

Le professeur Clark Bullard est co-fondateur, en 1989, de l'Air Conditioning and Refrigeration Center (ACRC) à l'University of Illinois à Urbana-Champaign, et il a été directeur de ce centre jusqu'en 2002. Ayant pris sa retraite en tant qu'enseignant, il reste néanmoins chercheur actif au Center. Il est l'auteur de plus de 100 publications techniques couvrant un éventail important de technologies, dont un bon nombre traitent de l'action combinée des forces du marché et des politiques des pouvoirs publics sur l'innovation technologique. Son expérience des politiques vis-à-vis de la technologie date des années 1970 alors qu'il était directeur de la Conservation and Advanced Systems Policy Office à l'US Department of Energy, et analyste senior à l'US Congress Office of Technology Assessment. Ses recherches actuelles sont principalement axées sur le développement de nouveaux composants en vue de maximiser l'efficacité énergétique et de réduire les charges de frigorigène de la nouvelle génération de technologies dans les domaines du conditionnement d'air et du froid.

Membre actif de l'IIF, il est Président de la Commission B2, Equipements frigorifiques. En 2004, il a reçu l'Anderson Medal, la distinction la plus importante en matière technologique, décernée par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). Pour davantage d'informations sur les activités de Clark Bullard et sur celles de l'ACRC, consultez : <http://acrc.mie.uiuc.edu/>

Systèmes transcritiques au CO₂ – progrès récents et nouveaux défis

par

Clark Bullard

Air Conditioning and Refrigeration Center
University of Illinois at Urbana-Champaign, Etats-Unis
e-mail : bullard@uiuc.edu

INTRODUCTION

Cet article a été préparé suite à une demande de l'IIF afin d'examiner l'intérêt accru et récent pour les technologies utilisant le CO₂, en synthétisant l'état de l'art et en explorant les applications probables. Bien que les avantages et inconvénients des systèmes frigorifiques au dioxyde de carbone aient fait l'objet de nombreux débats au sein de la communauté scientifique depuis 15 ans, il n'a été porté à l'attention du public que récemment par le vote de mars 2004 du Parlement européen d'interdire le frigorigène utilisé universellement pour le conditionnement d'air automobile, le HFC-134a. Ceci marque la première action internationale destinée à interdire l'une des applications de ce fluide, l'un des "nouveaux" frigorigènes développés en réponse au Protocole de Montréal (1987), qui a rendu obligatoire l'élimination des frigorigènes chlorés afin de protéger la couche d'ozone.

En 1987, les responsables politiques et le public s'attaquaient au problème urgent de protection de la couche d'ozone ; cependant, peu de personnes avaient prévu la possible élimination des frigorigènes de remplacement eux-mêmes dans le futur. L'intérêt que suscite aujourd'hui le dioxyde de carbone provient de la préoccupation vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre et du réchauffement planétaire, ainsi que de l'engagement du Parlement européen en faveur du Protocole de Kyoto. La nouvelle génération de frigorigènes de la famille des hydrofluorocarbures (HFC) a un important potentiel de réchauffement

planétaire – moins que leurs prédécesseurs qui étaient des substances appauvrissant l'ozone, mais tout de même plus de 1000 fois le potentiel du dioxyde de carbone pour la plupart d'entre eux. L'accent mis d'abord sur le conditionnement d'air automobile est lié à la réputation notoire de ce secteur, perçu comme responsable de fuites importantes lorsqu'on le compare à d'autres applications.

Le dioxyde de carbone est réapparu comme un éventuel substitut des frigorigènes de la famille des hydrofluorocarbures en 1989, et les premiers résultats majeurs ont été publiés par Lorentzen et Pettersen¹ à un symposium de l'IIF en Norvège en 1992. Ultérieurement, des recherches importantes ont été lancées dans des universités aux Etats-Unis et en Asie. Dès 1999, la Society of Automotive Engineers (Société des ingénieurs de l'industrie automobile, SAE) commença à organiser des symposiums annuels, où l'industrie automobile mondiale se rencontre pour échanger des informations techniques et pour comparer les performances des véhicules dans le climat très chaud de Phoenix aux Etats-Unis.²

A la différence de la plupart des frigorigènes qui peuvent rejeter de la chaleur dans l'air par l'intermédiaire de la condensation aux températures extérieures habituelles, le dioxyde de carbone fonctionne selon un cycle transcritique, s'évaporant dans la région sous-critique et rejetant la chaleur à des températures au-dessus du point critique dans un refroidisseur

de gaz au lieu d'un condenseur. C'est ce cycle qui est considéré pour le conditionnement d'air automobile, le chauffage résidentiel et le chauffage d'eau, et d'autres applications. Les recherches sur les applications conventionnelles sous-critiques du CO₂ sont aussi en cours dans le secteur du froid industriel.

