

# Les fluides frigorigènes pionniers reconstruisent l'avenir de la réfrigération

Ing. D. KÖTTGEN  
Ing. A. BORREY

HELMo-Gramme – Liège

*Dans le but de pouvoir déterminer le type d'installation frigorifique adéquat en termes environnemental, énergétique et financier, trois installations sont étudiées. Ces installations sont équipées de centrales frigorifiques utilisant du dioxyde de carbone (R744) ou de l'ammoniac (R717) comme fluide frigorigène. Ces centrales peuvent éventuellement être couplées à d'autres équipements tels que des pompes à chaleur ou des chaudières.*

*Mots-clés : Réfrigération, Chauffage, Economie, Energie, COP, TEWI, TCO, Retail, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>*

*In order to determine the appropriate type of refrigeration plant suitable in environmental, energy and financial terms, three plants are studied. These installations are equipped with refrigeration plants using carbon dioxide (R744) or ammonia (R717) as refrigerant. These plants can be coupled with other equipment such as heat pumps or boilers.*

*Key words : Refrigeration, Heating, Economy, Energy, COP, TEWI, TCO, Retail, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>*

## 1. Introduction

En pleine période de crise énergétique, il peut être intéressant de se pencher sur les secteurs les plus gourmands. Parmi ceux-ci, le domaine de la réfrigération est l'un des moins populaires. Avec plus de trois milliards de dispositifs installés à travers le monde, le secteur du froid représente plus de 15 % de la consommation électrique mondiale. Ce pourcentage se répartit parmi de nombreuses applications. Nous nous intéresserons ici précisément au secteur du retail, et plus spécifiquement aux installations frigorifiques et thermiques de trois magasins de proximité.

## 2. Objectif

Cette étude consiste en la comparaison de trois technologies de production frigorifique différentes. Cette comparaison se fera sous trois aspects :

- I. Selon un aspect énergétique avec le calcul du « coefficient de performance » COP;
- II. D'un point de vue environnemental sur base des tonnes équivalentes de CO<sub>2</sub> rejetées dans l'atmosphère tout au long de l'exploitation des installations;
- III. Troisièmement, selon un aspect financier par le calcul du « Total Cost of Ownership » TCO.

Il est important de souligner que cette étude compare les productions et pas les distributions frigorifiques et thermiques, c'est-à-dire qu'elle ne se penche pas sur les meubles frigorifiques, les chambres froides et les cassettes de chauffage mais uniquement sur les dispositifs de production : les centrales frigorifiques, les pompes à chaleur et les chaudières.

## 3. Les trois types d'installations étudiés

Les trois installations étudiées font recours à trois technologies différentes. Afin d'obtenir une comparaison valable, les puissances frigorifiques installées et les superficies des magasins sont similaires.

Avant toute chose, il est important de clarifier certaines notions.

On parle de froid négatif lorsqu'on se situe en-dessous de 0°C. Autrement, on parle de froid positif. On appelle « centrale frigorifique » l'ensemble des équipements (compresseurs, vannes, détendeurs...) permettant de produire de l'énergie frigorifique. Si l'on compare une installation frigorifique à une installation thermique (chauffage), la centrale frigorifique est l'équivalent de la chaudière (unité responsable de la production).

### **3.1. Centrale frigorifique au CO<sub>2</sub> couplée avec une chaudière au gaz naturel**

Le premier magasin est équipé d'une centrale frigorifique utilisant du dioxyde de carbone comme gaz réfrigérant. Cette centrale permet d'alimenter les points frigorifiques (meubles positifs et négatifs, chambres positives et négatives) ainsi que de chauffer le magasin. La technologie utilisant du CO<sub>2</sub> permet en effet de récupérer de la chaleur lors de la production d'énergie frigorifique. Si cette récupération de chaleur n'est pas suffisante pour chauffer le magasin, c'est une chaudière d'appoint au gaz naturel qui apporte le complément afin de satisfaire la demande thermique.

### **3.2. Centrale frigorifique au CO<sub>2</sub> uniquement**

Le second point de vente est également équipé d'une centrale frigorifique au CO<sub>2</sub>. La régulation de cette centrale est en revanche bien différente. Ce magasin diffère du précédent car il n'est pas équipé de système de chauffage d'appoint. Si la récupération de chaleur sur la centrale frigorifique n'est pas suffisante pour chauffer le magasin, le régime de celle-ci est modifié : afin de récupérer davantage de chaleur, la charge frigorifique est volontairement augmentée et le surplus de production frigorifique est rejeté dans l'atmosphère. La surproduction d'énergie frigorifique permet d'augmenter la production thermique et d'ainsi satisfaire la demande en chauffage.

