

Les technologies et fluides frigorigènes adaptés aux réseaux de refroidissement et de chauffage urbains

Les réglementations environnementales récentes remettent en question l'utilisation des fluides traditionnellement utilisés notamment pour les producteurs d'eau glacée et les pompes à chaleur des réseaux d'énergie. Ceci a suscité l'émergence de solutions nouvelles qui apportent des avantages marquants par rapport aux technologies antérieures. Cet article passe en revue les nouvelles solutions et conditions de mise en œuvre.

Mots clés :

Réseaux de froid urbain
Technologies

Paul De LARMINAT,
Consultant International

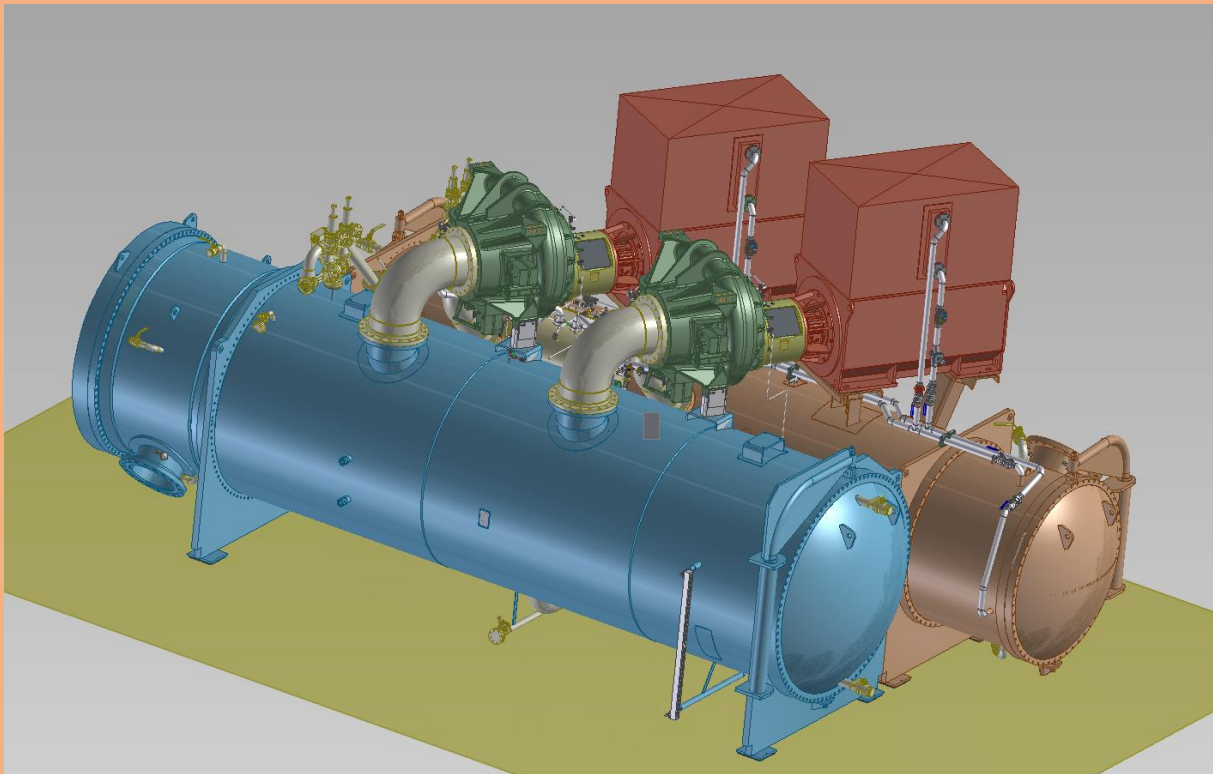


Figure 1 Groupe centrifuge double de 2 x 10 MW

1/ Introduction

La satisfaction des besoins de climatisation et de chauffage pour le confort des personnes ou les besoins industriels constitue une part significative des émissions anthropiques de GES (Gaz à Effet de Serre). La quasi-totalité de la production

de froid, toutes applications confondues, est assurée par des machines thermodynamiques utilisant des cycles à compression de vapeur utilisant divers fluides frigorigènes. Les besoins de chaleur sont en partie couverts par des PAC (Pompes à

Chaleur), dont un grand nombre utilisent aussi des cycles à compression de vapeur.

La réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue un impératif pour le respect des accords de la Conférence de Paris sur le

climat (COP-21). Les réseaux urbains de distribution d'énergie thermique offrent un potentiel considérable de réduction de ces émissions de GES, et suscitent de ce fait un intérêt croissant. L'utilisation de fluides traditionnellement utilisés est cependant remise en question du fait de leur impact potentiel sur l'environnement. Cependant, l'efficacité énergétique, qui est un enjeu majeur, ne dépend pas que du choix des fluides, mais aussi d'une multitude d'autres facteurs tels que les technologies de compresseurs et d'échangeurs de chaleur, les températures de fonctionnement, l'architecture générale des systèmes et leur intégration etc. Les questions d'arrangement général des systèmes sortiraient du cadre de cet article. Nous nous en tiendrons à l'étude des machines elles-mêmes (chillers et PAC), et particulièrement à l'interaction entre les technologies utilisées et les fluides, en se focalisant sur les machines à compression de vapeur, à l'exclusion des machines à absorption.

