



# Comparaison de systèmes de réfrigération couplés à une récupération de chaleur appliqué au froid commercial utilisant soit un HFO soit du CO<sub>2</sub>

Jean-Marc Christmann, Spécialiste Technique et Marketing, Chemours

## INTRODUCTION

Les réglementations actuelles telles que la F-Gas en Europe, ont toutes tendance à se focaliser sur le PRG<sup>1</sup> des réfrigérants utilisés dans les installations de réfrigération. Cependant lorsque l'on aborde la question avec un point de vue plus global et en intégrant des notions de consommations tout au long du cycle de vie d'une installation (par exemple via le TEWI<sup>2</sup> ou d'autres systèmes de notation), on se rend compte que le PRG va certes avoir un impact important mais on peut démontrer que lorsqu'il est suffisamment bas, tels que pour les HFO, la différence entre le PRG des fluides considérés n'a plus autant d'impact face à la consommation énergétique durant la vie de l'équipement frigorifique.

Les fluides frigorigènes du type R-454C et R-454A sont de très bons exemples de fluides offrant un PRG très bas tout en bénéficiant d'une excellente efficacité énergétique<sup>3</sup>, ce qui se traduit par des émissions totales de CO<sub>2</sub>, beaucoup plus basses que d'autres fluides à faible PRG. De plus ils permettent de conserver un coût total de cycle de vie de l'installation très proche de ceux obtenus avec les systèmes traditionnels fonctionnant aux HFC tout en conservant les savoirs faire présents dans la profession.

En se concentrant sur le cas des supermarchés il y a un autre poste qui est un grand contributeur aux émissions de CO<sub>2</sub> : les besoins chauds. Ils ont souvent été considérés comme provenant d'une source d'énergie complètement distincte de celle du froid et ce n'est que dans ces dernières années que ce besoin a été intégré à l'étude frigorifique afin de les rendre complémentaires.

Longtemps le surinvestissement lié à un système de récupération de chaleur a été un frein à sa mise en place, cependant l'arrivée des CEE (Certificats d'Economie d'Energie) a renversé la vapeur sur ces considérations. Transformant les frigoristes en chasseurs de besoin chauds afin de justifier un maximum de valorisation de « kWh cumacs » faisant chuter drastiquement le bilan financier de l'opération allant jusqu'à rembourser tout ou partie de certaines installations frigorifiques neuves lorsqu'elles étaient particulièrement efficaces. La question restante est donc celle-ci : Est-ce que ces fluides à faible GWP permettent une récupération de chaleur efficace, en permettant les réductions d'émissions souhaitées et tout ceci à un coût raisonnable ?

<sup>1</sup> Potentiel de Réchauffement Global ou GWP en anglais pour Global Warming Potential

<sup>2</sup> Total Equivalent Warming Impact, c'est un concept qui caractérise l'impact global d'une installation sur le réchauffement planétaire durant sa vie opérationnelle

<sup>3</sup> Etude Cameron et al, 2020

## SECTION PRINCIPALE

La difficulté pour l'utilisateur final est très souvent de comparer à l'identique les différentes technologies afin de déterminer laquelle sera la meilleure. En effet très souvent les données disponibles sont pour un cas précis d'une configuration d'installation qui est comparé avec ou sans l'option récupération de chaleur mais il n'y a que très peu de données (s'il y en a) qui permettent de comparer les autres technologies du point de vue du coût du système et des émissions totales sous les mêmes conditions de fonctionnement, en tout cas remplissant les mêmes besoins.

Afin de solutionner cette situation une comparaison théorique de plusieurs technologies disponibles pour les surfaces de ventes incluant une récupération de chaleur ont été comparées sous différentes conditions climatiques, en utilisant le coût ainsi que les émissions générées par la production d'électricité à différents endroits géographiques : Un exemple de climat tempéré basé sur les données climatiques de Leicester en Angleterre, un exemple de climat plus chaud basé sur Séville en Espagne et enfin l'exemple de la France pour les coûts et émissions générés avec le modèle énergétique français dans le cas des deux climats cités précédemment pour simuler une installation qui sera plutôt installée à Dunkerque et une autre à Nice par exemple.

### Méthodologie

Dans cette étude nous allons évaluer plusieurs technologies en nous basant sur :

- La prévision de la consommation énergétique totale
- La prévision des impacts sur l'environnement provenant du réfrigérant et du système de réfrigération
- Le coût d'investissement (CAPEX) pour chaque système de réfrigération et le réfrigérant
- Le coût du cycle de vie (CCV) pour chaque système de réfrigération et le réfrigérant

### Bases Limites de l'étude et Hypothèses

Cette étude se concentre sur un supermarché type avec une surface de vente de  $\sim 2300\text{m}^2$ , un besoin d'environ **160kW** de froid en moyenne température et **30kW** de froid en basse température. Pour les besoins chauds la base de comparaison est soit une chaudière à gaz, soit une pompe à chaleur à air indépendante du groupe. Le rendement de la chaudière a été estimé à 89% comme valeur moyenne. Les COP (tableau 1) des climatisations ou des pompes à chaleur à air sont issus des données constructeurs et basés sur des pompes à chaleur air/eau munies de compresseurs scroll avec variateur prenant en compte les consommations des ventilateurs et des auxiliaires.

| Température Ambiante / °C | C.O.P. Chaud | C.O.P. Froid |
|---------------------------|--------------|--------------|
| 40                        | -            | 2.22         |
| 35                        | -            | 2.79         |
| 30                        | -            | 3.47         |
| 25                        | 5.53         | 4.28         |
| 20                        | 4.80         | -            |
| 15                        | 4.10         | -            |
| 10                        | 3.60         | -            |
| 5                         | 3.20         | -            |
| 0                         | 2.75         | -            |
| -5                        | 2.50         | -            |

Tableau 1 – Valeurs de C.O.P. utilisées pour les unités de climatisation et les pompes à chaleur

Comme nous en avons déjà fait mention, deux zones géographiques différentes ont été considérées, le climat tempéré de Leicester en Angleterre et le climat chaud de Séville en Espagne. Dans ce dernier cas il a été pris en compte qu'une climatisation de la zone de vente est nécessaire, ainsi le coût et les émissions du système de climatisation son également intégrés à l'étude.

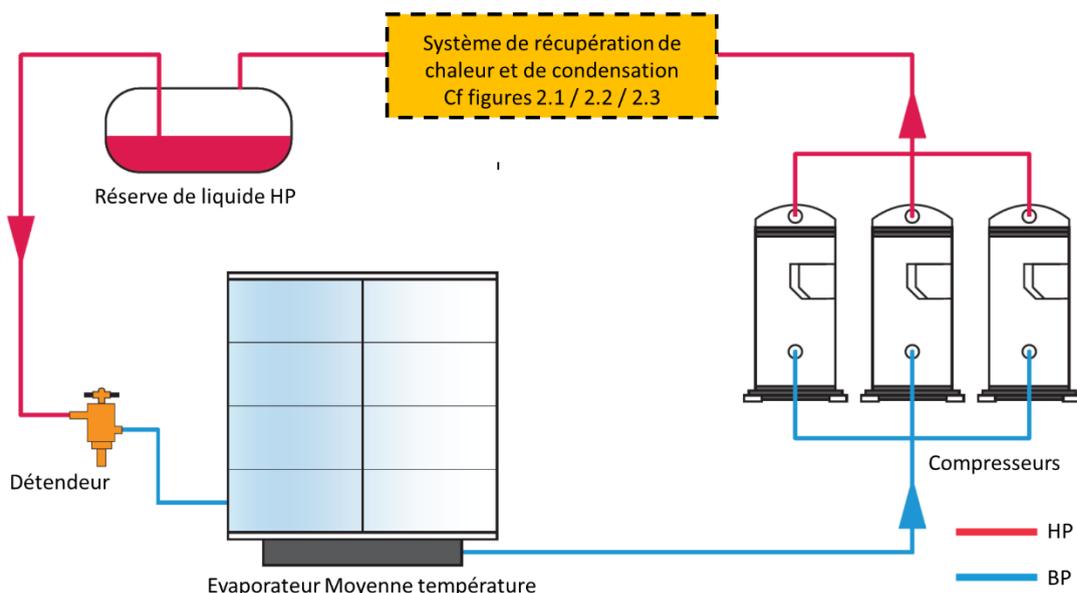
Pour la division jour/nuit nous avons considéré 13h de fonctionnement de « jour » et 11 heures de fonctionnement de « nuit ». La nuit la charge des meubles réfrigérés (MT) est diminuée de 30% pour prendre en compte les volets de nuit utilisés. Concernant la partie BT la charge de 30kW est conservée.

