

IV. L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE

la chasse aux “négawatts”

Consommer moins pour un service donné est le principe même de l'utilisation rationnelle de l'énergie. Cette recherche de l'efficacité énergétique intègre cet objectif dans la conception initiale des systèmes, des procédés et des équipements, à tous les stades de production, de distribution ou d'utilisation finale d'électricité, de calories ou de frigories. Elle suppose une connaissance approfondie des phénomènes de base en jeu. L'expérience que le CEA s'est forgée dans nombre de domaines, et tout particulièrement en thermohydraulique et dans les échangeurs de chaleur par ses activités nucléaires, lui permet de contribuer, avec les industriels, à l'avènement de solutions judicieuses dans cette chasse aux “négawatts”, ces mégawatts non consommés.



Enjeux, verrous et solutions de la chasse aux “négawatts”

Plus que jamais d'actualité, l'utilisation rationnelle de l'énergie implique dans tous les secteurs d'activité des développements technologiques très divers. Ceux-ci s'appuient sur une meilleure connaissance des phénomènes fondamentaux en jeu dans les principales disciplines : mécanique, électronique et thermohydraulique notamment, et une modélisation toujours plus fine des processus.

Des impératifs à plusieurs niveaux

L'utilisation rationnelle de l'énergie (URE) exige le développement de technologies propres et “sobres” permettant de produire de l'électricité, du froid, de la chaleur, d'augmenter les rendements industriels, de limiter la consommation d'énergie dans les transports et le bâtiment par exemple. Elle répond à des impératifs particulièrement actuels, au niveau national et régional, mais aussi au niveau européen et mondial.

Aspect national

L'indépendance énergétique du pays, la sécurité des approvisionnements en énergie fossile et la qualité de l'environnement seront grandement compromises dans l'avenir si les tendances actuelles en terme de croissance de la consommation d'énergie sont maintenues. La qualité de l'air dans les grandes métropoles, le rythme d'épuisement des ressources fossiles et le changement climatique sont largement conditionnés par notre capacité à utiliser mieux l'énergie. En 1990, la France a émis dans l'atmosphère 144 millions de tonnes équivalent carbone (encadré A, *L'effet de serre*). Sans mesures appropriées et au rythme actuel, ce chiffre serait de 175 millions de tonnes équivalent carbone en 2010. Suite à la conférence de Kyoto en 1997, la France s'est engagée à ne pas dépasser en 2010 le niveau d'émission de 1990. L'utilisation rationnelle de l'énergie est également un outil de lutte contre le chômage car elle consiste le plus souvent à remplacer

des énergies importées par de la matière grise locale. En outre, la mise en place progressive de la taxe sur les émissions de CO₂ encourage les industries fortes consommatrices d'énergie fossile à optimiser leurs procédés. Ceci crée un débouché national pour les industries de service (éco-industries) qui mettent en œuvre les nouvelles technologies sobres et propres. L'exportation de produits, de technologies et de compétences apparaît comme un élément d'importance croissante pour l'emploi dans le secteur énergétique.

L'enjeu d'une politique forte en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie a été souligné par le rapport du Commissariat général du Plan (tableau).

La recherche et le développement autour de l'efficacité énergétique se développent en France sur la base de réseaux d'innovation, propices aux transferts de connaissances entre acteurs de différentes natures, publics et privés, du monde de la recherche et de l'industrie. Limité à 2,5 % de l'effort de recherche public, le potentiel de croissance est important. Le CEA, riche de son expérience de R&D sur les équipements thermiques des centrales nucléaires, est un partenaire légitime et crédible pour conduire la R&D sur l'optimisation énergétique de tout procédé.

Aspect mondial

La consommation mondiale d'énergie devrait augmenter de 50 % au cours des vingt prochaines années. Dans ce contexte, la compétition entre pays producteurs de technologies sobres et propres est d'ores et déjà vive. Elle est appelée à s'intensifier et à faire émer-

ger les économies volontaristes en termes de recherche, de développement et de démonstration.