### **3.3. Centrales frigorifiques à l'ammoniac et au CO<sub>2</sub> couplées avec des pompes à chaleur au propane**

L'installation du troisième magasin est composée d'une centrale utilisant de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) comme fluide frigorigène pour produire du froid positif, d'une plus petite centrale au CO<sub>2</sub> pour produire du froid négatif et de deux pompes à chaleur air-eau au propane pour chauffer le magasin. Ces trois dispositifs sont régulés indépendamment selon les demandes frigorifiques positive et négative ainsi que suivant la demande thermique.

## 4. Principe de fonctionnement des installations frigorifiques

### 4.1. Installation à l'ammoniac

Dans une installation utilisant de l'ammoniac, ce dernier reste confiné dans la salle des machines et dans le condenseur se situant en toiture. Les alimentations frigorifiques des meubles frigorifiques positifs et des chambres froides positives se font par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur : un mélange d'eau et de mono-propylène glycol. Ce caloporteur est refroidi par l'ammoniac au sein d'un échangeur à plaques.

En partant du point d'aspiration des compresseurs (points 1 fig. 1 et 2), le cycle se déroule comme ceci :

- 1 - 2 : Compression. Entre les points 1 et 2, l'ammoniac est comprimé par deux compresseurs en parallèle. En entrée des compresseurs, l'ammoniac est surchauffé (décalage du point 1 à droite de la cloche liquide-gazeux sur le diagramme de Mollier fig. 2) afin de s'assurer que le fluide ne contienne plus aucune fraction liquide; sans quoi les compresseurs se détérioreraient. Les pressions moyennes d'entrée et de sortie des compresseurs sont respectivement de 3,5 et 9 bar absolus. Le taux de compression moyen est donc de 2,57. En sortie des compresseurs, l'enthalpie des gaz chauds atteint son maximum. C'est le rôle de la compression : communiquer de l'énergie au fluide en augmentant son enthalpie sur base d'énergie mécanique.
  
- 2 - 3 : Condensation. Durant la phase de condensation, les gaz chauds sont refroidis. En sortie des compresseurs, le fluide est totalement gazeux. Le condenseur (généralement situé en toiture) va permettre de refroidir le fluide et donc de faire chuter son enthalpie pour le ramener à une phase totalement liquide (point 3). Outre la désurchauffe durant laquelle la température de l'ammoniac varie (évacuation de la chaleur latente), le température reste constante pendant le reste de la condensation (évacuation de la chaleur sensible). Ceci est une propriété des fluides azéotropes : ils condensent à une température constante. On appelle sous-refroidissement le fait de prolonger légèrement la condensation à gauche de la cloche du diagramme de Mollier (fig. 2) afin de s'assurer d'être en présence d'une phase totalement liquide. Le sous-refroidissement permet d'accroître la puissance frigorifique de l'installation mais demande également davantage d'énergie au condenseur (en augmentant la vitesse de rotation des ventilateurs par exemple) et est limité par les conditions extérieures (température extérieure). La recherche d'un COP optimum en fonction des augmentations de la puissance frigorifique produite et électrique consommée est un paramètre des installations frigorifiques.

- 3 - 4 : Détente. Le flotteur de détente (entre les points 3 et 4 fig. 1) a comme objectif de maintenir un niveau de liquide suffisant dans l'évaporateur. Pour ce faire, comme son nom l'indique, le détendeur va faire chuter la pression du fluide. La pression étant directement liée à la température, la détente isenthalpique aura comme conséquence une chute importante de la température de l'ammoniac. Une fois détendu, l'ammoniac se trouve sous forme de mélange liquide-gazeux : la fraction prépondérante reste tout de même la proportion liquide ; seulement une faible partie de l'ammoniac est sous forme gazeuse. Le fluide se trouvant désormais à basse température ( $-5^{\circ}\text{C}$  dans ce cas), il peut entrer dans la phase suivante.
  
- 4 - 1 : Evaporation. L'évaporation est la phase objective du cycle. En effet, c'est durant cette phase que l'énergie frigorifique est disponible. Dans notre cas, le dispositif utilisé est un évaporateur de type noyé. Cela signifie qu'une fois détendu, l'ammoniac comprenant une faible fraction gazeuse et une grande fraction liquide entre dans un ballon. Ce ballon joue le rôle d'évaporateur. L'ammoniac liquide tombe dans le fond du ballon étant donné que sa masse volumique est plus importante que les fractions gazeuses. Le fond du ballon est relié à un échangeur à plaques dans lequel circule donc d'une part, l'ammoniac liquide et d'autre part, l'eau glycolée à refroidir. L'échangeur est alimenté en ammoniac par un principe de thermosiphon. Le fluide frigorigène part dans l'échangeur totalement liquide à une température d'environ  $-5^{\circ}\text{C}$  et revient sous forme de mélange liquide-gazeux dans le ballon. Les fractions liquides retombent dans le fond du ballon et les fractions gazeuses sont aspirées par les compresseurs depuis la partie supérieure du ballon. Le réglage du niveau de liquide par le détendeur est donc primordial afin de maintenir un niveau suffisant tout en s'assurant qu'uniquement des fractions gazeuses sont aspirées par les compresseurs. Une fois aspiré par les compresseurs, l'ammoniac gazeux reprend son cycle thermodynamique au point 1. Sur cette installation, l'échangeur permet de refroidir de l'eau glycolée entrant à  $-1^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $-3^{\circ}\text{C}$  pour un débit de  $30\text{ m}^3/\text{h}$  environ.

