

Optima technico-économiques d'installations frigorifiques selon leur réfrigérant

Ing. L. PAQUET
Dr Ir. V. HANUS
PIERRARD – Virton

De par la législation européenne, les réfrigérants utilisés actuellement sont appelés à disparaître. Cet article a, dès lors, pour but de comparer d'un point de vue technique et économique plusieurs solutions possibles pour une même installation frigorifique de manière à déterminer vers quels réfrigérants s'orienter dans le futur pour les chambres froides.

Mots-clefs : réfrigérants, installation frigorifique, technique et économique.

Following European policies, the refrigerating fluids which are used nowadays are going to disappear. The purpose of this article is to compare, from a technical and economic view, several possible solutions for a frigorific installation in order to determine which refrigerating fluids should be used in the future for cooling rooms.

Keywords : refrigerating fluids, frigorific installation, technical and economic.

1. Introduction

Le présent article traite de la problématique des gaz réfrigérants à l'heure actuelle. En effet, du fait de la législation environnementale européenne de plus en plus stricte, les réfrigérants actuels sont appelés à disparaître d'ici peu pour être remplacés par des substituts. Le problème qui demeure est de savoir lesquels parmi ces derniers seraient les plus avantageux en fonction de l'application à laquelle ils sont destinés. Le but de cet article est donc de tenter de répondre à cette question par le dimensionnement de 7 chambres froides sur un chantier du C.H.U. de Liège.

2. Interdictions et politique des quotas

Comme mentionné auparavant, les normes environnementales sont de plus en plus strictes. Les fluides frigorigènes qui ont un impact sur l'environnement (destruction de la couche d'ozone pour les CFC¹ et les HCFC² et réchauffement climatique pour les CFC, les HCFC et les HFC³) sont donc soumis à de nombreuses législations (contrôle d'étanchéité, installation par des frigoristes uniquement, etc.) et des mesures visant à leur interdiction sont mises en place :

- Le 1^{er} janvier 2015 voit l'apparition de l'interdiction de mise sur le marché de systèmes domestiques pour lesquels le gaz utilisé aurait un pouvoir de réchauffement global (GWP⁴) supérieur à 150.
- Le 1^{er} juillet 2016, la récupération et la destruction des CFC deviennent obligatoires, y compris pour les gaz contenus dans des équipements. Seuls les systèmes étanches et sans orifice de recharge échappent à cette mesure à condition qu'un test d'étanchéité soit effectué chaque année.
- En 2020, il est prévu l'interdiction de mise sur le marché de systèmes pour la réfrigération commerciale avec un GWP>2500. En outre, il sera également interdit d'utiliser des fluides ayant un GWP>2500 pour la maintenance de systèmes de réfrigération contenant une quantité de fluide de plus de 40 tonnes équivalents CO₂ (soit 16 kg d'un fluide ayant un GWP de 2500).
- 2022 verra la fin de mise sur le marché de systèmes contenant des HFC, car la limite maximale de PRG autorisée pour les systèmes de réfrigération neufs passera à 150 (ce qui est inférieur à tous les HFC existants).

¹ CFC : chlorofluorocarbure

² HCFC : hydrofluorocarbure

³ HFC : hydrofluorocarbure

⁴ Le global warming potential (GWP) ou, en français, potentiel de réchauffement global (PRG) est le rapport entre l'effet sur le réchauffement climatique dû à un fluide frigorigène et celui dû au CO₂ à quantité égale de matière sur une période de temps définie (par défaut, 100 ans).

- En ce qui concerne les HCFC, leur disparition est prévue pour 2020 dans les pays industrialisés et pour 2030 dans les pays en voie de développement.

L'approche de ces interdictions a pour conséquence une diminution progressive des quantités de gaz mise sur le marché et donc une augmentation des prix via une politique de quota.