Les systèmes frigorifiques considérés sont comme suit :

- Pour les systèmes fonctionnant à l'Opteon™XL20 (R-454C) la technologie considérée est un système en détente direct sans économiseur.
- Pour les systèmes fonctionnant au CO2 (R744) la technologie considérée est un système de type booster transcritique avec échangeur de chaleur interne.

Vous trouverez ci-après les schémas types de ces installations (**figure 1.1**).

### Système Moyenne Température pour Opteon™XL20



## Système Basse Température pour Opteon™XL20

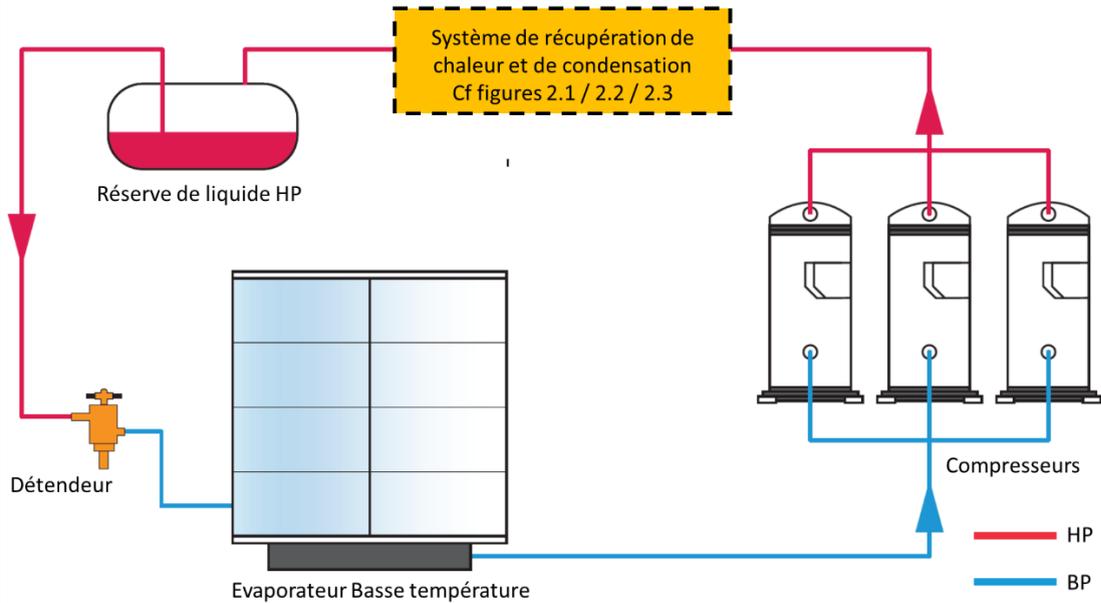


Figure 1.1 : Schémas fluides des technologies considérées pour le R-454C

## Système Transcritique avec échangeur interne pour R-744

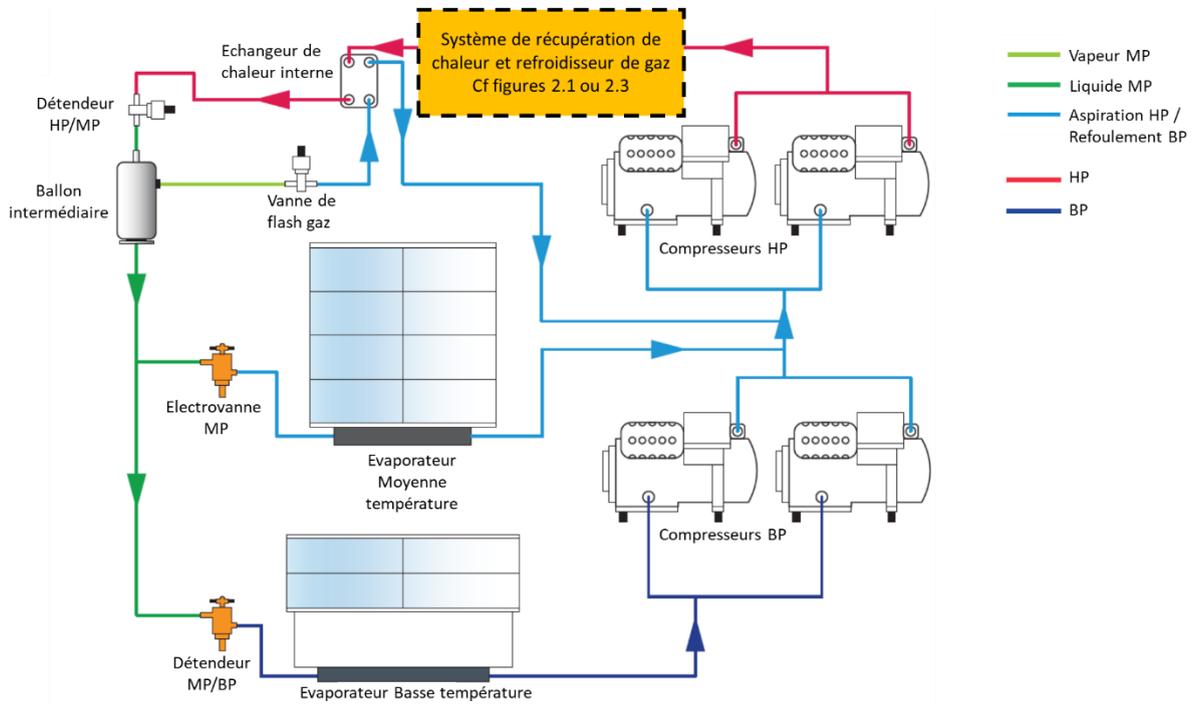


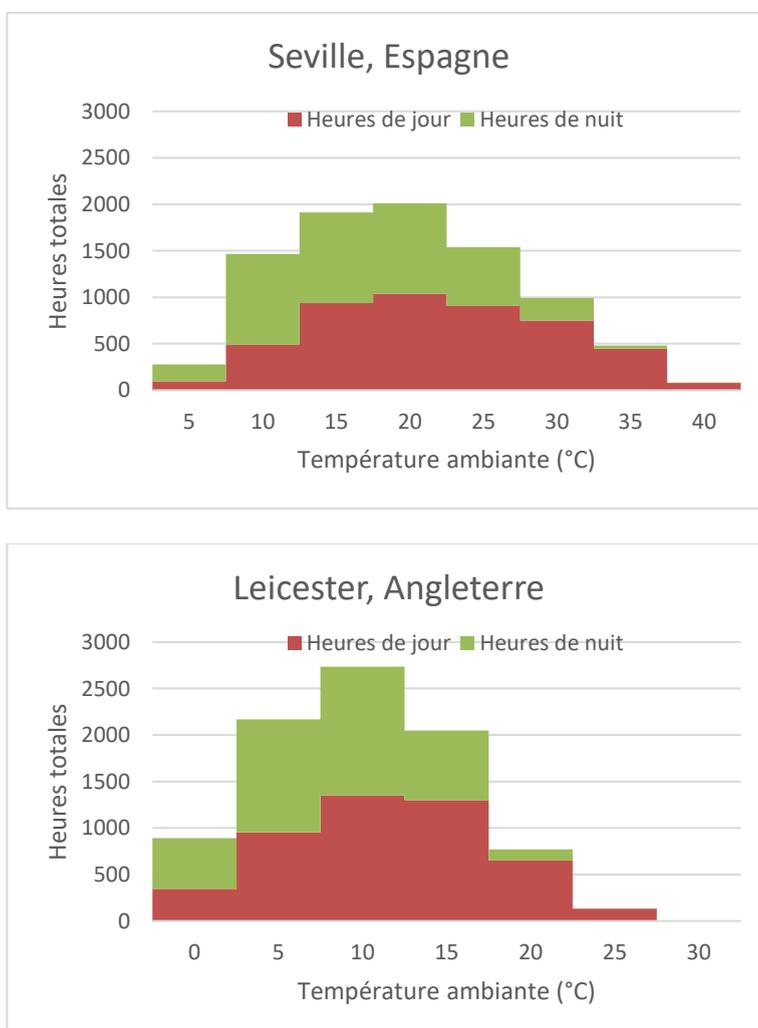
Figure 1.2 : Schémas fluides des technologies considérées pour le R-744

Concernant les températures du cycle frigorifique :

- Moyenne Température
  - o Température d'évaporation =  $-7^{\circ}\text{C}$
  - o Température d'aspiration saturée au compresseur =  $-9^{\circ}\text{C}$  (soit 2K de perte de charge)
- Basse Température
  - o Température d'évaporation =  $-31^{\circ}\text{C}$
  - o Température d'aspiration saturée au compresseur =  $-33^{\circ}\text{C}$  (soit 2K de perte de charge)

La température de design des unités de condensation est de  $+32^{\circ}\text{C}$  extérieur.

Les températures extérieures au cours de l'année sont estimées à partir de relevés météorologiques propres à chaque localisation et sont représentées par un nombre d'heure annuel pour chaque température extérieure possible (par tranche de 5 en 5) voir la **figure 1.3**.



**Figure 1.3 : Graphiques de répartition des heures selon la localité**

Ici nous considérons 2 fluides différents le R-744 (PRG=1), le R-454C (PRG=148)<sup>4</sup>. Les valeurs de PRG sont des valeurs AR4<sup>5</sup> qui sont celles utilisées par la F-Gas et ce sont ces valeurs qui sont utilisées pour estimer l'impact direct sur les émissions en cas de fuites.

Les taux de fuites ont été estimés comme suit :

- 5% pour les systèmes Opteon™XL20
- Négligés pour les systèmes CO2 car PRG = 1
- 2.5% pour les systèmes de climatisation
- 2,5% pour les pompes à chaleur à air

