts humains directs compensent largement l'effort consenti.

Une réponse de la SFT à ce problème est, depuis peu, de proposer des journées scientifiques chez l'industriel ou l'organisme (LNE, CETIAT, INRS, Airbus,...).

« *En guise de conclusions...* ». La thermique est une science pour l'ingénieur un peu particulière car il n'existe pas d'industrie thermique. Les applications sont foisonnantes. La thermique est présente partout, ce qui constitue à la fois une difficulté et un atout. Elle est actuellement enseignée partout, et le mérite de cet acquis revient au GUT. La recherche en thermique constitue un métier, ce qui rend sa structuration capitale. L'offre de recherche universitaire/CNRS est nourrie par la demande et représente une force active de proposition. La vocation du livre blanc est d'être actualisé de façon dynamique. La communauté doit se l'approprier afin de l'enrichir et de mettre en œuvre une réponse opérationnelle vis à vis des défis à relever.

Bernard Tamain (IN2P3) présente ensuite un exposé intitulé « *Quelles solutions pour une politique énergétique respectueuse de l'environnement ?* ». Il insiste sur le nécessaire équilibre entre les besoins, les ressources et les réserves et sur le fait que toute production d'énergie comporte des inconvénients. La seule voie possible est celle de la complémentarité de énergies. Si l'on compare les différentes énergies primaires (pétrole, gaz, charbon, nucléaire, hydraulique, biomasse, éolien, solaire et géothermique) suivant les critères des réserves (qu'on peut évaluer en termes de « fourchettes »), de la pollution, des déchets, de l'effet de serre, du coût, du caractère intermittent et du risque potentiel, on se rend compte que le charbon, le nucléaire (et la fusion ?) et le solaire sont incontournables et qu'il est donc absolument capital de chercher à « résoudre » leurs inconvénients majeurs. A part le solaire, les autres énergies renouvelables n'occuperont pas une place majeure. Il est en outre nécessaire d'économiser au maximum l'énergie. Il s'agit donc d'optimiser au maximum.

Bernard Tamain passe en revue les principaux postes de consommation : les pertes primaires constituent en France le premier poste (37 %) devant le tertiaire résidentiel (27 %), les transports (20 %) et l'industrie (15 %). La production d'électricité représente 40 % de cette consommation primaire en France, contre 27 % dans le monde. Quelques points-clé sont soulignés : la chaleur joue un rôle essentiel dans le monde de l'énergie ; toutes les sources abondantes, même le solaire DANS UNE LARGE MESURE, devront passer par la voie de la chaleur : il faudra améliorer les rendements et ne pas perdre la chaleur résiduelle ; les postes essentiels sont le chauffage et les transports : ils devront évoluer. Les principales voies d'amélioration des rendements de production électrique sont passées en revue : la cogénération par filière gaz, doit permettre, à côté du rendement électrique de 40 %, de récupérer sous forme de chaleur 50 % complémentaires (sous réserve de trouver un client

permanent), indépendamment du problème de contribution à l'effet de serre qui lui est associé. La production électrique par voie nucléaire doit s'accompagner d'une montée en température, PARALLELEMENT A un passage aux neutrons rapides : ceci concerne le réacteur de 4^{ème} génération, refroidi par gaz ou métaux liquides, avec la possibilité éventuelle de l'incinération des déchets. La cogénération associée à cette dernière filière bute sur le problème de la distance entre les centrales et les villes et requiert obligatoirement l'utilisation d'un vecteur de transport et de stockage (CHIMIQUE?). La production électrique par centrale solaire thermique est conditionnée par le problème du coût.

Plusieurs messages sont émis quant à l'amélioration de l'utilisation énergétique dans l'habitat. Le premier est celui de l'utilisation intelligente du solaire (thermique et non photovoltaïque) : il est essentiel de le développer pour chauffer les habitations individuelles. Ainsi, une maison de 100 m² reçoit en moyenne plus de 20 kW d'énergie solaire même au nord de la France (équivalent à 100 ampères au compteur électrique). Le deuxième message est celui de la possibilité de stockage local de la chaleur. Brûler du gaz ou du pétrole pour assurer l'ensemble du chauffage et de l'eau sanitaire est un non-sens. Se chauffer exclusivement à l'électricité est clairement non optimal : pour délivrer 1 kWh de chaleur dans la maison, on gaspille 2 kWh de plus dans une centrale électrique nucléaire.

Pour progresser, il faut une incitation politique pour baisser les coûts d'investissement du solaire (l'ADEME et certaines régions le font déjà) : ceux-ci représentent 4000 € pour la production d'eau chaude pour 4 personnes, 15000 € pour équiper (eau chaude+chauffage) un pavillon de 120m², l'amortissement étant obtenu au bout de 10 ans. Rappelons que 1,5 m² de capteur par personne permet d'assurer 60 % de sa consommation d'eau chaude individuelle. Un développement industriel (design, normes, formation des architectes et service après vente) est nécessaire. Par contre il n'existe aucun verrou technologique majeur pour le développement de cette filière de chauffage.

Une autre façon de moins chauffer nos maisons consiste à ne pas les laisser se refroidir en les isolant par l'extérieur, la maison elle-même (ses murs) devenant moyen de stockage. Ceci nécessite le développement de matériaux thermiques et hydrofuges : des efforts de R & D sont à faire sur ce point. Enfin il est nécessaire d'examiner de près l'aspect complémentaire du chauffage, c'est à dire la climatisation : sa montée est inquiétante, elle remet en question la gestion d'été des centrales nucléaires. Il faut se poser la question de LA MISE AU POINT DE CLIMATISEURS UTILISANT L'ENERGIE SOLAIRE pour réduire les consommations électriques.

La question de l'utilisation de l'énergie dans les transports est ensuite examinée. Plusieurs points méritent d'être évoqués. Tout d'abord se posent les deux problèmes de la disparition des carburants actuels et la nécessité de moins polluer en ville. La production d'essence artificielle produite à partir du charbon est possible mais non souhaitable du fait de sa contribution à l'effet de serre. Il faut donc faire jouer un rôle accru de l'électricité. Pour sa production, le nucléaire est le mieux placé. PAR AILLEURS, l'hydrogène peut constituer un nouveau « carburant ». Par contre l'hydrogène n'est pas une source d'énergie et devra donc être produit à partir du solaire, du charbon ou du nucléaire.

Bernard Tamain se focalise ensuite sur l'hydrogène qui constitue une solution possible pour résoudre les problèmes d'intermittence. Il s'agit du problème du stockage de l'électricité. Les performances des accumulateurs restent médiocres malgré les efforts de recherche. La

solution probable est celle de l'hydrogène (qui n'est pas une source d'énergie !). Sa production est rentable par électrolyse, thermoproduction ou bioproduction, même si les rendements restent à améliorer. Il devra être produit grâce à une source primaire, c'est-à-dire le solaire ou le nucléaire. Son stockage, si on laisse de côté la filière cryogénique nécessite une compression ou l'emploi éventuel de nanotubes ou d'hydrures métalliques. L'hydrogène ainsi produit et stocké pourra alimenter une pile à combustible ou un moteur thermique

Les conclusions de *Bernard Tamain* sont les suivantes. Dans les décennies qui viennent on va assister à une baisse inéluctable des sources non renouvelables (pétrole, gaz) et à des limitations des énergies renouvelables hors solaire

Les priorités dont il faut être conscient sont d'une part l'utilisation du solaire thermique pour l'habitat et d'autre part la diminution des pertes et du gaspillage énergétique, par l'amélioration des rendements des centrales, l'isolation extérieures des habitations, le transport de la chaleur, avec un rôle de la chimie pour ce dernier point.

A titre anecdotique mais néanmoins instructif, savez-vous que:

- une télévision en veille consomme plus que cette télévision allumée 3 heures par jour?
- oublier une lampe allumée par français nécessite 3 à 4 réacteurs nucléaires?
- prendre le train sur un long trajet coûte 10 fois moins d'énergie que prendre sa voiture ?

Il faut donc changer d'état d'esprit en se préparant au nucléaire du futur (EPR puis génération IV), en séquestrant le CO₂ et enfin en se préparant à l'utilisation de l'hydrogène (piles à combustible ou moteur thermique ?). Cela ne veut évidemment nullement dire qu'il ne faille pas développer éolien et biomasse et chercher de meilleurs capteurs photovoltaïques.

Trois messages terminent cet exposé :

- 20% de la population mondiale consomment 60% de l'énergie... que souhaitons-nous pour demain?
- Devenons raisonnables : pensons à économiser !
- Soyons raisonnables : l'avenir ne peut passer que par une complémentarité de modes de production, tous imparfaits.

Quelques questions (Q) et remarques (R) de l'assistance, et les réponses (Rép) de *Bernard Tamain* sont listées ci-dessous.

R : Si on remplace un climatiseur par une pompe à chaleur à absorption, on divise la consommation par deux (*Romuald Jurkowski, CIAT*).

R : La récupération des rejets thermiques et le transport de chaleur à longue distance est un sujet important qui est étudié notamment par l'IMP Perpignan, dans le cadre d'un Groupement d'Action Thématique du Programme Energie (*André Lallemand, CETHIL*).

R : Un commentaire sur le nucléaire : le VHTR (Very High Temperature Reactor) n'est pas encore « rapide », ce n'est qu'une étape (*Jean-Claude Bouchter, CEA*).

Q : Quels sont les délais pour mettre en œuvre le procédé de production d'hydrogène à partir du nucléaire ? (*Jean-Bernard Saulnier, CNRS*).

Rép : Un précurseur à moyenne température pour produire de l'hydrogène est envisagé aux USA dans les 15 ans (30 ans pour la haute température).

Alain Le-Douaron (Renault) présente l'exposé suivant, intitulé « Transport, Economie et Thermique ». Il dresse tout d'abord un panorama des carburants actuels pour les véhicules terrestres: fuels, essences, et carburants « alternatifs » : BTL (Biomass To Liquid), CTL (Coal To Liquid), GTL (Gas To Liquid), et le GNV (Gaz Naturel pour Véhicules) et enfin l'hydrogène. Les différents moyens de stockage de l'hydrogène (nanotubes, charbons actifs, fullerènes, micro-sphères de carbone, hydrures, hydrogène comprimé, hydrogène liquide,...) sont comparés en termes de densité et de masse spécifique (masse H₂/volume de stockage). Ces différentes filières sont ensuite passées en revue en fonction de leur impact en équivalent CO₂ par km. Les technologies utilisées dans les moteurs thermiques actuels (diesel mélange pauvre, essence) et leurs évolutions prévisibles sont rappelées.

Différents systèmes de post-traitement des gaz d'échappement sont présentés : catalyseur d'oxydation pour le diesel, catalyseurs 3 et 4 voies, filtre à particules, Catalyseur DNO_x, avec sa fenêtre 200-400°C, et pièges à hydrocarbures. L'hybridation des motorisations et la réduction associée des pertes d'énergie et des rejets de gaz à effet de serre sont ensuite examinées. Ces progrès doivent être mis en regard avec les coûts techniques additionnels pour le constructeur (jusqu'à plus de 250 %). *Alain Le-Douaron* donne ensuite quelques éléments sur les technologies de pile à combustible, ayant une alimentation en hydrogène directe ou avec reformeur.

L'industrie automobile ne basculera vraisemblablement pas brutalement vers le carburant hydrogène, les problèmes de distribution, d'implantation, de sécurité et de formation de personnels devront être résolus de concert avec les évolutions techniques du véhicule dans ce domaine. A titre transitoire, elle pourrait utiliser le reformage embarqué.

Les enjeux de la thermique dans l'automobile sont ensuite analysés en termes de puissance nécessaire ou dissipée. L'efficacité des systèmes de refroidissement est essentielle.

Dans le cas d'un *moteur à combustion interne*, un bilan énergétique complet est nécessaire. Celui-ci concerne de multiples organes et fonctions : moteur thermique, suralimentation, électronique et électrotechnique, lubrifiants, ligne d'échappement et système de catalyse, chauffage et climatisation de l'habitacle.

Dans le cas des *motorisations hybrides*, le refroidissement de l'électronique de puissance et des batteries rend plus délicat les choix.

Enfin, dans le cas de la *pile à combustible*, le conditionnement thermique du cœur de pile et du reformeur est essentiel.