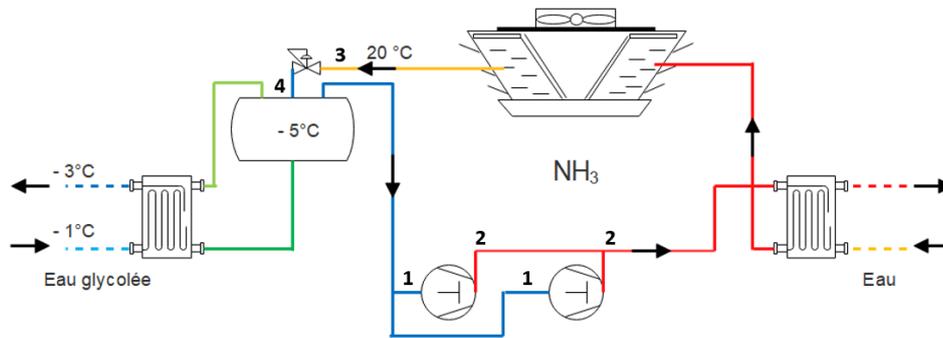
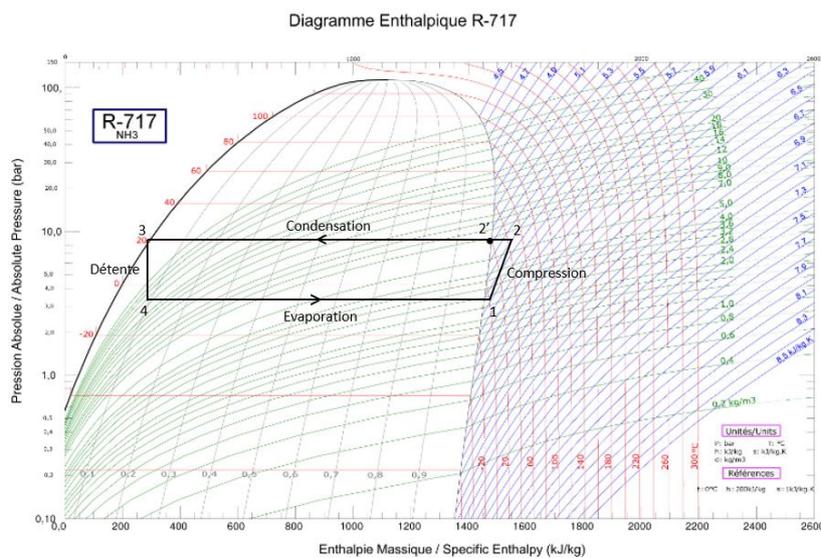


Figure 1 : Schéma de principe d'une installation à l'ammoniac



climalife dehon service SA – 26, avenue du Petit Parc – F-94683 Vincennes Cedex – Tél. : +33 (0)1 43 98 75 00 – Fax : +33 (0)1 43 98 21 51 – Email : climalife.fr@climalife.dehon.com

Figure 2 : Cycle thermodynamique d'une installation à l'ammoniac

L'inconvénient majeur d'une centrale à l'ammoniac est que la technologie n'est actuellement pas assez développée que pour produire du froid négatif à l'échelle du froid commercial (c'est-à-dire pour de petites puissances). C'est pourquoi une petite centrale au CO<sub>2</sub> pour la production de froid négatif est couplée à la centrale à l'ammoniac. Sur la figure 1, on remarque la présence d'un échangeur de chaleur avant de traverser le condenseur. Cet échangeur permet de récupérer de l'énergie thermique lors de la désurchauffe de l'ammoniac. Cependant, la quantité d'énergie récupérable

est infime : c'est pourquoi les pompes à chaleur au propane sont nécessaires. Ces pompes sont indépendantes de l'installation frigorifique.

## 4.2. Installation au dioxyde de carbone

Les installations au CO<sub>2</sub> se prêtent assez bien aux exigences des supermarchés et des entrepôts frigorifiques. Une solution CO<sub>2</sub> bi-étagée (basse température et moyenne température) permet d'alimenter aussi bien les meubles et chambres négatifs que positifs. Le schéma de principe (fig. 3) ainsi que le cycle thermodynamique sur le diagramme de Mollier (fig. 4) sont représentés.