L'état de l'art de la technologie du cycle transcritique au CO₂ dans des applications diverses du froid, du conditionnement d'air et des pompes à chaleur a récemment été passé en revue en profondeur.³ Cet article présente l'historique et la réapparition du frigorigène naturel CO₂, ses propriétés thermodynamiques et de transport, les cycles au CO₂ transcritique de base et certaines modifications de cycle proposées, les caractéristiques du transfert de chaleur et de chute de pression dans les systèmes à CO₂, et les problèmes de conception liés à la pression élevée lors du fonctionnement. Il explore aussi les défis au niveau de la conception des composants et les obstacles à franchir avant la commercialisation. Sauf si autrement cité ci-après, le lecteur peut trouver le support utilisé pour rédiger ce compte rendu succinct, en consultant ce dossier détaillé de la littérature technique.

PROPRIETES DU DIOXYDE DE CARBONE

La pente de la courbe de pression de vapeur pour le CO₂ est 4 à 10 fois plus forte que celle d'autres frigorigènes, moins denses, comme le montre la *Figure 1* de [3]. Par conséquent, les évaporateurs et les échangeurs de chaleur internes (ligne d'aspiration) peuvent être conçus pour fonctionner avec un débit massique élevé pour réaliser un transfert de chaleur élevé avec seulement une faible augmentation de puissance du compresseur. Le transfert de chaleur dans le refroidisseur de gaz est amélioré par une autre propriété thermodynamique, car la chaleur spécifique isobare est infinie au point critique et

relativement élevée aux pressions typiques de fonctionnement légèrement au-dessus de ce point. Les propriétés thermodynamiques uniques du cycle transcritique produisent des isothermes presque plates juste au-dessus du point critique, comme le montre le diagramme P-h dans la *Figure 2* de [3]. Dans les applications de conditionnement d'air, les températures de sortie du refroidisseur de gaz sont normalement au-dessus du point critique, donc l'enthalpie de sortie du refroidisseur de gaz peut être nettement diminuée en utilisant le détendeur pour augmenter légèrement la pression au-dessus du point critique. Si l'on continue à accroître la pression, les rendements décroissent ; ainsi l'efficacité du cycle peut être maximisée en ajustant la haute pression. Les HFC, les hydrocarbures, l'ammoniac et d'autres frigorigènes fonctionnent selon un cycle sous-critique sans maximum local, si bien que le détendeur est utilisé pour contrôler l'état du fluide à la sortie de l'évaporateur. Un réservoir basse pression est en général utilisé pour le cycle transcritique pour assurer que le CO₂ sorte de l'évaporateur sous forme de vapeur saturée, et pour fournir une charge de frigorigène suffisante pour le contrôle de la haute pression.

Certaines propriétés de transport du CO₂ lui-même compensent une efficacité thermodynamique inférieure inhérente au cycle transcritique, notamment une conductivité thermique du liquide et de la vapeur plus élevée, et une viscosité du liquide inférieure. Sa tension superficielle plus faible améliore le transfert de chaleur par évaporation en favorisant l'ébullition nucléée, mais des modifications du cycle (par exemple, dérivation de la vapeur instantanée) ou des stratégies de contrôle qui maintiennent un état diphasique à la sortie de l'évaporateur peuvent s'avérer nécessaires afin de tirer profit de façon maximale de cette propriété.⁴