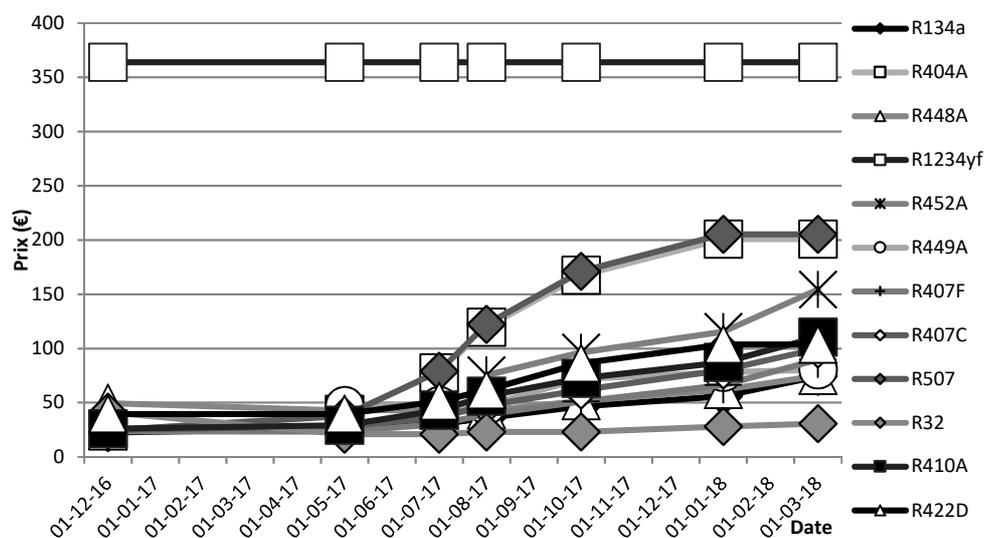


Figure 1 : Évolution du prix brut HTVA (en €) des réfrigérants entre décembre 2016 et mars 2018

Sur la figure 1, on peut voir l'évolution, entre décembre 2016 et mars 2018, du prix de certains réfrigérants. On peut observer que les réfrigérant ayant un fort GWP voient une forte augmentation de leur prix entre la fin de l'année 2016 et mars 2018 (le R404A et le R507 par exemple). On peut aussi voir que le R1234yf a un prix constant sur la période étudiée. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'un HFO (hydrofluorooléfine) qui est encore peu utilisé.

3. Présentation des réfrigérants [1-7]

3.1. Chlorofluorocarbures (CFC)

Il s'agit des hydrocarbures halogénés de première génération. Ils font leur apparition en 1930 et sont alors une véritable révolution dans le domaine de la production de froid. Cependant, en 1980, les scientifiques découvrent que le chlore contenu dans ces composés affecte énormément la couche d'ozone. Plus tard, il apparaîtra

qu'ils participent également à l'effet de serre. De nouveaux réfrigérants sont dès lors apparus : les HCFC.

3.2. Hydrofluorocarbures (HCFC)

Les hydrocarbures halogénés de deuxième génération comportent de l'hydrogène dans leur formule chimique, ce qui fait qu'ils contiennent moins de chlore, et qu'ils attaquent moins la couche d'ozone que leurs prédécesseurs. Toutefois, leur impact sur la couche d'ozone n'étant pas encore négligeable, une troisième génération voit le jour : les HFC.

3.3. Hydrofluorocarbures (HFC)

Ces hydrocarbures halogénés ne possèdent plus d'atomes de chlore et ne participent donc plus à la destruction de la couche d'ozone. En outre, ils présentent une efficacité énergétique supérieure à celle des CFC pour des propriétés techniques fort proches. Étant donné leur contribution à l'effet de serre, il a cependant été décidé de diminuer progressivement leur utilisation jusqu'à leur suppression complète. Plusieurs solutions sont maintenant susceptibles de s'imposer : les HFO, les hydrocarbures et les fluides inorganiques.

3.4. Hydrofluorooléfines (HFO)

Ces hydrocarbures halogénés de quatrième génération sont constitués d'un squelette carboné contenant au moins une double liaison. Cela les différencie des HFC qui n'en possèdent pas. De plus, ils ont l'avantage, par rapport à ces derniers, d'avoir un PRG très faible : la double liaison assure une décomposition rapide une fois relâché dans l'atmosphère.

3.5. Hydrocarbures

Ce sont des composés organiques constitués uniquement d'atomes d'hydrogène et de carbone. Ils possèdent de bonnes propriétés thermodynamiques mais sont hautement inflammables. Il est donc nécessaire de prendre des précautions lors de leur utilisation. Les 3 fluides de cette catégorie utilisés comme réfrigérants sont le propane, le butane et l'isobutane.