En partant du point 3 (fig. 3 et 4), le fluide est d'abord comprimé jusqu'à une pression généralement comprise entre 80 et 120 bar (point 4 fig. 3 et 4) et se trouve alors en état transcritique (au-dessus du point critique, sommet de la cloche sur le diagramme de Mollier fig. 4). Au-dessus de ce point, il n'existe plus d'équilibre des phases du CO<sub>2</sub>. On ne peut ni caractériser le CO<sub>2</sub> de liquide ni de gazeux. Le CO<sub>2</sub> est ensuite refroidi à pression constante dans un gascooler jusqu'à une température légèrement supérieure à la température extérieure (point 5 fig. 4).

Ensuite, le fluide traverse la vanne de détente transcritique et se retrouve en état diphasique (liquide-gazeux) avant d'être injecté dans la bouteille séparatrice de liquide en état diphasique (liquide - gazeux) (point 6 fig. 3 et 4) à une pression intermédiaire. La masse volumique du liquide étant supérieure à celle du gaz, le liquide tombe au fond du réservoir. Le CO<sub>2</sub> sort donc de la bouteille en état liquide saturé (point 7 fig. 3 et 4) et peut éventuellement (selon le type d'installation) être acheminé dans un échangeur liquide - vapeur afin de sous-refroidir le liquide et surchauffer les vapeurs après leur évaporation.

Depuis cette pression intermédiaire, le CO<sub>2</sub> est de nouveau détendu aux pressions désirées : moyenne pression (point 8 fig. 3 et 4) pour les meubles et chambres positifs et basse pression (point 10 fig. 3 et 4) pour les meubles et chambres négatifs. Les détendeurs injectent le fluide dans les évaporateurs aux pressions d'évaporation en état diphasique. En sortie des évaporateurs, on retrouve du CO<sub>2</sub> en état de vapeur surchauffée (points 9 et 11 fig. 3 et 4). Selon le type d'installation, la surchauffe peut se faire dans un échangeur liquide - vapeur comme mentionné plus haut. Dans ce cas, le fluide passe dans l'échangeur après avoir traversé un évaporateur.

Les vapeurs surchauffées provenant des meubles et chambres positifs (moyenne pression) sont mélangées avec les vapeurs provenant de la bouteille séparatrice de liquide (point 12 fig. 3 et 4) après avoir détendu ces dernières à la bonne pression. Les vapeurs surchauffées issues des meubles et chambres basse température (point

1 fig. 3 et 4) sont comprimées jusqu'à la pression correspondant à la moyenne température (point 2 fig. 3 et 4). Etant désormais à même pression, les vapeurs issues des meubles positifs et négatifs peuvent être mélangées (mélange des points 9 et 2 fig. 3 et 4) avant d'être de nouveau comprimées (point 4 fig. 3 et 4) et de recommencer un nouveau cycle.