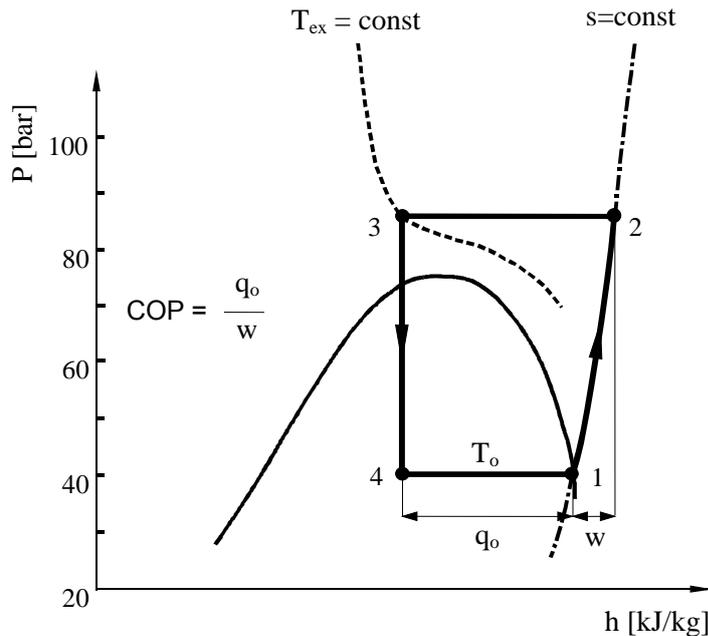


Figure 2. Diagramme pression-enthalpie du CO_2 : cycle transcritique
Transcritical cycle in the CO_2 pressure-enthalpy diagram

MODULATION DU DEBIT

Sur un point, le cycle transcritique ne diffère pas de ceux de ses concurrents – son efficacité peut être augmentée en modulant le débit du frigorigène pour éliminer les pertes dans le cycle et pour utiliser en continu les échangeurs de chaleur, au lieu du mode intermittent avec des cycles tout ou rien. Au cours de la dernière décennie, la perspective du réchauffement planétaire a annoncé une nouvelle ère : celle de coûts énergétiques plus élevés et de réglementations s'appliquant aux fluorocarbures. Dans les parties du monde où les prix de l'énergie sont déjà élevés, l'efficacité du cycle simple à compression de vapeur est améliorée par l'incorporation de capteurs, d'actionneurs et de régulateurs pour moduler le débit du frigorigène. Malheureusement, l'efficacité maximale qu'on peut obtenir avec cette approche atteint vite une limite spécifique liée au frigorigène : le COP lorsque le frigorigène en question est utilisé dans un cycle classique à compression de vapeur opérant entre les températures de la source chaude et de la source froide. Ainsi, dans le cas du CO_2 , comme dans celui des frigorigènes conventionnels, la recherche aujourd'hui se concentre sur les façons de modifier le cycle standard de compression de vapeur, comme il est communément fait dans les systèmes de taille industrielle où les coûts énergétiques sont déterminants.

MODIFICATIONS DU CYCLE

Il y a plusieurs façons d'améliorer le cycle thermodynamique de n'importe quel frigorigène en le rapprochant du cycle idéal de Carnot – un rectangle sur le schéma T-s. Dans le cas du CO_2 , ses plus grandes pertes exergétiques (irréversibilités) sont liées au processus de détente et à sa température de rejet de chaleur élevée. La façon la plus simple de réduire les pertes à la détente est de refroidir le frigorigène en amont du détendeur en transférant la chaleur dans un échangeur interne, au gaz froid de la ligne d'aspiration. La même approche a été appliquée pendant des décennies à de nombreux frigorigènes classiques, mais la pression élevée que nécessite le CO_2 a engendré le développement d'une conception unique de "sandwich à microcanaux" comme le montre la Figure 3, qui est plus performant que les conceptions simples à doubles tubes employées par le passé. Les points d'alimentation des microcanaux à faible diamètre et qui supportent la pression augmentent considérablement la surface, alors que la chute de pression peut être réduite en ajoutant simplement des orifices d'alimentation parallèles.⁵

Pour réduire les pertes liées au rejet de chaleur du refroidisseur de gaz ayant un grand ΔT , la température de refoulement du compresseur peut être réduite par une compression multi-étagée avec refroidissement intermédiaire. Montré de façon schématisée sur la Figure 4, le refroidissement intermédiaire réduit le volume du gaz au deuxième étage du compresseur,

réduisant ainsi le travail requis.⁶ En réduisant les différentiels de pression interne, la compression multi-étagée permet également l'utilisation de compresseurs rotatifs, qui seraient autrement sujet aux fuites internes excessives au niveau du piston.⁷ Des analyses effectuées par Huff *et al.* suggèrent que diverses combinaisons d'échange de chaleur interne et de compression biétagée pourraient augmenter l'efficacité du cycle de 38 à 63 % par rapport au cycle classique.⁸