Afin d'identifier les choix technologiques possibles, il importe tout d'abord d'analyser les besoins et les contraintes. Par « besoins », nous entendons essentiellement les puissances thermiques à délivrer, ainsi que les niveaux de température et la nature des fluides frigoporteurs. Les « contraintes » sont de natures variées, concernant notamment la sécurité des installations, leur encombrement, les objectifs

d'efficacité énergétique, et les contraintes environnementales. Dans ce qui suit, nous commencerons par l'analyse des contraintes, qui sont généralement communes aux applications de chaud et de froid. Nous analyserons ensuite séparément les applications de chaud et de froid, et les choix technologiques possibles.

2/ Analyse des contraintes

2.1 Contraintes environnementales

La remise en cause de certains fluides frigorigènes résulte d'inquiétudes ou de risques avérés relatifs à leur impact sur l'environnement, principalement par rapport à la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre. L'objectif de protection de la couche d'ozone a conduit à l'élimination par le Protocole de Montréal des CFC (Chlorofluorocarbones), maintenant pratiquement totale dans le monde entier, puis à celle des HCFC (Hydrochlorofluorocarbones) dont l'élimination est terminée dans les pays « développés », et en cours dans les pays en développement. Le même protocole de Montréal, par son amendement de Kigali en 2016, impose aussi maintenant un calendrier progressif de limitations sur le PRG des fluides frigorigènes. Avant même l'adoption de cet amendement de Kigali, la réglementation européenne de 2014 dite « F-Gaz » avait déjà imposé un tel calendrier de limitations au niveau de l'Europe. Ces réglementations touchent essentiellement les

« HFC » (Hydrofluorocarbones), qui avaient remplacé les CFC et HCFC.

La plupart des fluides utilisés dans les décennies passées étaient des fluides de synthèse dérivés des hydrocarbures par substitution d'atomes d'hydrogène par des atomes d'halogène, particulièrement chlore, fluor et brome. Ces produits présentaient de gros avantages : peu coûteux, avec d'excellents rendements énergétiques, très peu toxiques, et généralement ininflammables. Mais la présence des atomes d'halogènes est incriminée dans leur impact environnemental. Lors de la décomposition de ces molécules dans l'atmosphère, les atomes de chlore et de brome ont un impact potentiel sur la couche d'ozone, d'où l'interdiction des CFC et HCFC. Ce n'est pas le cas du fluor, sans impact sur l'ozone, mais celui-ci confère aux molécules qui en contiennent un PRG significatif, au même titre d'ailleurs que le chlore et le brome.

Pour faire face à ces interdictions ou restrictions progressives, une alternative est d'utiliser des fluides « naturels » tels que l'ammoniac, les hydrocarbures ou le CO₂. L'autre solution réside dans une nouvelle génération de fluides de synthèse désignés sous l'appellation générique de « HFO » (Hydrofluorooléfines). Ces molécules sont assez comparables à celles des HFC, mais avec une liaison double entre des atomes de carbone, qui leur confère une stabilité

réduite, et donc une durée de vie beaucoup plus courte dans l'atmosphère, d'où résulte un PRG (Potentiel de Réchauffement Global) très réduit. Mais une conséquence induite de cette instabilité est aussi de rendre ces molécules « insaturées » plus inflammables que leurs homologues insaturées.

2.2 Contraintes d'installation

Les conditions d'installation des machines sont extrêmement variables selon le contexte. Mais pour les réseaux de distribution d'énergie, ces machines sont généralement installées dans un milieu urbain ou en périphérie de celui-ci. Compte tenu de la pression foncière, les terrains sont toujours coûteux, et un encombrement limité est toujours recherché. Cette contrainte d'encombrement peut devenir extrêmement critique en cas de besoin d'extension ou de remodelage d'installations existantes dans un tissu urbain déjà saturé. Il est alors nécessaire d'optimiser rigoureusement l'espace dans des volumes souvent en sous-sols profonds et difficiles d'accès.

2.3 Contraintes de sécurité

Comme indiqué au §-2.1, certains des fluides alternatifs sont inflammables, particulièrement les hydrocarbures, et à un moindre degré l'ammoniac et certains fluides de synthèse de nouvelle génération. L'ammoniac est de surcroît toxique. Ces caractéristiques posent des problèmes de sécurité, qui se traduisent par des contraintes

réglementaires, et par des coûts liés aux mesures de sécurité nécessaires. Ceci est particulièrement contraignant pour les applications considérées, car ce sont des installations de forte puissance, donc avec de fortes charges de fluides, souvent installées en zone urbaine, et avec des conditions d'accès pouvant être délicates ; ceci peut rendre problématique l'utilisation de fluides inflammables.

2.4 Contraintes d'efficacité énergétique et émissions de GES

L'efficacité énergétique est un critère majeur d'évaluation des technologies pour des raisons économiques, environnementales et réglementaires.