3.6. Ammoniac (NH₃)

Il s'agit de l'un des premiers réfrigérants à avoir été utilisé dans les cycles frigorifiques. En effet, il possède de nombreux avantages en tant que tel et permet d'obtenir un coefficient de performance (COP) très élevé. On l'utilise principalement dans les installations industrielles commerciales. Néanmoins, bien qu'on

l'utilise depuis 1860, il s'agit d'un composé toxique et irritant qui peut présenter des risques d'explosions dans certaines conditions. Par ailleurs, il est corrosif pour le cuivre et ses alliages, ainsi que pour le zinc. Il nécessite donc l'utilisation de tuyauteries en acier.

3.7. Dioxyde de carbone (CO₂)

Étant donné que l'impact environnemental des gaz est calculé en prenant le CO₂ comme base, celui-ci se révèle intéressant car son PRG vaut 1. Il fait donc son retour en tant que gaz réfrigérant. Cependant, l'utilisation de ce gaz implique de surmonter de nombreux problèmes. En effet, non seulement il nécessite des compresseurs qui consomment plus d'électricité que ceux utilisés avec d'autres fluides, mais en plus, les pressions d'utilisations de ce gaz sont très élevées (de l'ordre de 80 bars) et il faut donc refaire les installations avec des tuyauteries plus épaisses. Par ailleurs, le CO₂ ayant une température critique très basse (31°C), il nécessite de travailler en cycle transcritique⁵.

4. Les chambres froides

Les chambres froides sont des locaux à basse température qui permettent de conserver divers produits tels que les vaccins, les aliments, etc. On peut retrouver deux types de chambres froides :

- Les chambres positives dont la température intérieure est supérieure à 0°C.
- Les chambres négatives dont la température intérieure est inférieure à 0°C.

4.1. Principe

La production de froid fonctionne grâce au principe des cycles frigorifiques qui permettent de refroidir un milieu froid tout en réchauffant un milieu chaud au travers d'une dépense d'énergie mécanique, celle-ci étant d'origine électrique.

4.2. Fonctionnement

Les cycles frigorifiques fonctionnent suivant 4 étapes (voir figure 2) :

- Compression : Le fluide à l'état gazeux arrive à basse pression et basse température. Le compresseur permet ensuite d'augmenter la pression et la température du gaz via un apport de travail au système. La température de condensation⁶ s'en trouve augmentée. En effet, cette dernière est fonction

⁵ Cycle thermodynamique dans lequel le fluide utilisé peut se trouver en-dessous et au-dessus de son point critique.

⁶ Température à laquelle le fluide passe de l'état gazeux à l'état liquide.

de la pression du fluide. Le fluide circule dans le circuit grâce à la différence de pression.

- Condensation : Une fois le gaz comprimé, il entre dans le condenseur où il cède sa chaleur à un autre fluide (tel que l'air ou l'eau) qui a une température moindre. En effet, lorsque 2 corps sont mis en présence l'un de l'autre, le plus chaud cède de l'énergie au plus froid sous forme de chaleur ; lorsqu'il a cédé suffisamment de chaleur, le réfrigérant passe à l'état liquide (du fait de sa pression élevée, il condense à une température élevée).
- Détente : La détente est le principe inverse de la compression. En effet, lors de cette troisième étape, la pression du fluide diminue, et avec elle, le point d'évaporation.
- Évaporation : À l'intérieur de l'évaporateur, le fluide frigorigène emmagasine de la chaleur en s'évaporant grâce à l'énergie cédée par l'air se trouvant à l'intérieur de la chambre froide. Cela permet à cette dernière de rester à basse température. Il est à noter que cette opération s'effectue à pression constante. L'évaporateur doit être dimensionné pour que la chambre cède une quantité voulue d'énergie. En effet, si elle cède trop de chaleur, elle est à une température trop basse et à l'inverse, si elle n'en cède pas assez, il fait trop chaud à l'intérieur. Une fois sorti de l'évaporateur, le fluide se dirige vers le compresseur et le cycle recommence.

Une surchauffe et un sous-refroidissement peuvent également être introduits afin de s'assurer que tout le fluide soit gazeux après l'évaporation et qu'il soit entièrement liquide après la condensation.