Le diagramme bien connu, montrant la naissance, le développement, l'aboutissement ou au contraire la disparition des différentes innovations technologiques est présenté. Chrysler a fait fonctionner le premier une pile à combustible pour mouvoir une automobile dans les années 50 ; ce n'était que le premier cycle naissance-essor et décès de cette technologie. Actuellement on en est au 3^{ème} cycle pour la pile à combustible pour l'automobile.

L'impact des véhicules anciens sur les émissions de polluants est important : si on substituait les véhicules anciens par des véhicules à la norme « Euro 4 » (applicable en 2005), on constaterait sur la France des réductions de 60 à 80% des émissions de polluants réglementés. La réduction des émissions dues au transport routier du fait des normes de plus en plus

restrictives a permis en 20 ans une réduction de 90% à 70% suivant les polluants et ce, malgré une augmentation du trafic d'un facteur compris entre 1,7 et 2,1.

Alain Le-Douaron termine son exposé en soulignant plusieurs points. Tout d'abord les progrès à venir résulteront de compétences partagées. Un bon exemple de ce qu'il faut faire est le travail du réseau AMETH. Une deuxième exigence est de continuer à développer des connaissances solides afin que les chercheurs se frottent aux industriels dès le démarrage d'une nouvelle technologie : la thermique de la pile à combustible est un bon exemple.

Mettre de côté les problèmes de propriété industrielle (souvent source de conflits entre industriels et instituts de recherche publics) pour un contrat dans la longue durée améliorerait les choses. Enfin l'analyse exergetique (énergie utile) pourrait être plus souvent utilisée pour analyser et comprendre les enjeux énergétiques.

Dany Escudié (CETHIL) s'interroge sur la pérennité des relations industrie-laboratoires et de l'absence de thèmes de travail sur la durée. Elle cite l'exemple des recherches du pôle carburant, en continuation de l'ARC (Action de Recherche Concertée du CNRS) sur l'auto inflammation : ceci produit un décalage du fait du temps de réponse et du manque de soutien des constructeurs.

Alain Le-Douaron évoque en réponse le ressenti très fort des industriels sur le problème de l'absence de visibilité des partenaires. Il cite l'exemple de l'institut FEV à Aix la Chapelle, capable de prendre en compte une grande part de la complexité d'un problème industriel, partant d'équipes universitaires il est devenu un centre de recherches lucratif de 1400 personnes. En France l'ensemble CORIA/CERTAM en Normandie constitue un pôle de compétences qui se place en force de proposition.

Une première table ronde sur « *l'offre de recherche et la demande industrielle* » est animée par *Fabienne Chauvière* et présidée par *Jean-Claude Bouchter*. Elle rassemble *Alain Coutrot* (SNECMA), *Alexandre Rojey* (IFP), *Jean-Baptiste Rieunier* (Saint Gobain, branche isolation), *Romuald Jurkowski* (CIAT) et *Jean-Bernard Saulnier* (CNRS – SPI).

Fabienne Chauvière lance le débat en demandant à chacun des participants leur réactions sur le livre blanc de la recherche en thermique. Nous rapportons ici les propos de chacun de façon résumée même si ces interventions n'ont pas forcément suivi l'ordre purement séquentiel qui a été retranscrit ci-après.

Alain Coutrot déclare y retrouver « ses billes » notamment sur les problèmes de rayonnement et de techniques de mesure qui y sont présentés. Il évoque le délicat problème du contrôle thermique de certaines aubes de turbines qui sont exposées à un écoulement gazeux dont la température est supérieure à la température de fusion de l'alliage qui les constitue : celles-ci doivent par conséquent être protégées par des barrières thermiques en céramique. Il passe en revue d'autres problèmes en thermique du groupe SNECMA, tels que les chambres de combustion, les protections thermiques des propulseurs à propergol solide et le packaging des circuits électroniques de puissance. Il plaide pour une intégration des chercheurs dans des structures mixtes multidisciplinaires et multiculturelles, afin notamment de travailler en commun sur de véritables pièces industrielles. La démarche qu'il attend de ce type de manifestation est celle d'un forum d'échanges pour développer une certaine intimité avec la recherche publique.

Alexandre Rojey positionne la thermique à l'IFP dans le cadre du développement durable. Elle concerne trois secteurs de l'IFP. Tout d'abord, les études de base en combustion afin de

minimiser les rejets de NO_x et de SO_x , de récupérer le CO_2 émis et de développer des systèmes innovants (oxycombustion, combustion catalytique). Un deuxième secteur est celui de la production des gaz de synthèse avec oxydation partielle, soit à partir d'hydrocarbures, soit à partir de biomasse. Enfin la compréhension et la maîtrise des transferts thermiques et de matière est essentielle pour l'intensification des procédés, en particulier dans le domaine de la conception de micro-réacteurs (réduction de taille et de coût, accroissement des performances). L'IFP collabore avec des laboratoires du CNRS et souhaite dépasser les collaborations ponctuelles en mettant en place des collaborations structurées, articulées avec les actions européennes et débouchant sur des résultats concrets.

Jean-Baptiste Rieunier a trouvé dans le livre blanc des compétences qui sont susceptibles de faire sauter des verrous technologiques. Un des objectifs de son groupe est de diviser par quatre la consommation énergétique dans le bâtiment pour arriver à une consommation de 200 à 300 kWh par m^2 et par an par habitant. Afin d'atteindre ces objectifs il est nécessaire d'agir dans trois directions. Il faut tout d'abord concevoir de nouveaux matériaux super isolants ainsi que des matériaux à changement de phase solide/solide durables (encapsulation) afin d'augmenter le stockage de la chaleur dans les enveloppes. Un deuxième axe est celui de la meilleure compréhension du couplage des transferts, en particulier pour l'amélioration du confort d'été, ou des couplages convection, conduction et rayonnement dans les combles en hiver par vent fort. Enfin il est essentiel de développer des outils expérimentaux et de simulation pour comparer les différentes simulations.

Romuald Jurkowski, sollicité sur les récents progrès en thermique, considère que l'avancée dans ce domaine porte sur l'enrichissement de la thermique classique par l'approche de la micro-échelle et en particulier la prise en compte des phénomènes liés à la structure morphologique des surfaces d'échanges :

- un tube lisse est-il vraiment lisse ?
- la présence de l'huile dans les réfrigérants influence t'elle la conception de la surface d'échange pour obtenir un coefficient de transfert thermique optimal en ébullition ?

Cette « fusion » entre thermique « classique » et les phénomènes à la micro-échelle est essentielle dans la compréhension des phénomènes physiques ainsi que dans la conception et la fabrication des échangeurs thermiques et machines frigorifiques. Il interpelle donc les universitaires pour que ceux-ci s'intéressent d'avantage aux préoccupations des industriels et développent les connaissances fondamentales correspondantes. Il souhaiterait également une SFT plus offensive.

Jean-Bernard Saulnier précise ensuite la place du département SPI du CNRS vis à vis de la problématique de la présente table ronde (Offre de recherche et demande industrielle). L'action de ce département s'articule autour de cinq secteurs principaux: énergie, environnement, information-communication, transports et santé. Il présente ensuite successivement plusieurs actions. Dans le domaine spatial du contrôle thermique des satellites, on est passé de quelques watts à évacuer en 1965 à plusieurs kilowatts aujourd'hui et ce, en micro-gravité. Il s'agit ici du soutien à l'outil de base de l'architecte thermicien, c'est-à-dire les boucles fluides diphasique et les caloducs, par l'intermédiaire d'un GdR (Groupement de Recherche) qui rassemble notamment cinq laboratoires, le CNES, Alcatel et EADS.

Dans le domaine de la miniaturisation, plusieurs actions sont également engagées. En refroidissement en micro-électronique grâce à de l'air, des liquides et l'ébullition, par intégration directe par exemple des caloducs dans le substrat, la miniaturisation nous fait passer à la micro- puis à la nano-échelle (super réseaux, nanofils, puits quantiques). Les recherches dans ce domaine, qui nécessitent de faire de la physique et de croiser les compétences, sont soutenues par un GdR Micro/nanothermique (*S. Volz*) qui s'est constitué récemment. En microfluidique les recherches en transferts de masse et de chaleur pour le génie chimique, la biologie et la micro-analyse sont soutenues par un Programme Interdisciplinaire de Recherches (*D. Hauden*) et par l'Action Concertée Incitative Energie Echangeurs multifonctionnels; de manière parallèle les recherches en transferts multiphysiques et multi-échelles (chaleur/masse/charge) en cœur de pile à combustible sont portées par l'ACI Energie.

Dans le domaine de l'efficacité énergétique, le SPI soutient le développement de capteurs photovoltaïque/thermique, la recherche d'un optimum système/besoins (ACI Energie), le développement d'isolants par la compréhension des couplages conduction/rayonnement dans la laine de verre et l'innovation par la conception de super isolants à partir d'agrégats de nanoparticules.

Dans le domaine des procédés d'usinage, la compréhension du partage du flux de chaleur entre l'outil et la pièce est capitale. Dans ce type de configuration associée à une difficulté évidente d'accès, les techniques inverses ont un rôle majeur à jouer.

Enfin, dans le domaine de la thermique du vivant, par exemple en traitement par hyperthermie, énormément de choses restent à faire : développer des modèles pertinents, utiliser une métrologie adaptée, optimiser l'apport et l'emport d'énergie, cartographier en temps réel le champ de température. Plus généralement, dans ce domaine de la thermique du vivant qui constitue un enjeu de société, force est de constater qu'il n'existe pas de réponse structurée pour l'instant et on constate une nette domination des Etats-Unis dans ce secteur.

Quelle doit être la réponse du CNRS à toutes ces demandes de recherches ? Celle-ci se construit à plusieurs niveaux. Il faut tout d'abord donner aux laboratoires la mission de développer des concepts, des modèles et une métrologie appropriée : on peut donner ici l'exemple de ce qui se fait en thermique aux micro- et nano-échelles. Il faut ensuite lancer des actions de structuration comme des GdR, des programmes, des actions bilatérales industrie-laboratoire(s), ou des actions sectorielles comme c'est actuellement le cas dans deux projets communs entre le CNRS, la SNECMA et l'ONERA : l'INCA (projet commun d'INItiative en Combustion Avancée), MAIA (Méthodes Avancées en Ingénierie méCAnique).

Des retombées à ces actions existent en matière de formation (les managers de réseaux, la formation initiale...), pour l'amélioration de la préparation des offres comme les PNIR (Pôle de recherche National à Implantation Régionale) en combustion, sur les bio films, les réseaux (Groupes d'Action Thématique) du programme Energie : H₂, Biomasse et CO₂, Habitat, gestion de l'énergie, nucléaire...), et enfin les plates formes: Piles à Combustible, INES (Institut National d'Energie Solaire, Chambéry).

Jean-Claude Boucher tire la conclusion que l'offre de recherche est très riche, que les besoins sont très nombreux mais que la mise en adéquation n'est pas toujours faite de manière optimale. La responsabilité du monde industriel est d'impliquer les laboratoires publics très en amont d'une problématique.

La session de l'après-midi débute par l'exposé de *Pascal Gardin* (Arcelor) intitulé « Enjeux industriels et contexte liés à la maîtrise du refroidissement par eau ». Celui-ci précise en préambule la problématique du refroidissement par eau en élaboration et mise en forme de produits sidérurgiques destinés au marché automobile. L'acier est un produit qui doit évoluer en permanence pour respecter un certain nombre de contraintes.

Ces dernières sont d'abord réglementaires : pour respecter l'environnement par une baisse de consommation et de rejet de CO₂, il faut alléger les véhicules. Par ailleurs les exigences de sécurité se renforcent (il faut obtenir ainsi la note 5 * au « crash test »). Il existe donc une demande pour des aciers à haute résistance et haute limite élastique. Afin de la satisfaire, on joue sur la microstructure en produisant notamment des aciers de type « Dual Phase » (ferrite, martensite) ou Trip, acronyme pour « Transformation induced plasticity » (ferrite, bainite, austénite).

Les moyens d'action permettant d'obtenir ces deux types d'acier sont d'abord sa composition et/ou un traitement thermique spécifique. Pour donner ici un chiffre, on peut dire que 60% des aciers utilisés aujourd'hui dans l'automobile n'existaient pas il y a 5 ans !