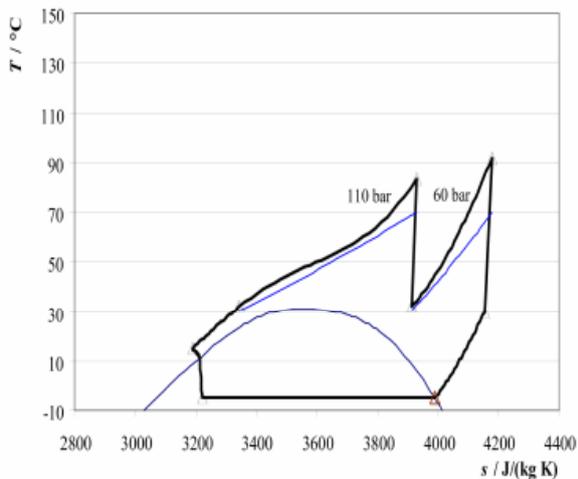


Figure 4. Two-stage compression with intercooling and internal heat exchange
Compression biétagée avec refroidissement intermédiaire et échange de chaleur interne

L'échange de chaleur interne ne constitue pas la seule façon de réduire les pertes importantes dues à la détente, inhérentes au cycle transcritique. Le travail potentiel récupérable des variations de pression et de volume importantes lors de la détente isenthalpique suggère qu'un système avec travail extérieur pourrait générer assez de travail pour faire marcher une pompe ou un ventilateur, ou éventuellement le compresseur du deuxième étage.⁹ L'inconvénient de cette approche est qu'elle entre en concurrence pour les mêmes pertes exergetiques avec l'échangeur de chaleur interne, qui est un dispositif beaucoup plus simple et moins coûteux. Cependant, les bénéfices potentiels s'avèrent plus importants lorsque l'efficacité isentropique dépasse 0,5 ; ainsi, les mécanismes permettant la récupération et la transmission de ce "travail perdu" font l'objet de recherches en cours.

TECHNOLOGIES DES COMPOSANTS

Hormis les modifications des composants dictées par la nature du cycle et décrites ci-dessus, les pressions de fonctionnement élevées et les propriétés uniques du CO₂, elles aussi, donnent lieu à des contraintes au niveau de la conception

des composants conventionnels, tels que les échangeurs de chaleur et le compresseur. Par exemple, les pressions élevées nécessitent des tubes à faible diamètre pour minimiser les contraintes ainsi que des matériaux adaptés. En dépit des préoccupations selon lesquelles les pressions élevées présenteraient des risques insurmontables en matière de sécurité, le développement d'échangeurs de chaleur à microcanaux ultra-compacts a considérablement réduit ce risque, en confinant le frigorigène dans des centaines de canaux parallèles sub-millimétriques. Par exemple, le volume plus petit du côté frigorigène compense quasi-totalement la pression élevée pour produire une énergie d'explosion qui est comparable à celle du R-22, et la charge réduite atténue le risque d'inhalation lié à la libération prolongée ou soudaine dans un espace occupé.¹⁰

La compacité du compresseur est une autre innovation liée aux caractéristiques pression élevée/faible volume du CO₂ ; les volumes balayés sont 6 à 8 fois inférieurs à ceux du R-134a et la sensibilité aux pertes au niveau du détenteur est réduite en raison de la densité élevée de la vapeur. Dans les compresseurs automobiles où la compacité est d'une importance capitale, des volumes balayés plus petits peuvent permettre de réduire la taille des composants. Néanmoins, certains des premiers prototypes étaient plus lourds à cause de la plus grande résistance requise au niveau du carter des moteurs des compresseurs hermétiques, mais il n'apparaît pas encore clairement si les versions commerciales seront désavantagées par leur poids. Les faibles taux de compression ont engendré des efficacités plus élevées, et les différences de pression importantes à l'intérieur du compresseur ont donné lieu à une évolution vers des prototypes de compresseurs à piston ou rotatifs biétagés. L'évaluation des lubrifiants pour le cycle transcritique est encore en cours ; le polyalkylène glycol (PAG) est préféré pour son pouvoir lubrifiant, les dérivés d'esters aromatiques pour leur aptitude à supporter des températures élevées et les polyolesters (POE) pour leur miscibilité tout au long du cycle transcritique. La faible miscibilité des huiles minérales synthétiques est compensée par leurs propriétés supérieures d'écoulement à basse température ; ainsi, le choix ultime pourrait porter sur un mélange de deux lubrifiants voire davantage.