Economiquement, les coûts de l'énergie représentent une part considérable (de l'ordre de 80%) du coût global de possession des installations. La réduction des consommations énergétiques est également recherchée pour d'autres raisons telles que la réduction de l'empreinte carbone, l'indépendance énergétique, ou la flexibilité d'adaptation aux énergies renouvelables. L'efficacité énergétique est donc un critère central dans le choix des technologies. Ce critère, commun à toutes les applications de froid et PAC, revêt une importance toute particulière pour les réseaux de distribution d'énergie, dont le modèle économique dépend massivement des coûts de l'énergie utilisée.

Cette forte consommation énergétique a également un impact important sur le profil

des émissions de GES par ces machines. Ces émissions sont de deux sortes : les émissions directes et indirectes. Les émissions « directes » correspondent aux pertes intempestives d'une partie des charges de fluides frigorigènes utilisés dans les machines, fluides dont certains ont un PRG substantiel. Les émissions « indirectes » correspondent aux quantités de CO₂ émises lors de la production de l'énergie nécessaire pour faire fonctionner les machines. Ces émissions indirectes sont le produit de l'énergie consommée (en kWh) par l'empreinte carbone de cette énergie (en kg de CO₂ / kWh). Dans le cas particulier des réseaux considérés, les émissions « directes » ne représentent qu'une fraction infime (de l'ordre de 2%) des émissions totales. Ceci résulte de la forte consommation énergétique, mais aussi de taux de fuites de fluides très bas du fait du confinement des charges en salle des machines, et d'une maintenance généralement très rigoureuse. Les émissions équivalentes de CO₂ sur la durée de vie d'une machine peuvent très utilement être évaluées par des outils d'analyse tels que le TEWI (Total Equivalent Warming Impact).

Au-delà de la dimension économique, les contraintes environnementales, réglementaires et de sécurité sont en France strictement encadrées par le Code de l'Environnement, puisque la plupart des réseaux considérés sont des « ICPE » (Installations

Classées pour la Protection de l'Environnement).

2.5 Contraintes des sources et puits de chaleur

Les machines frigorifiques nécessitent un circuit de refroidissement pour évacuer la chaleur dégagée au condenseur du circuit frigorifique. De même, les PAC utilisent une source d'énergie thermique, dont elles remontent la température à un niveau convenant au besoin d'utilisation. Les possibilités de puiser ou rejeter ainsi de la chaleur relèvent de contraintes dépendant de l'environnement dans lequel sont installées les machines. Mais les problématiques étant très différentes selon qu'il s'agit d'une machine de refroidissement ou d'une PAC, nous analyserons plus en détails ces aspects ci-dessous séparément, conjointement avec l'analyse des besoins.

3/ Analyse des besoins

3.1 Généralités

De par leur constitution, les réseaux urbains de chaud / froid utilisent presque toujours de l'eau comme fluide frigoporteur vers les divers utilisateurs. Il existe aussi des réseaux de chaleur distribuant de la vapeur ; mais ils se prêtent généralement assez mal aux applications de PAC en milieu urbain. Il existe également pour des applications de froid des réseaux utilisant des fluides à changement de phase tels que des coulis de glace ; mais leur application reste pour l'instant extrêmement limitée. Nous limiterons donc notre analyse

aux réseaux de distribution d'eau.

Les puissances peuvent être extrêmement fortes, avec des salles des machines pouvant comporter une puissance thermique installée de quelques mégawatts à plusieurs dizaines de mégawatts. De ce fait, les puissances thermiques par machine (chillers ou PAC) démarrent typiquement aux alentours de 1 MW environ pour les plus petites, allant jusqu'à 20 MW pour les plus grosses, voire même 40 MW dans les cas extrêmes.

3.2 Applications de refroidissement

3.2.1 Les besoins

Les réseaux de froid sont en grande majorité à usage de climatisation de confort. Pour ces applications, l'optimum énergétique est généralement atteint pour des températures de départ d'eau froide aux alentours de 7°C, avec des retours à 12°C environ. Ces températures peuvent varier selon les applications. C'est le cas notamment dans des réseaux urbains préexistants dans lesquels on cherche à augmenter la puissance thermique distribuée. Lorsqu'il n'est pas possible d'augmenter la taille ou le nombre des tuyaux, augmenter les débits d'eau conduirait vite à des pertes de charge prohibitives. On cherche alors à obtenir l'augmentation de puissance en augmentant les écarts de température. L'utilisation d'antigel est généralement prohibitive en coût et pertes de charge, une limite basse de température proche de 2°C est

assez couramment adoptée. A l'inverse, certaines applications ne nécessitent pas une température aussi basse que les 7°C conventionnels ; c'est le cas particulièrement du refroidissement de certains systèmes informatiques pour lesquels une température de l'ordre de 20° peut être acceptable. Mais dans le cas général où le réseau n'est pas exclusivement dédié à de telles applications, la température retenue est généralement la plus basse parmi les applications, soit aux alentours des 7°C typiques.

Certaines installations présentent également un besoin de stockage thermique sous forme de glace. Les machines dédiées à cet usage fonctionnent généralement sur un circuit local d'eau glycolée avec une température de l'ordre de -10°C alimentant des bacs à glace.

