



La maîtrise de l'énergie dans l'industrie

L'obligation d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les investissements a conduit à introduire des échangeurs thermiques compacts et à hautes performances dans tous les procédés industriels où les échanges thermiques jouent un rôle essentiel. De plus, dans le contexte actuel de mondialisation de l'économie, l'industrie nationale doit innover en mettant sur le marché des technologies performantes, tant sur le plan technique qu'économique.

L'optimisation des transferts de chaleur dans les échangeurs thermiques nécessite de mettre au point de nouvelles structures et géométries. Dans cet échangeur AlfaNova, entièrement fabriqué en acier inoxydable, le profil des plaques est conçu pour assurer une distribution optimale des fluides.



Alfa Laval

L'émérgence de nouvelles technologies, tels les échangeurs thermiques compacts, ne se fait qu'après un long processus destiné à prouver que les nouveaux équipements offrent de meilleures performances que les échangeurs thermiques conventionnels et que la fiabilité du procédé est conservée. Après ces étapes, il reste à vaincre les réticences de certains industriels pour une implantation sur leurs sites de production.

Il faut donc pour cela mener des projets de recherche et de développement à trois niveaux. Des études de base visent à mieux maîtriser la physique du transfert de chaleur, ce qui permet de proposer de nouvelles structures et géométries. Des études globales ont pour objectif de valider les performances thermiques et hydrauliques en conditions industrielles, ce qui nécessite des essais sur plate-forme (encadré). Des études, enfin, doivent intégrer l'échangeur dans son contexte productif.

Trois interventions du CEA dans le domaine de l'efficacité énergétique dans l'industrie seront détaillées dans cet article. La première est relative aux bouilleurs utilisés dans la pétrochimie, la deuxième concerne les chaudières à gaz pour l'habitat collectif et la troisième se rapporte aux économies d'énergie dans les procédés de fabrication du verre.

Optimisation des bouilleurs pour la pétrochimie

Les bouilleurs à tubes horizontaux sont présents dans de nombreux secteurs industriels. Leurs deux principales applications sont comme rebouilleur au pied d'une colonne de distillation ou comme évaporateur dans un cycle de réfrigération, principalement en tant que refroidisseur de procédés dans l'industrie pétrochimique et de liquéfaction de gaz. Ces bouilleurs offrent la parti-

cularité de présenter un dimensionnement thermique assez complexe. En effet, ces bouilleurs à tubes horizontaux se caractérisent par l'écoulement d'un mélange liquide-vapeur dans la calandre, gouverné par une recirculation naturelle interne difficile à **modéliser**. Le transfert thermique du côté extérieur aux tubes dépend fortement des conditions hydrodynamiques, ce qui se traduit par une variabilité importante du coefficient d'échange selon la position des tubes dans le faisceau.

Des méthodes de dimensionnement insuffisantes pour l'extrapolation aux hydrocarbures

Une analyse bibliographique montre rapidement que les corrélations servant au dimensionnement de ces appareils sont basées sur des expériences réalisées sur des réfrigérants, comme le R113 (**CFC**) par exemple. De ce fait, les méthodes employées actuellement pour le dimensionnement thermique des appareils utilisés avec des **hydrocarbures** présentent une grande incertitude, dans la mesure où l'extrapolation à d'autres fluides n'est absolument pas validée.

Un travail important a été entrepris par le GRETh⁽¹⁾ depuis plusieurs années pour combler cette lacune et fournir des précisions sur l'ébullition d'hydrocarbures dans un faisceau de tubes de taille significative. De plus, les recherches ont permis de donner des réponses quant à l'amélioration occasionnée par des tubes à surface non lisse; ceux-ci seront progressivement introduits dans de nouvelles installations et apporteront un gain de performance très significatif.

Comparaison entre les tubes lisses et les tubes améliorés

La physique de l'ébullition d'un liquide sur une surface chaude montre que les bulles de vapeur apparaissent en premier dans des défauts de surface, assimilables à des petites cavités, où la vapeur se forme, puis grossit et se détache de la paroi. L'idée de créer artificiellement des cavités à la surface d'un tube, pour améliorer ses performances thermiques, a donc naturellement suscité beaucoup d'intérêt depuis plusieurs dizaines d'années. Les techniques actuelles sont très sophistiquées. Elles permettent d'usiner la surface d'un tube et de la structurer, par exemple en rabattant des ailettes ou en déposant un matériau poreux en surface. Les recherches portent actuellement sur la capacité d'une surface améliorée à créer une bulle de vapeur, c'est-à-dire à activer un site de nucléation, puis à désengager cette vapeur, c'est-à-dire à désactiver le site, pour que du liquide revienne prendre place.

La comparaison des coefficients de transfert thermique entre un faisceau de tubes lisses et un faisceau de tubes améliorés, pour les mêmes conditions de fonctionnement, avec de l'**isobutane** (figure 1), met en évidence que l'utilisation des tubes à surface améliorée permet une forte augmentation du transfert de chaleur tout au long du faisceau. L'amélioration est supérieure d'un facteur 3 pour les faibles flux de chaleur (10 kW/m²) et est comprise entre 1,7 et 3 pour les forts flux de chaleur (52 kW/m²). Il faut noter que lorsque le flux de



Échangeur thermique à tubes horizontaux à hautes performances installé sur le site de production de polypropylène de Knapsack en Allemagne. L'échangeur est placé au pied d'une colonne de distillation pour la purification du propylène, et le bas de la colonne est chargé en **propane** qui est vaporisé dans l'échangeur.

chaleur est supérieur à 30 kW/m², le coefficient de transfert thermique a tendance à stagner aux environs de 16 kW/m².K. Ces observations ont aussi été faites par le Professeur Manfred Groll de l'Université de Stuttgart (Allemagne) et ses collaborateurs. Pour leur étude sur un tube unique, ils ont obtenu une amélioration d'un facteur 3 par rapport à un tube lisse. Cette stagnation rend compte de la saturation des cavités en vapeur, le liquide ne peut plus entrer dans le pore et le site de nucléation se trouve alors désactivé (figure 2).

Optimisation d'un échangeur haute température pour une chaudière à gaz

Le projet de recherche européen Combo est consacré au développement d'une nouvelle génération de chaudières à gaz de moyenne puissance destinée au chauffage collectif (immeubles d'habitation, bureaux, piscines,

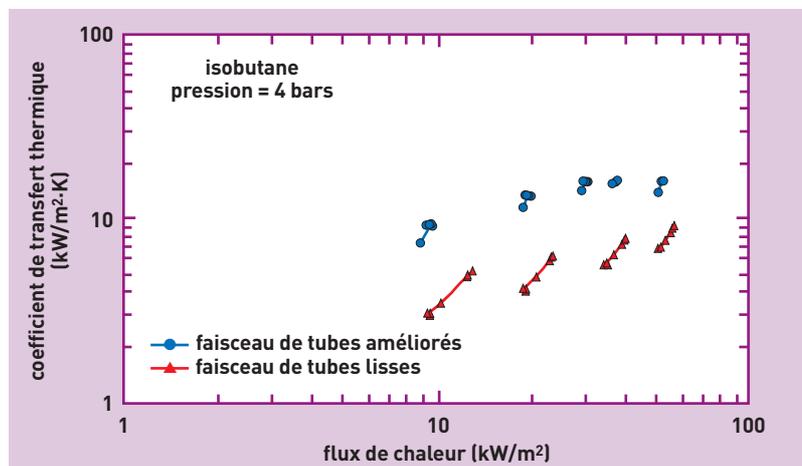


Figure 1. Coefficient de transfert thermique en fonction du flux de chaleur. Comparaison des échanges de chaleur entre un faisceau de tubes lisses et un faisceau de tubes améliorés, pour un débit liquide d'entrée de 46 kg/m².s.