Les climatisations et pompes à chaleur sont considérées chargées en R-454B (PRG=466).

Les échangeurs ont été considérés comme idéalement dimensionnés pour leurs conditions de fonctionnement prévues et les équipements auxiliaires communs à toutes les technologies envisagées (comme les pompes) ne sont pas incluses. Lorsque cela était possible, les performances ont été obtenues grâce aux logiciels de sélection des fournisseurs, lorsqu'il n'était pas possible de faire les sélections des calculs des cycles thermodynamiques ont été utilisés, en faisant l'hypothèse de rendements compresseurs similaires aux fluides connus.

Les coûts de l'électricité<sup>6</sup> et les facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> par kWh<sup>7</sup> utilisés sont visibles ci-après (Tableau 2).

| Situation | Coût        |             | Emissions     |                |
|-----------|-------------|-------------|---------------|----------------|
|           | Electricité | Gaz         | Electricité   | Gaz            |
| Leicester | 0.162 €/kWh | 0.043 €/kWh | 0.3072 kg/kWh | 0.20437 kg/kWh |
| Sevilla   | 0.161 €/kWh | 0.051 €/kWh | 0.309 kg/kWh  | 0.20437 kg/kWh |
| France    | 0.123 €/kWh | 0.058 €/kWh | 0.053 kg/kWh  | 0.20437 kg/kWh |

**Tableau 2 – Coûts énergétiques et émissions de CO<sub>2</sub> par énergie**

## Configurations et conditions de fonctionnement considérées pour la récupération de chaleur

Trois configurations ont été considérées dans cette étude : la désurchauffe en sortie du compresseur (Figure 1.1), la condensation partielle (Figure 1.2) et des centrales de traitement d'air équipées de condenseur/gas cooler (Figure 1.3).

<sup>4</sup> L'étude complète considère 3 fluides différents le R-454C le R-744 et le R-454A. Si vous le souhaitez, vous pouvez vous référer à l'étude complète : Wheatlands Aire Valley Engineering Ltd, Chemours UK, Chemours France Study, 2021

<sup>5</sup> IPCC, 2014

<sup>6</sup> Source Eurostat, 2019

<sup>7</sup> Source Defra, 2018 & AIB, 2017

## Système de récupération de chaleur pour la désurchauffe sur boucle d'eau R-454C / R-744

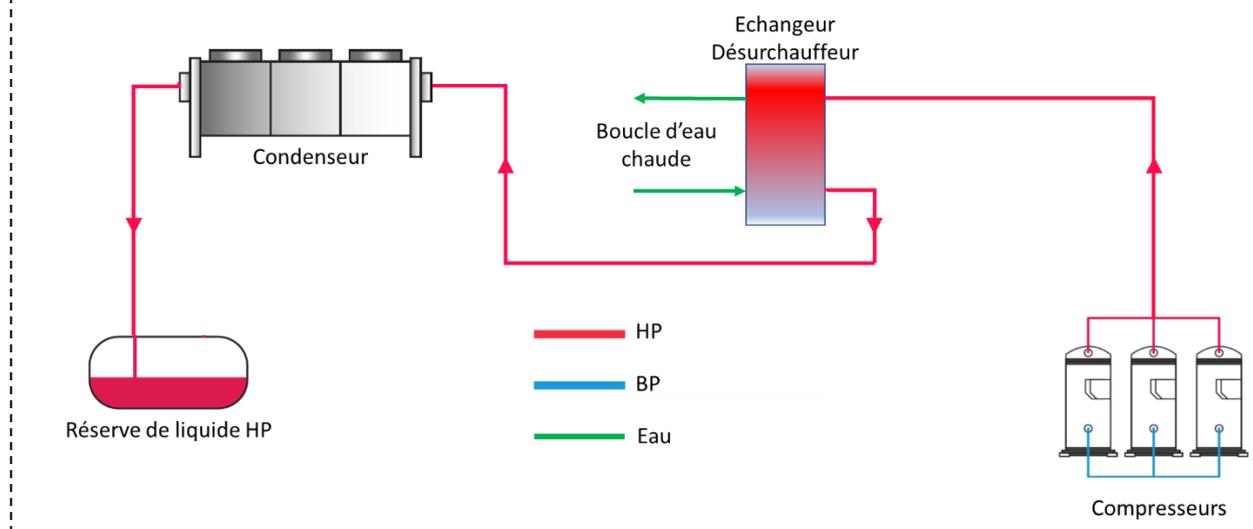


Figure 2.1 – Exemple de schéma fluide pour la désurchauffe (R-454C) / « A eau » (R-744)