3.2.2 Contraintes de refroidissement des condenseurs

Comme indiqué au §-2.5, les machines frigorifiques requièrent l'utilisation d'un système de refroidissement destiné à évacuer la chaleur dégagée au condenseur. Ces modalités d'évacuation sont très variables, et sont d'une grande importance pour le rendement des machines, une élévation de 1K de la température de condensation générant une baisse de rendement énergétique de l'ordre de 3%. Le choix des modes de réjection est donc fondamental, et se fait parmi les solutions suivantes.

La solution la plus traditionnelle est l'utilisation de condenseurs à eau associés à une tour de refroidissement évaporative. La température d'entrée d'eau au condenseur est alors supérieure de 8 K environ à la température de bulbe humide ambiante. Cependant, les tours de refroidissement sont de plus en plus souvent interdites en milieu urbain, et (ou) nécessitent des coûts d'entretien élevés, en raison notamment des risques de légionellose. Par ailleurs, l'eau est une ressource parfois rare et souvent coûteuse. Une alternative possible est l'utilisation de radiateurs secs pour refroidir l'eau de condensation. La température d'eau partant vers les condenseurs est alors de l'ordre de 10K au-dessus de la température sèche ambiante. En alternative, certains circuits frigorifiques sont également équipés de condenseurs à air, avec lesquels la température de condensation est de l'ordre de 12 K au-dessus de la température sèche. De plus en plus de ces échangeurs « secs », radiateurs ou condenseurs à air, sont également proposés avec une option de fonctionnement « adiabatique » : ils fonctionnent généralement en mode sec ; mais sont dotés d'une possibilité d'arrosage occasionnel mis en service lors des pics de chaleur.

En alternative aux systèmes de refroidissement à partir de l'air ambiant, nombre de réseaux urbains utilisent pour le refroidissement des condenseurs l'eau des rivières,

ou l'eau de mer selon la disponibilité.

3.3 Applications de PAC

3.3.1 Les besoins

Comme indiqué au §-3.2, les niveaux de température requis pour les applications de refroidissement sont relativement uniformes, avec une sortie d'eau généralement de l'ordre de 7°C, sauf pour les besoins de stockage de glace. Selon les possibilités de refroidissement, les températures au condenseur peuvent varier dans une plage assez large, mais selon des typologies malgré tout assez bien définies. La situation est très différente pour les applications de PAC, où le champ des applications possibles est beaucoup plus diversifié.

Les besoins de température, pour commencer, sont extrêmement variés. En chauffage de confort, les températures dépendent largement des technologies de construction des bâtiments. Avec des bâtiments modernes bien isolés et avec chauffage par le sol, une température d'eau de 35 °C est largement suffisante. Pour des bâtiments plus anciens avec des radiateurs conventionnels, une température de l'ordre de 65° est souvent nécessaire, tandis que pour l'eau chaude sanitaire, 60°C est un minimum pour des raisons sanitaires. De plus, les PAC sont fréquemment utilisées en remplacement des centrales de chauffage utilisant des combustibles fossiles. Dans ce cas, la température de sortie avant modification est souvent

de l'ordre de 80 à 90°C... quand il ne s'agit pas même de circuits de vapeur.

3.3.2 Les sources de chaleur

Les sources de chaleur pour les PAC sont également très diverses selon le contexte. Une solution particulièrement favorable est celle de la disponibilité d'énergie géothermique. Des nappes à des températures de l'ordre de 50 à 80° sont fréquemment disponibles, et se prêtent à l'exploitation « directe » de ce niveau de température, ou à son relevage par PAC. Des possibilités de récupération de chaleur peuvent aussi se présenter, provenant notamment de rejets industriels ou sur les eaux d'égouts. De la chaleur peut également être puisée dans le milieu ambiant, notamment dans les eaux de rivières ou de mer ; il est également possible de le faire à partir de l'air ambiant en utilisant les réseaux de refroidissement d'eau de condenseurs de systèmes de refroidissement selon leur disponibilité. Enfin, une source de chaleur particulièrement intéressante se présente lorsqu'il y a des besoins simultanés de chaud et de froid. C'est alors le circuit froid qui est la source de chaleur, les fonctions de refroidissement et chauffage étant combinés en une seule machine dite « thermofrigopompe » dans laquelle l'évaporateur est utilisé pour le refroidissement, et le condenseur pour le chauffage. Dans ce cas, les températures de l'eau à l'évaporateur et au condenseur sont fixées par les besoins de refroidissement et de

chauffage, comme indiqué plus haut.

3.3.3 Une infinité de combinaisons

Comme on le voit, les besoins sont très variés ainsi que les disponibilités de sources de chaleur. S'y ajoute le fait que les écarts entre température de départ d'eau chaude et retour vers la centrale peuvent également être très variables selon les applications. De ce fait, une option est également de n'utiliser les PAC que pour une partie de la puissance, et de compléter par des chaudières pour finir de remonter à la température désirée. Les possibilités d'agencements de circuits pour optimiser les rendements sont donc extrêmement variées, avec des températures de source de chaleur pouvant varier de 0 à 70°C environ, et des températures d'utilisation pouvant aller de 35°C à 100°C, voire plus.