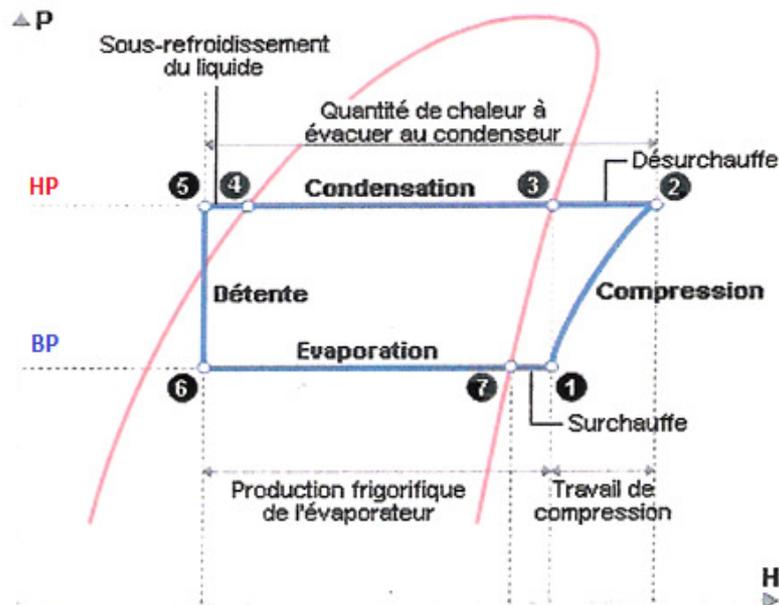


Figure 2 : Diagramme pression-enthalpie d'un cycle frigorifique [8]

5. Installation étudiée

Le C.H.U. de Liège, dans une phase d'expansion, a commandé la construction d'un nouveau bâtiment. Ce dernier doit être pourvu de 7 chambres froides qui serviront à conserver divers produits (vaccins, sang, organes, etc.). Elles sont réparties sur 3 étages différents : il y a 2 chambres à l'étage -4 (CF1 et CF2), 2 autres (CF3 et CF4) se situent à l'étage 1 et les 3 dernières sont à l'étage 2. Le tableau 1 reprend les caractéristiques de chacune de celles-ci : les puissances sont obtenues via un bilan thermique des pièces, avec un fonctionnement journalier de 16 heures du compresseur.

	Température intérieure	Besoin frigorifique (W)	Dimensions (m)	Volume (m ³)
CF1	4°C	1897	4,5 x 2,4 x 2,1	22,7
CF2	-20°C	4151	2,7 x 2,4 x 2,1	13,6
CF3	4°C	1855	3,9 x 2,7 x 2,1	22,1
CF4	-20°C	4194	2,7 x 2,7 x 2,1	15,3
CF5	4°C	3053	4,8 x 4,5 x 2,1	45,4
CF6	-20°C	4238	4,8 x 1,5 x 2,1	15,1
CF7	-30°C	1398	1,2 x 1,5 x 2,1	3,8

tableau 1 : Caractéristiques des chambres froides étudiées dans cet article

Plusieurs contraintes sont prises en compte lors des dimensionnements des composants nécessaires au fonctionnement des installations. Il faut, en effet, tenir compte des longueurs de tuyauteries, de l'encombrement du toit par les compresseurs mais aussi du bruit et de l'aspect esthétique. Au niveau technique, les logiciels des fabricants permettent de choisir séparément tous les composants au moyen d'un cycle modélisé comme suit :

- La température d'évaporation est inférieure de 8 à 9 K à la température de la chambre froide, et la surchauffe choisie est de 7 K.
- La température de condensation est choisie égale à 38°C, avec 3K de sous-refroidissement.

6. Comparaison des solutions collectives et individuelles

6.1. Solutions collectives et individuelles [9]

La différence entre ces deux solutions réside dans le nombre de compresseurs et de condenseurs utilisés pour l'ensemble de l'installation. En effet, on parle de centrale frigorifique (solution collective) lorsqu'un même compresseur comprime le fluide alimentant plusieurs chambres. Lorsqu'on choisit cette option, le compresseur doit

être suffisamment puissant pour alimenter l'ensemble des chambres choisies. On se retrouve alors avec un condenseur qui reprend les gaz en sortie de compresseur. Une fois redevenu liquide, le fluide frigorigène est détendu puis envoyé dans les évaporateurs de chacune des chambres.