Afin de mettre en évidence cet effet de la micro-structure sur les propriétés mécaniques des aciers, *Pascal Gardin* présente des courbes contrainte-élongation pour trois nuances d'acier. Evidemment, les micro-structures dépendent de la vitesse de refroidissement et c'est à ce stade que la thermique intervient. Ainsi, pour la nuance d'acier considérée, une faible vitesse de refroidissement fera apparaître des structures ferrite-perlite alors qu'une forte vitesse de refroidissement sera responsable de la formation de structures martensite. Des vitesses de refroidissement intermédiaires donneront quant à elles naissance à des structures bainite.

Si on se place maintenant au niveau du procédé de mise en forme, le laminage, on constate que celui-ci est responsable d'une violente évolution des micro-structures. On place donc en sortie du train de laminage à chaud un actionneur de refroidissement pour imprimer et contrôler la micro-structure. Si l'on considère maintenant le système industriel, celui-ci est constitué d'une tôle qui progresse en translation sur des rouleaux et qui est refroidie par des jets d'eau impactant normalement à la direction de défilement. Ce type de refroidissement risque de créer des inhomogénéités locales de la tôle d'acier.

« *Quelle démarche pour progresser ?* ».

Il est tout d'abord nécessaire de procéder à l'acquisition de données et de connaissances sur un système de refroidissement de laboratoire. Il faut ensuite effectuer des études du refroidissement sur des dispositifs spécifiques : c'est le cas de la trempe sur bande statique et du refroidissement sur produit défilant. On doit ensuite construire une modélisation appropriée et l'implanter dans un code de simulation numérique intégré dans un logiciel de dynamique des fluides numérique. Evidemment, à ce stade, on part d'une approche simplifiée et on améliore si nécessaire par itérations successives.

Pascal Gardin donne ensuite l'exemple du prototype industriel d'une Table de Sortie sur laquelle défile jusqu'à 4 m/s un produit chauffé jusqu'à 1200°C et qui est équipée de refroidissement par jet d'eau débitant 250 m³/h sous une pression d'alimentation de 20 bars ; Un capteur de température, un thermocouple de diamètre inférieur à 0,3mm implanté à une profondeur de 500 microns de la surface, est utilisé pour le calcul des flux extraits grâce à une

méthode de conduction thermique inverse s'appuyant sur différents modèles de diffusion (1D, 2D, stationnaire, instationnaire).

Ce type d'expérimentation nécessite donc une instrumentation in-situ, délicate à mettre en œuvre, mais qui permet par exemple de comparer les refroidissements respectifs des faces supérieure et inférieure de la tôle en défilement sous les jets. Evidemment, il est également nécessaire d'étudier par simulation numérique le ressaut qui apparaît entre deux impacts de jet et de confirmer celle-ci par réalisation d'une maquette

Pascal Gardin tire enfin les conclusions et dresse les perspectives de ce type d'approche.

Le contrôle local de la vitesse de refroidissement en métallurgie devient maintenant une nécessité afin d'être capable de s'adapter à la demande d'allègement des voitures.

Le dimensionnement des installations de refroidissement est en complète mutation : on passe du macroscopique au local. La physique qui régit les transferts thermiques multiphasiques avec changement de phase est nettement plus complexes que celle qui préside aux échanges thermiques en monophasique : le partenariat pérenne avec un laboratoire universitaire conduit au développement de la connaissance et à la consolidation du design industriel. La démarche devient ainsi transverse et permet de traiter efficacement les multiples couplages entre thermique, mécanique des fluides, thermodynamique, mécanique, métallurgie, sans oublier la métrologie...

Quelques questions (Q) et remarques (R) de l'assistance, et les réponses (Rép) de *Pascal Gardin* sont listées ci-dessous.

Q : Quels sont les laboratoires qui collaborent avec Arcelor sur cette thématique ? (*Fabienne Chauvière*)

Rép : Il s'agit du CETHIL et du LEMTA.

R : Il faut souligner ici l'aspect transversal car cela nécessite une structure de recherche prête à collaborer avec l'industriel dans le long terme. Le LEMTA collabore avec l'IRSID (devenu depuis Arcelor Research) depuis 25 ans (*Michel Lebouché*, MSTP et LEMTA).

Q : Comment vous structurez-vous vis à vis de la concurrence ? (*Jean-Claude Boucher*, SFT et CEA)

Rép : En ce qui concerne l'allègement des pièces automobiles, le principal concurrent est actuellement l'aluminium, c'est pourquoi il faut produire des tôles plus fines (0,7 mm d'épaisseur actuellement). Pour ce faire, nous mettons en place notre collaboration avec la recherche universitaire au travers de plans de fidélisation. Ceci permet d'éviter le « stop and go » et de maintenir une compétence dans les laboratoires en relation avec nos propres objectifs, dans un climat de confiance et de respect des impératifs de chacun.

Jean-Pierre Joly (CEA-LETI) présente ensuite un exposé intitulé « Les enjeux de la micro-thermique ». Il introduit tout d'abord la problématique du refroidissement des composants. Les puissances thermiques à dissiper sont très variables. Les plus critiques sont celles des microprocesseurs : il va falloir évacuer des densités de flux de 200 W/cm^2 très bientôt. Les convertisseurs de forte puissance nécessitent des refroidissements qui atteignent 400 W/cm^2 . Les composants radio-fréquences ou certaines diodes laser atteignent 1000 W/cm^2 , mais avec des points chauds localisés. Une tentative de solution pour évacuer ces flux est celle apportée par les micro-caloducs intégrés dans le silicium. Cette technologie est actuellement étudiée dans le cadre d'une collaboration entre le CNES, le LETI, le CETHIL et le LEG. Les avantages et le principe de fonctionnement du caloduc sont ensuite présentés. Il présente

l'intérêt de permettre un transfert de chaleur sous faible gradient thermique et constitue un composant purement passif. Le silicium présente quant à lui de nombreux avantages, tels la possibilité de miniaturisation et d'intégration, un faible poids, une technologie de fabrication commune à de nombreux microsystèmes et enfin une compatibilité électromagnétique identique à celle du composant électronique.

Un prototype de micro-caloduc a été fabriqué dans le cadre de cette collaboration. Il a demandé l'utilisation des techniques de gravure profonde, de scellements Si – Si et de perçage laser de la cavité vapeur. Ses performances thermiques sont tout à fait intéressantes, avec une diminution du gradient de température entre sources chaudes et froides, qui permet d'évacuer jusqu'à 60 W/cm^2 . Ce caloduc silicium de 1,5 mm d'épaisseur et de 3,5 g peut être caractérisé par une conductivité thermique équivalente qui peut atteindre 2000 W/mK . Une plaque de cuivre (équivalente) qui assurerait le même refroidissement aurait une épaisseur de 7,2 mm pour une masse de 76 g.

Jean-Pierre Joly passe ensuite en revue un certain nombre de problèmes actuels. Ainsi les diélectriques doivent avoir de hautes conductivités thermiques mais de faibles permittivités, ce qui constitue une difficulté car ces propriétés évoluent dans le même sens. Une autre difficulté résulte de la méconnaissance des propriétés thermiques des matériaux en couche mince et des interfaces : celles-ci diffèrent de celles des matériaux « en masse ». Ceci nécessite des méthodologies de mesure spécifiques et pose en outre la question de la validité des modèles physiques traditionnels pour les faibles dimensions. Il faut donc disposer d'une connaissance précise des structures de matériaux non seulement dans leur volume mais aussi à leurs interfaces. L'orateur décrit ensuite une technique de mesure modulée spécifique de la conductivité thermique de matériaux en couches minces, la « méthode des 3ω ». Une autre application de la microthermique est celle de la détection des flux de chaleur à l'aide de micro-bolomètres. Cette technique permet d'effectuer de l'imagerie infrarouge à des coûts raisonnables. Les composants à actuation thermique utilisent la chaleur pour réaliser certaines fonctions en micro-électronique, telle le stockage de données, comme par exemple les mémoires PCRAM, au sein desquelles c'est le niveau commandé de température qui provoque le basculement entre état cristallin et amorphe d'un matériau avec le changement associé de propriété électrique du circuit, ou les mémoires magnétiques de type TAS. Un autre dispositif à actuation thermique est le microcommutateur électro-thermique dont une dilatation provoquée permet de fermer un micro-circuit.

Jean-Pierre Joly termine sa présentation en insistant sur les enjeux que la micro-électronique peut offrir aux thermiciens. Il est tout d'abord nécessaire que ces derniers puissent proposer des concepts « intégrables » pour le micro-refroidissement. Il faut ensuite utiliser la physique et la nanostructuration pour casser la corrélation pénalisante entre permittivité et conductivité thermique. Des outils de mesure des propriétés thermiques adaptés aux couches et aux dimensions de la micro-électronique doivent être développés. Il est aussi essentiel d'intégrer des modèles diphasiques pour certaines problématiques. Enfin la modélisation physique des transferts de chaleur aux très faibles (nano-) dimensions reste encore à bâtir.

Quelques questions (Q) et remarques (R) de l'assistance, et les réponses (Rép) de *Jean-Pierre Joly* sont listées ci-dessous.

Q : Dans votre métier, la thermique, c'est un inconvénient ? (*Fabienne Chauvière*)

Rép : La thermique n'existe pas toute seule, ce sont les matériaux et la physique du solide qui structurent le tout.

R : Les nouvelles technologies de l'information dépendent des progrès en thermique ; des efforts communs entre thermiciens et électriciens sont nécessaires car la thermique constitue un facteur limitant. La césure qui a conduit à la création de deux départements séparés du CNRS (STIC et SPI) a provoqué un appauvrissement de cette thématique (*Michel Lebouché*)

Q : Pour parler d'un besoin plus large que la thermique, la création du pôle Minatec à Grenoble, va permettre de rapprocher les différents chercheurs et entrer en compétition avec les Etats-Unis et avec l'Asie (*Jean-Claude Bouchter*, SFT et CEA) ?

Rép : Il s'agit d'une ambition à la fois régionale et nationale.

R : C'est un réseau qui existe (*Jean-Bernard Saulnier*, CNRS-SPI).

R : Dans ce domaine un GdR existe, ainsi que l'Observatoire des micro- et nano-technologie. Pour la recherche dans ce domaine, le brevet ne constitue t-il pas une contrainte ? (*Sebastian Volz*, EM2C).

Rép: Mais nous sommes dans une logique de compétition et une idée peut déboucher sur une « start-up ».

Une deuxième table ronde sur « *la concrétisation de la relation recherche-industrie* » est animée par *Fabienne Chauvière* et présidée par *Michel Lebouché* (MSTP, Ministère de la Recherche). Elle rassemble *Jean-Claude Charbonnier* (Arcelor), *Michel Combarrous* (Association Française de Mécanique), *Pierre Guillon* (Délégation Générale pour l'Armement), *Marc Lalande* (INRA), *Christophe Marvillet* (GRETH), *Gérard Pajean* (BSN Glass Pack) et *Victor Sanchez* (CNRS SPI).

Fabienne Chauvière anime le débat en demandant tout d'abord à chacun des participants de se présenter brièvement.

Gérard Pajean donne quelques chiffres : un four verrier fonctionne à 1550°C et produit de 300 à 600 tonnes de verre par jour. L'élaboration d'une tonne de verre produit 500 kilogrammes de CO₂. La mise en forme des produits verriers nécessite l'extraction d'une importante quantité de calories. Le contrôle du produit fini (les bouteilles) se fait aujourd'hui à froid et l'enjeu des années futures est de remonter en amont du process pour pouvoir effectuer ces contrôles à chaud, par exemple, par thermographie infrarouge. Ceci nécessite des développements en métrologie et en simulation numérique. Ces investissements s'inscrivent dans la durée, en rapport avec la durée de vie d'une installation (de l'ordre de dix ans).

Pierre Guillon donne quelques éclairages sur les besoins en thermique des industries de l'armement. Il s'agit d'une recherche duale menée en partenariat DGA-industrie. Les besoins concernent les propriétés radiatives des matériaux, la furtivité, les matériaux à haute température et les couplages (instrumentation, simulation), la micro électronique et les piles à combustibles. Dans ces thèmes l'environnement doit être pris en compte.