## Système de récupération de chaleur avec condensation partielle sur boucle d'eau R-454C uniquement

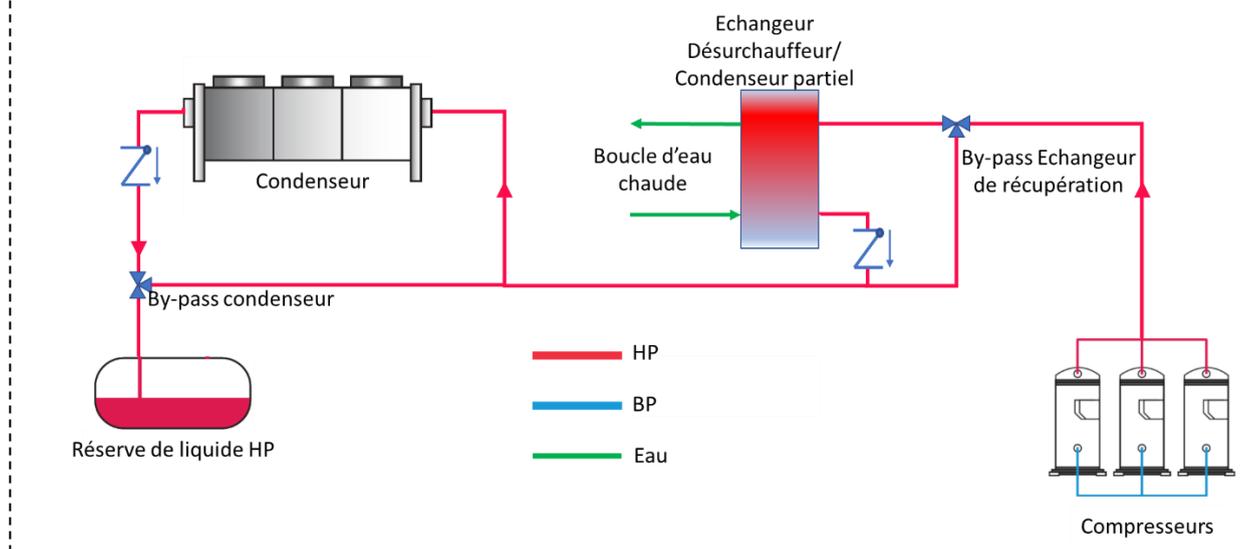
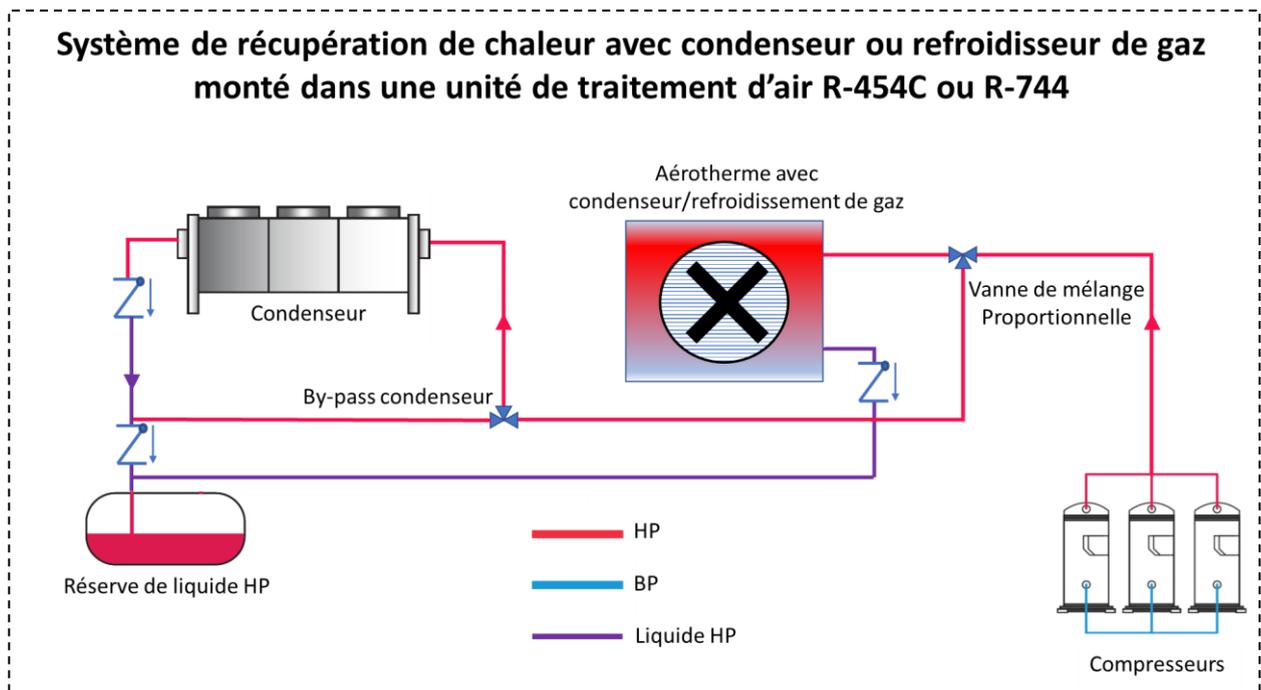


Figure 2.2 – Exemple de schéma fluide pour la condensation partielle (R-454C)

Pour les échangeurs à plaques brasées utilisés dans les figures 1 et 2 les sélections ont été effectuées avec le logiciel fournisseur<sup>8</sup> dans une configuration à contre-courant afin de maximiser le delta T moyen au cours de l'échange afin d'avoir les pincements les plus faibles et les températures de condensations (R-454C) ont été utilisées pour permettre une récupération de chaleur efficace en termes de quantité de chaleur et de température de disponible.

<sup>8</sup> SWEP, 2019



**Figure 2.3 – Exemple de schéma fluide pour le montage d'une unité de traitement d'air munie d'un condenseur (R-454C) ou d'un Gas cooler (R-744)**

Les niveaux de température des boucles d'eau ont été choisis en 45/30°C pour la désurchauffe et 36/30°C pour la condensation partielle. Ces deux niveaux de température ont été conservés pour le refroidissement sensible du R-744. Ils sont également suffisant pour assurer un transfert de chaleur convenable dans les aérothermes en considérant une température d'entrée d'air de 20°C, pour sortir à 28°C, qui sont des valeurs usuelles dans les applications de chauffage. Concernant la condensation partielle lorsque les températures ambiantes ne permettent pas d'effectuer une condensation, seule la désurchauffe est utilisée.