La seconde solution, quant à elle, nécessite un compresseur individuel par chambre, d'où son appellation de solution individuelle.

6.2. Comparaison

Afin de pouvoir comparer laquelle des deux solutions mentionnées ici est la plus intéressante, les dimensionnements ont été effectués en utilisant un même réfrigérant (R448A) pour chacune d'elles. Ainsi, pour la première solution, le choix s'est porté sur trois compresseurs différents (car il y a trois températures intérieures différentes) et sur un condenseur commun à toutes les chambres, tandis que, pour la seconde, on retrouve 7 groupes de condensation⁷. On peut remarquer sur le tableau 2 que la solution sous forme de centrale est plus intéressante que les compresseurs individuels et permet d'économiser environ 3500 € pour l'installation étudiée.

	Compresseur	Condenseur	Evaporateur	Détendeur	Accessoires
Centrale	3987€	2442€	5150€	443€	3333€
Individuel	9995€	/	5150€	443€	3333€

Tableau 2 : Comparatif des coûts pour une solution collective et une combinaison de solutions individuelles

7. Fronts de Pareto

Le front de Pareto est l'ensemble des solutions les plus intéressantes lorsqu'on cherche à maximiser un rapport entre deux caractéristiques. Ici, les caractéristiques prises en compte sont le prix de l'installation (coût d'investissement) et son COP (lié au coup de fonctionnement). Plusieurs fluides peuvent donc convenir en fonction de la combinaison de caractéristiques que le client veut maximiser : soit le prix en dépit de la performance, soit l'inverse.

7.1. Chambres positives

La figure 3 reprend le front de Pareto pour les dimensionnements effectués avec différents gaz pour l'ensemble des 3 chambres positives de l'installation. On peut voir que selon le graphique, les réfrigérants les plus adaptés pour les chambres positives sont le R134a, le R450A, le R1234ze et l'ammoniac.

⁷ Il s'agit d'un compresseur groupé avec un condenseur.

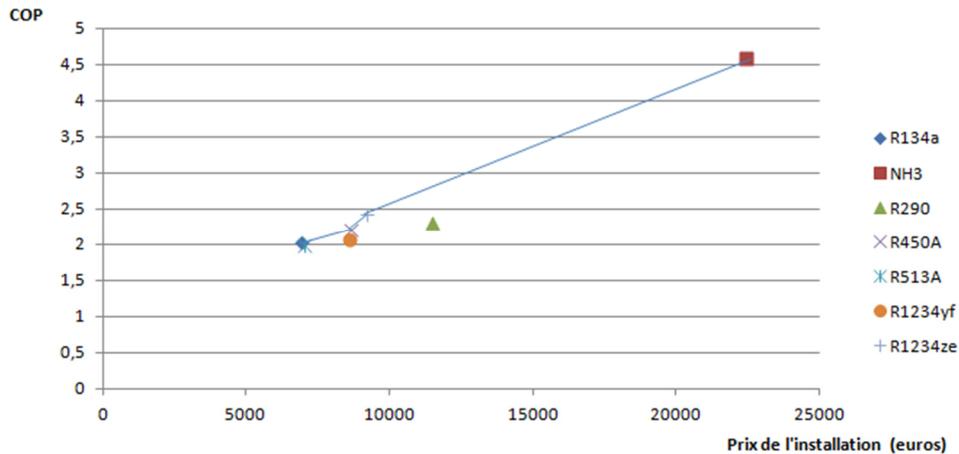


Figure 3 : Rapport COP/prix pour les chambres positives

7.2. Chambres négatives

La figure 4 reprend le front de Pareto pour les dimensionnements effectués avec différents gaz pour l'ensemble des chambres négatives de l'installation. On peut voir que selon le graphique, les réfrigérants les plus adaptés pour les chambres négatives sont le R448A, le R449A et les solutions reprenant le propane et un autre gaz pour la chambre à -30°C (le R449A ou le CO_2).