Jean-Claude Charbonnier donne quelques chiffres : la sidérurgie est à la fois un gros consommateur d'énergie : 50 térawatt-heures par an (gaz plus électricité), ce qui correspond à la production de trois tranches de centrale nucléaire, et un producteur de gaz et d'électricité (couvre un tiers de ses besoins). Arcelor est l'un des premiers consommateurs d'énergie dans plusieurs pays européens (France, Luxembourg, Belgique et Espagne) Elle émet beaucoup de CO₂ : la production d'une tonne d'acier émet environ 1,5 tonnes de CO₂. Des efforts pour restreindre la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ ont permis une baisse de 50 % environ, à la fois de cette consommation et de ces émissions au cours des 50 dernières années. On vise à aller beaucoup plus loin et à diminuer encore massivement les émissions de CO₂

(plus de 50%) dans le cadre d'un grand projet intégré de la commission européenne, ULCOS, lui-même axe important d'une plateforme technologique européenne du secteur acier.

La politique de recherche d'Arcelor consiste à fidéliser les relations du groupe avec la recherche publique, en l'inscrivant dans une démarche pérenne et un climat de confiance, en l'associant à la formation, pour développer les compétences de demain dans les secteurs qui sont importants pour lui.

Christophe Marvillet précise que l'échangeur thermique est un produit spécifique pour lequel les acteurs sont identifiables. Le GRETH est une structure de recherche appliquée du CEA. Elle constitue également un club d'utilisateurs industriels. Dans ce domaine, les technologies innovantes sont fréquemment portées par les Petites et Moyennes Entreprises. Le GRETH permet une mutualisation de la demande, sa traduction en termes scientifiques et la constitution de réseaux de laboratoires pour y répondre. Notons qu'actuellement les gros acteurs traditionnels ont évolué et il n'existe plus de « locomotive » identifiée. Néanmoins le nucléaire et la pétrochimie restent demandeurs.

Michel Combarrous présente l'Association de mécanique qui se situe dans une logique de regroupement de disciplines complémentaires au sein de projets communs. Il souligne la richesse du vivier de doctorants qui acquièrent, dans le domaine de la mécanique, une véritable formation aux projets industriels.

Marc Lalande met en exergue l'importance des transferts thermiques dans l'agro-industrie, qui est une industrie de transformation dans laquelle le procédé est prépondérant. On peut citer les exemples des transferts thermiques en fluides complexes, les problèmes de cuisson et de texturation associée (qualité du produit), les problèmes de traitements thermiques associés à la sécurité alimentaire (pasteurisation,...) et la problématique des échangeurs-réacteurs. Elle souffre d'un déficit d'image et de communication sur les innovations dans les procédés employés. Depuis un certain temps, le développement des procédés ne s'effectue plus de façon empirique mais repose sur de fortes collaborations INRA-CNRS (GIS TIFAN, devenu PROSETIA : PROcédés de SEparation et de Traitements dans les Industries Alimentaires, par exemple). Le secteur est marqué par l'existence de quatre ou cinq géants entourés de beaucoup de PMI. Il existe des interlocuteurs naturels de ces PMI au travers des centres techniques associés aux équipementiers dans les différentes filières industrielles.

Victor Sanchez donne quelques chiffres sur le département SPI du CNRS qui regroupe 5000 personnes en recherche amont avec finalité industrielle et qui tire 50 % de ses ressources de fonctionnement de contrats avec les industriels. Il a constitué dix laboratoires communs montés avec des industriels : ceux-ci constituent de petits groupes associant ingénieurs et chercheurs. Il existe également un accord CNRS-CETIM et des unités mixtes de recherche avec des grands groupes comme TOTAL (sur les pétroles à Pau), Rhodia (sur la microfluidique à Bordeaux). Les programmes interdisciplinaires associent CNRS et industriels, par exemple le Programme Energie (recherche amont). Des programmes existent également en aéronautique (avec Airbus, SNECMA et ONERA), en transports terrestres (avec PSA notamment). L'habitat constitue une préoccupation majeure qui a justifié la création d'un centre solaire à Chambéry.

Le CNRS marque son intérêt pour des développements pérennes sur des enjeux majeurs.

A ce stade, *Fabienne Chauvière* pose la question : « Comment aller plus loin dans la coopération ? ».

Jean-Claude Charbonnier, au delà des actions de fidélisation visant à une pérennisation public-privé, insiste sur la nécessité d'atteindre une taille critique dans un cadre interdisciplinaire et propose une mise en commun de gros équipements ou de compétences de base autour de la compréhension des phénomènes, les modèles et la métrologie. Comme les besoins industriels sont les mêmes, on peut penser à une certaine mutualisation autour d'une fédération regroupant des moyens génériques (plates-formes).

Victor Sanchez reprend la parole pour évoquer le rôle important des réseaux constitués autour de sept GdR SPI auxquels participent déjà l'industrie, notamment au travers des comités de pilotage et autour des pôles nationaux sur une thématique précise comme celle des carburants et moteurs (25 laboratoires), ou l'usinage à grande vitesse (30 laboratoires).

Pierre Guillon indique que la DGA souhaite aller plus loin dans sa démarche vers les laboratoires dans le cadre de la Mission pour la Recherche et l'Innovation Scientifique, qui remplace la DRET, au travers par exemple de bourses de thèse et de financement de projets exploratoires.

Gérard Pajean indique que l'environnement industriel actuel (durée de vie des produits de plus en plus courtes et priorité aux résultats financiers à court terme) pousse au rapprochement universités-entreprises, ne serait-ce que pour des raisons financières : les recherches amont ne peuvent plus être financées en interne et l'industrie est alors obligée de faire appel aux universités comme sous-traitants. Deux exemples sont cités : le réseau REVELOR (Réseau Verrier Lorrain) monté à l'aide de la Région autour du verre et le GdR (Groupe de Recherche) « Matériaux vitreux » regroupant des laboratoires du CNRS et des entreprises (comme St Gobain, BSN, Alcatel, les Verreries d'Arques, Baccarat) regroupées sous l'égide de l'Institut du Verre.

Michel Combarous pose le problème plus général des sciences et techniques pour lequel l'intérêt des jeunes décroît. Il note le fossé qui se creuse entre les grands groupes internationaux et les PME-PMI enracinées dans un terroir. Il propose de revivifier le continuum formation-industrie-recherche, notamment au travers des départements d'IUT.

Christophe Marvillet insiste sur la nécessité de faire passer les innovations issues de la recherche dans le monde industriel en favorisant la conception et la construction de démonstrateurs et prototypes. Un exemple parlant de cette démarche est le modèle du CEA-LETI.

Fabienne Chauvière redonne alors la parole à *Romuald Jurkowski* (CIAT) qui n'avait pas pu exprimer toutes ses suggestions lors de la table ronde du matin. Son entreprise, qui a dû s'adapter, en temps que concepteur d'équipements frigorifiques, à au moins quatre générations de substituts de CFC (réfrigérants à base de fréons[®]), exprime des besoins forts en recherche amont, afin d'éviter l'établissement expérimental coûteux et fastidieux de corrélations de transfert de chaleur empiriques.

Marc Lalande intervient à son tour pour insister sur les bénéfices de la mobilité entre public et privé qui permet d'instaurer non seulement des passerelles mais surtout une compréhension mutuelle profonde.

La conclusion de cette table ronde est tirée par *Michel Lebouché*. La relation entre laboratoires et industrie doit être basée sur la confiance reposant sur une compétence reconnue.

Le laboratoire constitue un réservoir naturel de compétences qui s'enracine dans la durée. Les besoins industriels sont pluridisciplinaires. On peut donc envisager les propositions suivantes :

- fidéliser les laboratoires en termes de moyens,
- mettre en place des structures d'accueil de PME dans les laboratoires,
- monter des fédérations de laboratoires sur des projets communs,
- faire intervenir les enseignants-chercheurs dans des séminaires dans l'industrie.

Il est nécessaire d'ajouter à cette démarche un volet formation en suscitant notamment l'intervention des ingénieurs dans les masters, et en renforçant la relation recherche-industrie au travers de thèses CIFRE, de Bourses de Docteur-Ingénieur co-financées et en lançant des travaux post-doctoraux en partenariat avec l'industrie. *Michel Lebouché* propose d'organiser un colloque EPST-Universités-EPIC autour de l'optimisation des modalités de coopération avec l'industrie.

Jean-Claude Boucher conclue la journée en soulignant la richesse des échanges et en remercie les différents intervenants.

7.2 Quelques réflexions suite au Colloque du 12 janvier 2005

Les deux réflexions suivantes, qui font suite au colloque, émanent d'une réunion de synthèse du Conseil d'administration de la SFT qui s'est tenue le 10 mars 2005.

- i) Paradoxalement, les chercheurs en thermique des laboratoires universitaires et/ou CNRS ne se sentent nullement en concurrence. Ceci n'est pas forcément le signe d'une recherche qui fait du sur place, mais traduit seulement le fait qu'il y a beaucoup plus de demande que d'offre de recherche. Ce point peut constituer un argument non négligeable pour demander la création de davantage de postes (chercheurs et enseignants-chercheurs), à condition que le document soit lu par les instances de décision. Cette demande est souvent (mal-) traitée ailleurs par des chercheurs qui n'ont pas intégré la nécessité d'une double culture (leur thématique de base + la thermique), double culture nécessaire à tout chercheur dans notre domaine. Cette mauvaise appréciation du besoins réel de thermiciens résulte d'une prise en compte séquentielle, dans les différents « génies », de la dimension thermicienne selon trois niveaux: au niveau 0, l'utilisateur est obligé de prendre en compte la température comme variable d'influence ; au niveau 1, il effectue des corrections de température sur le phénomène qu'il étudie et, au niveau 2, il utilise des modèles couplés intégrant la thermique. Les exemples de cette approche progressive sont légion. On peut ainsi citer le problème de la trempe du cristal en cristallerie (mécanique et thermique), celui de la fatigue thermomécanique dans les centrales nucléaires au sein desquelles les matériaux sont soumis à des alternances d'écoulements chauds et froids, et aussi le développement des différentes techniques optiques (photo- ou thermomécanique) avec l'intéressant problème du pilotage des différents champs.
- ii) Le Colloque a également montré une contradiction entre une industrie de plus en plus demandeuse d'innovations nourries par la recherche et de grandes entreprises souvent

trans-nationales qui se désengagent de la recherche. On peut citer ici l'exemple de certains (mais pas tous) groupes de l'industrie du verre qui ferment leur centre de recherche en France.

Il est très intéressant de rapprocher ce point, concernant la relation recherche-industrie, de la position des 18 centres techniques industriels français (CTI) qui sont fédérés au sein d'un réseau (www.reseau-cti.com). Ceux-ci sont les interlocuteurs naturels de 70000 entreprises, souvent des PME, en matière de recherche. Ces CTI devraient jouer le rôle d'interface PME-laboratoires. Les demandes de recherches, indispensables à ces PME, sont souvent mal ou peu couvertes (recherche non high tech,...). De façon générale, il existe un fossé entre les PME et les outils et les manifestations de la communauté de la recherche avec des problèmes d'accessibilité aux concepts qu'elle utilise (méthode inverse, réduction de modèle, outil stochastique,...), concepts qui sont explicités dans le livre blanc. Il existe donc un besoin de vulgarisation et les CTI pourraient jouer le rôle d'interface. Cette recherche, issue des centres techniques, est souvent traitée au sein des Ecoles des Mines.

A l'exception de quelques CTI qui l'ont déjà fait (le GRETH-CEA par exemple), la plupart des CTI gagneraient à se rapprocher davantage des laboratoires. Actuellement, beaucoup de demandes de PME remontent directement vers les laboratoires : on peut citer l'exemple de la caractérisation thermophysique de matériaux, qui est une activité « de routine » pour les laboratoires. Ces derniers, n'ont ni le temps, ni la vocation de répondre à ce type de demandes. Depuis que les grandes entreprises ont fermé leurs centres de caractérisation, personne n'est capable de se substituer aux laboratoires : un sérieux problème de transfert de compétences existe.

Il serait donc intéressant d'organiser une rencontre entre le réseau des CTI et la SFT pour voir comment traiter ce problème.

8. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

8.1 Synthèse

Nous nous proposons de dégager ici quelques idées générales permettant d'identifier les points durs, d'un point de vue scientifique, pour lesquels des efforts significatifs seraient à entreprendre dans les années qui viennent.

En *rayonnement thermique* la communauté occupe dans le domaine de l'expérimentation une position avancée à l'échelle mondiale, en n'hésitant pas à innover et à entreprendre des expériences difficiles. Cependant il existe des thèmes peu couverts tels le rayonnement des agrégats. De même les travaux de caractérisation des phénomènes de diffusion sont à poursuivre, notamment dans le domaine du couplage avec la conduction et la convection et en présence de réaction chimique (combustion). La constitution de bases de données des propriétés radiatives des gaz, des solides ou des milieux semi-transparents, en particulier à haute température, constitue un enjeu considérable.

En *transfert convectif* la communauté est très active et bien placée au niveau de la modélisation et de la simulation numérique.

La connaissance des phénomènes liés au développement d'instabilités dans les fluides doit contribuer à l'élaboration de stratégies de contrôle des transferts de chaleur et de masse. Des outils, notamment de simulation numérique, se mettent en place, mais les expériences sont encore très rares. Cette nouvelle façon d'aborder les problèmes de thermique par des analyses de stabilité devrait permettre de trouver des solutions nouvelles et originales pour mieux comprendre des disparités de fonctionnement ou des anomalies de systèmes thermiques. Notons cependant les difficultés réelles de manipulation des structures thermo-convectives qui ne permettent pas encore le développement d'un contrôle thermique actif.

La thermique des fluides complexes est directement liée aux applications (fluides et pâtes alimentaires, polymères, fluides biologiques, ...). Elle nécessite le développement de modèles pertinents de description physique et la caractérisation préalable des propriétés rhéologiques et thermophysiques. Des moyens d'investigation adaptés doivent être conçus et utilisés afin d'accompagner les progrès attendus des simulations consécutifs à l'augmentation des puissances de calcul.

Dans le domaine de la convection aux *micro-échelles*, domaine actuellement en plein essor (réfrigération, pile à combustible, conditionnement thermique en micro-électronique, refroidissement des aubes de turbine, écoulements dans les tissus biologiques...), les problèmes à résoudre concernent la légitimité de l'extrapolation des lois classiques à ces échelles et celui de la mesure locale des différentes variables ainsi que des flux. On peut ici noter qu'une approche type milieu-poreux constituerait peut-être une ouverture originale.

De même, la conduction dans les micro-structures doit être maîtrisée afin de permettre la conception de matériaux microstructurés dont on pourrait optimiser les propriétés thermiques macroscopiques. La micro-électronique pose également des problèmes de refroidissement redoutables liés à l'augmentation continue des densités de puissance.

La compréhension des transferts thermiques aux *nano-échelles*, c'est à dire, pour fixer les idées, en dessous de 0,1 micromètre, est indispensable à la maîtrise de l'intégration des micromachines (MEMS) ainsi que de celle des puces électroniques ou biologiques. Notons

cependant qu'il faut distinguer ici la thermique des milieux continus, au dessus de 0,1 micromètre, pour lesquels des problèmes délicats d'homogénéisation « classique » existent, des problèmes de nanothermique ou seule une approche à base de physique « discrète » devient pertinente. Cette thématique 'nanothermique' est appelée à connaître un fort développement dans les décennies à venir.

La thermique des *écoulements diphasiques* liquide-gaz, ou particules-fluide ou liquide-solide soulèvent des problèmes multi-échelles liés d'abord à la physique du changement de phase, qui peut survenir hors équilibre, et à la détermination des lois de comportement et d'échanges.

Dans ces trois domaines la mesure locale reste difficile, ce qui ouvre un champ aux méthodes inverses pour l'estimation des propriétés et des champs.

Les travaux des thermiciens dans le domaine des échanges fluide-fluide (mélangeur-échangeur) constituent des approches originales qui complètent celles de la communauté du génie des procédés qui cherche également à intensifier les échanges, notamment dans des réacteurs de plus en plus miniaturisés.

Les problèmes à traiter en transferts en *milieux poreux* devront mettre l'accent sur les aspects couplage en relation avec différentes applications (sûreté nucléaire en cas de fusion de cœur de réacteur, stockage souterrain des déchets nucléaires, membrane de pile à combustible). Notons également les besoins de qualification des lois d'échanges pour les procédés (dispersion thermique dans l'imprégnation des résines dans le renfort des composites ou en réacteur catalysé à lit fixe).

La *thermique des systèmes* concerne trois domaines d'application générique : l'énergie au sens large (production, distribution, utilisation, transformation, stockage), les procédés industriels et enfin les applications spécifiques liées au confort (habillement,...), à la santé et au cadre de vie. On retrouve les thématiques abordées plus haut appliquées maintenant à une échelle plus grande, celle des systèmes.

Les *échangeurs* thermiques constituent un maillon stratégique de la chaîne énergétique. Les avancées à attendre dans ce domaine concernent l'optimisation des échanges, l'aspect multifonctionnel, le développement de micro-échangeurs et l'adaptation aux nouvelles technologies de l'énergie (pile à combustible, solaire,...).

Les progrès à attendre pour les *machines thermiques* se situent dans l'optimisation de leur comportement en régimes transitoire et surtout varié. Ces deux domaines sont encore très ouverts. Les rendements des moteurs ne pourront pas augmenter indéfiniment mais il reste à faire des progrès en ce qui concerne les émissions polluantes et le problème non résolu du CO₂. Les mêmes problématiques concernent les turbo-réacteurs d'aviation.

Enfin, il convient de noter, en matière de machines thermiques que leur emploi à des échelles millimétriques, voire peut-être micrométriques, est de plus en plus envisagée. Ce changement d'échelle doit s'accompagner de conceptions tout à fait nouvelles pour ces machines.

La thermique des *machines électriques* est un secteur pluridisciplinaire trop rarement abordé par le thermicien. Elles peuvent pourtant constituer une alternative intéressante qu'il conviendra de ne pas négliger notamment pour les applications transport en liaison avec la filière hydrogène.

Les filières énergétiques non-conventionnelles doivent mobiliser le thermicien dans les années à venir, notamment la *pile à combustible* et la filière hydrogène ainsi que le *solaire thermique*. Il en est de même du stockage de la chaleur, notamment à l'aide de matériaux à changement de phase. Ces thèmes sont bien sûr au cœur du programme énergie du CNRS.

La thermique est au cœur des *procédés industriels* : l'utilisation rationnelle de l'énergie constitue un gisement potentiel non encore suffisamment utilisé. La qualité du produit est aujourd'hui l'autre enjeu majeur, qu'il s'agisse du respect de la chaîne du froid en agro-alimentaire ou du respect des spécifications d'une pièce produite. La haute qualité de nos productions est liée à une maîtrise fine de la thermique, notamment lors de l'élaboration par solidification du matériau : il suffit de penser aux qualités requises pour un pare-brise. La place de leader de l'industrie européenne est à ce prix.

Le secteur du *chauffage et de la climatisation* des bâtiments constitue le premier poste de consommation d'énergie et représente 46 % de la facture.

Il convient de dynamiser les recherches sur les systèmes eux-mêmes, cela présuppose des études plus transversales, avec l'interaction de différents domaines d'activités pour faire évoluer les systèmes en vue d'une véritable intégration dans le bâti et optimiser les systèmes intégrés. De même la prise en compte des concepts d'architecture bioclimatique et des techniques passives, permettra d'améliorer le bilan énergétique et environnemental global. Enfin une diminution des besoins (appareils économiques, éclairage performant, protection solaire, inertie des bâtiments...) et une maîtrise de la demande en énergie (stratégies de groupement de maisons voire de quartier) constitue une piste à exploiter.

La *thermique du vivant* est un secteur dont on parle mais sur lequel les thermiciens sont encore trop peu actifs. Les progrès en microthermique ouvriront peut-être des portes pour une meilleure implication de la communauté.

Le nucléaire est évidemment en filigrane dans les sections précédentes. Il tient une place particulière dans la *thermique des matériaux et des fluides à haute température*. Les problèmes posés par les réacteurs nucléaires de 3^{ème} et surtout de 4^{ème} génération tournent autour de l'élaboration des matériaux et leur mise en œuvre dans des conditions extrêmes de température et de flux.

Le thermicien, depuis Joseph Fourier au XIX^{ème} siècle, a toujours eu à l'esprit la volonté de développer des outils spécifiques. Il s'agit tout d'abord des *techniques de modélisation et de simulation* spécifiques en convection et en rayonnement, domaines sur lesquels l'expertise de la communauté est patente. Des moyens appropriés de mesure de température ont été développés grâce au progrès de l'instrumentation (dispositifs d'acquisition et de traitement numérique du signal). Ainsi la *mesure de température* par contact en régime transitoire ou modulé et surtout les progrès apportés par les méthodes optiques (thermographie et pyrométrie infrarouge, fluorescence induite laser par exemple) ont permis le développement de méthodes spécifiques de *caractérisation thermique* des matériaux et de mesures de températures non intrusives dans les fluides. Les méthodes modernes de mesure (indirecte) des propriétés thermophysiques ont été rendues possibles par la mise en œuvre de méthodes de résolution de problèmes inverses de mesures. La SFT a joué un rôle moteur dans le développement de ce type de *techniques d'inversion* développées initialement en Russie puis aux USA. Des voies nouvelles d'estimation de flux pariétaux, de validation de modèles et de construction de modèles réduits pertinents sont maintenant envisageables pour une grande classe d'applications. La *thermodynamique*, et ses évolutions récentes, constitue une science

d'appui du thermicien mais aussi du mécanicien des fluides ou des spécialistes des matériaux, ou du génie des procédés. L'enjeu pour des thèmes actuels comme le développement d'énergies durables et acceptables, en est un exemple concret et urgent : le stockage dynamique du futur vecteur hydrogène, la gestion thermique des piles à combustibles, le transport du froid et/ou de la chaleur à longue distance, la séquestration du CO₂ en conditions supercritiques, l'optimisation énergétique des procédés industriels sont des exemples nécessitant l'interdisciplinarité de tels spécialistes.

Enfin les *méthodes d'homogénéisation* et les *processus stochastiques* développés initialement dans la communauté des milieux poreux, constituent des outils puissants de modélisation que les thermiciens doivent s'approprier.

8.2 Conclusions

Il est évident que la recherche en thermique ne peut être absente des enjeux du siècle qui démarre. Un des plus vitaux concerne la production, la distribution, la conversion et l'utilisation de l'énergie. Si on s'intéresse en particulier à la filière carburant, il est nécessaire de trouver le raccord entre une économie basée sur le pétrole pour les transports et une production d'électricité, voire d'hydrogène à partir de la fusion : le thermicien peut et doit participer à la conception des filières énergétiques intermédiaires qui vont être utilisées dans les prochaines décennies.

Dans le même ordre d'idée il n'est pas inutile de dégager ici quelques grands problèmes pour lesquels l'action du thermicien sera déterminante :

- les centrales nucléaires de 4^{ème} génération et bien sûr la fusion thermonucléaire vont faire émerger des défis redoutables liés à l'emploi de matériaux à très hautes températures et soumis à de très hauts flux neutroniques et thermiques. Si on considère par exemple le projet ITER, la récupération et la conversion de la chaleur produite par ce « mini-soleil » constituent encore des problèmes très ouverts.

- dans un contexte d'épuisement à relativement court terme des combustibles fossiles, et des problèmes liés à l'effet de serre, des solutions alternatives doivent être testées et mises au point dans le domaine des transports. Pour donner un exemple concret, le stockage de l'hydrogène dans des charbons actifs nécessite les compétences du thermicien, le stockage de ce gaz dans ce matériau étant fortement exothermique.

- le développement exponentiel de mini- ou micro-équipements faisant appel aujourd'hui aux microtechnologies et demain aux nanotechnologies et consommant des puissances électriques faibles mais concentrées dans de faibles volumes est limité par des problèmes drastiques d'évacuation de la chaleur. Dans ce domaine les concepts fondamentaux classiques devront évoluer pour établir une nécessaire connexion entre le niveau continu et les nano-échelles de la matière : il n'est plus possible d'utiliser une conductivité thermique lorsque le nombre de porteurs devient faible. Ceci constitue un verrou pour la conception de tels systèmes.