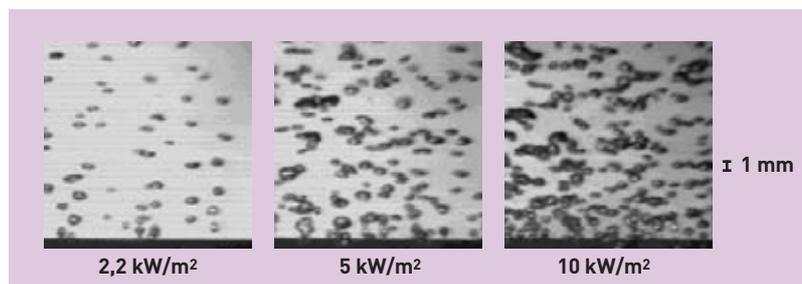


Figure 2. Augmentation du nombre de sites de nucléation pour des tubes améliorés en fonction du flux de chaleur pour du **propane** à une température de saturation de 283 K.

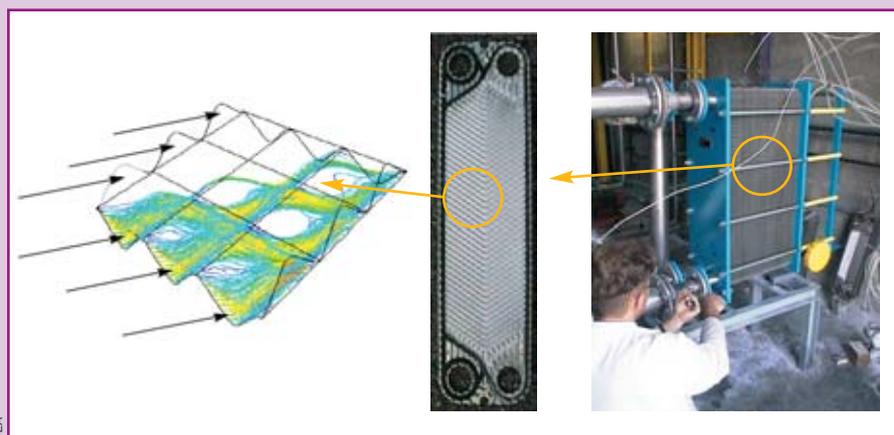
(1) Cette dénomination recouvre en fait ici à la fois celle du Service Système multi-énergies et gestion de l'énergie (Grethe) du CEA et celle du Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh) proprement dit (voir l'encadré *La modélisation des écoulements*, p. 143).



La plate-forme Esther

Dans le cadre des missions du GRETh, la recherche et le développement d'échangeurs de chaleur innovants jouent un rôle fondamental. De par son positionnement à l'interface entre la recherche amont et la recherche concurrentielle industrielle, le GRETh s'est doté d'une plate-forme capable de répondre à ses besoins de R&D : la plate-forme Esther. Celle-ci a pour vocation le développement d'échangeurs de chaleur, de l'échelle millimétrique au pilote pour des applications industrielles et nucléaires.

La plate-forme Esther met à disposition des outils de différents niveaux.



CEA

De l'échelle locale à l'échangeur industriel : échangeur à plaques.

À l'échelle locale, les outils de la plate-forme logiciels (voir l'encadré *La modélisation des écoulements*, p. 143) sont disponibles et offrent la possibilité d'analyser les phénomènes **thermo-hydrauliques** locaux au sein de l'échangeur, typiquement à l'échelle de quelques ailettes. Ils ont notamment permis l'optimisation d'ailettes d'échangeur compact, de formes d'insert pour four de verrerie...

À l'échelle du canal élémentaire, des boucles d'essais analytiques ont été mises en place. À partir d'une instrumentation fine (sonde de taux de vide, microcapteurs, fils froid/chaud, caméra infrarouge), il est possible de disposer de données expérimentales locales et globales à l'échelle du canal élémentaire, typiquement une plaque d'échangeur. Celles-ci, indispensables pour la validation des **modélisations** numériques, conduisent à une meilleure

compréhension des phénomènes physiques dans la perspective d'une optimisation.

À l'échelle du pilote, des boucles d'essais semi-industrielles permettent de tester des échangeurs de taille réelle dans des conditions représentatives. Ainsi, le GRETh dispose d'une panoplie de boucles. Plusieurs sont dédiées à l'évaporation ou à la condensation d'**hydrocarbures** ou d'alcool pour le secteur de la réfrigération industrielle, la chimie et la pétrochimie. Certaines sont consacrées à l'écoulement de gaz à haute température (jusqu'à 550 °C en 2004 et 850 °C en 2005) pour la **cogénération** et les développements de réacteurs nucléaires **HTR**. D'autres sont vouées à l'écoulement chargé de particules solides destinées aux études d'encrassement/décrassement et de filtration. Le GRETh possède également une boucle de tests d'échangeurs-réacteurs.

Début 2004, dans le cadre des Nouvelles technologies de l'énergie, la plate-forme Esther s'est dotée d'une nouvelle boucle d'essais de **reformeur** compact en vue de l'étude de la production d'**hydrogène** à partir d'hydrocarbures liquides.