4 Technologies pour les applications de refroidissement

4.1 Panorama global

De manière générale, les applications de climatisation couvrent une gamme très étendue de puissances, allant de petits appareils de climatisation individuels d'une

puissance frigorifique unitaire de quelques kW, jusqu'aux très grosses unités considérées ici, avec des puissances thermiques pouvant atteindre plusieurs dizaines de MW. Les petites machines utilisent conventionnellement des technologies à « détente directe », avec des compresseurs « scroll » ou à pistons, et des fluides frigorigènes à relativement haute pression, typiquement le HFC R-410A, ou encore le HCFC R-22 dans les pays en développement. A l'inverse, les grosses machines sont des systèmes indirects (« chillers »), avec des compresseurs le plus souvent centrifuges, ou éventuellement à vis, utilisant traditionnellement des fluides à moyenne pression tels que le HFC R-134a, ou à basse pression comme le HCFC R-123. Cependant, en raison des contraintes environnementales, l'utilisation des quatre fluides susmentionnés (HFC R-410A et R-134a, HCFC R-22 et R-123) est aujourd'hui remise en cause, avec des interdictions pour les HCFC, et des restrictions pour les HFC.

4.2 Fluides alternatifs

Comme indiqué au §-2.1, les alternatives possibles sont des fluides naturels, ou des fluides

« HFO » de synthèse à plus bas GWP, utilisés purs ou comme composants de mélanges pouvant contenir aussi des HFC. Le tableau 1 ci-dessous donne un aperçu des principaux fluides ou familles de fluides envisageables comme alternatives aux quatre fluides « conventionnels ». Dans ce tableau sont mentionnés pour mémoire des mélanges avec glissement de température (« glide » en anglais), mais ils ne sont guère utilisables pour les applications considérées ici, comme expliqué plus loin. Dans les fluides « alternatifs » est également introduite une distinction entre les fluides dits de « drop-in », qui peuvent être utilisés en remplacement dans des machines existantes sans modifications substantielles et avec des performances quasi-équivalentes, et les fluides « similaires » ; pour ceux-ci, les performances sont du même ordre de grandeur (de l'ordre de +/- 20% sur la puissance frigorifique avec un rendement similaire à quelques pourcent près) ; la classe d'inflammabilité peut également être différente de celle du fluide de base, comme indiqué par les codes de couleurs.

Fluides "de base"	Fluides Alternatifs (1)	
	"Drop-In"	"Similaire"
R-123	R-514A	R-1233zd ; R-1336mzz(Z) et (E)
R-134a	R-513A	R-450A; R-1234ze
R-22	Mélanges HFC/HFO	NH3; R-290 (Propane)
R-410A	avec "glide" (2)	R-32; Mélanges avec "glide"

(1) Code de couleurs de classes d'inflammabilité: Forte, réduite, ou non inflammable.

(2) Certains mélanges alternatifs au R-22 sont inflammables, d'autre pas.

Tableau 1

4.2.1 Analyse théorique de fluides

Pour évaluer ces divers fluides, une première approche consiste à les analyser d'un point de vue théorique par le biais de calculs sur les cycles thermodynamiques. Si l'on compare des fluides à basse pression tels que le R-123 ou ses alternatives, et des fluides à haute pression tels que le R-410A ou ses alternatives, on constate que les fluides à basse pression ont un rendement de cycle sensiblement meilleur (de l'ordre de 10%), mais requièrent un débit volume de fluide beaucoup plus important, de l'ordre de dix à quinze fois plus. Entre ces deux extrêmes, on observe une tendance relativement linéaire entre le débit volume et le rendement. Il y a donc en général un compromis à trouver : les fluides à plus

basse pression tendent à avoir un meilleur rendement, mais leur plus fort débit volumétrique nécessite des machines plus volumineuses, et souvent plus coûteuses.

Des résultats de calcul de cycle sont présentés par la figure-1. Les conditions de calcul sont typiques de chillers avec refroidissement à eau, soit des températures saturantes d'évaporation et condensation de 5 et 35°C, avec un sous-refroidissement liquide de 4 K, et une compression à simple étage de rendement isentropique 0,8. L'axe vertical est représentatif du rendement de cycle, et l'axe horizontal représente la puissance volumétrique.

On constate ici le rendement médiocre des fluides à haute pression R-410A et R-32. Le R-22 présentait un compromis

très favorable entre débit volume et rendement. Il n'y a pas à ce jour de fluide de synthèse, pur ou en mélange sans « glide », présentant des caractéristiques similaires au R-22. L'ammoniac présente un potentiel théorique très intéressant, mais avec des contraintes de sécurité assez fortes ainsi que des contraintes technologiques sur les compresseurs (à vis) et les échangeurs, qui ne lui permettent pas toujours de réaliser pleinement son potentiel. Malgré une puissance un peu plus faible, le propane serait théoriquement envisageable, mais d'une utilisation restreinte du fait de son inflammabilité. On constate, enfin les excellents rendements permis par le groupe des fluides à basse pression. (Voir figure 2)