- si l'on veut passer maintenant aux très grandes échelles, celles du globe, les concepts et les méthodologies des sciences thermiques pourraient être transposées à la résolution de problèmes d'environnement comme le transfert des contaminants dans l'atmosphère : les équations sont les mêmes que celles de la convection thermique.

La pérennisation des savoirs en thermique constitue, lui également, un enjeu, dans une société où les changements d'orientation peuvent être très rapides du point de vue économique et/ou industriel. La communauté doit donc s'organiser pour assurer le maintien des savoirs et des compétences des laboratoires.

Celles-ci constituent une base de connaissances vivante pouvant être judicieusement intégrée dans les outils existants permettant d'optimiser la productivité et la qualité des produits de l'industrie : il est dommage de voir des travaux de développement industriels se lancer alors que la réponse existe mais demeure inconnue par méconnaissance des acquis de recherches antérieures. La veille technologique qui consistait notamment pour les ingénieurs et chercheurs à fréquenter les rencontres scientifiques semble avoir disparu et de nouvelles méthodes restent à inventer.

Enfin, ce document n'est pas figé et il a vocation à être actualisé de manière dynamique. La communauté doit se l'approprier, à la fois pour l'enrichir et pour mettre en œuvre une stratégie propre à apporter une réponse opérationnelle aux défis posés par les multiples questions que soulève ce texte.

ANNEXE 1 – Nanothermique : Figures

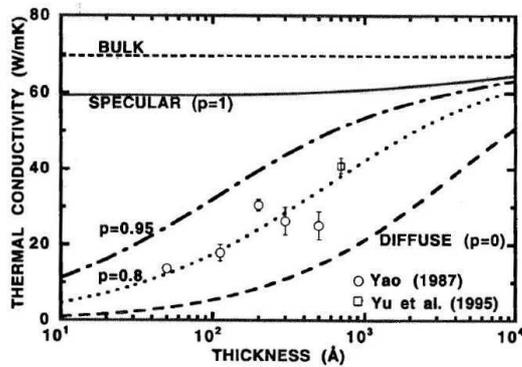


Figure 1

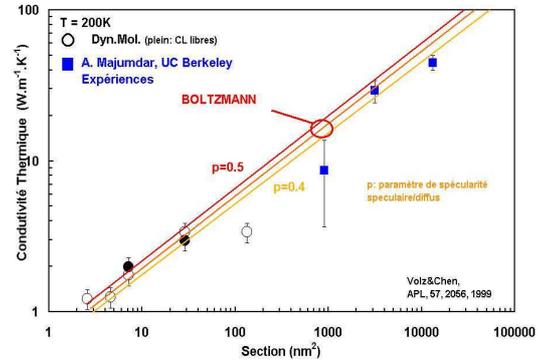


Figure 2

Figures 1: conductivité thermique effective d'un superréseau Si-Ge en fonction de l'épaisseur d'une couche. Le modèle prédictif (lignes) est dépendant du taux de réflexion spéculaire p aux interfaces. Sur la base des valeurs expérimentales (disques et carrés), ce taux est fixé à 0.8. La conductivité effective peut se trouver diminuée d'un ordre de grandeur.

Figure 2: conductivité thermique effective d'un nanofil de silicium en fonction de sa section. Le modèle prédictif (lignes) est de même dépendant du taux de réflexion spéculaire p aux surfaces. Ce taux est fixé sur la base des valeurs obtenues par un modèle atomique (disques noirs et blancs). Les valeurs expérimentales (carrés bleus) se trouvent finalement proches de celles du modèle. Une réduction de deux ordres de grandeur de la conductivité thermique effective peut être constatée.

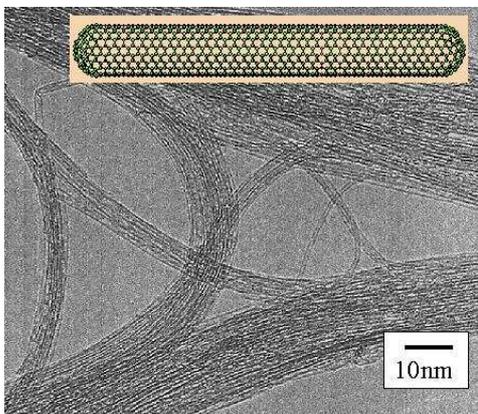


Figure 3

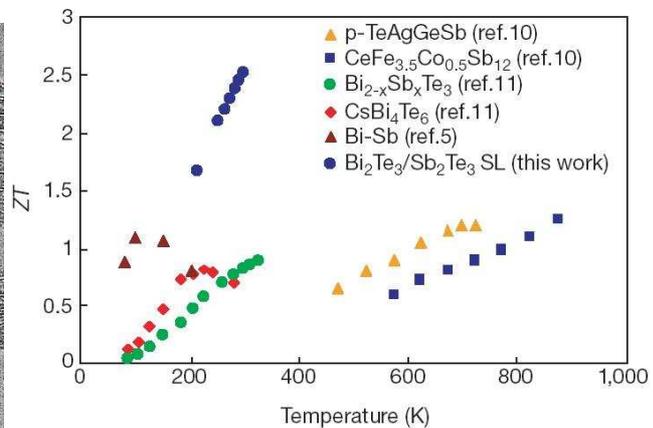


Figure 4

Figure 3 : Image en microscopie électronique à transmission d'un amas de nanotubes fabriqués par une technique de dépôt de vapeur chimique utilisant le méthane comme source de carbone.

Figure 4: Facteur de mérite de différents alliages en fonction de la température. Le superréseau de Bismuth, Tellure et d'Etain atteint, à température ambiante, des valeurs inégales. [R. Venkatasubramanian et al., Nature, **413**, 597, 2001].

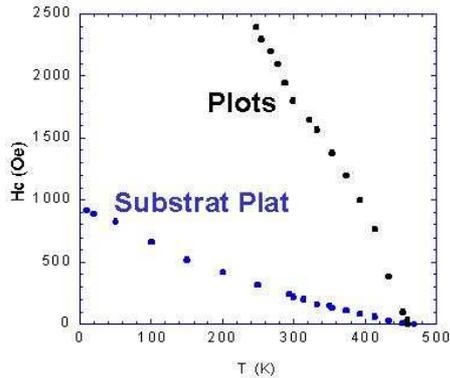


Figure 5

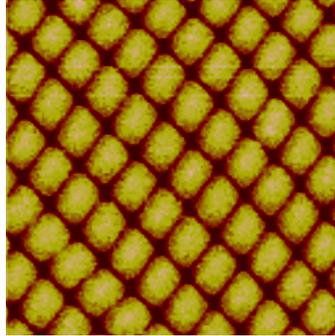


Figure 6a

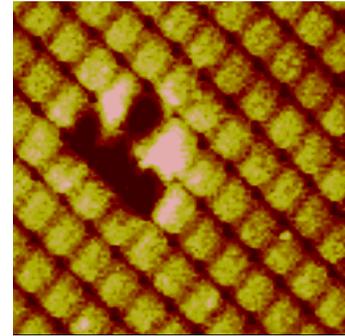


Figure 6b

Figure 5 : Dépendance de la valeur du champ coercitif en fonction de la température. Les substrats munis de plots présentent une sensibilité accrue à la température (Jean-Pierre Nozière Spintronics, MINATEC Grenoble).

Figures 6a et 6b : Images par microscopie à force magnétique d'un support magnétique à plots avant (milieu) et après (droite) l'inversion d'aimantation. Le substrat est plongé dans un champ magnétique, simultanément une pointe chauffante vient localement diminuer la valeur du champ coercitif et permettre l'inversion. Les images représentent des zones de $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ (Jean-Pierre Nozière Spintronics, MINATEC Grenoble).

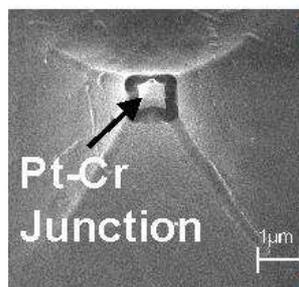


Figure 7a

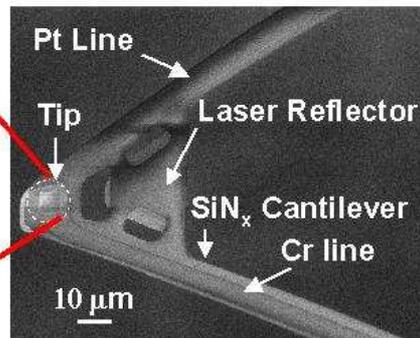


Figure 7b

Figure 7 : a) nanothermocouple déposé sur une pointe de microscope à force atomique (AFM). b) : microlevier supportant la pointe AFM. (Arun Majumdar, ME Dpt, UC Berkeley).

Remerciements

Nous remercions les personnes ayant fourni et autorisé la diffusion, pour cette annexe, d'images non encore publiées: Jean-Pierre Nozière (Spintronics, MINATEC Grenoble) et Arun Majumdar (ME Dpt, UC Berkeley).

ANNEXE 2 – Principe des méthodes de simulation en transfert convectif

- méthodes de différences finies et de volumes finis

Ces méthodes consistent à approcher les opérateurs aux dérivées partielles par des opérateurs discrets. Considérons d'abord le cas des problèmes stationnaires : le principe des méthodes de différences finies est de définir, dans une grille constituée par un réseau discret de points dans le domaine étudié, des opérateurs discrets faisant intervenir les valeurs en ces points de l'inconnue. Ces opérateurs doivent alors vérifier une propriété de consistance : si l'on prend comme valeurs discrètes les valeurs en ces points d'une fonction régulière, la différence entre l'opérateur discret appliqué à ces valeurs et l'opérateur continu appliqué à la fonction, évalué en l'un des points, doit tendre vers zéro avec l'écart moyen entre les points du réseau discret (le pas du maillage). Ainsi de telles méthodes sont-elles usuelles en thermique, dans le traitement numérique de l'équation de la chaleur.

Cependant, dans le cas des équations de Navier-Stokes, qui comportent aussi bien un opérateur de diffusion qu'un opérateur de convection non-linéaire, le mot différences finies est souvent employé pour désigner des méthodes de discrétisation qui portent non pas sur les opérateurs continus de l'équation initiale mais sur les opérateurs obtenus après intégration d'une équation de conservation dans une partition du domaine considéré (on parle alors de méthodes de volumes finis). Ces opérateurs obtenus après intégration sont d'un ordre inférieur aux opérateurs initiaux (on passe d'un laplacien au gradient sur des faces) et sont, à leur tour, évalués par des méthodes de différences finies. Ainsi, des documents mentionnant « les équations de Navier-Stokes sont discrétisées sous forme conservative par une méthode de différences finies » se réfèrent en fait souvent à une méthode de volumes finis.

L'intégration des équations peut se faire sur une grille unique pour toutes les composantes de la quantité de mouvement, pour la matière, l'énergie et les autres équations : cette approche est privilégiée par des grands codes industriels. Cependant, la plupart des codes développés dans les laboratoires reposent sur des grilles différentes pour les composantes de la vitesse et les grandeurs scalaires (c'est le cas du fameux schéma MAC : « Marker-and-Cell method »). Les inconnues sont alors les composantes de la vitesse, la pression, la température, etc., définies en des points différents et vues comme des valeurs moyennes de la grandeur considérée sur de petits volumes élémentaires entourant le point en question. Il est à noter que la plupart des implémentations de ces schémas ne demandent pas un calcul simultané de toutes les inconnues discrètes pour les problèmes stationnaires : les solutions stationnaires sont généralement obtenues comme limites asymptotiques des solutions du régime transitoire.