Aspect européen

Le *Livre vert* pour une stratégie communautaire de l'énergie⁽¹⁾ présente les formes d'intervention en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie : un support financier pour les actions de R&D dans le cadre du 5^e programme cadre de recherche et développement technologique – l'URE étant l'une des quatre actions – clés, des incitations financières pour la coopération avec les pays en développement pour tenir compte de l'impact de leur politique de maîtrise de l'énergie sur le bilan global, une réglementation adaptée pour limiter la croissance de la consommation d'énergie et favoriser l'utilisation de technologies sobres et propres.

Aspect régional

La récente discussion des contrats de plan État-Région en France a montré l'implication des politiques régionales pour un développement durable. Particulièrement sensibles à l'aspect économique, les élus locaux misent sur la création d'activités et d'emplois, notamment dans les services, liée à une politique régionale en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie.

L'exemple du GRETH

Une politique forte en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie permet de fournir une réponse adaptée aux problèmes sociaux, environnementaux et économiques liés à l'énergie. Sa dimension technologique en constitue un volet important. Le groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh), structure mise en place depuis plus de quinze ans par le CEA et l'Ademe, en charge de l'amélioration des

consommation totale (MTEP)	1997	S1 2020	S2 2020	S3 2020
industrie	58	73	70	62
transport	50	79	72	59
habitat	93	125	113	98
total	204	280	258	222

Tableau. Évolution entre 1997 et 2020 de la consommation énergétique française en fonction de trois hypothèses : S1 “société de marché”, S2 “État industriel” et S3 “État protecteur de l'environnement” (Source : Commissariat général du Plan).

(1) Énergie pour l'avenir : les sources d'énergies renouvelables COM(96) 576 du 20/11/96. Un *Livre vert* sur la sécurité d'approvisionnement en énergie de l'Union a été adopté le 29/11/2000.

échangeurs de chaleur par lesquels transitent plus de 80 % de l'énergie nationale, a su construire une relation de confiance avec de nombreux acteurs industriels (encadré). Il peut ainsi tenir son double rôle de traducteur des besoins industriels en recherche appliquée et de diffuseur des nouvelles connaissances acquises.

Les verrous scientifiques et technologiques

Le développement des technologies sobres et propres nécessite une interaction forte entre chercheurs et ingénieurs, entre science et technologie, entre recherche et industrie pour trouver un équilibre entre contraintes économiques et environnementales.

Les verrous scientifiques et technologiques diffèrent selon les secteurs (voir les articles suivants). L'impératif reste cependant le même : produire des connaissances et des technologies transférables, ce qui implique la prise en compte des besoins du marché et des contraintes économiques. C'est pourquoi la définition des programmes de recherche ainsi que leur réalisation doivent être conduites par des équipes en constante interaction avec l'industrie, sur un modèle proche de celui du GRETh. L'action de ce groupement atteste de la continuité et de la réussite de l'action du CEA dans ce domaine.

D'abord produire rationnellement l'énergie

La dérégulation dans le secteur de la production énergétique a pour effet de modifier en profondeur les principes des grands acteurs industriels, qui raisonnent désormais en terme de services globaux apportés à leurs clients. Ils sont donc amenés à proposer des solutions combinant la production d'électricité et de chaleur (**cogénération**), voire également de froid (trigénération) avec des rendements croissants. De nombreux problèmes subsistent. Pour la récupération d'énergie à haute température, par exemple, la modélisation des échanges radiatifs dans les fumées et la conception d'échangeurs céramiques innovants constituent des champs d'investigation prometteurs. Pour la dépollution des centrales thermiques classiques, les verrous résident dans la captation des particules submicroniques : des solutions sont basées sur des systèmes **électrostatiques** ou par des équipements thermiques mettant en œuvre des mécanismes de **thermophorèse**.

Au-delà de ces travaux élémentaires, l'analyse globale des systèmes permet d'apprécier le gain dû à des progrès sur l'un des composants : c'est le domaine de la simulation dynamique avec la mise en œuvre d'outils logiciels incorporant les lois physiques issues des expériences analytiques.