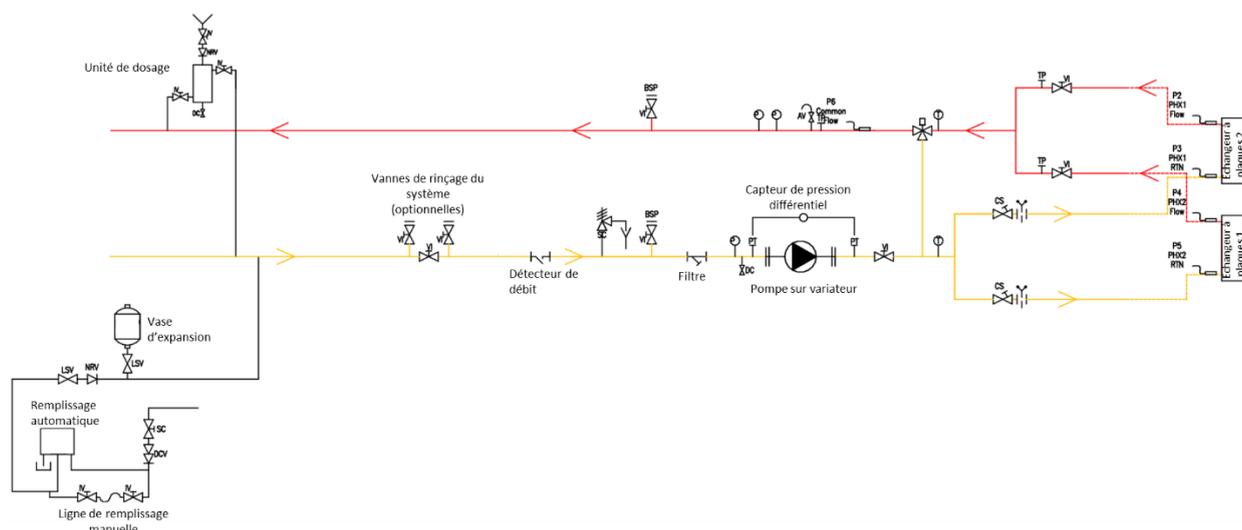
Il a été également envisagé de mettre en place un maintien de la pression de refoulement afin de maximiser la récupération d'énergie dans le but de réduire les consommations annexes du système de chauffage ou alors de laisser le système obtenir sa température de condensation la plus basse possible (type HP flottante) afin de minimiser la consommation de l'installation frigorifique.

Vous trouverez ci-après les scénarii qui ont été envisagés.

| Technologie de récupération de chaleur     | Réfrigérant | HP flottante | Température ambiante minimale équivalente pour la condensation |      |      |      |      |      |      | Température d'eau en sortie |      |
|--|-------------|--------------|--|------|------|------|------|------|------|-----------------------------|------|
|  |             |              | 5°C  | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 35°C | 36°C                        | 45°C |
| Désurchauffe au refoulement du compresseur | R-454C      | X            |  |      | X    | X    | X    | X    |      |                             | X    |
| "A eau"                                    | R-744       | X            | X  | X    | X    |      |      | X    |      | X                           |      |
| "A eau"                                    | R-744       |              |  |      | X    | X    |      | X    | X    | X                           | X    |
| Condensation partielle                     | R-454C      | X            |  |      | X    | X    | X    | X    |      | X                           |      |
| Aérotherme avec condenseur                 | R-454C      |              |  |      |      |      | X    | X    | X    |                             |      |
| Aérotherme avec gas cooler                 | R-744       |              |  |      |      |      |      | X    | X    |                             |      |

**Tableau 3.1 : Scénarii des conditions climatiques et des températures de sortie d'eau utilisés pour la comparaison**

Nous considérons dans cette étude que l'idéal est de maintenir le delta de température sur la boucle d'eau dans le but de maximiser la récupération de chaleur. Il faut donc envisager une pompe sur variateur de vitesse permettant d'adapter le débit d'eau aux températures de la boucle. Afin de clarifier cet aspect vous trouverez ci-après un exemple de schéma fluide pour le contrôle de la boucle d'eau (**figure 2.1**):



**Figure 2.1 – Exemple de schéma fluide pour la régulation de la boucle d'eau**

Le besoin de chauffage pour un magasin de cette taille a été déterminé en utilisant des données collectées auprès d'une chaîne typique de supermarchés d'Europe centrale, ici le besoin utilisé sera de 246.6kW pour -2°C extérieur et un air intérieur chauffé à +20°C.

Le déversement d'air froid provenant des meubles réfrigérés positifs (aussi appelé effet de refroidissement net ambiant) a été estimé en prenant la puissance froide nominale des meubles selon l'ISO 0 multiplié par un coefficient de 0.75 en journée (pendant les horaires d'ouverture) et de 0.70 pour la nuit (magasin fermé, en utilisant les volets de nuit). Pour les meubles négatifs leur puissance nominale a été multiplié par 0.25 pour la journée comme la nuit.

La charge thermique totale a été déduite en considérant constant l'effet de refroidissement net ambiant quelque soit la température extérieure, ce qui est basé sur une charge frigorifique constante des meubles réfrigérés, en y ajoutant les déperditions de chaleur externes qui elles varient en fonction de la température extérieure. Cette variation est une interpolation linéaire entre la température de dimensionnement de -2°C (=246.6kW) et +20°C où les déperditions sont considérées comme nulles.

Pour les températures extérieures supérieures à +25°C les déperditions thermiques sont considérées comme un apport thermique depuis l'extérieur puisqu'il fait plus chaud à l'extérieur qu'à l'intérieur du bâtiment. Cet apport est déduit du déversement d'air froid des meubles. Au-delà de ça, il y aurait un besoin refroidissement du bâtiment qui devra être assuré par la climatisation afin de maintenir les 20°C intérieurs. Pour le cas de Leicester ceci a été ignoré car pour le cas à +30°C il n'y a que 7 heures dans l'année à ces températures et de plus le besoin froid est très faible. Dans le cas de Séville, le besoin de climatisation a été modélisé pour les cas à partir de +30°C et jusqu'au besoin maximum à +40°C.

Vous trouverez ci-après le détail des charges considérées pour Leicester et pour Séville (tableaux 3.2 et 3.3):

| Température Ambiante | Jour   | Nuit   | Déversement froid de jour | Déversement froid de nuit | Besoin de chauffage | Besoin total de Jour | Besoin total de nuit |
|----------------------|--------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| °C                   | Heures | Heures | kW                        | kW                        | kW                  | kW                   | kW                   |
| <b>30</b>            | 7      | 0      | 97.75                     | 70.3                      | -112.08             | 0                    | 0                    |
| <b>25</b>            | 134    | 3      | 97.75                     | 70.3                      | -56.04              | 41.71                | 14.26                |
| <b>20</b>            | 651    | 121    | 97.75                     | 70.3                      | 0                   | 97.75                | 70.3                 |
| <b>15</b>            | 1301   | 748    | 97.75                     | 70.3                      | 56.04               | 153.79               | 126.34               |
| <b>10</b>            | 1352   | 1383   | 97.75                     | 70.3                      | 112.08              | 209.83               | 182.38               |
| <b>5</b>             | 954    | 1213   | 97.75                     | 70.3                      | 168.12              | 265.87               | 238.42               |
| <b>0</b>             | 332    | 519    | 97.75                     | 70.3                      | 224.16              | 321.91               | 294.46               |
| <b>-2</b>            |        |        |                           |                           | 246.58              |                      |                      |
| <b>-5</b>            | 14     | 28     | 97.75                     | 70.3                      | 280.2               | 377.95               | 350.5                |