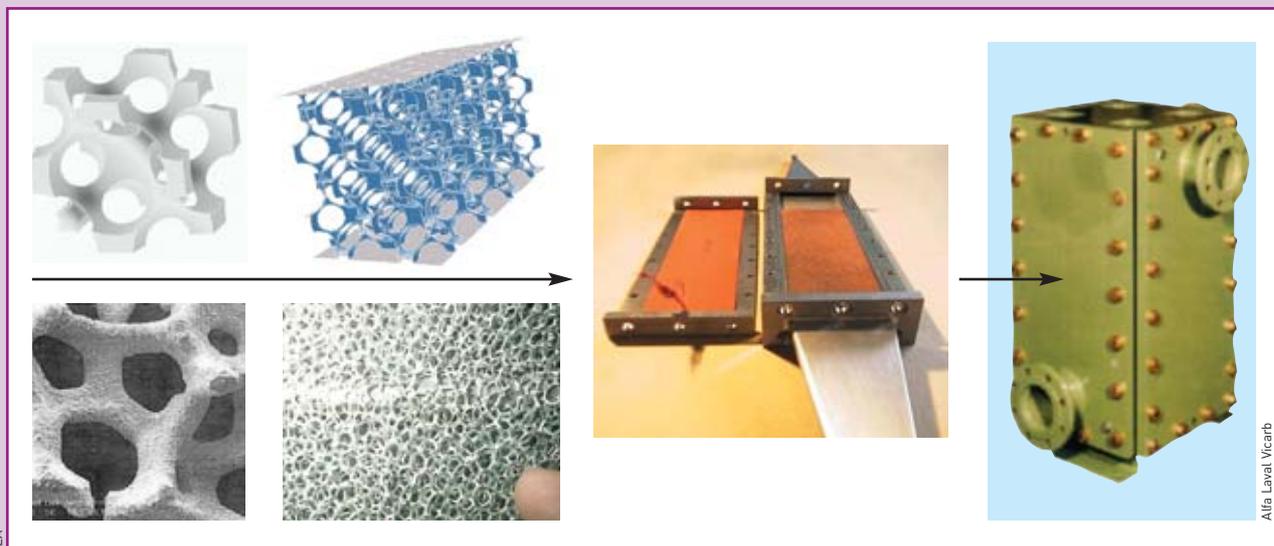
Ainsi, le GRETh dispose dans un même lieu de tous les outils nécessaires à l'innovation technologique, de l'échelle élémentaire jusqu'au pilote industriel.

Le bilan 2003 est éloquent. La plate-forme de développement d'échangeurs de chaleur Esther a permis d'une part, le dépôt d'un brevet sur une nouvelle géométrie d'échangeur compact, d'autre part, la fiabilisation des plaques Haricot (brevet CEA-Alfa Laval) et enfin, le montage de plusieurs programmes de codéveloppement d'échangeurs industriels avec des acteurs internationaux reconnus.

Le succès de la plate-forme réside dans la diversité des outils disponibles, mais également dans la forte synergie entre docteurs, techniciens et ingénieurs travaillant dans un même but : l'optimisation de l'efficacité énergétique des systèmes thermiques.

➤ **Patrice Tochon**

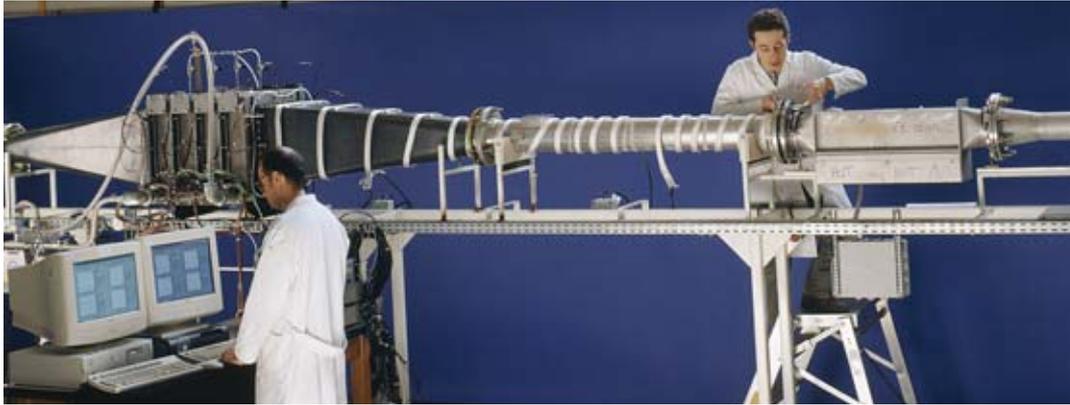
Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble



CEA

De l'échelle locale à l'échangeur industriel : échangeur à mousses métalliques.

Alfa Laval Vicarb



A. Gomin/CEA

Projet Combo de développement de chaudière à gaz pour lequel le CEA étudie la partie récupération de chaleur. Ici, maquette de l'échangeur en cours de tests.

écoles...). Ces nouvelles chaudières d'une puissance nominale de 400 kW peuvent être utilisées en cascade pour atteindre les 4000 kW et améliorer leur rendement thermique.

Le but de ce programme est de concevoir des équipements de faible encombrement, avec un fort rendement thermique (95% rapporté au **pouvoir calorifique supérieur**) et un faible taux d'émission de polluants du type oxydes nitriques **NOx** (moins de 20 mg par kWh produit). Ces objectifs seront atteints par la mise en œuvre de brûleurs radiants et par la condensation de l'eau contenue dans les produits de combustion du **gaz naturel**. Si les chaudières à condensation⁽²⁾ sont assez répandues pour le marché domestique, ce concept est encore peu développé pour les puissances plus fortes. Les participants à ce projet sont des fabricants de chaudières ou de composants, des distributeurs de gaz et des centres de recherche et universités.

Les innovations

Le premier point innovant de ce programme est l'utilisation de brûleurs radiants. Ces brûleurs sont constitués d'un matériau poreux (fibres métalliques ou mousse céramique) et permettent d'obtenir des flammes courtes et de faible température, qui restent à l'intérieur de la matrice poreuse. Alors que pour un brûleur classique la couleur des flammes est bleue, en mode radiant la couleur prend un aspect rouge orangé correspondant à la température de surface de la structure poreuse. Dans ces conditions, une part non négligeable de la puissance thermique (environ 20%) est transférée par rayonnement vers les surfaces en regard.

Ceci entraîne la nécessité de modifier l'échangeur de chaleur placé en regard du brûleur, de façon à être efficace pour les deux modes de transfert que sont la **convection** et le rayonnement.

Conception et dimensionnement de l'échangeur thermique

Le GRETh a effectué des simulations numériques et des essais pour dimensionner au mieux le nouvel échangeur. Deux aspects doivent alors être pris en compte: l'échange par rayonnement entre le brûleur et les premières rangées de tubes de l'échangeur et le transfert convectif pour les rangées suivantes.

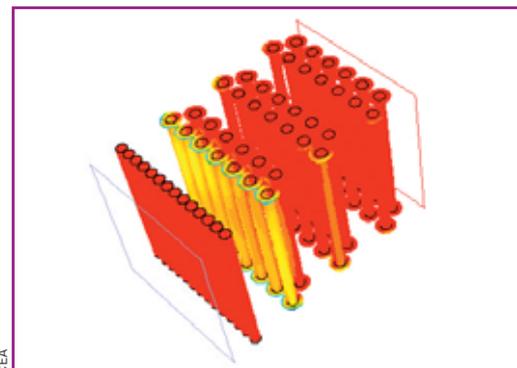
(2) La combustion de gaz naturel produit de la vapeur d'eau. Dans une chaudière à condensation, la chaleur contenue dans cette vapeur d'eau est récupérée, contrairement à une chaudière classique où elle est rejetée à l'extérieur de l'habitation. Pour cela, les fumées traversent un échangeur-condenseur où la vapeur se condense, permettant une récupération supplémentaire de chaleur. L'eau est rejetée vers les eaux usées.