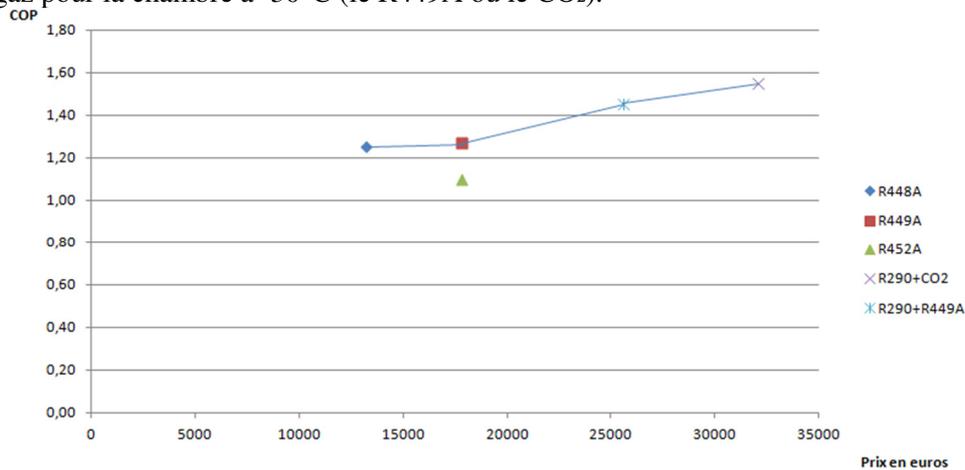


Figure 4 : Rapport COP/prix pour les installations en froid négatif

7.3. Toutes les solutions

Sur la figure 5, on peut voir le front de Pareto pour l'ensemble de l'installation dont le dimensionnement a été effectué avec différents gaz. Selon le graphique, les solutions optimales sont les centrales au R448A, au R449A et l'ammoniac.

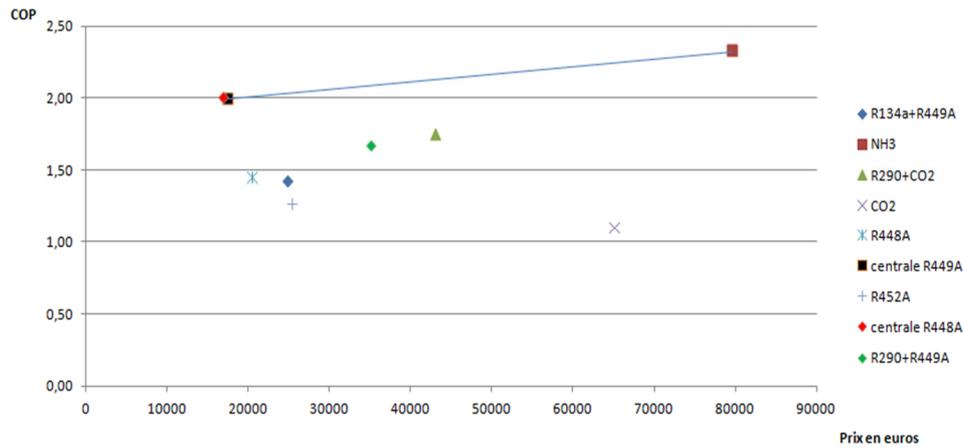


Figure 5 : rapport COP/prix pour les solutions globales

8. Perspectives en 2022

En conclusion, on remarque qu'il existe diverses alternatives aux HFC qui, bien que difficile à mettre en œuvre, permettront de continuer à utiliser les chambres froides.

On remarque également dans cet article que les solutions sous forme de centrales sont plus intéressantes au point de vue rapport prix/COP que les solutions individuelles.

Par ailleurs, en 2022, plusieurs fluides seront interdits. Les fronts de Pareto exposés sur les figures ci-dessus changeront donc, car les réfrigérants ne seront plus les mêmes. Cela se traduit par une diminution des choix de réfrigérant possibles pour chacune des trois applications possibles.