Géométries originales et matériaux avancés pour l'industrie

L'adoption de nouveaux composants thermiques afin d'améliorer le rendement global des procédés de l'industrie manufacturière ou de réduire les rejets pose des problèmes complexes de compréhension des mécanismes physiques ; la condensation et l'ébullition sur des surfaces améliorées, l'encrassement particulaire sont des sujets d'étude théoriques cruciaux nécessitant des travaux numériques et expérimentaux dans le cadre de thèses. Les aspects technologiques concernent la conception de surfaces d'échanges permettant une intensification des échanges thermiques et limitant l'encrassement pour des équipements variés comme les bouilleurs, les condenseurs de **composés organo-volatils**, les filtres électrostatiques. Les solutions proposées couplent le plus souvent des géométries innovantes à des matériaux avancés.

Des solutions très innovantes dans le transport

L'émergence de solutions nouvelles en matière de systèmes hybrides couplant moteur thermique et électrique, de dépollution du moteur thermique, de composants et sous-systèmes critiques pour la consommation et les émissions, de thermique de l'habitacle nécessite des progrès tant en modélisation des phénomènes physiques qu'en conception de solutions originales économiquement viables. C'est un champ de recherche actif et fédérateur permettant la mise sur le marché de solutions innovantes souvent reprises par la suite dans d'autres secteurs. Concernant les composants intégrés dans les systèmes électroniques de pilotage des systèmes de puissance (dont le développement est un enjeu pour une meilleure maîtrise de la demande d'électricité), des ruptures technologiques sont possibles pour les aspects thermiques.

Le partenariat CEA-Ademe autour du GRETh

L'amélioration des technologies vers plus de sobriété et plus de propreté constitue un enjeu majeur pour notre économie. C'est l'une des missions essentielles de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

Les échangeurs thermiques sont apparus comme l'un des composants technologiques majeurs, qu'il convenait d'améliorer dans le champ des ressources technologiques et de la prévention des pollutions atmosphériques.

La politique publique menée a eu pour principal objectif de créer un environnement favorable aux entreprises d'un secteur de moyenne technologie, constitué de PMI ayant une activité de R&D interne, nécessairement réduite. L'AFME, puis l'Ademe, avec ses principaux partenaires – le CEA, EDF, le CNRS, le Cetim (Centre technique des indus-

tries mécaniques), l'Institut français du pétrole (IFP) – et bien entendu les industriels eux-mêmes, a promu un actif réseau Science-Technologie-Industrie-Marché sur le thème des échangeurs thermiques. Le GRETh, avec son club d'adhérents qui réunit plus de 85 % des constructeurs français, à travers ses boucles d'essais, ses activités résolument tournées vers les entreprises, son action majeure de formation par la recherche, a permis de cristalliser l'effort sur la liaison faible du réseau : celle qui séparait la technologie disponible au CEA du tissu des constructeurs. Le bilan de plus de quinze années, aujourd'hui largement satisfaisant, a conduit l'Ademe à renouveler en avril 1999 son partenariat avec le CEA pour soutenir le développement du GRETh.