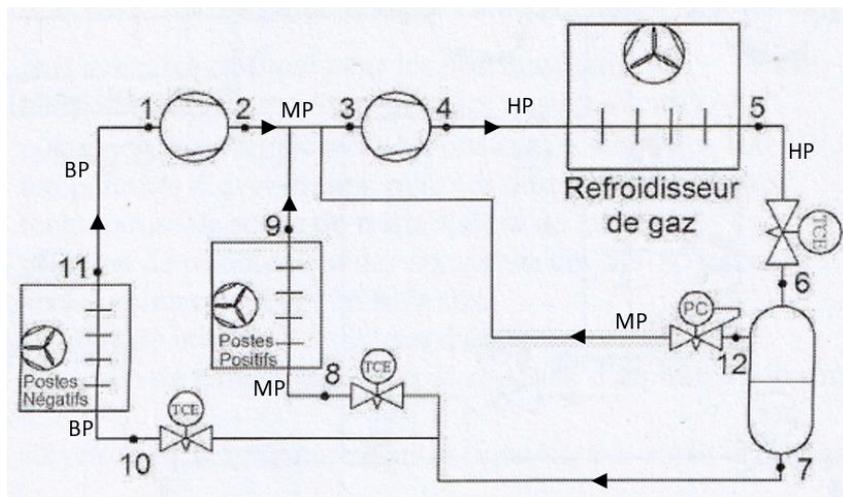


Figure 3 : Schéma de principe d'une installation bi-étagée au dioxyde de carbone

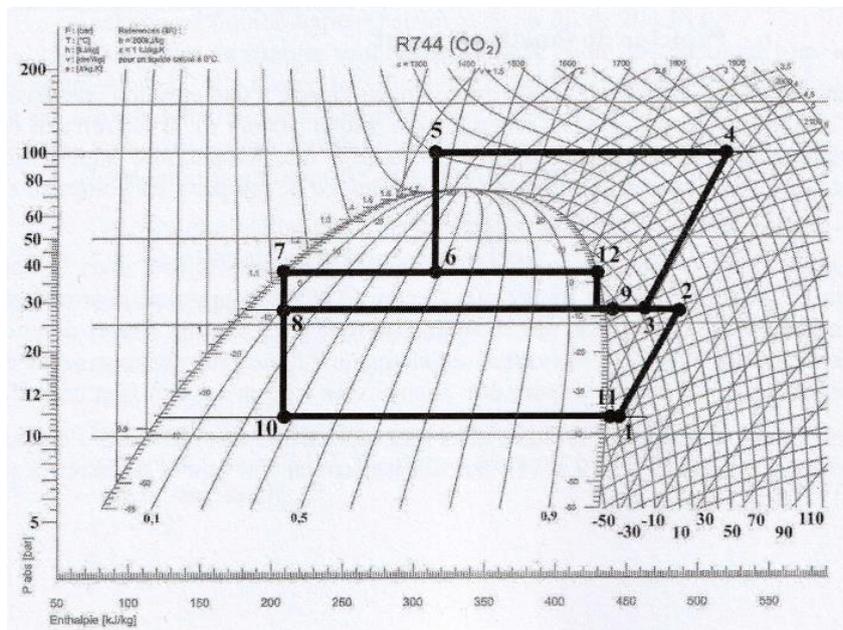


Figure 4 : Cycle thermodynamique d'une installation bi-étagée au dioxyde de carbone

## 5. Mesures réalisées

Sur chacune des installations étudiées, différents paramètres ont été relevés. Suivant le type d'installation et les dispositifs de mesures disponibles, les données relevées ont pu être plus ou moins détaillées. Généralement, les points de mesures étaient enregistrés automatiquement toutes les 10 minutes.

Pour l'installation composée d'une centrale à l'ammoniac, d'une centrale au CO<sub>2</sub> et de deux pompes à chaleur au propane, les mesures suivantes ont été relevées :

- Au niveau des consommations électriques :
  - Consommation électrique de la centrale ammoniac et de son condenseur
  - Consommation électrique de la centrale CO<sub>2</sub>
  - Consommation électrique des pompes à chaleur
- Au niveau des productions :
  - Pour la production de froid positif, nous avons enregistré les températures de départ et de retour d'eau glycolée vers le magasin. Le débit étant constant, il a simplement été contrôlé ponctuellement.
  - Pour la production de froid négatif, nous avons considéré un COP constant (calculé selon le régime de fonctionnement de la centrale à l'aide d'un logiciel de simulation) étant donné que la centrale au CO<sub>2</sub> condense sur l'eau glycolée et donc toujours à la même température. En prenant un COP constant, on peut calculer la production frigorifique sur base de la consommation électrique de cette centrale au CO<sub>2</sub>.
  - Pour la production thermique, nous avons relevé les températures de départ et de retour d'eau chaude vers le magasin, ainsi que son débit.

Pour les deux installations composées de centrales frigorifiques au CO<sub>2</sub>, les mesures réalisées sont les suivantes :

- Au niveau des consommations énergétiques :
  - Consommation électrique des centrales au CO<sub>2</sub> et des gascoolers.
  - Consommation de gaz naturel pour l'installation équipée d'une chaudière.
- Au niveau des productions :
  - Pour les productions de froid positif et négatif, nous avons relevé les pourcentages de fonctionnement des étages positif et négatif des centrales. Connaissant leurs capacités à 100 %, nous avons pu calculer les productions frigorifiques.
  - Pour la production thermique, nous avons relevés les températures de départ et de retour d'eau chaude vers le magasin, ainsi que son débit.

Cette campagne a été réalisée continuellement sur une période de 2 mois durant laquelle la température extérieure moyenne était assez proche de la température moyenne annuelle (température moyenne de 12,68°C durant notre campagne et température moyenne annuelle de 10,2°C en Belgique). Sur base des mesures, nous avons pu déterminer différentes performances. D'un point de vue énergétique, nous nous sommes concentrés sur le coefficient de performance « COP ». Il se définit comme le rapport des productions par les consommations.

$$COP = \frac{\text{Production(s) frigorifique(s)} + \text{Production(s) thermique(s)}}{\text{Consommation énergétique totale}} \quad (1)$$

Suivant les dispositifs de mesures installés, nous avons pu affiner l'analyse des COP en calculant par exemple un  $COP_{\text{froid}}$  :

$$COP_{\text{froid}} = \frac{\text{Production(s) frigorifique(s)}}{\text{Consommation énergétique liée aux productions}} \quad (2)$$

Deuxièmement, nous avons quantifié les tonnes équivalentes de CO<sub>2</sub> rejetées dans l'atmosphère sur toute la durée de vie des installations. Cet indice porte le nom de « Total Equivalent Warming Impact » TEWI.