Les applications dans le transport nécessitent des systèmes légers et compacts ; ces exigences ont abouti à l'utilisation de tubes plats à orifices multiples (microcanaux) dont les diamètres sont inférieurs à 1 mm. De tels échangeurs de chaleur brasés en aluminium ont été utilisés depuis plus

d'une décennie en tant que condenseurs pour le R-134a dans les systèmes de conditionnement d'air automobiles. Cependant, la nécessité d'utiliser la même technologie dans les évaporateurs à CO₂ focalise l'attention sur le problème de distribution des gouttelettes de frigorigène biphasique uniformément parmi des centaines de canaux parallèles.¹¹ Ce problème de distribution du frigorigène, allant de pair avec le besoin de développer des échangeurs de chaleur à microcanaux résistants au gel, pose de sérieux obstacles au développement d'évaporateurs au CO₂. En attendant, pour les conditionneurs d'air et les pompes à chaleur résidentielles où la formation de givre est un problème et où les contraintes de volume sont moins sévères, des tubes circulaires à faible diamètre (5 à 7 mm) à ailettes plates à surfaces augmentées sont actuellement étudiés au stade de prototype, pour résoudre le problème de distribution en réduisant au minimum le nombre

de circuits pour que des distributeurs de frigorigène classiques puissent être utilisés.

La performance du système transcritique au CO₂ est très sensible à la température de sortie du frigorigène du refroidisseur de gaz, où une faible variation de température engendre un grand changement d'enthalpie dû à la chaleur spécifique isobare élevée. La *Figure 5* montre comment une diminution supplémentaire de la température du frigorigène de 2°C peut augmenter le COP de 11 % tout en réduisant la pression de refoulement, optimisant ainsi le COP du refroidisseur de gaz d'un système de conditionnement d'air automobile.¹² Cette observation a abouti à la conception d'un refroidisseur de gaz contre-courant croisé à plusieurs nappes comme le montre la *Figure 6*. Celui-ci résulte de l'invention d'une méthode de fabrication par un constructeur important, et de la validation ultérieure du prototype en laboratoire et dans des véhicules d'essai.¹³

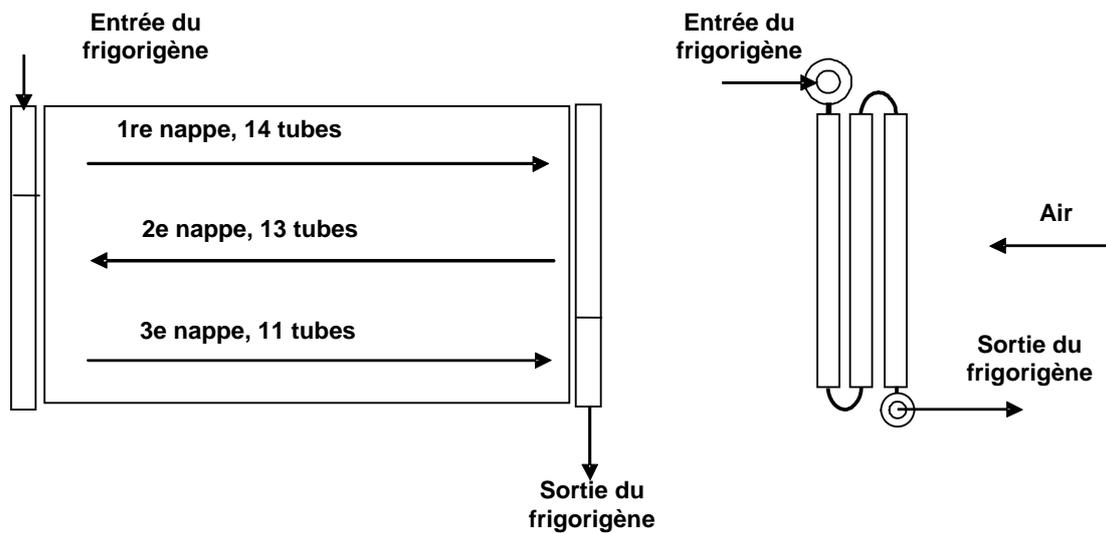


Figure 6. Conceptions de refroidisseurs de gaz à courants croisés et à contre-courants croisés