Au sujet du rayonnement thermique, une optimisation a été réalisée sur la disposition des tubes et l'influence de la présence d'ailettes. Cette étude a montré qu'un premier rang de tubes, très proches les uns des autres et placés à une courte distance du brûleur, permet d'acquies la meilleure efficacité du transfert radiatif. Il faut aussi assurer une émissivité élevée pour la surface des tubes, ce qui peut être obtenu par un traitement de surface adéquat. La présence d'ailettes, quelles qu'en soient la taille et la forme, ne conduit qu'à des gains très minimes d'efficacité en rayonnement, inférieurs à 5%. L'option retenue est donc une première rangée de tubes lisses assez proches, tout en maintenant un passage suffisant pour les fumées, et placés près du brûleur, ce qui est possible en mode radiant sans flammes extérieures.

Pour le transfert convectif, des tubes avec de larges ailettes sont employés. Ils offrent une grande surface d'échange qui compense la décroissance rapide de température des fumées. Des essais en air sur un prototype d'échangeur complet, autorisant une instrumentation détaillée, ont été effectués au GRETh pour caractériser le comportement thermique des tubes en termes de transfert de chaleur et d'efficacité d'ailettes.

Analyse tridimensionnelle du comportement thermique

Des simulations tridimensionnelles du fonctionnement de l'échangeur ont été réalisées par le GRETh avec le logiciel FLUENT. Prenant en compte les deux modes de transfert de chaleur (rayonnement et convection), elles permettent de bien comprendre le comportement thermique global et local de l'échangeur (instabilités, effets de bord...) et d'envisager des solutions pour en améliorer le fonctionnement (figure 3). Ces simulations (modèles physiques et conditions aux



CEA

Figure 3. Géométrie utilisée pour les simulations numériques réalisées au GRETh: une première rangée de tubes lisses fortement resserrés, suivie de 6 rangées de tubes à ailettes.



limites) sont validées par comparaison avec les mesures effectuées sur le prototype de chaudière. Elles vont conduire par la suite à tester facilement les idées d'amélioration de l'échangeur, avec une bonne confiance dans les résultats.

Par ailleurs, afin d'obtenir une chaudière encore plus compacte, la mise en œuvre d'une technologie différente, à savoir un échangeur à plaque et ailettes, est actuellement à l'étude. Ce type d'échangeur offrira la possibilité d'atteindre un rapport surface d'échange sur volume global très élevé, tout en améliorant les coefficients d'échange thermique.

Optimisation des régénérateurs de fours de verrerie

Depuis de nombreuses années, le GRETh collabore avec le centre de recherche (CREE) de la branche céramique du groupe Saint-Gobain pour l'optimisation des empilages de régénérateurs de fours de verrerie. Durant les trois dernières années, ce programme de recherche s'est articulé autour d'une thèse CIFRE⁽³⁾, soutenue en décembre 2003. Le but de ce travail était d'améliorer l'efficacité énergétique des fours de verrerie, en concevant de nouvelles géométries de régénérateurs.

La matrice solide, l'élément clé

Une bonne partie des fours de verrerie, dits *fours à flamme*, fonctionnent avec de l'**énergie fossile**. L'énergie nécessaire pour fondre le verre est transmise par rayonnement entre la flamme (combustion de gaz ou de fioul) et le bain de verre. Seule une faible partie de l'énergie disponible est ainsi directement employée. Celle contenue dans les fumées chaudes serait donc perdue sans l'implantation de régénérateurs qui permettent de l'exploiter pour préchauffer l'air indispensable à la combustion. Les régénérateurs sont utilisés en verrerie depuis le XIX^e siècle et, du fait de leur constante amélioration, restent une solution performante, en particulier grâce aux hautes températures de préchauffage atteintes.

Le principe de fonctionnement d'un échangeur-régénérateur est la circulation alternée des deux fluides, chaud puis froid, dans une matrice solide qui stocke et déstocke de l'énergie. Les régénérateurs vont toujours par deux pour permettre un fonctionnement en continu des fours.

L'efficacité d'un régénérateur dépend de l'optimisation de la matrice solide qu'il contient. La société SEPR

(Société européenne des produits réfractaires), filiale du groupe Saint-Gobain, produit et distribue des empilages de régénération basés sur des pièces cruciformes. Le fluide chaud ou froid circule dans les canaux formés par ces pièces, de dimensions et d'aspects différents suivant le type utilisé. Les échanges de chaleur entre le fluide et les éléments de l'empilage se font alors par convection ou rayonnement thermique (hautes températures).

Essais et simulation numérique pour des empilages plus performants

Le travail mené au GRETh a consisté, à partir d'une étude détaillée des phénomènes physiques, à utiliser des moyens expérimentaux et numériques pour mettre au point de nouvelles configurations d'empilage plus performantes.



Installation d'essais équipée de deux régénérateurs de 5 m de hauteur permettant d'étudier le comportement thermique de pièces cruciformes et ainsi d'optimiser les configurations d'empilage.

Sur le plan des moyens expérimentaux, le GRETh s'est appuyé sur une installation d'essais constituée de deux régénérateurs à une échelle quasi industrielle (hauteur de 5 mètres) fonctionnant dans les conditions réelles d'alternance thermique (stockage/déstockage). Les nombreux dispositifs de mesure de température installés dans les régénérateurs permettent de mieux comprendre et quantifier les mécanismes physiques de l'échange thermique dans les différentes parties de l'empilage.

La simulation numérique est un outil complémentaire aux essais, en offrant la possibilité d'étudier commodément des configurations géométriques qui n'existent pas encore. Le choix des modèles du logiciel FLUENT adaptés pour les conditions particulières de fonctionnement des empilages (fortes variations verticales de température) a d'abord été validé par comparaison avec les mesures réalisées sur l'installation expérimentale. Par la suite, des études paramétriques ont permis de confirmer l'intérêt de modifications apportées aux empilages, en vérifiant leur impact sur les transferts de chaleur par convection.

Cette étude a débouché sur la mise au point de nouvelles pièces cruciformes et de nouvelles géométries d'empilage.

➤ **Pierre Mercier**

Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble

(3) CIFRE : Convention industrielle de formation par la recherche.



Pièces cruciformes fabriquées par la société SEPR. Leur forme, leur taille et les matériaux les constituant sont très variés.

A L'énergie dans tous ses états

« Rien ne se perd, rien ne se crée », écrivait en son temps Lavoisier, père de la chimie moderne. Cet adage vrai pour les espèces chimiques l'est tout aussi pour l'énergie. En effet, l'énergie est une entité multiforme qui peut se transformer sous de très divers aspects. Toutefois, les **énergies primaires** directement accessibles dans la nature sont en nombre limité : ce sont les **énergies fossiles** (charbon, pétrole, gaz), l'**énergie nucléaire** et les **énergies renouvelables** (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie, énergie des marées). Ces énergies primaires constituent ce que l'on appelle le *mix* ou le *bouquet énergétique* (figure 1).

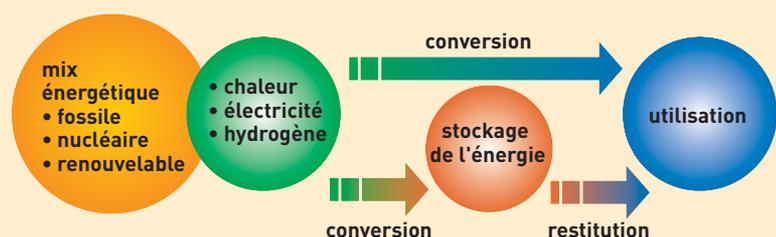


Figure 1. Le schéma énergétique.