$$TEWI = GWP_{100} * [ M * (1 - x) + M * f * N ] + E * A * N \quad (3)$$

Où :

- $GWP_{100}$  représente la valeur du  $GWP_{100}$  du fluide considéré (en kg équivalent de CO<sub>2</sub>)<sup>1</sup>
- M est la masse de fluide frigorigène chargée dans l'installation (en kg)
- x est la fraction de fluide récupérée en fin de vie de l'équipement (en %)
- f est le taux de fuite annuel de l'équipement (en %)
- N est la durée de vie de l'équipement (en années)
- E est la consommation énergétique annuelle de l'équipement (en kWh)
- A est la quantité de CO<sub>2</sub> (en kg équivalent de CO<sub>2</sub>) émise pour produire 1 kWh de l'énergie utilisée. Cette quantité s'exprime en kg équivalent CO<sub>2</sub>/kWh.

Le premier terme représente l'effet direct : les émissions dues aux fuites durant l'utilisation de l'équipement ainsi qu'au non-recyclage du fluide en fin de vie de

---

<sup>1</sup> Le  $GWP_{100}$  (*Global Warming Potential*), quantifie la contribution des fluides à effet de serre. Dans ce classement, c'est le CO<sub>2</sub> qui est pris comme référence et possède donc un indice GWP de 1. Etant donné que les gaz ne disparaissent pas tous de l'atmosphère à la même vitesse, le GWP indique pour un intervalle de temps déterminé (généralement 100 ans), la masse de CO<sub>2</sub> en kg dont les effets radiatifs pour l'effet de serre sont équivalents à ceux de 1 kg de fluide frigorigène relâché. Plus cet indice est haut, plus le fluide est donc néfaste pour l'atmosphère.

l'installation. Le second terme représente les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la consommation énergétique de l'installation.

Dernièrement, le calcul du coût total des installations et de leurs exploitations « Total Cost of Ownership » TCO est basé sur les frais de maintenance, de consommations énergétiques ainsi que les investissements initiaux lors de l'acquisition des centrales de production. Pour calculer l'indice TCO, on additionne l'ensemble des coûts sur toute la durée de vie de l'installation.

## 6. Résultats

Aussi bien des points de vue énergétique, environnemental que financier, c'est la technologie utilisant de l'ammoniac comme fluide frigorigène qui est la plus efficace.

Ce sont ses performances énergétiques qui lui permettent de se démarquer. Avec un COP<sub>global</sub> (c'est-à-dire reprenant aussi bien les productions frigorifiques que thermiques) moyen sur une période de 2 mois de 5,9, elle devance successivement les technologies « CO<sub>2</sub> – gaz naturel » (COP<sub>global</sub> de 3,5) et « uniquement CO<sub>2</sub> » (COP<sub>global</sub> de 2,5). Si l'on creuse davantage, on remarque que c'est le fait d'avoir une production frigorifique très performante (COP<sub>froid</sub> moyen de 6,3) qui permet à l'installation à l'ammoniac de se démarquer. Le couplage des centrales frigorifiques avec des pompes à chaleur au propane ne dégrade pas énormément le COP car ces pompes offrent également des performances respectables (COP<sub>chaud</sub> moyen proche de 5). Pour ce qui est des installations utilisant du CO<sub>2</sub>, leur COP<sub>global</sub> est supérieur au COP<sub>froid</sub> car l'énergie thermique récupérée sur les centrales est gratuite. En effet, la récupération de chaleur n'engendre pas de consommation électrique supplémentaire. Elle est donc très intéressante et permet de bien meilleures performances lorsqu'elle est bien utilisée.

Deuxièmement, sur base des performances énergétiques, nous pouvons analyser les performances environnementales. Ces dernières se quantifient à l'aide du « Total Equivalent Warming Impact » TEWI. Cet indice permet de quantifier les tonnes équivalentes de CO<sub>2</sub> rejetées dans l'atmosphère sur l'ensemble de la durée de vie de l'installation (dans notre cas 25 ans). Il tient compte d'une part des effets directs, les émissions dues aux fuites des équipements ainsi qu'au non-recyclage du fluide frigorigène en fin de vie de l'installation (ramenées en tonnes équivalentes de CO<sub>2</sub> dans le cas de l'ammoniac et le propane). D'autre part, il inclut également les émissions de CO<sub>2</sub> provoquées par la consommation énergétique des installations.

Par la définition du TEWI, il est évident que les performances énergétiques des technologies permettront de minimiser l'impact environnemental des centrales. Toute économie sur la consommation énergétique permet en effet de réduire la composante indirecte de TEWI. Logiquement, l'installation utilisant de l'ammoniac tire donc de nouveau son épingle du jeu. Par ses performances énergétiques, les émissions équivalentes de CO<sub>2</sub> sont diminuées de moitié (fig. 5) par rapport à l'installation composée d'une centrale au CO<sub>2</sub> et d'une chaudière au gaz naturel. L'installation n'utilisant que du CO<sub>2</sub> voit son impact environnemental multiplié par 3 par rapport à l'installation à l'ammoniac.