Gérard Chaumain
Ademe

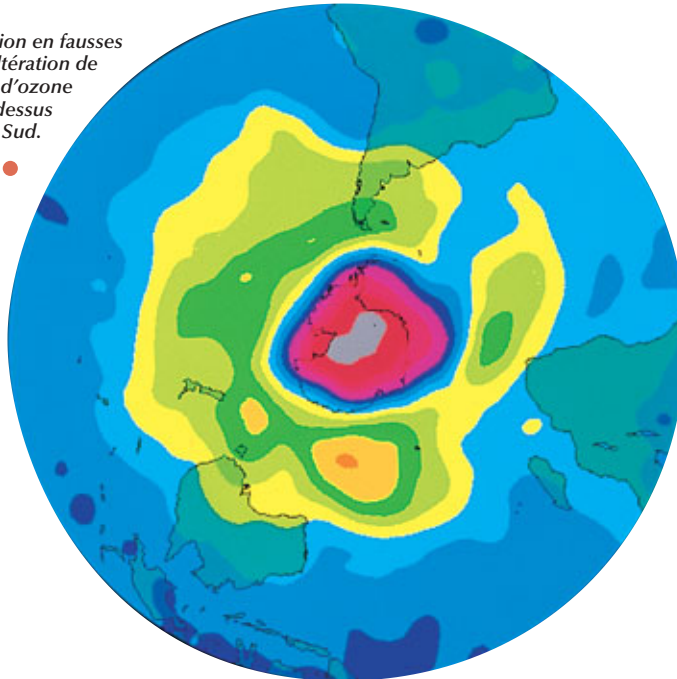
Les industriels acteurs du GRETh

Les membres du club d'industriels du GRETh (plus de 110 partenaires) sont acteurs actifs des développements du groupement en matière de la maîtrise de l'énergie et de protection de l'environnement. Ils appartiennent au secteur **industrie** (production d'énergie : EDF, GDF, Dalkia, Vivendi (CREED), Alstom, CNIM, Pillard ; mécanique : Alfa-Laval, Vicarb, Barriquand, Packinox ; pétro-

chimie : TotalFinaElf, IFP ; chimie : Air Liquide, AGA, Nordon ; ferreux et non ferreux : SEPR (Saint-Gobain), Le Carbone Lorraine, Pechiney ; agroalimentaire : Danone (CIRDC), Actini, FCB), au secteur **transport** (Valeo, Alstom transport, ECLIA, Delphi), au secteur **bâtiment, froid, chaud, climatisation** (CIAT, Chafoteaux, LGL (groupe Lennox) et au secteur **ingénierie** : Technip, SGN.



Reconstitution en fausses couleurs de l'altération de la couche d'ozone terrestre au-dessus du Pôle Sud.



NOAA/SPL/COSMOS

Des recherches ambitieuses pour l'habitat et le tertiaire

Le développement de nouvelles technologies du froid est nécessaire pour répondre à l'évolution rapide de la réglementation. La conception des machines thermodynamiques est très dépendante des fluides utilisés et des études de base sont nécessaires sur la condensation et l'évaporation de mélanges complexes sur des surfaces améliorées ainsi que sur les aspects systèmes : l'étude de cycles thermodynamiques innovants, de l'impact des transitoires sur la fiabilité, de l'incorporation de nouveaux composants thermiques (pile à combustible) constitue des sujets de recherches ambitieux et novateurs.

Une compréhension toujours plus fine des mécanismes

Le développement de technologies sobres et propres nécessite des outils de modélisation et d'expérimentation particuliers. Pour les premiers, la compréhension toujours plus fine des mécanismes physiques en jeu et la simulation de performances attendues permettent de réduire la durée du cycle de conception des produits et procédés innovants. Pour les seconds, l'expérimentation à l'échelle du laboratoire puis à grandeur réelle permet, à l'aide d'une instrumentation fine adaptée, de valider les solutions proposées et de répondre aux enjeux de disponibilité, de fiabilité et de sécurité exigés par les utilisateurs.

Au-delà de ces aspects technologiques, d'autres freins limitent l'introduction de ces innovations dans les secteurs industriels traditionnels : maîtrise des risques économiques, exigences de sécurité justifient un conservatisme important. Un atout non négligeable du CEA dans son action de transfert et d'appui à l'industrie réside dans la crédibilité et la légitimité obtenues dans le contexte nucléaire. ●

Bruno Ragué et Christophe Marvillet

Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETH)
Direction de la recherche technologique

CEA/Grenoble

Technologies frigorifiques contre l'effet de serre

La production de froid représente un enjeu énergétique évident : 10 à 15 % de l'énergie électrique produite dans les pays industrialisés sont consommés pour cet usage. L'utilisation à cette fin des fluides frigorigènes concerne une large diversité de secteurs : bâtiment, transport, industries agro-alimentaire, chimique et mécanique. Les fluides de type CFC (chlorofluorocarbures) et HCFC (hydrochlorofluorocarbures) sont visés par le protocole de Montréal (1987), compte tenu de leur effet destructeur sur la couche d'ozone. Les directives européennes ont imposé un arrêt de production des premiers

depuis plusieurs années et imposent une stricte limitation d'utilisation des seconds. Les fluides HFC (hydrofluorocarbures) qui ont remplacé les fluides traditionnels font aussi partie des gaz à effet de serre et sont soumis de ce fait au protocole de Kyoto de 1997 (encadré A, *L'effet de serre*).