Pour la plupart des applications, il est nécessaire de **convertir** l'énergie afin de la rendre compatible avec l'usage envisagé. Bien évidemment la nature, très ingénieuse, a mis au point les tout premiers **convertisseurs énergétiques** que sont les êtres vivants. Les plantes, par la **photosynthèse**, assurent la conversion de l'énergie rayonnante de la lumière en énergie chimique. Le corps humain lui-même permet, en particulier, de convertir l'énergie chimique en énergie mécanique *via* le système musculaire. Par la suite, l'homme a inventé de très nombreux convertisseurs (figure 2). Le premier en date est tout simplement le feu qui convertit de l'énergie chimique (combustion) en lumière et chaleur. Plus récemment un poste de télévision assure la conversion de l'électricité en énergies lumineuse (images) et mécanique (sons). En fait, de nombreux systèmes énergétiques sont l'association de plusieurs convertisseurs, comme par exemple une centrale nucléaire qui réalise la conversion de l'énergie nucléaire en énergie thermique (réacteur) puis en énergie mécanique (turbine) et enfin en énergie électrique (alternateur). Malheureusement, le **second principe de la thermodynamique** nous enseigne que toute transformation de l'énergie a

un coût : une partie plus ou moins importante de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur inutilisable (le frottement dans un système mécanique par exemple). Dans le cas d'une centrale nucléaire de la génération actuelle, l'énergie électrique produite ne représente qu'environ un tiers de l'énergie nucléaire initiale contenue au sein du combustible. Mais il serait bien évidemment trop simple que l'énergie puisse être consommée au fur et à mesure sur le lieu même de sa production. Dans de très nombreux cas, les sites de consommation de l'énergie peuvent être très éloignés du site de production, cette dernière et la demande correspondante n'étant

pas de plus toujours concomitantes (électricité photovoltaïque la nuit, par exemple). Une bonne gestion de l'énergie demande donc la mise en place à la fois d'un **réseau de distribution** et de capacités de **stockage de l'énergie**. Le **transport de l'énergie** est assuré par l'intermédiaire d'un **vecteur éner-**

gétique. À l'heure actuelle, les deux principaux vecteurs sont l'**électricité** et la **chaleur**. Mais demain un nouveau vecteur pourrait devenir prépondérant : l'**hydrogène** qui serait converti en électricité et chaleur grâce aux **piles à combustible**.

Enfin, pour que l'énergie puisse être disponible à tout moment il est indispensable de pouvoir la stocker : la "mettre en conserve" pourrait-on dire. Ce **stockage** peut se décliner sous diverses formes. L'énergie peut être stockée sous forme **mécanique** (*énergie potentielle* dans le cas d'une retenue d'eau d'un barrage hydroélectrique ou *énergie cinétique* dans un volant d'inertie), **thermique** (ballon d'eau chaude), **chimique** (réservoir d'essence, piles et **accumulateurs**), voire **magnétique** (bobine **supraconductrice**).

La gestion de l'énergie est donc un art subtil qui associe production, transformation, transport et stockage. Dans le contexte actuel du débat énergétique, il apparaît de plus en plus évident que demain les réseaux énergétiques vont se développer et se multiplier selon une approche multimodale (gestion simultanée de plusieurs réseaux associant des sources d'énergies diversifiées). Les **nouvelles technologies de l'énergie** sont donc appelées à y jouer un rôle essentiel.

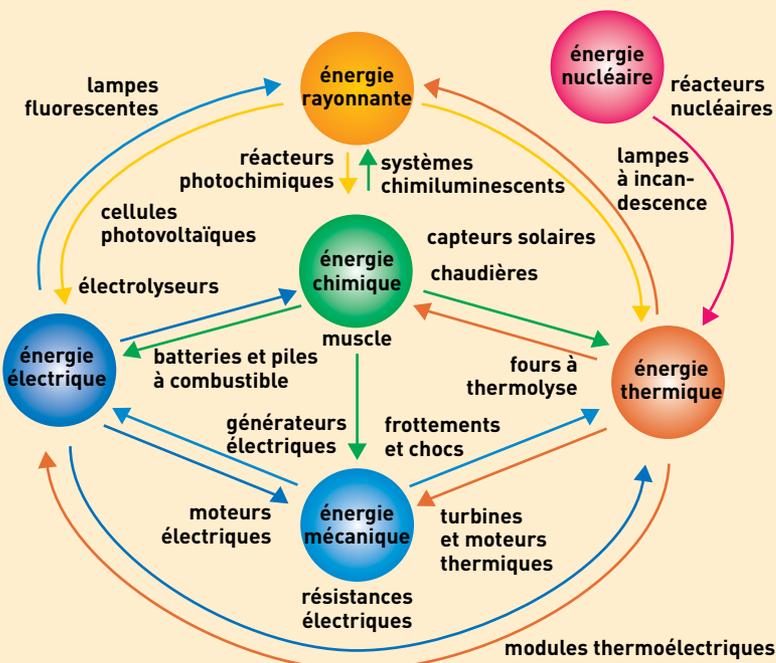
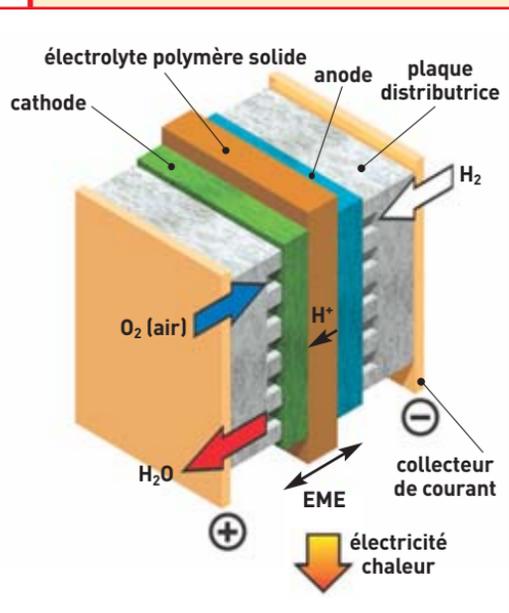


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

C

Comment fonctionne une pile à combustible ?



Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'**hydrogène** comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du **combustible**. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène H_2 et l'oxygène O_2 – comme couple électrochimique, les réactions d'**oxydo-réduction** qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la **cellule électrochimique élémentaire**) essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte**, matériau permettant le passage des **ions**. Les électrodes mettent en jeu des **catalyseurs** pour activer d'un côté, la

réaction d'**oxydation** de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de **réduction** de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de **protons**), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène H^+) et en **électrons**, suivant la réaction d'oxydation : $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$. À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinent pour former de l'eau : $2 H^+ + 1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$. Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'**électrolyse** de l'eau. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des **densités de courant** de 0,6 à 0,8 A/cm². Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50%, l'énergie dissipée l'étant bien évidemment sous forme de chaleur.

E Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration

Les **accumulateurs** et les **piles** sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en wattheure (Wh), l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux **électrodes** baignant dans un **électrolyte** lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branchée à ses bornes. L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme **batterie** est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs. Sa **densité d'énergie massique** (ou **volumique**), en wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) d'accumulateur. Sa **densité de puissance massique**, en watt par kilogramme (W/kg), représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur. Sa **cyclabilité**, exprimée en nombre de cycles⁽¹⁾, caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale, cette valeur étant la valeur la plus souvent demandée pour les applications portables.

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les deux principales technologies répandues sur le marché étaient les accumulateurs au **plomb** (pour le démarrage de véhicules, l'alimentation de secours de centraux téléphoniques...) et les accumulateurs **nickel-cadmium** (outillage portable, jouets, éclairage de secours...). La technologie au plomb, connue plus communément sous

le nom de batterie au plomb, est également qualifiée de système au plomb-acide. En effet, les réactions chimiques mises en jeu impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive (improprement appelée cathode) et le plomb de l'électrode négative (anode), toutes deux plongées dans une solution d'acide sulfurique qui constitue l'électrolyte. Ces réactions tendent à convertir le plomb et l'oxyde de plomb en sulfate de plomb, avec formation d'eau. Pour recharger la batterie, ces réactions doivent être inversées par la circulation d'un courant électrique imposé. Les inconvénients relevés sur la technologie au plomb (poids, fragilité, utilisation d'un liquide corrosif) ont conduit au développement d'accumulateurs alcalins, de plus grande capacité (quantité d'électricité restituée à la décharge) mais développant une force électromotrice moindre (différence de potentiel aux bornes du système en circuit ouvert). Leurs électrodes sont soit à base de nickel et de cadmium (accumulateur nickel-cadmium), soit à base d'oxyde de nickel et de zinc (accumulateur zinc-nickel), soit à base d'oxyde d'argent couplé à du zinc, du cadmium ou du fer (accumulateurs à l'oxyde d'argent). Toutes ces technologies utilisent une solution de potasse comme électrolyte. Les technologies au plomb, comme les accumulateurs alcalins, se caractérisent par une grande fiabilité, mais leurs densités d'énergie massiques restent relativement faibles (30 Wh/kg pour le plomb, 50 Wh/kg pour le nickel-cadmium).

Au début des années quatre-vingt-dix, avec la croissance du marché des équipements portables, deux filières technologiques nouvelles ont émergé : les accumulateurs **nickel-métal hydrure** et les accumulateurs au **lithium** (voir l'[encadré Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium](#), p. 131). La première filière, mettant en jeu une électrode positive à base de nickel et une électrode négative – constituée d'un alliage absorbant l'hydrogène – plongeant dans une

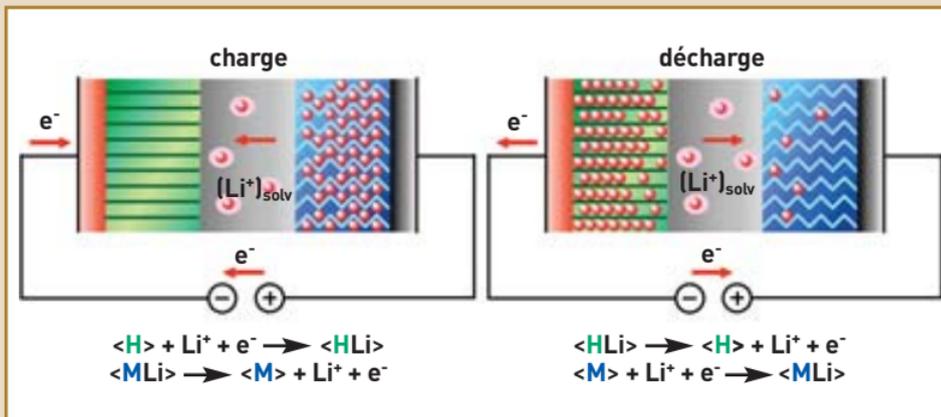
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs au plomb ou au nickel-cadmium employés jusque-là. Les premiers modèles ont ainsi été conçus avec une électrode négative à base de lithium métallique (filiale **lithium-métal**). Cependant, cette technologie s'est heurtée à des problèmes liés à une mauvaise reconstitution de l'électrode négative de lithium au cours des charges successives. C'est pourquoi, vers le début des années quatre-vingt, des recherches ont été entreprises sur un nouveau type d'électrode négative à base de carbone, utilisé comme composé d'insertion du lithium. La filière **lithium-ion** était née. Les industriels japonais se sont rapidement imposés en tant que *leaders* dans le domaine. Déjà fabricants d'équipements portables, ils ont considéré la source d'énergie comme faisant partie des composants stratégiques de ces équipements. C'est ainsi que Sony, qui n'était pas à l'origine fabricant d'accumulateurs, a décidé de mobiliser au cours des années quatre-vingt des ressources considérables afin de faire progresser la technologie et de la rendre industrialisable. En février 1992, Sony annonçait à la surprise générale le lancement immédiat de la fabrication industrielle d'accumulateurs lithium-ion. Ces premiers accumulateurs offraient des performances limitées (90 Wh/kg). Depuis, celles-ci se sont notablement améliorées (de 160 à plus de 180 Wh/kg en 2004), grâce d'une part aux progrès technologiques réalisés (diminution de la part inutile dans le poids et le volume des accumulateurs) et d'autre part à l'optimisation des performances des matériaux. Des densités d'énergie massiques de plus de 200 Wh/kg sont escomptées vers 2005.

(1) Un cycle correspond à une charge et une décharge.

Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium

1

En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'**accumulateur**, le lithium relâché par l'**électrode négative** (matériau d'intercalation hôte <H>) sous forme **ionique** Li^+ migre à travers l'**électrolyte** conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'**électrode positive** (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique <Mli>). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un **électron** dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La **densité d'énergie massique** libérée par ces réactions est à la fois proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et à la quantité de lithium qui se sera intercalé dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Or le lithium est en même temps le plus léger (avec une masse molaire atomique de 6,94 g) et le plus **réducteur** des métaux : les systèmes électrochimiques qui l'emploient peuvent atteindre des tensions de 4 V, contre 1,5 V pour les autres systèmes. Il permet ainsi aux batteries au lithium d'offrir les plus importantes densités d'énergie massique et volumique (typiquement plus de



160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium est le même selon qu'est utilisée une électrode négative de lithium métallique ou à base de carbone. Dans ce deuxième cas, la filière technologique est appelée *lithium-ion*, car le lithium n'est jamais sous forme métallique dans l'accumulateur, et fait "yo-yo" entre les deux composés d'insertion du lithium contenus dans les électrodes positive et négative à chaque charge ou décharge de l'accumulateur.