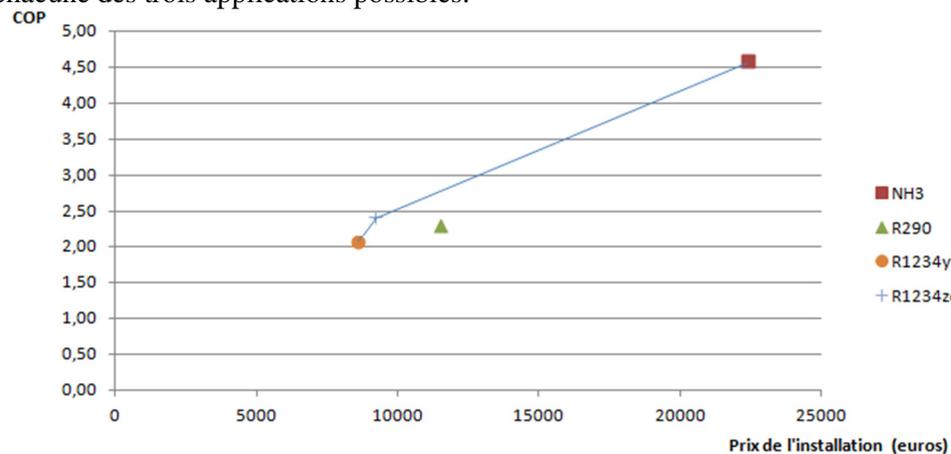


Figure 6 : Rapport COP/prix pour les chambres positives

8.1. Chambres positives

On peut donc remarquer sur la figure 6 que le R1234yf, le R1234ze et l'ammoniac seront les solutions optimales pour les installations reprenant uniquement des chambres positives.

8.2. Chambres négatives

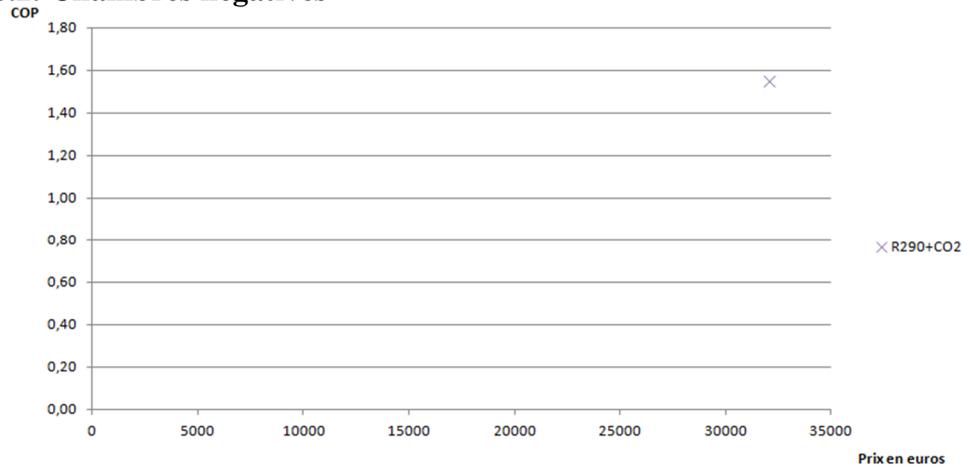


Figure 7 : Rapport COP/prix pour les installations en froid négatif

Pour les installations reprenant uniquement des chambres négatives, la seule solution qui demeure est la solution au propane avec la chambre à -30°C qui fonctionne au CO_2 .

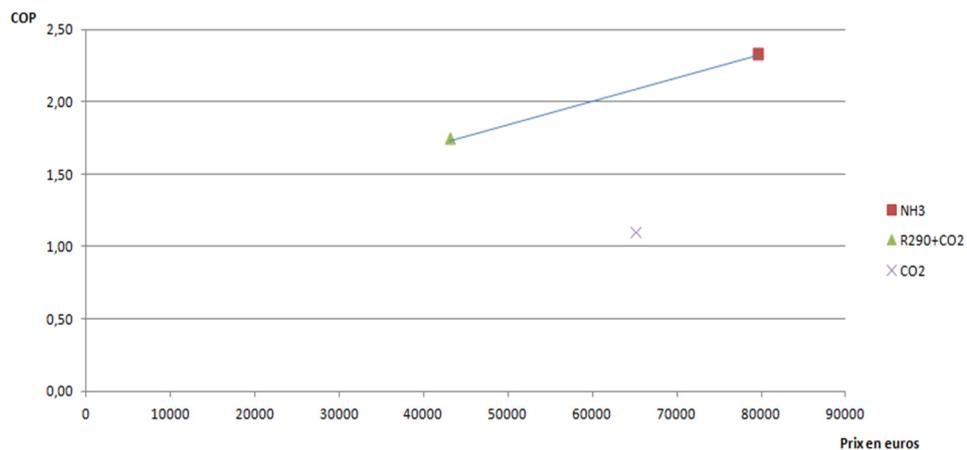


Figure 8 : Rapport COP/prix pour les solutions globales

8.3. Toutes les solutions

En 2022, on peut voir sur la figure 8 que si l'on choisit de favoriser le prix au dépend des performances, la solution reprenant le propane et le CO₂ est la plus intéressante. Toutefois, si la performance est ce que l'on choisit de favoriser, alors l'ammoniac est la meilleure solution.