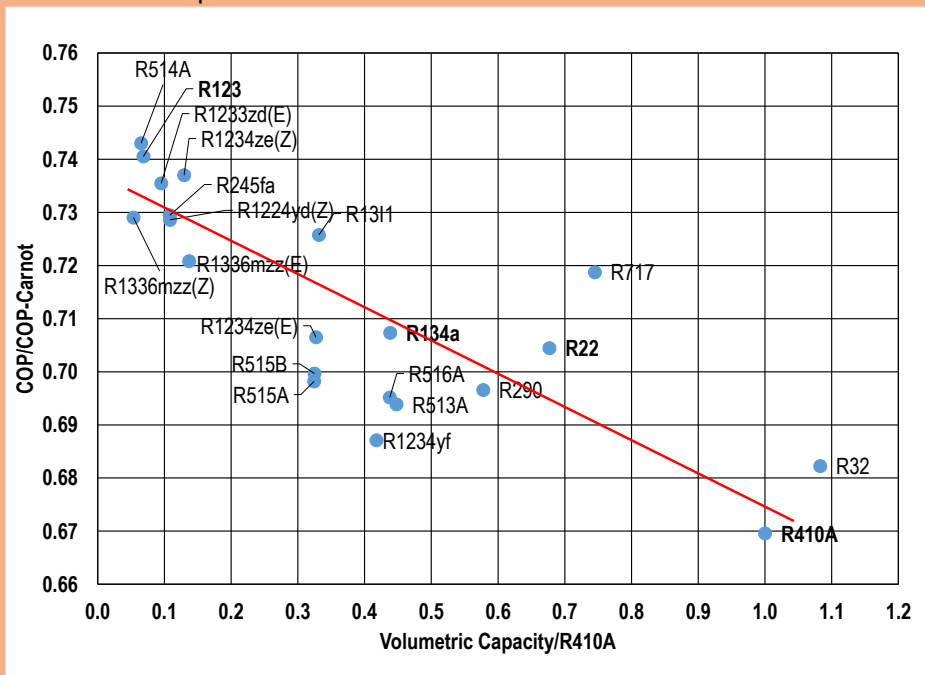


Figure-2 Positionnement des fluides par rapport au 410A

De ces résultats de calculs se dégagent des tendances fortes, très éclairantes pour orienter le choix des fluides. Mais comme indiqué plus haut, ces tendances peuvent être modulées par de nombreux facteurs relatifs à la mise en œuvre de ces fluides. Elles ne peuvent donc se substituer à des calculs complets de sélection des machines dans toutes leurs conditions de fonctionnement réelles.

4.2.2 Technologies utilisées

Comme indiqué au §-2.4, l'efficacité énergétique est un impératif majeur pour les réseaux de distribution d'énergie ; mais les fluides à haute pression ne permettent pas d'atteindre les efficacités énergétiques recherchées. C'est pourquoi le R-410A n'est quasiment pas utilisé pour ces applications. L'efficacité énergétique requiert également des échangeurs de chaleur à très hautes performances. Pour ce faire, la technologie dominante est celle des échangeurs multitubulaires avec circulation d'eau à l'intérieur des tubes, et équipés de tubes cuivre à surfaces d'échange améliorée. Pour les évaporateurs, la technologie des évaporateurs noyés est encore largement utilisée, mais de plus en plus supplantée par des évaporateurs à film tombant (« falling film »), qui offrent de meilleures performances dans un volume réduit et avec de plus faibles charges de fluides. Dans l'ensemble, ces échangeurs avec évaporation ou condensation à l'extérieur des tubes ne sont pas adaptés pour les fluides avec « glide »,

qui présentent dans ces configurations de fortes pénalités de transfert thermiques. Pour des telles applications, les fluides purs ou mélanges azéotropiques sont donc de facto quasi impératifs.

A ce jour, le fluide largement dominant est le R-134a, qui a bénéficié de l'élimination de ses deux « concurrents » potentiels qu'étaient les HCFC R-123 et R-22. Des alternatives au R-134a sont maintenant disponibles, notamment les R-1234ze, et le R-450A, de puissance légèrement inférieure au R-134a avec un PRG quasi-nul, mais légèrement inflammable et avec un léger glissement de température. Autre alternative, le R-513A est, lui, ininflammable mais avec a un PRG un peu supérieur (de l'ordre de 600). Il peut être utilisé en remplacement direct du R-134a avec des performances très proches. Pour des pressions plus basses, des alternatives au R-123 sont également disponibles, telles que les R-1233zd(E), R-1224yd(Z), R-1336mzz(E) ou 1336mzz(Z), qui permettent une excellente efficacité énergétique, avec en plus un PRG quasi nul, et l'avantage d'être ininflammables. Le R-1233zd(E) et ses équivalents sont donc extrêmement attractifs, mais trouvent leurs limites pour les machines de forte puissance par comparaison avec le R-134a ou ses alternatives, du fait de son encombrement supérieur. Le R-1233zd a l'avantage d'un meilleur rendement théorique ; mais si l'on ne veut pas en perdre le bénéfice par des

pénalités de pertes de charge élevées, les machines deviennent extrêmement volumineuses, ce qui peut être prohibitif selon les contraintes d'installation évoquées au §-2.2. Dans la pratique, une puissance unitaire de l'ordre de 5 à 6 MW pourrait constituer une limite haute pour l'utilisation rationnelle de tels fluides à basse pression.