La modélisation des écoulements

Dans le domaine des échangeurs thermiques, la connaissance précise des écoulements est devenue un facteur critique pour la conception et l'optimisation. En effet, rendre l'écoulement **turbulent** ou **diphasique** est la meilleure manière pour augmenter les transferts de chaleur entre un fluide et une paroi. C'est pourquoi ces écoulements complexes sont présents dans la majorité des procédés industriels. Par exemple, dans le cas des échangeurs compacts, le caractère fluctuant, tridimensionnel et à large

œuvre de différents modèles de turbulence et de logiciels tels que Trio_U du CEA, FLUENT et STAR-CD⁽²⁾, il a été démontré, par comparaison avec des résultats expérimentaux, que grâce à une utilisation avertie de modèles de turbulence avancés, de type LES⁽³⁾, il était possible de disposer d'un outil de prédimensionnement et d'optimisation fiable pour les échangeurs compacts (figures 1 et 2). Un guide de recommandations, destiné aux adhérents du GRETh, a été rédigé, de façon à préciser la meilleure

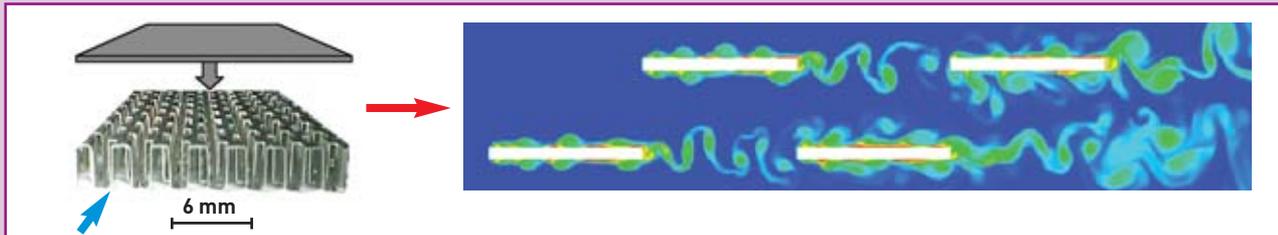


Figure 1.

Image instantanée de champ de température de l'air à un instant donné au sein d'un échangeur compact, obtenue à l'aide du logiciel Trio_U. La plaque grise correspond à une des plaques placées de part et d'autre des ailettes, et qui constituent un canal. La flèche bleue représente l'écoulement perpendiculairement à ces ailettes, ce qui se traduit sur la figure de droite par un écoulement de la droite vers la gauche, l'image représentant une coupe horizontale à mi-hauteur d'ailette.

spectre d'énergie de la turbulence est recherché pour l'optimisation des performances. Cependant, ces trois aspects rendent difficiles les mesures expérimentales et la généralisation des modèles physiques. Jusqu'à il y a cinq ans environ, l'utilisation de moyens numériques pour analyser ce type d'écoulement était réservée aux scientifiques et chercheurs très avertis, et souvent limitée à des géométries simples. Depuis quelques années, le développement des moyens informatiques et la vulgarisation des logiciels de mécanique des fluides rendent les **modélisations** numériques accessibles à tous. Ces méthodes ouvrent un nouveau champ d'investigation en proposant un saut important dans nos capacités à prédire les transferts de chaleur. Malgré tout, un grand fossé subsiste encore entre les travaux académiques et la réalité industrielle. Il manque notamment des validations intensives sur des problèmes industriels réalistes.

Face à cette situation, l'action du GRETh est double. Elle consiste, d'une part, à réaliser la validation industrielle des modèles avancés de simulation thermique sur des problèmes liés aux échangeurs de chaleur, et d'autre part, à rendre accessibles les modèles et leur domaine de validité à son club d'industriels à travers le concept de plate-forme logiciels.

Pour illustrer cette action, il faut citer un travail de fond qui a été réalisé avec l'aide de l'Ademe dans le domaine de l'étude des écoulements turbulents au sein des échangeurs de chaleur compacts⁽¹⁾. En menant une étude systématique de la mise en

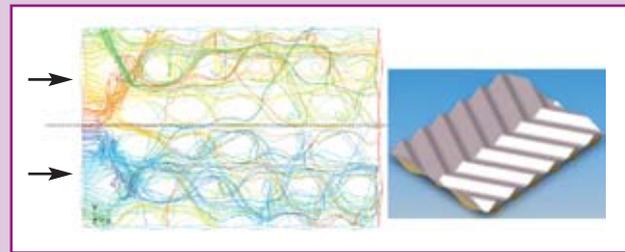


Figure 2.

Image de l'écoulement d'un fluide au sein d'un échangeur à plaques et joints, obtenue à l'aide du logiciel FLUENT. Dans l'exemple considéré, le pas des chevrons est d'environ 10 mm. Les flèches correspondent au sens de l'écoulement.

manière d'aborder un problème de modélisation d'écoulements turbulents industriels. Dans la continuité, le GRETh a démarré en 2004 une action sur la modélisation des écoulements diphasiques industriels, en collaboration avec les équipes de thermo-hydraulique de la Direction de l'énergie nucléaire (CEA/DEN). Rendre ces méthodes accessibles aux industriels est également la préoccupation du GRETh. Cela consiste à travailler en collaboration avec le partenaire industriel en lui ouvrant les moyens disponibles et en l'associant étroitement à la mise en œuvre des outils. Les industriels, qui font appel au GRETh pour des développements technologiques en rupture, ont bien compris l'intérêt qu'ils ont à s'associer à un laboratoire qui essaie d'aller plus loin qu'une simple démonstration des potentialités des nouvelles méthodes.

> **Patrice Tochon**

Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble

Le GRETh (Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques), Association loi 1901, a pour mission de diffuser les résultats scientifiques et techniques des recherches menées dans le domaine des échangeurs de chaleur et de permettre la valorisation de ses résultats dans l'industrie. Pour ce faire, le Club des industriels du GRETh s'appuie sur des laboratoires du CEA (le Grethe - Service Système multi-énergies et gestion de l'énergie), du CNRS et de l'Université (le LEGI - Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels), et a des liens privilégiés avec les centres d'enseignement des métiers de la thermique comme l'IUT Génie thermique et énergie de Grenoble. L'Association s'est ouverte à l'Europe en mettant notamment en place en tant que coordinateur de programme le projet européen SHERHPA (*Sustainable Heat and Energy Research for Heat Pump Applications*).

(1) Thèse de F. Michel soutenue fin 2003.

(2) FLUENT et STAR-CD : il s'agit de logiciels de mécanique des fluides, commercialisés par Fluent et CD adapco Group.

(3) LES (*Large Eddy Simulation*) : simulation des grandes échelles, technique prometteuse pour prédire et analyser les écoulements turbulents. À l'inverse de la simulation directe, qui représente toutes les échelles sans aucune approximation, elle repose sur une séparation d'échelles. Ainsi, les échelles d'une taille supérieure à une limite arbitrairement fixée sont déterminées directement par le calcul, alors que les autres sont prises en compte au moyen d'un modèle statistique appelé modèle sous-maille.