La réduction drastique des émissions de fluides frigorigènes est sans conteste l'élément moteur des évolutions technologiques à venir, auquel le CEA contribue pour répondre aux besoins des industriels. Ces émissions ont de nombreuses causes et se produisent en différents moments de la vie

d'une machine frigorifique : lors de la production du fluide, de la fabrication et de l'utilisation de la machine et bien entendu en fin de vie de celle-ci. L'analyse des conditions nécessaires à la réduction des émissions montre l'importance déterminante de la conception de la machine et de la technologie des composants. Au-delà des règles de bonnes pratiques en termes de maintenance, de montage et d'installation des équipements, le développement de nouvelles technologies apparaît comme une nécessité. Ainsi, les ruptures technologiques à privilégier doivent viser un triple objectif.

D'abord améliorer les performances énergétiques des équipements en garantissant leur confinement (vers le *zéro fuite*) et en minimisant la quantité de fluide frigorigène contenu. Ensuite favoriser l'utilisation de fluides à faible effet de serre tels que les **hydrocarbures** ou, paradoxalement, le dioxyde de carbone (CO₂) dont la contribution à l'effet de serre pour une même masse émise est plusieurs centaines voire milliers de fois inférieure à celle d'un fluide HFC. Enfin, développer des technologies alternatives basées, entre autres, sur les principes d'**absorption** ou d'**adsorption**.

La chaîne du froid revisitée

Les industries agro-alimentaires et la distribution des produits alimentaires sont le premier secteur concerné par les nouvelles technologies du froid : la réfrigération, à la base de ce qui est traditionnellement appelé la chaîne du froid, y est d'une importance majeure tant par les enjeux économiques et sanitaires qu'elle représente que par le poids énergétique et les quantités de fluides frigorigènes mis en jeu.

L'évolution réglementaire pousse à l'évidence la profession à s'engager dans des choix techniques privilégiant les réductions de charge de fluide. Les stratégies à adopter sont simples dans leurs principes mais les difficultés de conception et de réalisation nombreuses. L'une d'entre elles, et non des moindres, est la sensibilité accrue du fonctionnement des équipements aux pertes de fluide dans l'atmosphère : réduire les charges de fluide s'accompagne nécessairement d'une amélioration de son confinement.

La minimisation de la charge des fluides frigorigènes se traduit par deux priorités. La première est de privilégier les systèmes monoblocs (froid indirect) au faible niveau de **charge spécifique**⁽¹⁾ (< 0,2 kg/kW froid) par rapport aux systèmes séparés. Ceci se traduit par l'usage systématique d'un circuit frigopporteur intermédiaire entre le dispositif utilisateur du froid et la machine frigorifique.