**Tableau 3.2 Besoins chauds pour Leicester**

| Température Ambiante | Jour   | Nuit   | Déversement froid de jour | Déversement froid de nuit | Besoin de chauffage | Chauffage            |                      | Climatisation        |                      |
|----------------------|--------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                      |        |        |                           |                           |                     | Besoin total de Jour | Besoin total de nuit | Besoin total de Jour | Besoin total de nuit |
| °C                   | Heures | Heures | kW                        | kW                        | kW                  | kW                   | kW                   | kW                   | kW                   |
| <b>40</b>            | 79     | 1      | 97.75                     | 70.3                      | -224.16             | 0                    | 0                    | 126.41               | 153.86               |
| <b>35</b>            | 448    | 34     | 97.75                     | 70.3                      | -168.12             | 0                    | 0                    | 70.37                | 97.82                |
| <b>30</b>            | 747    | 245    | 97.75                     | 70.3                      | -112.08             | 0                    | 0                    | 14.33                | 41.78                |
| <b>25</b>            | 907    | 632    | 97.75                     | 70.3                      | -56.04              | 41.71                | 14.26                | 0                    | 0                    |
| <b>20</b>            | 1038   | 975    | 97.75                     | 70.3                      | 0                   | 97.75                | 70.3                 | 0                    | 0                    |
| <b>15</b>            | 939    | 972    | 97.75                     | 70.3                      | 56.04               | 153.79               | 126.34               | 0                    | 0                    |
| <b>10</b>            | 491    | 974    | 97.75                     | 70.3                      | 112.08              | 209.83               | 182.38               | 0                    | 0                    |
| <b>5</b>             | 96     | 182    | 97.75                     | 70.3                      | 168.12              | 265.87               | 238.42               | 0                    | 0                    |

**Tableau 3.3 Besoins chauds pour Séville**

## Prise en compte de la chaleur disponible pour la récupération

Les températures de refoulement des compresseurs ont été obtenues à partir des logiciels de sélection ou de simulation disponibles.

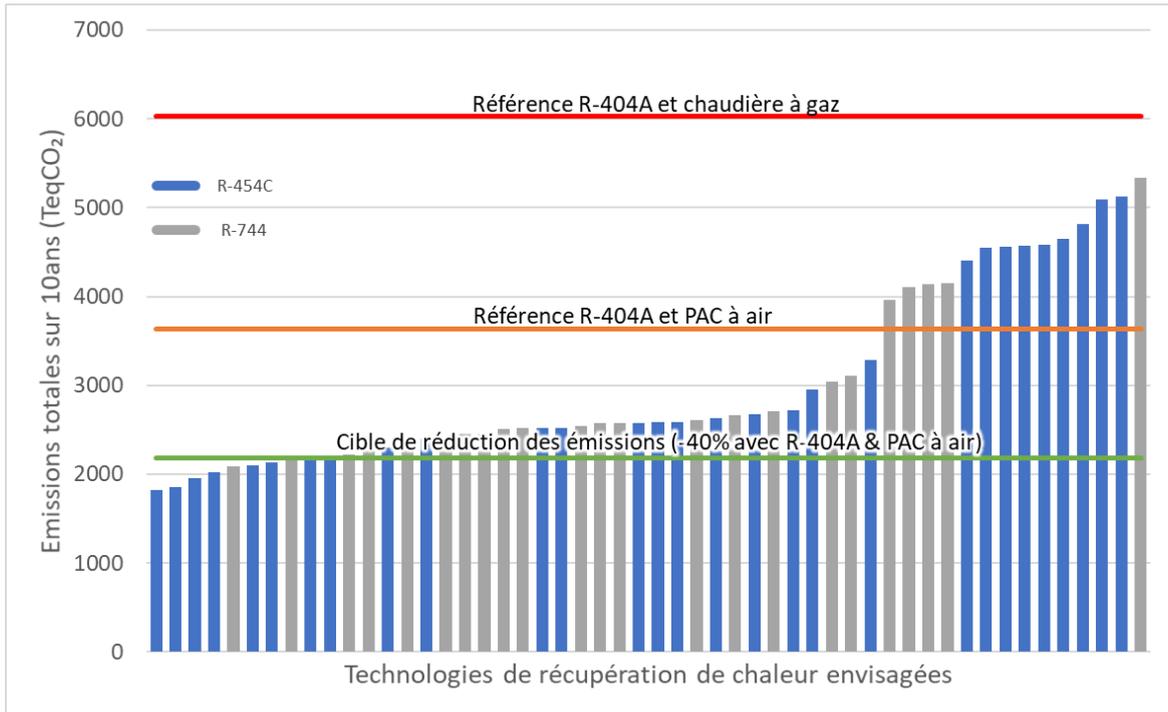
Les températures de refoulement varient comme suit :

- Systèmes Opteon™XL20 :
  - o Etages moyenne température : de 55°C pour la température de condensation minimum jusqu'à 110°C pour la température maximale de 40°C extérieur.
  - o Etages basse température : de 80°C à 110°C (grâce à un système d'injection de liquide la température est maintenue à ce niveau automatiquement dès que la température ambiante dépasse 25°C)
- Systèmes CO2 :
  - o Seule la partie moyenne température est prise en considération car c'est le seul étage sur lequel nous pouvons effectuer une récupération de chaleur : elle varie de 62°C à 118,4°C à +35°C extérieur

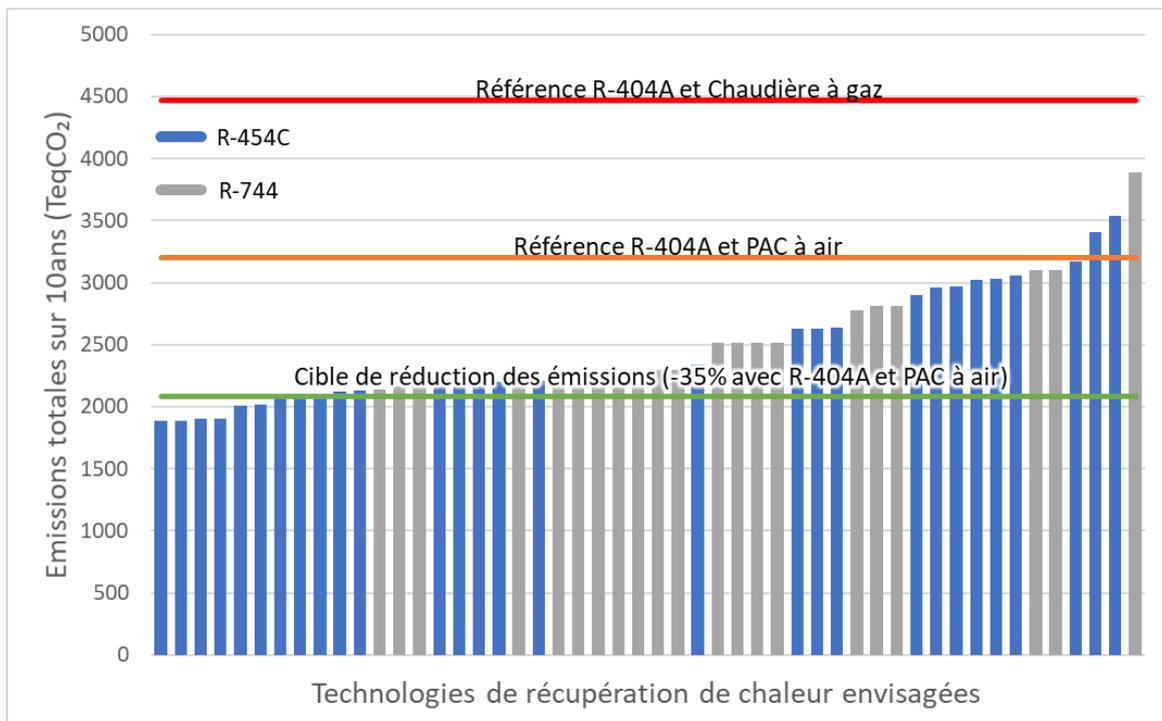
Les conditions de refoulement sont donc assez similaires pour les deux systèmes (du moment que les systèmes CO2 fonctionnent en transcritique)

## Résultats et discussions

Les résultats de cette étude pourraient être présentés de bien des façons cependant comme le but de la législation et des agréments qui ont été mis en place sont de réduire les émissions qui influent sur le climat il semble pertinent de considérer les émissions totales du système en Tonnes Equivalentes de Dioxyde de Carbone  $T_{eq}CO_2$  comme le premier facteur de comparaison des différentes technologies. Sans surprise les différentes technologies ont produit un large spectre de résultats qui vont d'une réduction des émissions de 13%, jusqu'à des réductions de l'ordre de 58 à 70% par rapport à celles produites par un système basique au R-404A couplé à une chaudière à gaz. Dans les figures 4 et 5 ces différentes solutions sont rangées par ordre croissant d'émissions totales et par réfrigérant.