Ces fluides à moyenne à moyenne pression, et à fortiori à basse pression nécessitent des débits volumes importants, particulièrement pour les fortes puissances nécessaires. Se prêtant bien aux forts débits volumétriques, les compresseurs centrifuges sont de ce fait très largement dominants. La plupart de ces compresseurs sont à un seul étage, mais des machines à deux ou trois étages sont également proposées. Beaucoup d'entre elles sont à vitesse variable, et un nombre croissant sont équipées de paliers magnétiques. Un autre avantage des compresseurs centrifuges est qu'ils s'adaptent extrêmement bien aux conditions de puissance et de température de condensation variable, particulièrement s'ils sont associés à un entraînement à vitesse variable et à des paliers magnétiques. Ceci leur confère une remarquable flexibilité pour optimiser le rendement selon les conditions.

L'ammoniac est également utilisé pour certaines applications, mais exclusivement avec des compresseurs à vis, ce fluide se prêtant mal à la compression par des machines centrifuges. Il

est également incompatible avec les matériaux cuivreux, et requiert de faibles charges de fluide frigorigène pour raisons de sécurité. La tendance est donc d'utiliser des échangeurs à plaques en acier inoxydable, ou des échangeurs hybrides de technologie à plaques et virole. L'utilisation de l'ammoniac est particulièrement en vogue dans les pays nordiques. Sa combinaison avec les compresseurs à vis le rend également bien adapté aux applications de stockage de glace qui requièrent des écarts de température importants.

5 Les applications de PAC

5.1 Domaines d'application

Le champ des applications possibles des PAC est très étendu. Comme indiqué au §-3.3, les sources de chaleur peuvent être à une température basse, proche de 0°, alors que les températures requises du côté chaud peuvent approcher les 100°. Mais dans la pratique, les PAC ne sont pas utilisées avec de tels écarts, car le COP deviendrait inacceptable, rendant cette technologie injustifiable. En pratique, un écart de l'ordre de 50 K entre les températures d'évaporation et de condensation est une limite pratique rarement dépassée, sauf pour les thermofrigopompes ; mais le « calage » de cet écart est très variable selon les applications ; par exemple entre 5 et 55°C pour des applications à relativement basse température, ou entre 40 et 90°C pour des températures plus élevées. Il reste que les plages de températures de

fonctionnement sont beaucoup plus larges que pour les machines de refroidissement, ce qui peut nécessiter l'emploi d'une palette de fluides frigorigènes plus étendue.

5.2 Fluides alternatifs

Pour les applications à température relativement basse (jusque vers 60 à 70°C), les fluides pour les PAC ne diffèrent pas sensiblement de ceux utilisés en climatisation. Pour les plus hautes températures, la tendance générale est d'utiliser des fluides à plus basse pression, ce qui permet de garder des pressions de fonctionnement compatibles avec les compresseurs existants malgré l'élévation des températures. De plus, les fluides à basse pression ont en général une température critique plus élevée, au moins pour les fluides organiques que sont les hydrocarbures et les fluides synthétiques. Or, le rendement des cycles frigorifiques se dégrade lorsque la température de condensation approche de la température critique. L'utilisation de fluides à plus basse pression permet donc à la fois de limiter les pressions de service, et d'optimiser les rendements.

Dans la gamme des fluides à basse pression utilisés en climatisation, le R-123 se prêtait mal aux PAC à haute température (de 75 à 120°C environ), en raison d'une stabilité chimique insuffisante. Pour ces applications, le HFC R-245fa a été particulièrement utilisé pour compléter la gamme des fluides. Il est ininflammable et bénéficie

d'un GWP assez modéré (1030). Comme pour la climatisation, les fluides à basse pression tels que le R-1233zd(E), ou les R-1336mzz(E) ou (Z) ont des propriétés assez proches ; cependant, la stabilité de ces fluides aux températures élevées doit être considérée avec vigilance ; des additifs stabilisateurs peuvent être requis.

Pour des températures de 70 à 90°C environ, le HFO R-1234ze présente également un intérêt particulier avec des propriétés intermédiaires entre le R-134a et le R-245fa, qui en font un compromis particulièrement attractif à ces températures.

L'ammoniac est également très intéressant à ces niveaux de température. Fluide inorganique, il a une température critique nettement plus élevée que les fluides organiques nécessitant un débit volumétrique comparable, ce qui lui confère une excellente efficacité énergétique. Sa pression aux températures élevées est largement supérieure aux pressions de service habituelles en climatisation, ce pourrait constituer un handicap ; mais l'ammoniac bénéficie des efforts effectués depuis une vingtaine d'années pour développer des compresseurs à haute pression destinés à la compression de CO₂ pour des cycles trans-critiques. De ce fait, l'ammoniac est maintenant largement utilisé avec d'excellents rendements pour des températures de condensation de l'ordre de 85°C. En outre, la récupération de la chaleur de désurchauffe, particulièrement élevée sur ce

fluide, permet de remonter la température de sortie d'eau légèrement au-dessus de la température de condensation, permettant des températures de sortie d'eau pouvant atteindre jusqu'à 90°C.