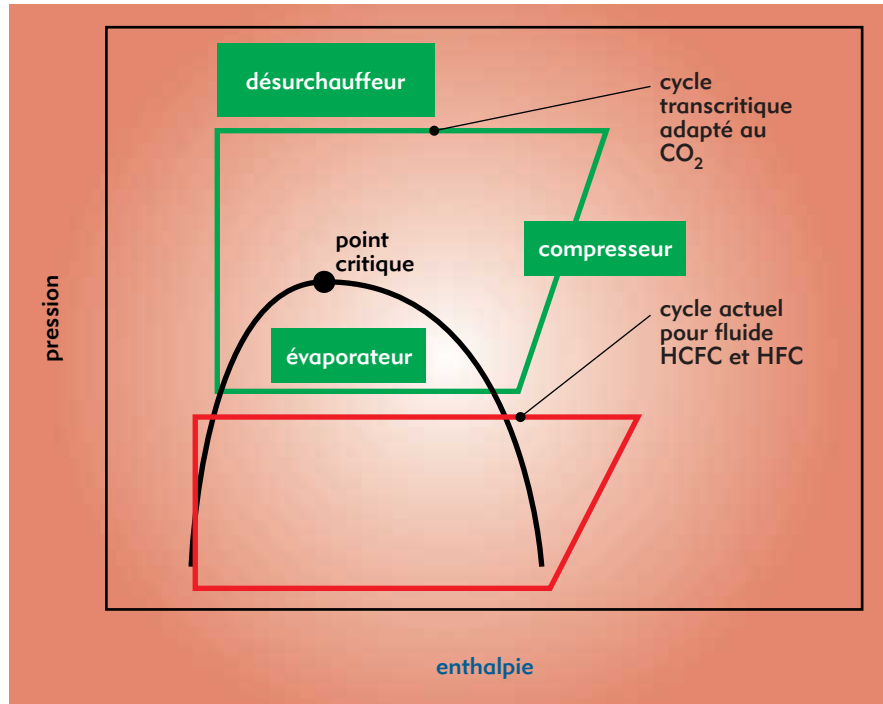


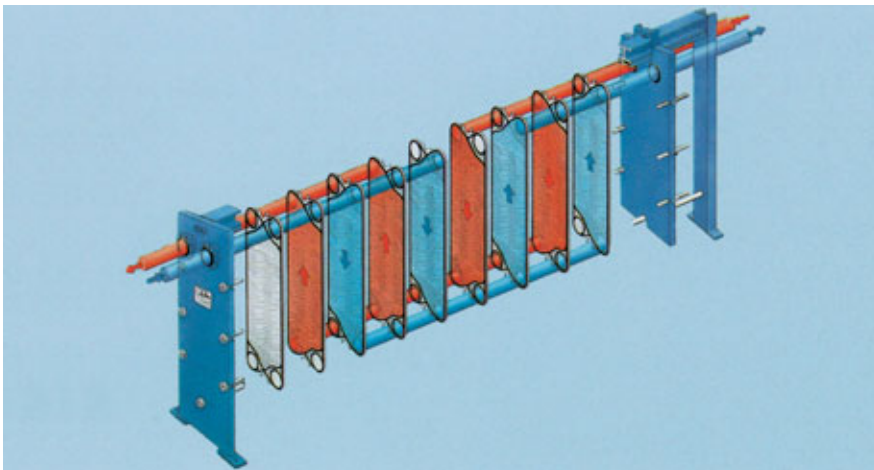
Figure. Diagramme du cycle à compression transcritique (dit cycle de Lorentzen) pour le CO₂ comparé à celui du cycle actuel pour fluides HCFC et HFC.



figue. Les fluides frigopporteurs dits "diphases" peuvent se développer à moyen terme dans ce contexte : ils sont constitués d'une phase porteuse liquide et dopés de particules contenant un matériau à changement de phase liquide-solide⁽²⁾ à une température de fusion fixe (entre 0 °C et - 40 °C suivant la nature de ce matériau).

Une seconde priorité est de privilégier des composants comme les échangeurs compacts (voir *Les échangeurs compacts : une innovation écologique et rentable*). Les différents types d'échangeurs sont caractérisés par des

- (1) Masse de fluide frigorigène contenue dans une machine frigorifique nécessaire à l'obtention d'une puissance frigorifique de 1 kW.
- (2) Les structures recevant les fluides à changement de phase sont des **microcapsules** contenant de la paraffine, le fluide porteur étant une solution saline, ou des **gels**. Dans ce cas, une structure porteuse en polymère reçoit une solution aqueuse, le fluide porteur étant un fluide organique.



Un exemple d'échangeur compact pour un cycle frigorifique.