**Figure 4 : Emissions totales sur 10ans pour les différentes technologies de récupération de chaleur considérées dans le cas du climat de Leicester en Angleterre.**



**Figure 5 : Emissions totales sur 10ans pour les différentes technologies de récupération de chaleur considérées dans le cas du climat de Séville en Espagne.**

Afin de limiter le nombre de technologies à étudier, la cible de réduction des émissions a été fixée arbitrairement à : -40% pour le cas de Leicester et de -35% pour Séville, comparé à la solution de référence : R-404A + pompe à chaleur à air.

En appliquant cette cible il reste donc 9 solutions viables pour le cas de l'Angleterre et 6 pour l'Espagne. Afin de rendre le référencement plus aisé des différentes solutions étudiées nous allons leur donner un numéro comme indiqué dans le tableau 4.

Le coût du cycle de vie (CCV) de chaque solution ainsi étudiée est bien entendu un facteur à prendre en compte dans le choix de la technologie qui permet de réduire les émissions mais la solution la moins chère n'est pas nécessairement celle qui génère le moins d'émissions. Voir le tableau 5.

Afin d'évaluer quelle solution fournit la meilleure réduction des émissions à un coût raisonnable une méthodologie différente est nécessaire. Nous allons donc calculer le coût d'abattement par tonne équivalente de CO<sub>2</sub> (T<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>) sur une période de 10ans, ce qui permettra de trouver la technologie la plus efficace en termes de coût pour réduire l'impact environnemental. L'abattement relatif des émissions peut quant à lui être calculé en divisant la différence du coût du cycle de vie sur 10 ans entre la technologie étudiée et la solution de référence par la différence des émissions totales sur 10 ans entre la technologie étudiée et la solution de référence. Ce qui nous donnera un coût d'abattement en £/T<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> (voir Equation\_1).

$$\text{Coût d'abattement par } T_{eq}CO_2 = \frac{CCV_{Technologie alternative} - CCV_{Solution de référence}}{Emissions_{Solution de référence} - Emissions_{Technologie alternative}} \quad (\text{Eq. 1})$$

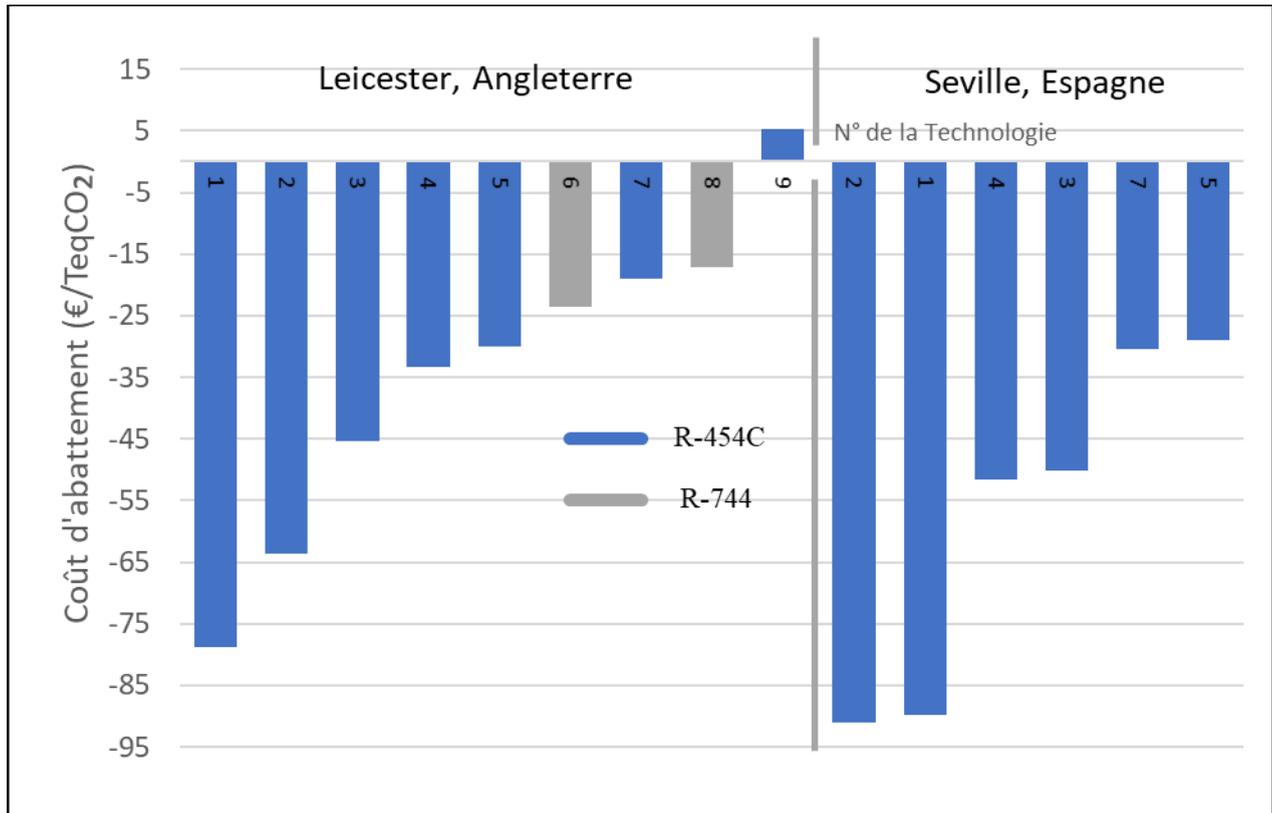
| N° | Technologie  |
|----|--|
| 1  | R-454C - Gaz - Condensation partielle - température de condensation équivalente pour 25°C extérieur  |
| 2  | R-454C - PAC à air - Condensation partielle - température de condensation équivalente pour 25°C extérieur  |
| 3  | R-454C - Gaz - Aérotherme avec condenseur - température de condensation équivalente pour 25°C extérieur  |
| 4  | R-454C - PAC à air - Aérotherme avec condenseur - température de condensation équivalente pour 25°C extérieur  |
| 5  | R-454C - Gaz - Aérotherme avec condenseur - température de condensation équivalente pour 25°C extérieur pour l'étage HT / 30°C pour l'étage BT       |
| 6  | R-744 - PAC à air - Récupération à eau (+36/+30°C) - température de condensation équivalente pour 20°C extérieur                                     |
| 7  | R-454C - PAC à air - Aérotherme avec condenseur - température de condensation équivalente pour 25°C extérieur pour l'étage HT / 30°C pour l'étage BT |
| 8  | R-744 - PAC à air - Récupération à eau (+36/+30°C) - température de condensation équivalente pour 25°C extérieur                                     |
| 9  | R-454C - PAC à air - Aérotherme avec récupération totale sur condenseur - température de condensation équivalente pour 30°C extérieur                |