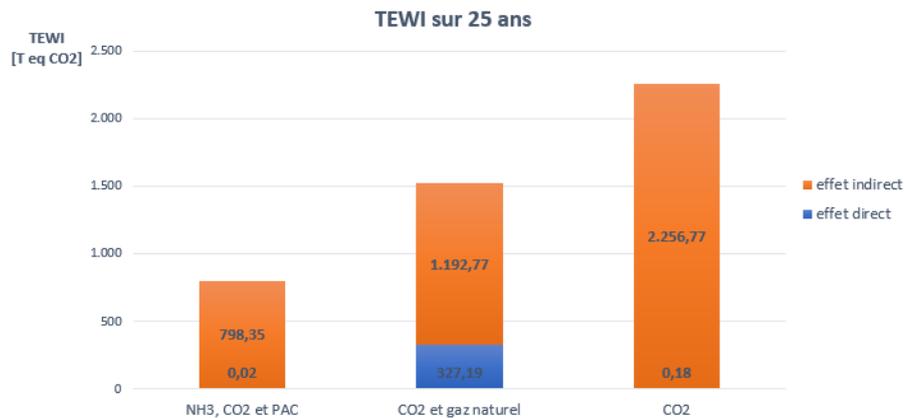


Figure 5 : Graphique de comparaison des TEWI sur 25 ans

Notons la prépondérance de l'effet indirect devant l'effet direct (fig. 5). Sur le graphique, les composantes directes n'apparaissent même pas pour les installations à l'ammoniac et uniquement au CO<sub>2</sub>. Les contributions des fuites et du non-recyclage du fluide en fin de vie n'interviennent qu'à raison inférieure à 1% de l'ensemble des émissions. Si l'on se penche sur l'installation utilisant du gaz naturel, plus de 99% de l'effet direct est causé par la combustion de gaz naturel. En conclusion, nous pouvons très clairement remarquer la prépondérance de l'effet indirect devant l'effet direct. Les émissions équivalentes dues à l'échappement de fluide frigorigène dans l'atmosphère sont donc minimes devant l'influence des performances énergétiques. L'installation de dispositifs performants avec un fluide légèrement plus nocif pour l'environnement est donc à privilégier devant une installation moins performante avec un fluide environnementalement neutre.

Dernièrement, il est de nouveau évident que de faibles consommations énergétiques permettent de réduire le coût d'exploitation des installations. C'est pourquoi le « Total Cost of Ownership » TCO est à son tour fortement lié aux performances énergétiques. Pour calculer cet indice TCO, nous tenons compte de trois composantes :

- Le coût initial de l'installation, que l'on nommera « l'investissement »
- Les frais de maintenance
- Les coûts de consommations énergétiques (électricité et gaz dans notre cas)

L'indice TCO a été calculé pour une période de 25 ans (fig. 6). 25 ans étant la durée de vie moyenne de ce type d'installation frigorifique. Les frais de maintenance et de consommations sont donc pris sur une période de 25 ans tandis que l'investissement prend uniquement compte de l'achat initial des équipements.

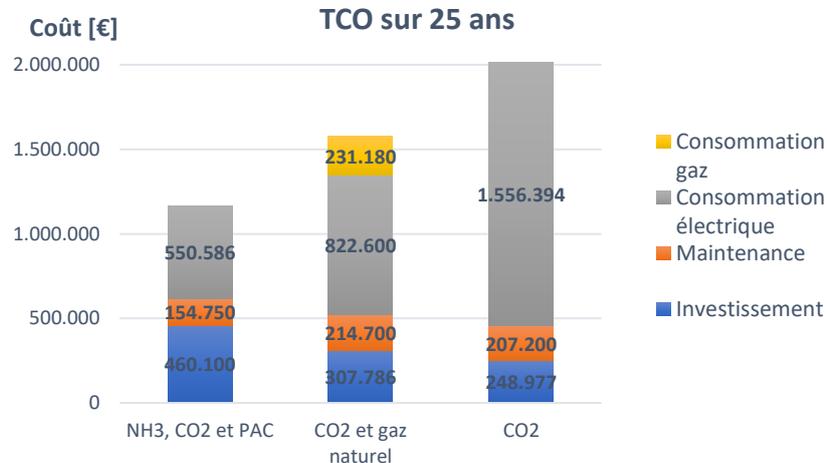


Figure 6 : Graphique de comparaison des TCO sur 25 ans

Une fois l'ensemble des frais cumulé, on remarque qu'une installation initialement plus onéreuse mais offrant de meilleures performances permet de minimiser son coût d'exploitation et principalement ses coûts de consommations énergétiques. Le surcoût d'une installation à l'ammoniac est relativement vite récupéré par rapport à une installation au CO<sub>2</sub> (environ après quatre années d'exploitation seulement).