Dans le cas des problèmes transitoires, les dérivées partielles par rapport au temps des composantes de la vitesse et de l'accumulation d'énergie sont traitées par différences finies (schéma d'Euler par exemple) alors que les opérateurs en espace sont appliqués soit aux valeurs connues des grandeurs en début de pas de temps (schémas explicites) soit aux valeurs inconnues de fin de pas de temps (schémas implicites). Plus les schémas sont implicites, plus la résolution d'un pas de temps est chère en temps calcul mais meilleure est la stabilité du schéma. Il faut donc trouver des compromis entre le coût d'un pas de temps et la valeur maximale de ce pas liée aux problèmes de stabilité. La précision du schéma est améliorée si les différences finies en temps sont prises avec plus de deux points mais le problème principal est alors le traitement du terme convectif. En pratique, ce terme est fréquemment traité de manière explicite bien que des approches implicites soient de plus en plus utilisées. Cela implique la résolution de systèmes algébriques d'équations non-linéaires et l'emploi de la

méthode de Newton, ou de méthodes de type quasi-Newton (il en existe une très grande variété). Il faut enfin souligner que, quelle que soit la méthode choisie, des systèmes linéaires de grande taille à matrice creuse doivent être résolus.

- méthodes d'éléments finis

Ces méthodes ont été développées parallèlement à l'essor de l'analyse mathématique des méthodes d'éléments finis pour la mécanique du solide. Elles reposent sur la définition d'espaces de discrétisation pour les composantes de la vitesse et pour la pression. Les équations continues sont d'abord discrétisées par rapport au temps (en général par une méthode de différences finies). Les équations résultantes sont obtenues par projection sur des fonctions de base et intégration. Le terme de convection non-linéaire conduit à un terme, appelé « forme trilineaire », pour lequel de nombreuses options d'écriture existent. Les méthodes les plus courantes font appel à une partition unique du domaine de calcul, en général sous forme d'une suite de triangles ou de quadrilatères en 2D, tétraèdres ou parallélépipèdes en 3D, identique pour toutes les inconnues, sur laquelle sont définies les fonctions de base.

Il faut alors noter que des conditions de stabilité³ impliquent une que les fonctions de base diffèrent selon l'inconnu : un type peut être adopté pour toutes les composantes de la vitesse, et un autre type pour la pression, la température, etc. Par exemple, un choix courant en deux dimensions d'espace, est de prendre les fonctions « triangle à 6 nœuds » pour la vitesse (les nœuds étant les sommets du triangle et les milieux des côtés, associés chacun à un jeu de valeurs discrètes des inconnues) et les fonctions « triangle à 3 nœuds » pour la pression et la température (les nœuds étant les sommets du triangle). De tels choix conduisent à des systèmes linéaires très grands (on retrouve les problèmes évoqués pour les méthodes de différences et de volumes finis). Plus récemment, une variété plus grande de choix de fonctions de base a été proposée (éléments finis « à bulle » pour les composantes de la vitesse).

Il convient également de mentionner les méthodes de type CVFEM (« Control Volume Finite Element Method »), à l'interface entre les éléments finis, dont elles gardent les capacités à traiter des géométries complexes, et les méthodes de type volumes finis dont les schémas présentent des propriétés de conservation locales et globales.

- méthodes spectrales ou pseudo-spectrales

Le principe général des méthodes spectrales consiste à rechercher la solution $f(x)$ d'une équation différentielle ou aux dérivées partielles sous la forme d'un développement en série de fonctions, généralement orthogonales au sens d'un produit scalaire. Les fonctions les plus communément utilisées sont les polynômes de Chebyshev ou de Legendre et les fonctions trigonométriques qui donnent naissance aux séries de Fourier. En pratique, la solution $f(x)$ est approchée par $f_N(x)$ qui est l'expression tronquée à l'ordre N de la série. Le grand intérêt des méthodes spectrales tient en leur précision : si la solution est C^∞ (ou plus exactement analytique) alors l'écart $\|f - f_N\|$ décroît plus vite que toute puissance de N .

³ Cette notion de stabilité est différente de celle évoquée plus haut. Elle ne concerne que la stabilité de l'approximation spatiale, due principalement au couplage vitesse-pression, et renvoie à une notion technique connue sous le nom de condition inf-sup.

Deux grandes classes de méthodes sont disponibles pour résoudre des équations elliptiques. Elles se distinguent par le choix des inconnues : méthodes Galerkin ou Tau si les inconnues sont les coefficients spectraux ou pseudo-spectraux (approximation des coefficients spectraux), méthodes de collocation forte ou faible si les inconnues sont les valeurs de la fonction aux nœuds du maillage. En multi-dimensionnel, les bases d'approximation sont en général obtenues à partir de produits tensoriels de fonctions de base unidimensionnelle. On fait alors appel aux polynômes orthogonaux, séries de Fourier voire différences finies, selon la nature du domaine géométrique ou des conditions aux limites imposées. Il est alors fréquent que les inconnues des systèmes algébriques soient mixtes, valeurs de la fonction dans l'espace physique pour une direction spatiale et coefficients spectraux pour l'autre. Certaines propriétés de ces approximations polynomiales ont conduit à développer des algorithmes spécifiques, tant pour la résolution des systèmes algébriques que pour le traitement de l'incompressibilité par exemple. Ces techniques, lorsqu'elle s'appliquent, rendent les méthodes spectrales particulièrement intéressantes en matière de rapport précision-coût de calcul. Ceci est vrai en particulier dans le cas des équations de Navier-Stokes, dans l'approximation de Boussinesq pour des propriétés physiques constantes dans des domaines de géométrie simple. Elles sont intéressantes si des précisions élevées sont recherchées, comme c'est le cas pour l'étude des instabilités thermo-convectives par exemple.

Lorsque le critère de précision n'est pas déterminant, le tryptique précision-coût de calcul-difficulté de mise en oeuvre rend les méthodes spectrales moins compétitives. C'est le cas par exemple du traitement d'équations elliptiques non-séparables même si des développements de type éléments spectraux ont déjà été effectués.

ANNEXE 3 – Liste des organismes, laboratoires et sociétés cités (voir aussi : <http://www.sft.asso.fr>)

| Sigles | NOMS | LIEU + CODES |
|---------------|--|---|
| 3S | Laboratoire Sols, Solides, Structures | 38041 GRENOBLE CEDEX 9 |
| AICVF | Association des Ingénieurs en Climatique, Ventilation et Froid | 75008 PARIS |
| AFM | Association Française de Mécanique | 92038 PARIS LA DEFENSE |
| BRGM | Bureau de Recherches Géologiques et Minières | 45060 ORLEANS CEDEX 2 |
| BSN | BSN Glass Pack | 69702 GIVORS |
| CdM | Centre des Matériaux, Ecole des Mines de Paris | 75272 PARIS CEDEX 6 |
| CEA | Commissariat à l'Energie Atomique | 75752 PARIS CEDEX 15 |
| CEE | Centre Energie Environnement, Ecole des Mines d'Albi (voir LGPSD) | 81013 ALBI CT CEDEX 9 |
| CEE | Club Electrotechnologies Enseignement | 44306 NANTES |
| CEMAGREF | Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement | 92163 ANTONY CEDEX |
| CENERG | CENtre d'ENERGétique de l'Ecole des Mines de Paris | 75272 PARIS CEDEX 6 |
| CERTES | Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Thermique, Energétique et Systèmes | 94010 CRETEIL |
| CETHIL | Centre de Thermique de l'INSA de Lyon | 69621 VILLEURBANNE |
| CETIAT | Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques | 69603 VILLEURBANNE |
| CETIM | Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques | 60300 SENLIS |
| CIAT | Compagnie Industrielle d'Applications Thermiques | 01350 CULOZ |
| CNRS | Centre National de la Recherche Scientifique | 75016 PARIS |
| CORIA | COmplexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie | 76801 SAINT ETIENNE DU ROUVRAY |
| CPMOH | Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne | 33405 TALENCE CEDEX |
| CREST | Centre de Recherche sur les Ecoulements, les Surfaces et les Transferts (Institut FEMTO) | 90000 BELFORT |
| CROMEP | Centre de Recherche Outillages, Matériaux et Procédés, Ecole des Mines d'Albi | 81013 ALBI CT CEDEX 9 |
| CRIFIC | Centre de Recherche et d'Innovations et de Formation pour Ingénieurs et Cadres | 54001 NANCY |
| CRTBT | Centre de recherches sur les très basses températures | 38042 GRENOBLE CEDEX 9 |
| CTA-DGA | Centre Technique d'Arcueil | 94110 ARCUEIL et 66125 FONT ROMEU CEDEX |
| DGA | Délégation Générale à l'Armement | 75015 PARIS |

| | | |
|-------------------------------------|---|---|
| EM2C | Lab Energétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion | 92295 CHATENAY |
| EADS | European Aerospace Defence and Space Company | 92150 SURESNES |
| EDF | Electricité de France | 78400 CHATOU |
| ENSAM | Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers | 75013 PARIS |
| EPM | Elaboration par Procédés Magnétiques | 38402 SAINT-MARTIN D'HERES CEDEX |
| EPUN | Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes | 44306 NANTES |
| FAST | Fluides, Automatique, Systèmes Thermiques | 91405 ORSAY CEDEX |
| FEV | FEV Motorentechnik | AACHEN (Allemagne) |
| GeM (ex LMM, LAMM et LGCNSN) | Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Ecole Centrale de Nantes | 44321 NANTES CEDEX 3 |
| GMAI | Groupe de Mécanique, Acoustique et Instrumentation | 66860 PERPIGNAN |
| GPM2 | Génie Physique et Mécanique des Matériaux | 38402 SAINT-MARTIN D'HERES CEDEX |
| GREEN | Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy | 54516 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX |
| GREMI | Groupe de Recherche sur l'Energétique des Milieux Ionisés | 45067 ORLEANS |
| GRETh | Groupement pour la Recherche sur les Echangeurs Thermiques (CEA) | 38054 GRENOBLE CEDEX 9 |
| GUT | ex Groupement Universitaire de Thermique (incorporé dans la SFT en 2000) | |
| IFP | Institut Français du Pétrole | 92500 RUEIL MALMAISON |
| IMFT | Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse | 31400 TOULOUSE |
| IMP | Institut des Sciences et de Génie des Matériaux et Procédés (IMP) | 66860 PERPIGNAN et 66125 FONT ROMEU ODEILLO CEDEX |
| IN2P3 | Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, CNRS | 75016 PARIS |
| INRA | Institut National de la Recherche Agronomique | 75007 PARIS |
| INRETS | Institut National sur l'Etude des Transports et leur Sécurité | 94114 ARCUEIL |
| INRS | Institut National de Recherche de la Sécurité | 54500 VANDOEUVRE LES NANCY |
| IRPHE | Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre | 13384 MARSEILLE CEDEX 13 |
| IRSID (maintenant ARCELOR Research) | Institut de Recherche de la Sidérurgie - ARCELOR | 57280 MAIZIERES-LES-METZ |
| ISMCM | nouveau nom: : Institut Supérieur de Mécanique de Paris | 93405 SAINT OUEN CEDEX |
| IVK | Institut von Karman de Mécanique des Fluides | RHODE-SAINT-GENESE (Belgique) |
| IUSTI | Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels | 13453 MARSEILLE |
| IXL | Laboratoire d'étude de l'intégration des composants et systèmes électroniques | 33405 TALENCE CEDEX |
| LEEE | Laboratoire d'Energétique et d'Economie d'Energie | 92410 VILLE D'AVRAY |
| LABOMAP | Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés, ENSAM | 71250 CLUNY |
| LAGEP | Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés | 69622 VILLEURBANNE CEDEX |