B Effet de serre et CO₂

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en **rayons infrarouges**. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 **watts/m²**. Sans **effet de serre**, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (**gaz carbonique**, **méthane**, oxydes d'azote, etc.) qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m². Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m², le **gaz carbonique** (CO₂) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m²), les **halocarbures** (chlorofluorocarbures **CFC**, hydrochlorofluorocarbures **HCFC** et hydrofluorocarbures **HFC**) avec 0,34 W/m² et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m². En outre, l'**ozone** troposphérique présente un forçage radiatif positif de 0,35 W/m² (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif négatif de 0,15 W/m²).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m²) est faible, correspondant à un accroissement de l'ordre de 1%. Néanmoins, il est presque certain qu'il

a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (**figure 1**). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (**figure 2**) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la consommation mondiale actuelle⁽¹⁾ de combustibles **fossiles** (7700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO₂ actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an ! Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz

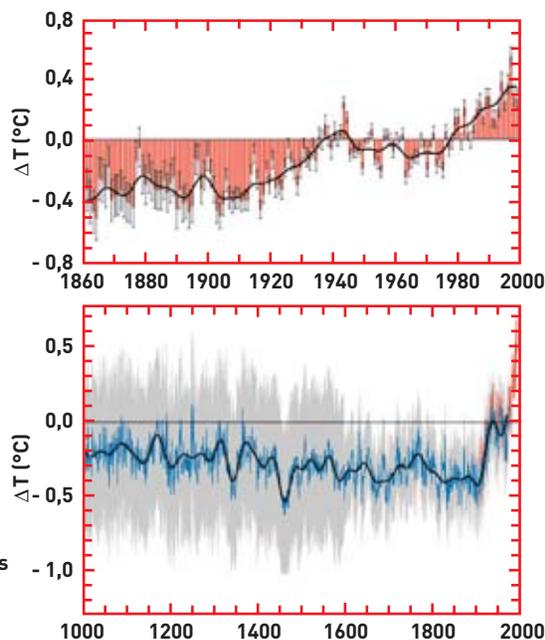
carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

Ces chiffres peuvent sembler petits et n'avoir que de faibles conséquences sur le climat ; il n'en est rien. Pour s'en convaincre, il faut se rappeler que lors du "petit âge glaciaire", entre 1450 et 1880, la température moyenne ne s'est abaissée en France que de 1 °C en moyenne. Il y a 6000 à 8000 ans, alors que l'Europe occidentale a connu une période plus chaude avec une température moyenne supérieure de 2 °C à 3 °C à celle d'aujourd'hui, le Sahara n'était

(1) CEE DG XVII (1996), scénario "Sagesse traditionnelle".

Figure 1. Écarts en température (ΔT) par rapport à la moyenne des années 1961-1990 pour les années 1860-2000 à l'échelle globale (en haut) et pour les mille dernières années dans l'hémisphère Nord (en bas).

■ mesures par thermomètres
■ données estimées



B (suite)

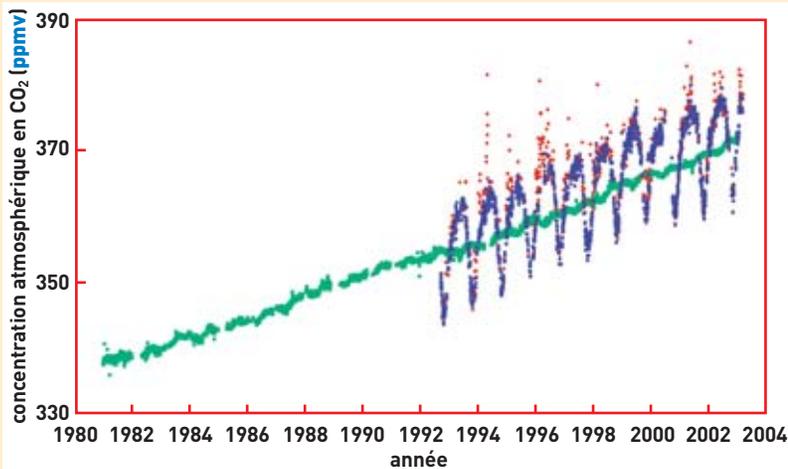


Figure 2.

Évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ depuis 1980 telle qu'elle est mesurée quotidiennement par les stations automatiques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), depuis 1981 sur l'île d'Amsterdam (Océan indien) et depuis 1992 à Mace Head sur la côte ouest de l'Irlande.

Les mesures de l'île d'Amsterdam (en vert), loin de toute perturbation anthropique directe, mettent essentiellement en évidence l'augmentation continue de la concentration. Le site de Mace Head mesure essentiellement l'air océanique (régime normal de vents d'ouest; mesures en bleu). Quand le régime des vents s'inverse, il reçoit une atmosphère continentale, avec un fort excès de CO₂ (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO₂ se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO₂ en hiver et absorbeur en été.

pas un désert mais le siège de pluies abondantes. C'est moins l'augmentation de la température qui est préoccupante que sa variation rapide (en un siècle). Les grandes variations déjà observées dans la nature se sont produites sur des échelles de temps beaucoup plus longues, au moins pour celles qui ont un caractère global. Ainsi, la dernière glaciation a duré 100 000 ans et la déglaciation correspondante 10 000 ans. La variation rapide que nous sommes en train de vivre peut induire des perturbations importantes et inattendues du climat et de l'écosystème, qui n'aura pas toujours le temps de s'adapter.

De Rio à Kyoto : les grandes conférences sur l'environnement

L'évolution de l'environnement global a suscité l'organisation d'importantes conférences, depuis la dernière décennie du vingtième siècle.

Au Sommet de la Terre de **Rio de Janeiro** (juin 1992) a été signée la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui adopta l'objectif d'une stabilisation des émissions de **gaz à effet de serre** (entrée en vigueur le 21 mars 1994).

À la conférence de Kyoto (décembre 1997) a été signé le protocole de réduction

globale des émissions de ces gaz, de 5,2% en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, pour les pays de l'OCDE et les pays de l'Europe de l'Est (dont la Russie). Les objectifs de réduction pour l'Union européenne et la France sont de respectivement 8% et 0%. Les moyens de les atteindre ont été débattus sans succès en novembre 2000 à **La Haye**. Les conférences suivantes, tenues à **Marrakech** (2001), **Johannesbourg** (Sommet de la Terre en août-septembre 2002), **New-Delhi** (octobre 2002), **Moscou** (septembre-octobre 2003) et **Milan** (décembre 2003) n'ont pas permis la mise en application dès 2004 du **protocole de Kyoto**, enfin intervenue en 2005, grâce à sa récente ratification par la Russie.

Sous l'impulsion du programme des Nations unies pour l'environnement (**PNUE**), les problèmes posés par les substances appauvrissant la couche d'ozone atmosphérique ont été traités à **Vienne** (1985) et surtout à **Montréal** (septembre 1987) où a été signé le protocole imposant une réduction de la production et de l'utilisation des chlorofluorocarbures



National University of Ireland

La station de mesure de Mace Head, en Irlande.

(CFC). Ce protocole a fait l'objet des amendements de **Londres** (1990), qui a imposé l'abandon des CFC au 1^{er} janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).