Note importante : l'étude se veut la plus neutre possible. Au niveau des conditions de fonctionnement des installations, le fait de réaliser des mesures entre les mois de mars et de mai a permis d'obtenir une température extérieure moyenne assez proche de la température extérieure annuelle moyenne (température moyenne de 12,68°C durant notre campagne et température moyenne annuelle de 10,2°C en Belgique). Ensuite, concernant les coûts énergétiques, notre volonté était de ne pas se placer dans un contexte exceptionnel. En effet, l'étude se déroulant en pleine période de crise, les tarifs énergétiques étaient assez variables. Afin d'essayer de ne pas être influencé par ce contexte, nous avons décidé de fixer un tarif constant pour le MWh électrique. En choisissant une valeur de 200 € par MWh électrique, nous ne tenons pas compte de l'explosion des tarifs due à la crise, mais nous prenons un tarif plus onéreux que ceux antérieurs à la crise. Il est en effet difficile d'imaginer que les tarifs énergétiques diminueront jusqu'à retrouver leurs valeurs initiales.

## 7. Conclusion

En vue de réduire l'empreinte environnementale des installations frigorifiques tout en limitant leurs coûts d'investissement et d'exploitation, il est primordial de pouvoir proposer des solutions performantes pour le secteur du froid commercial. Afin d'établir une classification des technologies de production frigorifique existantes, la première phase de cette étude consiste à réaliser différentes observations sur les mesures de leur performance. Ce sont les analyses de ces mesures accompagnées de celles des indices TEWI et TCO permettant d'impliquer les enjeux écologiques et financiers qui illustrent et argumentent notre classification.

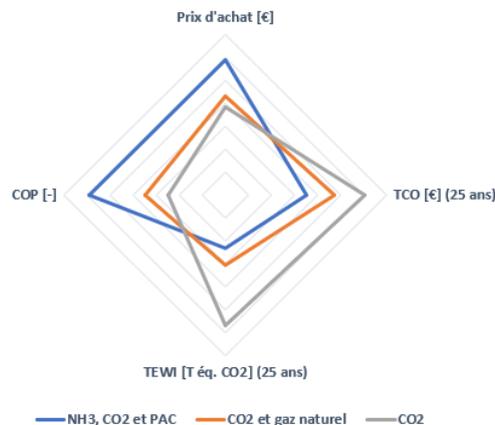


Figure 7 : Graphique résumant l'ensemble des performances étudiées pour les trois types d'installations frigorifiques

Pour conclure, sur base des analyses énergétiques, environnementales et financières, une technologie frigorifique tire son épingle du jeu : l'installation comprenant une centrale à l'ammoniac pour le froid positif, une centrale au dioxyde de carbone subcritique pour le froid négatif et deux pompes à chaleur au propane pour le chauffage. La gestion indépendante des demandes calorifiques permet une meilleure régulation des productions. Ce sont évidemment les performances énergétiques des équipements qui permettent de minimiser les indices TEWI et TCO. Pour l'installation la plus performante, la consommation énergétique représente 47 % du TCO après 25 ans. Pour les deux autres installations, ce pourcentage est de 67 et 77 %. Il est donc préférable d'investir dans une installation plus onéreuse à l'achat. Avec un tarif du MWh électrique de 200 €, ce surcoût est remboursé en seulement quatre ans. Au niveau environnemental, l'effet indirect du TEWI (c'est-à-dire la contribution de la consommation énergétique) représente plus de 99 % de l'effet total (que ce soit pour le dioxyde de carbone ou l'ammoniac). Il est donc nécessaire de se concentrer davantage sur les performances des installations plutôt que de réglementer les fluides frigorigènes utilisés. L'avenir ne se situe-t-il pas dans l'optimisation de technologies existantes plutôt que dans l'innovation de techniques frigorifiques ?

## 8. Sources

- [1] DELCOURT P. *Les installations frigorifiques au CO2. Publication indépendante*, 2016
- [2] COULOMB D., DUPONT J-L.& PICHARD A. *Le rôle du froid dans l'économie mondiale, Note d'information sur les technologies du froid*, Institut International du Froid, 2015.
- [3] SANDY, C. Gondola, *Un magasin 30 % moins énergivore*. 2019.
- [4] MEUNIER F., RIVET P. & TERRIER M-F. *Froid industriel. RPF Revue pratique du froid et du conditionnement d'air*. 2005
- [5] SINOPOLI M., PICARD M. *Guide des bonnes pratiques FROID. Les Mousquetaires*, 2019