| | | |
|----------------|---|-------------------------------------|
| LaMCoS | Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides | 69621 VILLEURBANNE CEDEX |
| LAMEFIP | Laboratoire Matériaux Endommagement Fiabilité et Ingénierie des Procédés | 33405 TALENCE CEDEX |
| LAMIH | Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines | 59313 VALENCIENNES CEDEX 9 |
| LASMIS | Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée | 10010 TROYES CEDEX |
| LATEP | Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés | 64075 PAU CEDEX |
| LCD | Laboratoire de Combustion et de Détonique | 86961 FUTUROSCOPE CEDEX |
| LCPC | Laboratoire Central des Ponts et Chaussées | 44341 NANTES |
| LCTS | Laboratoire des Composites Thermostructuraux | 33600 PESSAC |
| LE (ex LESETH) | Laboratoire d'Energétique | 31062 TOULOUSE CEDEX 4 |
| LEA | Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques | 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL CEDEX |
| LEEE | Laboratoire d'Energétique et d'Economie d'Energie | 92410 VILLE D'AVRAY |
| LEEVAM | Laboratoire Environnement, Energétique Valorisation, Matériaux | 95031 CERGY-PONTOISE CEDEX |
| LEG | Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble (LEG) | 38402 ST MARTIN D HERES CEDEX |
| LEGI | Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels | 38041 GRENOBLE CEDEX 9 |
| LEMTA | Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée | 54504 VANDOEUVRE LES NANCY |
| LEPTAB | Laoratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment | 17042 LA ROCHELLE |
| LERMAB | Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois | 54506 VANDOEUVRE LES NANCY |
| LET | Laboratoire d'Etudes Thermiques | 86961 FUTUROSCOPE |
| LET2E | Laboratoire d'Etudes Thermiques, Energétiques et Environnement | 56321 LORIENT |
| LETEM | Laboratoire d'Etude des Transferts d'Energie et de Matière | 77454 MARNE LA VALLEE CEDEX |
| LETI | Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information (CEA) | 38054 GRENOBLE CEDEX 9 |
| LG2M | Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux | 56325 LORIENT CEDEX |
| LGC | Laboratoire de Génie Chimique | 31062 TOULOUSE CEDEX 4 |
| LGCNSN | Laboratoire Génie Civil de Nantes - Saint Nazaire | 44606 SAINT NAZAIRE |
| LGPSD | Laboratoire de Génie des Procédés des Solides Divisés, Ecole des Mines d'Albi | 81013 ALBI CT CEDEX 9 |
| LIMSI | Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur | 91403 ORSAY |
| LMARC | Laboratoire de Mécanique Appliquée Raymond Chaleat (Institut FEMTO) | 25000 BESANCON |
| LMC | Laboratoire de Modélisation et de Calcul | 38041 GRENOBLE CEDEX 9 |
| LME | Lab. de Mécanique et d'Energétique | 59913 VALENCIENNES cedex 9 |
| LMFA | Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique, Ecole Centrale de Lyon | 69134 ECULLY CEDEX |
| LML | Laboratoire de Mécanique de Lille | 59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX |
| LMP | Laboratoire de Mécanique Physique | 78210 SAINT CYR L'ECOLE |

| | | |
|----------------------------|---|---|
| LMSC | Laboratoire de Modélisation, Matériaux et Structures, Groupe matériaux et Sciences de la Construction | 95011 NEUVILLE-SUR-OISE CEDEX |
| LMSNM-GP | Laboratoire de Modélisation et Simulation Numérique en Mécanique et Génie des Procédés | 13451 MARSEILLE CEDEX 20 |
| LMSP | Laboratoire de Mécanique des Systèmes et Procédés, ENSAM-ESEM | 75013 PARIS et 45072 ORLEANS |
| LMS | Laboratoire de Mécanique des Solides | 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL CEDEX |
| LMT | Laboratoire de Mécanique et de Technologie | 94235 CACHAN CEDEX |
| LNE | Laboratoire National d'Essais | 757247 PARIS CEDEX 15 |
| LOCIE | Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement | 77376 LE BOURGET-DU-LAC |
| LPAA | Laboratoire de Physique Appliquée et d'Automatique | 66860 PERPIGNAN |
| LPGP | Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas | 91405 ORSAY |
| LPLI | Laboratoire de Physique des Liquides et des Interfaces | 57078 METZ |
| LMPF | Laboratoire de Mécanique et Procédés de Fabrication, ENSAM | 51000 CHALONS EN CHAMPAGNE |
| LPMI | Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications | 54506 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX |
| LPMM | Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux | 57045 METZ CEDEX 1 |
| LPMO | Laboratoire de Physique et de Métrologie des Oscillateurs | 25044 BESANCON |
| LSG2M | Laboratoire de Science et Génie des Matériaux et de Métallurgie | 54042 NANCY CEDEX |
| LSGC | Laboratoire des Sciences du Génie Chimique | 54001 NANCY CEDEX |
| LASH | Laboratoire des Sciences de l'Habitat | 69518 VAULX EN VELIN CEDEX |
| LTDS | Laboratoire de Tribologie et de Dynamique des Systèmes, Ecole Centrale de Lyon | 69134 ECULLY CEDEX |
| LTEP | Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés | 64013 PAU |
| LTN (ex LTI ou LT ISITEM) | Laboratoire de Thermocinétique | 44306 NANTES CEDEX 3 |
| LTm | Laboratoire Laser et Traitement des Matériaux | 71200 LE CREUSOT |
| LTRMC | Laboratoire des Transferts et Réactivité dans les Milieux Condensés | 80025 AMIENS Cedex 01 |
| LTT | Laboratoire de Transferts Thermiques | 64053 PAU CEDEX 9 |
| MSTP | Mission Scientifique, Technologique et Pédagogique, Ministère de la Recherche | 75231 PARIS CEDEX 05 |
| ONERA | Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales | 92322 CHATILLON et 31055 TOULOUSE cedex 4 |
| PECM | Plasticité, Endommagement et Corrosion des Matériaux, Ecole des Mines de Saint-Etienne | 44023 SAINT-ETIENNE CEDEX 2 |
| SHF | Société Hydrotechnique de France | 75015 PARIS |
| SNECMA | Société Nationale de Construction de Moteurs d'Avions | 75015 PARIS |
| SPI | Département Sciences pour l'Ingénieur, CNRS | 75016 PARIS |
| TREFLE (ex LEPT et MASTER) | Transferts, Ecoulements, Fluides, Energétique | 33405 TALENCE CEDEX et 33607 PESSAC CEDEX |
| ULB | Université Libre de Bruxelles | B-1050 Belgique |
| UTAP | Unité de Thermique et d'Analyse Physique | 51687 REIMS CEDEX 2 |

| | | |
|--|---|--|
| | Airbus France | 31300 TOULOUSE |
| | BSN Glass Pack | 69702 GIVORS |
| | CALOR SA Département Energétique, Ecole des Mines de Douai | 38780 PONT EVEQUE 59508 DOUAI CEDEX |
| | FRAMATOME | 92084 PARIS |
| | HUTCHINSON | 45120 CHALETTE SUR LOING |
| | La Vision France | 35510 CESSON SEVIGNE |
| | PECHINEY | 38341 VOREPPE |
| | RENAULT Technocentre | 78288 GUYNCOURT |
| | SAINT GOBAIN - Centre de Recherches CREE | 84306 CAVAILLON |
| | SAINT GOBAIN Recherche | 93303 AUBERVILLIERS CEDEX |
| | TOTAL France | 92907 PARIS LA DEFENSE CEDEX |

ANNEXE 4 – Liste des contributeurs de ce livre blanc

Coordination de l'ensemble du document :

Didier Delaunay et Denis Maillet

| Section | Rédaction | Relecture |
|--|------------------------|------------------------------------|
| 1. RAYONNEMENT THERMIQUE | J. Taine, G. Jeandel | A. Soufiani, P. Boulet |
| 2. TRANSFERTS DE CHALEUR PAR CONVECTION MONOPHASIQUE | | |
| 2.1 Etude et contrôle des instabilités, turbulence | F. Penot | D. Delaunay |
| 2.2 Manipulation des structures thermoconvectives | F. Penot | P. Le Quéré |
| 2.3 Fluides complexes | M. Lebouché | C. Castelain |
| 3. TRANSFERTS THERMIQUES ECHELLES MICRO- ET SUB-MICRONIQUES | | |
| 3.1 Transferts aux micro-échelles | | |
| 3.1.1 Convection aux microéchelles et microcaloducs | P. Marty, M. Lallemand | |
| 3.1.2 Conduction dans les microstructures | | |
| 3.1.2.1 Thermique des couches minces | Y. Scudeller | P. Delaunay |
| 3.1.2.2 Micro-électronique | D. Maillet | P. Lagonotte |
| 3.2 Transferts aux échelles ultimes des milieux continus: nanothermique | S. Voltz | N. Trannoy |
| 4. TRANSFERTS THERMIQUES MILIEUX HETEROGENES | | |
| 4.1 Transferts de chaleur dans les milieux diphasiques | | |
| 4.1.1 Milieux diphasiques liquide-gaz, ébullition, condensation, évaporation | L. Tadrist | M. Lallemand |
| 4.1.2 Ecoulements particules-fluide | B. Oesterlé | F. Lemoine |
| 4.1.3. Milieux diphasiques solides-liquides avec changement de phase | D. Gobin | D. Delaunay |
| 4.1.4 Milieux diphasiques liquide-liquide | E. Saadtjian | C. Castelain, H. Peerhossani |
| 4.2 Transferts dans les milieux poreux | M. Quintard | D. Stemmelen |
| 4.3 Transferts aux interfaces | | |
| 4.3.1 Interfaces solide-solide fixes ou mobiles | N. Laraqi | B. Desmet, J.-L. Battaglia |
| 4.3.2 Echanges pariétaux fluide-solide | D. Maillet | D. Petit |
| 5. THERMIQUE DES SYSTEMES | | |
| 5.1 Echangeurs | P. Mercier | A. Ould el Moctar |
| 5.2 Machines thermiques | A. Lallemand | D. Delaunay |
| 5.3 Electronique et électrotechnique | P. Lagonotte | J.-C. Batsale |
| 5.4 Piles à combustibles et leurs périphériques | S. Didierjean | D. Maillet |
| 5.5 Solaire thermique | A. Ferrière | D. Delaunay |
| 5.6 Thermique de quelques procédés industriels | | |
| 5.6.1 Agroalimentaire | A. Kondjoyan | A. Le Bail |
| 5.6.2 Procédés de mise en forme des matériaux | D. Delaunay | E. Arquis |
| 5.7 Gestion du froid et de la chaleur | A. Lallemand | J.P. Dumas |
| 5.8 Thermique du bâtiment et de l'environnement | F. Penot | F. Allard |
| 5.9 Thermique du vivant | A. Dittmar | B. Saulnier |
| 5.10 Matériaux et fluides à haute température | C. Journeau | J.-M. Goyeneche |
| 6. METHODOLOGIES SPECIFIQUES A LA THERMIQUE | | |
| 6.1 Mesures en thermique: propriétés et champs | J.-C. Batsale | A. Degiovanni |
| 6.2 Techniques de modélisation et de simulation | | |
| 6.2.1 en convection | G. Lauriat, | E. Chénier, R. Eymard, P. Le Quéré |
| 6.2.2 en rayonnement | G. Jeandel | F. Asllanaj |
| 6.3 Méthodes inverses | D. Maillet, Y. Jarny | D. Delaunay |
| 6.4 Thermodynamique fondamentale | B. Spinner | D. Delaunay |
| 6.5 Méthodes d'homogénéisation et processus stochastiques | C. Moyne | D. Maillet |

Industriels ayant contribué à la rédaction du livre blanc

| Société | Personne |
|--|--|
| ACTIS S.A., Limoux | Delfin Braga, Responsable Recherche |
| ARCELOR , Paris et Maizières-lès-Metz | Jean-Claude Charbonnier, Directeur Relations Internationales et Scientifiques Pascal Gardin, Technical Manager, Groupe Process Engineering, ARCELOR Research |
| BONNET NEVE, Hendaye | Stéphane Mousset, Responsable Recherche et Essais |
| BSN Glass Pack, Givors | Gérard Pajan, Directeur Recherche et Développement |
| CEA, Saclay | Jean-Claude Bouchter, Directeur du soutien nucléaire industriel |
| CEA-GRETH, Grenoble | Christophe Marvillet, Directeur |
| CEA-LETI, Grenoble | Jean-Pierre Joly, Direction de la Recherche Technologique, CEA Grenoble |
| CETIAT, Villeurbanne | F. Durier, Directeur Scientifique |
| CETIM, Senlis | P. Devalan, Directeur de l'Agence de Programmes |
| CIAT, Culoz | Romuald Jurkowski, Recherche et Développement |
| IFP, Lyon | Alexandre Rojey, Directeur Développement Durable |
| RENAULT, Guyancourt | Alain. Le-Douaron, Directeur du Département Systèmes Energétiques Environnement à la Direction de la Recherche |
| Saint Gobain, Rantigny | Jean-Baptiste Rieunier, Directeur du Centre de Recherches, Branche Isolation |
| SNECMA, Paris | Alain Coutrot, Directeur de la Recherche et de la Technologie |