CIAT-CEA : un partenariat pour s'adapter

Les constructeurs de climatiseurs et de pompes à chaleur ont vu leur méthode de développement de nouveaux produits très fortement modifiée par les nouvelles exigences environnementales. Pour répondre aux évolutions rapides des réglementations sur les fluides frigorigènes, ils ont mis en place une stratégie évolutive pour conduire une démarche très réactive de mise au point et d'optimisation des produits. Ainsi, les constructeurs européens doivent mener un ensemble d'actions pour le développement des nouvelles technologies. Ils doivent être à même de maîtriser une large diversité de fluides, que ce soit des HFC, des hydrocarbures ou de l'ammoniac, faire un usage plus large des fluides frigo-

porteurs et appliquer plus largement des techniques telles que la **cogénération**, l'**absorption** et l'**adsorption**.

La société CIAT, bien entendu imprégnée de ce contexte et des contraintes, sait bien que, face à de telles situations, la réussite ne s'obtient pas seul. Parmi toutes les mesures qu'elle a prises pour défendre ses positions figure l'établissement de partenariats avec les équipes de R&D. Le lien durable que CIAT entretient avec les équipes du CEA/Grenoble, et en particulier celle du GRETh, et l'appui des expertises et des moyens tant matériels qu'humains qu'elle possède sont un atout évident pour une entreprise telle que la nôtre.

André Bailly

Compagnie industrielle d'applications thermiques (CIAT)

charges spécifiques très variables : les échangeurs à plaques et tubulaires à tubes de faible diamètre, qui présentent de faibles valeurs, suscitent notamment l'intérêt.

L'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques peut être fortement accrue par l'usage de la trigénération, c'est-à-dire d'une production électrique accompagnée d'une valorisation des chaleurs rejetées par une production de froid (pompes à absorption).

Le conditionnement d'air renouvelé

Le renouvellement des technologies concerne également le conditionnement d'air tertiaire et résidentiel. La demande accrue de confort amène à une croissance régulière de l'utilisation de systèmes de climatisation de petite taille dans le résidentiel et de moyenne à forte puissance dans le tertiaire. L'enjeu que constitue l'abandon du HCFC22 à court terme incite à l'utilisation de fluides "nouveaux" comme les hydrocarbures et éventuellement le dioxyde de carbone pour les appareils de petite puissance. Les évolutions technologiques que nécessitent ces fluides touchent les échangeurs, les compresseurs et plus largement l'architecture des systèmes.

L'usage d'échangeurs compacts peut être néfaste aux performances si certaines précautions ne sont pas prises. Il est ainsi nécessaire de réduire les défauts d'homogénéité de la distribution du fluide frigorigène à l'entrée de l'évaporateur et de prendre en compte le rôle de l'huile de lubrification, dont le poids relatif dans la charge de fluide devient prédominant. L'effet de l'huile peut être asso-

cié aux phénomènes de solubilité du fluide frigorigène qui modifie la charge active de fluide voire sa composition dans le cas de **mélanges zéotropes** et à une dégradation des performances de l'évaporateur.

Les variations brutales de régimes de fonctionnement peuvent aussi avoir des effets négatifs sur la fiabilité de la machine, d'autant plus marqués que l'inertie du système est fortement réduite par l'utilisation d'équipements compacts.

Une nouvelle gestion de l'énergie dans l'automobile

La forte croissance de ce secteur en Europe – qui représente traditionnellement dans les pays comme les États-Unis et le Japon les sources d'émissions les plus importantes de gaz frigorigènes – appelle à une substitution des HFC par le dioxyde de carbone dans un cycle à compression transcritique (figure) où la pression de refoulement du compresseur (le fluide se situant alors à l'état supercritique) peut atteindre des valeurs supérieures à 140 bars. Les évolutions technologiques qu'implique ce changement sont rendues encore plus complexes par les évolutions des motorisations (en particulier **hybride**) pour lesquelles une nouvelle gestion de l'énergie mécanique, thermique et électrique est indispensable.

Christophe Marvillet

Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh)
Direction de la recherche technologique



S. de Luigi/GAMMA