FACTEURS DETERMINANTS DE L'INNOVATION

Trois facteurs déterminants influencent les premières phases de commercialisation de la technologie au CO₂. En premier lieu, il convient de citer les actions réglementaires liées au Protocole de Kyoto, qui stimulent le développement de la génération actuelle de prototypes de conditionneurs d'air mobiles. Cependant, sur le long terme, les progrès en matière d'efficacité énergétique des véhicules va créer un manque de chaleur "perdue" traditionnellement utilisée pour chauffer l'habitacle en hiver, et stimule le développement de technologies de remplacement. Un certain nombre de technologies utilisées actuellement (par exemple, des systèmes de chauffage à résistance électrique, ou à frottements) ont un COP = 1, alors qu'une pompe à chaleur air-air transcritique au CO₂ aurait pu produire de la chaleur à une température élevée a COP >3 immédiatement lors du démarrage du véhicule.¹⁴

Le désir des fabricants de plaire aux "consommateurs verts" constitue le deuxième facteur. Les engagements pris par un fabricant important de boissons non alcoolisées pour passer aux frigorigènes naturels dans ses refroidisseurs de boissons avant les jeux olympiques de 2004 ont stimulé la concurrence parmi les constructeurs de systèmes à compression de vapeur utilisant le CO₂ et les hydrocarbures, ainsi que des cycles Stirling. Pour des raisons semblables, plusieurs grandes sociétés du secteur agro-alimentaire sont en train de concevoir des systèmes frigorifiques biétagés en cascade (CO₂ et ammoniac) utilisant des frigorigènes naturels afin de remplacer les frigorigènes conventionnels tels que les frigorigènes chlorés en passe d'être éliminés.

Les forces conventionnelles du marché constituent le troisième facteur et sont les plus dominantes et durables. A présent, elles exercent leur plus forte influence dans le secteur du chauffage domestique d'eau au Japon, où la demande est plus forte le soir (à l'heure du bain), et où les tarifs d'électricité avantageux aux heures creuses encouragent l'accumulation d'eau plus économique la nuit. Pour le secteur commercial, les sociétés multinationales sont en train de développer de grands (~20 kW) systèmes de chauffage d'eau pour les lave-vaisselle des cafétérias ; ces systèmes sont utilisés simultanément pour produire de l'eau glacée comme sous-produit, pour les applications en mode refroidissement ou pour d'autres utilisations.¹⁵

D'autres applications sont encore au stade expérimental. Le séchage des vêtements est un exemple où le cycle transcritique fournit de la chaleur à la température élevée requise sans perdre en efficacité, et le côté froid reste disponible pour condenser la vapeur d'eau afin de la rejeter sous forme liquide. Pour le chauffage en résidentiel, les recherches préliminaires ont confirmé que le CO₂ transcritique est moins efficace et a un plus fort impact sur le réchauffement planétaire total équivalent (TEWI) en mode conditionnement d'air que le R-410A, le frigorigène HFC de prédilection actuel. Cependant, son efficacité en mode chauffage saisonnier est potentiellement plus élevée, parce que la plus grande puissance des systèmes au CO₂ à basse température réduit le besoin de chauffage à résistance électrique supplémentaire. Les résultats indiquent que la consommation d'énergie annuelle globale pourrait être équivalente à celle des systèmes utilisant des HFC dans des climats maritimes sans hiver rigoureux comme Seattle, et pourrait être plus efficace dans les climats continentaux comme celui de Chicago, à condition que les pompes à chaleur soient conçues et dimensionnées pour les besoins du chauffage plutôt que pour le mode refroidissement.¹⁶

PERSPECTIVES

Le potentiel de réchauffement planétaire des HFC a initialement stimulé la recherche destinée à trouver des frigorigènes naturellement dégradables dans l'atmosphère, contrairement aux substances synthétiques nouvelles dont la chimie atmosphérique est nocive ou encore peu connue. Dans le cas du CO₂, l'approche initiale permettant son évolution à été le développement de technologies pour la production en masse d'échangeurs de chaleur légers et contenant un frigorigène à haute pression dans des canaux à faible diamètre.

La recherche pratiquée depuis que les systèmes transcritiques au CO₂ ont commencé à susciter un intérêt renouvelé, il y a 10 ans, a été très conventionnelle de plusieurs points de vue. Principalement, elle a imité, à un rythme accéléré, les types de recherche effectuées sur les systèmes sous-critiques au siècle dernier. En même temps, les améliorations apportées aux côtés air ou eau des échangeurs de chaleur au CO₂ ont promu tous les frigorigènes de la même manière en amenant la vraie performance thermodynamique des systèmes plus près du cycle à compression de vapeur idéal.¹⁷ La plupart des recherches spécifiques sur le CO₂ en tant que frigorigène se sont concentrées sur les manières d'exploiter ses propriétés thermodynamiques et de transport uniques afin

ARTICLE DE SYNTHESE

de réduire les pertes du compresseur et des échangeurs de chaleur. Le résultat logique d'une telle stratégie de recherche est d'amplifier l'importance du choix du frigorigène, en favorisant les fluides les plus efficaces dont les cycles conventionnels à compression de vapeur ressemblent de très près au rectangle sur le diagramme T-s.