5.3 Technologies

Comme pour les fluides, les technologies de compresseurs et d'échangeurs sont assez similaires à celles de la climatisation pour les PAC à relativement basse température. Lorsque la température s'élève, des problèmes spécifiques apparaissent, particulièrement liés à la lubrification des machines en raison de l'absorption de fluide frigorigène par les huiles, source de baisses de viscosité, moussage d'huile intempestif etc. De ce fait, l'utilisation de compresseurs centrifuges à des températures d'évaporation supérieures à 30°C environ peut nécessiter des adaptations particulières, tout comme pour les machines à vis avec des températures de condensation supérieures à 90°C environ.

Comme en climatisation, la technologie centrifuge est largement la plus répandue pour les machines de forte puissance généralement utilisées pour les réseaux de chaleur. L'ammoniac fait là aussi exception ; n'étant pratiquement pas utilisable avec les compresseurs centrifuges, il requiert des machines à pistons ou à vis, ces dernières étant les plus généralement utilisées pour les réseaux de chaleur.

Un cas particulier est celui des thermofrigopompes. Utilisant à la fois le froid et le chaud, elles peuvent présenter des écarts importants, de l'ordre de 80 K, entre les températures d'évaporation et de condensation.

Les compresseurs à vis se prêtent bien aux taux de compression élevés qui en résultent. Les compresseurs centrifuges sont également utilisables, mais requièrent une compression en deux étages au moins, sinon plus. Pour les fortes puissances, des compresseurs centrifuges industriels multiétages à trois, voire quatre étages, sont couramment utilisés. Cette compression en plusieurs étages permet également des améliorations de cycle thermodynamique par l'usage « d'intercoolers », qui permettent de garder des rendements intéressants même à l'approche du point critique des fluides.

6/ Conclusions

Les réglementations environnementales récentes remettent en question l'utilisation des fluides traditionnellement utilisés notamment pour les chillers et PAC des réseaux d'énergie. Ceci a suscité l'émergence de solutions nouvelles qui apportent des avantages marquants par rapport aux technologies antérieures. Un exemple est celui de la toute dernière génération de machines centrifuges au R-1223zd(E), qui offrent une efficacité énergétique supérieure avec un fluide ininflammable et ayant un PRG

quasi-nul ; mais au prix, il est vrai, d'un encombrement supérieur. De même, pour les PAC à haute température, la nouvelle génération de PAC à l'ammoniac apporte des avantages indéniables, ainsi que l'utilisation du R-1234ze, de caractéristiques assez proches du R-134a, mais permettant d'atteindre des températures plus élevées que celui-ci avec des caractéristiques par ailleurs assez comparables. La contrainte dans ces deux derniers cas est d'avoir à utiliser un fluide inflammable, et de plus toxique pour l'ammoniac ; mais l'avantage fonctionnel est réel et peut être déterminant pour accepter et surmonter les contraintes.

Il est cependant d'autres cas où la tendance à abaisser le PRG des fluides conduit à des choix plus problématiques. Dans le cas par exemple du R-134a, rien n'interdit réglementairement de continuer à l'utiliser, mais une certaine réticence à cette utilisation se fait jour, alimentée par divers facteurs objectifs ou subjectifs. Certains craignent un durcissement de futures régulations, ou des difficultés pour assurer la maintenance des machines jusqu'à la fin de leur durée de vie normale. Il est certes contraire à l'intention déclarée des législateurs d'abrèger la durée de vie des équipements ; mais il est de fait que la réglementation européenne a eu pour effet une forte augmentation du prix des HFC en général, et même une pénurie des produits à très fort

PRG comme le R-404A, qui a pu nourrir des craintes sur la future maintenance de certains systèmes.

Il serait très dommageable que de telles inquiétudes ne conduisent ~~dans certains cas~~ à remettre en cause dans certains cas le principe des solutions réseau très performantes, sous prétexte de chasse au PRG. Ce serait également paradoxal: sur des chillers bien entretenus, surtout avec des paliers magnétiques, des fuites de fluides de l'ordre de 0.5% par an sont un objectif parfaitement réaliste. Avec récupération quasi-totale en fin

de vie, à peine 15% de la charge initiale partira à l'atmosphère sur une durée de vie de 30 ans !

Ceci a deux conséquences, relatives à la maintenance des machines et aux émissions de GES. Pour la maintenance, la minimisation des fuites reste un objectif essentiel... et en général déjà atteint sur ce type d'installations. Il en résulte que la contrainte relative aux appoints de charge ultérieurs est faible, tant en termes de coûts que de sécurité d'approvisionnement. Ceci est d'autant plus vrai lorsque des solutions alternatives existent, comme par exemple une future

conversion au R-513A d'installations fonctionnant initialement au R-134a.

Concernant les émissions de GES, la conséquence est qu'en équivalent CO₂, les fuites de fluide ne représentent qu'une part infime des émissions liées à l'énergie, et ceci quels que soient le fluide utilisé. Sans minimiser l'importance du choix des fluides, il reste donc que l'optimisation de l'efficacité énergétique et la rigueur dans la prévention des fuites sont les deux facteurs essentiels pour atteindre réellement les objectifs recherchés.

Bibliographie

[1] de Larminat & Wang, "Overview of Fluids for A/C Applications, Part 2" – ASHRAE Journal, Février 2017.