9. Conclusion

En 2018, on constate au tableau 3 que pour un dimensionnement reprenant uniquement des chambres positives, le R134a est la solution la moins chère, tandis que l'ammoniac est la solution la plus performante pour le prix le plus élevé. Pour une installation de chambres négatives uniquement, le R448A est la solution la moins chère tandis que la solution reprenant le propane et le CO₂ est la plus performante. Enfin, si l'on choisit de dimensionner une installation reprenant à la fois des chambres positives et négatives, les centrales au R448A ou au R449A sont les plus intéressantes si l'on veut favoriser le prix tandis que l'ammoniac est la solution la plus intéressante si l'on veut favoriser la performance.

2018			
	Positive	Négative	Global
Solution la moins chère	R134a	R448A	Centrale R448A Centrale R449A
↓	R450A	R449A	
	R1234ze	R290+R449A	NH ₃
Solution la plus chère	NH ₃	R290+CO ₂	

Tableau 3 : Récapitulatif des solutions avantageuses en 2018

2022			
	Positive	Négative	Globale
Solution la moins chère	R1234yf	R290+CO ₂	R290+CO ₂
↓	R1234ze		NH ₃
Solution la plus chère	NH ₃		

Tableau 4 : Récapitulatif des solutions avantageuses en 2022

En 2022, on peut remarquer au tableau 4 que pour un dimensionnement reprenant seulement des chambres positives, la solution la plus intéressante est le R1234yf si l'on décide de favoriser le prix, tandis que l'ammoniac est la solution la plus performante. Pour les installations reprenant des chambres négatives, la seule solution

qui demeure est la solution reprenant le propane et le CO₂. Pour les installations reprenant à la fois des chambres positives et négatives, la solution reprenant du propane et du CO₂ est la solution la moins chère tandis que l'ammoniac est la solution la plus performante. L'absence de solutions multiples pour les chambres négatives suggère que les fabricants de fluide vont en développer de nouveaux dans les années à venir.

10. Sources

- [1] GFF (consulté le 7 février 2018), *F-Gas, on fait le point !*
Adresse URL : <http://www.lagff.com/actualites/la-reglementation-f-gaz/>
- [2] PIC BLEU (consulté le 7 février 2018), *Fluides frigorigènes, HCFC, HFC supergaz effet de serre environnement.*
Adresse URL : <https://www.picbleu.fr/page/fluides-frigorigenes-hcfc-hfc-supergaz-effet-de-serre-environnement>
- [3] DECHETS PICARDIE (consulté le 7 février 2018), *CFC/HCFC*
Adresse URL : <http://www.dechets.picardie.fr/spip.php?rubrique43>
- [4] AD-ENVIRONNEMENT (consulté le 7 février 2018), *F-gas : vers une interdiction européenne des fluides frigorigènes fluorés.*
Adresse URL : <http://www.ad-environnement.fr/breves/f-gas-vers-une-interdiction-europeenne-des-fluides-frigorigenes-fluores/>
- [5] ENERGIEPLUS (consulté le 7 février 2018), *Les fluides frigorigènes.*
Adresse URL : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11179#c5932>
- [6] ENERGIEPLUS (consulté le 9 février 2018), *Choisir un fluide frigorigène.*
Adresse URL : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11125#>
- [7] Frigoristes.fr (consulté le 26 mars 2018), *Le CO₂ transcritique.*
Adresse URL : <http://www.frigoristes.fr/article.php?sid=106#.Wwn2uu4iOM9>
- [8] ENERGIE FACTEUR 4 ASBL (consulté le 9 octobre 2018), *Cycle frigorifique détaillé.*
Adresse URL : <http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html>
- [9] KELVION (consulté le 14 février 2018), *RT SELECT.*
Adresse URL : <https://rtselect.kelvion.com/quotation/#390bcd33-4e7e-4e32-9011-7c7067d82f01?OP=select&TS=1527382177877>