Cette stratégie traditionnelle de recherche n'est bien sûr pas suffisante pour le CO₂ en raison de l'efficacité plus faible inhérente au cycle conventionnel lié au fonctionnement transcritique. Elle a cependant créé des niches spécialisées pour plusieurs applications où l'aspect le plus important correspondant à la partie non-rectangulaire du cycle transcritique (sa température élevée de rejet de chaleur) constitue un atout qui compense sa perte thermodynamique. Ces applications sont le chauffage d'eau et le conditionnement d'air mobile, détaillés dans les paragraphes suivants.

Applications pour les pompes à chaleur

La demande pour l'eau chaude domestique se produit autant pendant les saisons de chauffage que pendant les saisons de refroidissement, et les températures d'approvisionnement désirées (60 à 90°C, selon le coût du volume d'accumulation) dépendent directement du glissement de température supercritique dans le refroidisseur de gaz à CO₂. Par conséquent, l'eau peut être fournie au coût marginal de l'énergie les jours très chauds, avec un faible coût supplémentaire lorsque les charges de refroidissement sont faibles, simplement en utilisant le détendeur pour augmenter la haute pression suffisamment pour rejeter la quantité désirée de chaleur à la température voulue. De même, pendant la saison de chauffage, le compresseur peut assurer selon les besoins, soit le chauffage des locaux (air ou hydronique), soit le chauffage d'eau sanitaire, toujours à l'aide du détendeur pour assurer le chauffage dans chacun des cas à la température appropriée. En toute saison, on peut donc chauffer de l'eau sanitaire avec une efficacité dépassant de loin celle du chauffage à l'aide d'une résistance électrique.

Il en va de même pour l'eau chaude dans le secteur tertiaire, comme dans l'exemple de la cafétéria citée ci-dessus. Beaucoup d'immeubles commerciaux ont une demande faible d'eau glacée tout au long de l'année, donc l'eau chaude peut être fournie comme un sous-produit du cycle transcritique avec peu de frais supplémentaires. Néanmoins, l'avantage économique du CO₂ transcritique est limité aux applications nécessitant l'approvisionnement à des températures dépassant environ 40°C, sinon

l'eau peut être préchauffée en utilisant la chaleur rejetée d'un système sous-critique et simplement complétée en utilisant la chaleur plus coûteuse obtenue à l'aide d'une résistance électrique. Puisque les installations à cycle mixte à gaz naturel modernes peuvent produire de l'électricité avec une efficacité de plus de 50 %, les pompes à chaleur utilisées à grande échelle répondent déjà plus efficacement que la combustion directe à la demande en modes chauffage de locaux et chauffage d'eau. Cependant, la future viabilité économique des pompes à chaleur sera déterminée par les coûts relatifs d'immobilisation des capitaux et de l'énergie. C'est seulement lorsque ces conditions seront réunies que se posera la question des avantages respectifs des systèmes de pompes à chaleur utilisant les HFC sous-critiques comparés aux systèmes au CO₂ transcritique. La réponse sera influencée dans une certaine mesure par la température de chauffage exigée, et dans une plus grande mesure, par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre directes et indirectes, et de mesurer ces réductions à l'aide d'indicateurs tels que TEWI.

Applications pour le conditionnement d'air automobile

Dans le conditionnement d'air automobile, on a besoin de systèmes légers et ultra-compacts, la température élevée du rejet de chaleur par le refroidisseur de gaz à CO₂ favorise l'utilisation de petits échangeurs de chaleur. L'impact direct négligeable sur le réchauffement planétaire du CO₂ est un avantage important qui tend à compenser sa perte d'efficacité lorsqu'il fait extrêmement chaud, et sa température de rejet de chaleur plus élevée permet de réduire la taille des échangeurs de chaleur, permettant ainsi d'économiser davantage de carburant par l'intermédiaire d'une conception plus aérodynamique du véhicule. Le coefficient de traînée aérodynamique de la voiture est très sensible à la forme et à la pente de l'avant du véhicule où le condenseur ou le refroidisseur de gaz ont traditionnellement été situés afin de réduire au minimum la recirculation de l'air chaud du moteur lorsqu'il tourne au ralenti, et pour recevoir l'air forcé lorsque le véhicule se déplace. Des systèmes de contrôle sont en train d'être développés pour profiter du degré de liberté supplémentaire lié au cycle transcritique, permettant d'échanger l'efficacité contre une plus grande puissance lorsqu'il faut abaisser rapidement la température de l'habitacle au démarrage du véhicule. La capacité de contrôler la haute pression de cette manière présente également un moyen de réduire davantage la taille du refroidisseur de gaz dans une conception à haute température.

Applications pour la réfrigération, la congélation et le conditionnement d'air

Afin d'envisager une large utilisation du CO₂ à long terme, il faut regarder au delà des marchés niches où le rejet de chaleur à haute température constitue un avantage économique (par exemple pour le chauffage, ou pour la compacité comme en conditionnement d'air automobile). L'efficacité du cycle classique au CO₂ est tellement faible qu'il ne suffit pas de travailler simplement les composants pour que le vrai cycle se rapproche du cycle idéal. Pour des applications de refroidissement, le cycle lui-même doit être modifié pour l'amener plus près de l'efficacité idéale. La mesure la plus rentable, l'échange thermique interne, a déjà été prise en compte dans des applications automobiles et de chauffage d'eau, mais les recherches futures devront se concentrer sur la réduction de la différence de température entre l'air et le frigorigène du refroidisseur de gaz, réalisant un glissement de température qui s'approche de celui de la source de chaleur. Les prochaines étapes logiques exigeront des composants supplémentaires et des contrôles plus complexes, y compris des dispositifs tels que la compression à plusieurs étages avec refroidissement intermédiaire et une réduction plus grande des pertes à la détente, etc. A moins que le cycle transcritique puisse être modifié de manière rentable de façon telle que son handicap énergétique soit plus faible que l'impact direct sur le réchauffement planétaire des HFC sous-critiques, il sera peu susceptible de devenir le cycle de prédilection dans la plupart des applications de refroidissement.

Il est donc instructif de regarder vers le futur à long terme et d'imaginer quels genres de développements technologiques futurs pourraient être requis pour les systèmes transcritiques au CO₂ afin de permettre une utilisation répandue dans les applications de refroidissement. Un scénario potentiellement plausible serait caractérisé par des réductions continues du coût des capteurs, des actionneurs et des régulateurs de microprocesseurs, et de les incorporer dans les articles produits en masse. Un tel progrès en R&D diminuerait l'avantage en terme de coût dont bénéficient actuellement les frigorigènes ayant les propriétés thermodynamiques favorables dans les cycles classiques, et permettrait aux frigorigènes d'être sélectionnés en se basant sur leur sécurité vis-à-vis de l'environnement et leur compatibilité avec les divers composants conçus pour améliorer le cycle. Tout comme les méthodes modernes pour améliorer les circuits du côté frigorigène ont diminué l'importance des propriétés de transport des frigorigènes, les technologies de contrôle des microprocesseurs et d'intégration des

composants peuvent ainsi également diminuer l'importance des propriétés thermodynamiques des frigorigènes.

La recherche sur les frigorigènes de substitution continue sur un bon nombre de voies parallèles, y compris l'exploration de l'utilisation des hydrocarbures ou de l'ammoniac en réduisant au minimum la charge ou en employant les boucles à frigoporteur. Chacune de ces voies donne des résultats étonnants, comme le montre le cas du dioxyde de carbone. Ces efforts ont en commun d'amener la recherche fondamentale, à se concentrer sur une technologie dont le développement a traditionnellement évolué de façon régulière dans l'intérêt de la fiabilité. Depuis que le Protocole de Montréal a montré que les données empiriques spécifiques des frigorigènes sont dépassées, l'industrie est entrée dans une ère de changement technologique discontinu. Avec le CO₂ et les autres frigorigènes de substitution, nous avons évolué au-delà du stade de développement des technologies, où les nouveaux frigorigènes remplaçaient simplement les anciens dans les vieux systèmes. Nous apprenons que les différents frigorigènes exigent des composants et des contrôles fondamentalement différents pour amener leur cycle thermodynamique simple plus près de l'efficacité thermodynamique idéale.