**Tableau 4 : Numéro d'identification des différentes technologies qui atteignent les objectifs d'émissions**

| N° de la technologie | Angleterre                           |                    | Espagne                              |                    |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|
|                      | Emissions totales sur 10ans (TeqCO2) | CCV sur 10ans (k€) | Emissions totales sur 10ans (TeqCO2) | CCV sur 10ans (k€) |
| 1                    | 2095                                 | 1721               | 1907                                 | 1663               |
| 2                    | 1858                                 | 1767               | 1889                                 | 1659               |
| 3                    | 2022                                 | 1849               | 1900                                 | 1764               |
| 4                    | 1825                                 | 1891               | 1887                                 | 1760               |
| 5                    | 2134                                 | 1914               | 2020                                 | 1822               |
| 6                    | 2092                                 | 1938               | -                                    | -                  |
| 7                    | 1957                                 | 1953               | 2008                                 | 1819               |
| 8                    | 2151                                 | 1965               | -                                    | -                  |
| 9                    | 2154                                 | 2052               | -                                    | -                  |

**Tableau 5 : Emissions totales sur 10ans et coût du cycle de vie sur 10ans des technologies qui atteignent les objectifs d'émissions fixés**

Un coût d'abattement négatif indique que le CCV sur 10ans du système considéré est inférieur à la solution de référence au R-404A. Cette approche seule ne montre pas quelle technologie donne la plus grande réduction des émissions mais comme nous avons déjà sélectionné les différentes technologies qui atteignent notre objectif de réduction des émissions, ceci donne une vraie vision de quelle technologie donne le meilleur résultat de réduction des émissions avec le coût le plus faible. (Figure 6)



**Figure 6 : Coût d'abattement par région selon la technologie considérée**

Une autre façon de représenter ceci avec une cartographie qui va permettre de visualiser les solutions les plus intéressantes rapidement : les bulles placées en bas à gauche représentent les solutions les plus efficaces car avec le moins d'émissions pour le coût total le plus faible. Le diamètre des bulles donne le coût d'abattement qui est rappelé dans les étiquettes, pour rappel un montant positif indique un surcoût pour réduire les émissions alors qu'un montant négatif indique une économie réalisée en même temps qu'une réduction des émissions est réalisée ! Ce coût d'abattement est exprimé en £ pour chaque T<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> en moins. (Voir figures 7 et 8)

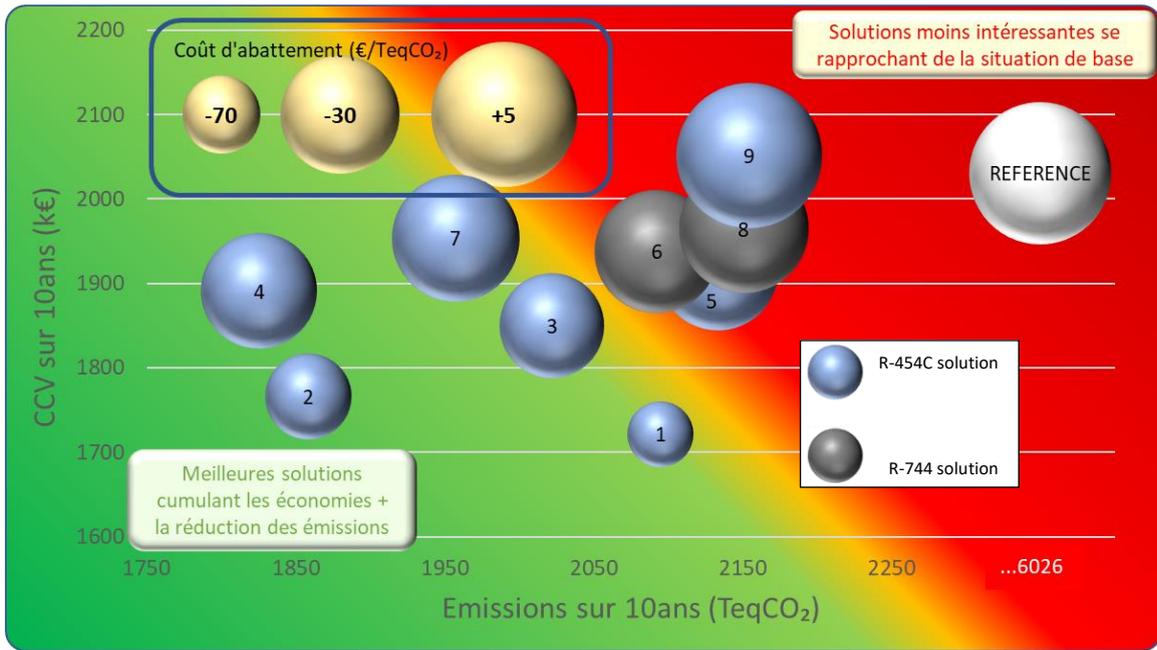


Figure 7 : Coût d'abattement pour l'Angleterre selon la technologie considérée. Le point de base de comparaison est le R-404A et chaudière à gaz (2031k€ / 6026 TeqCO<sub>2</sub>)

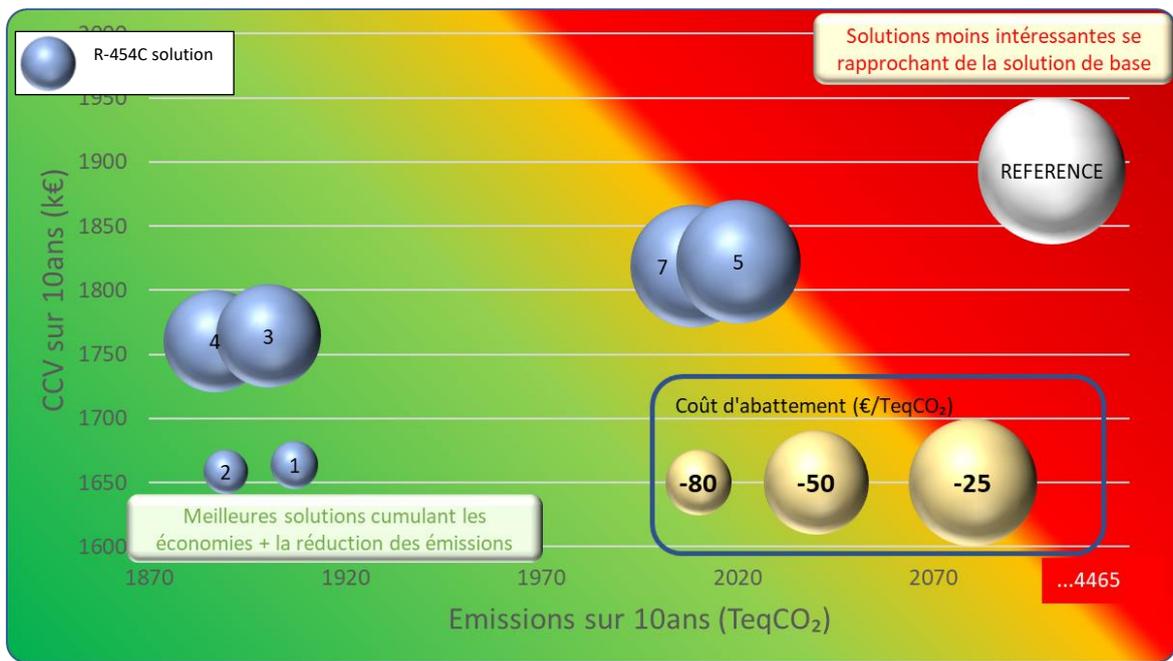
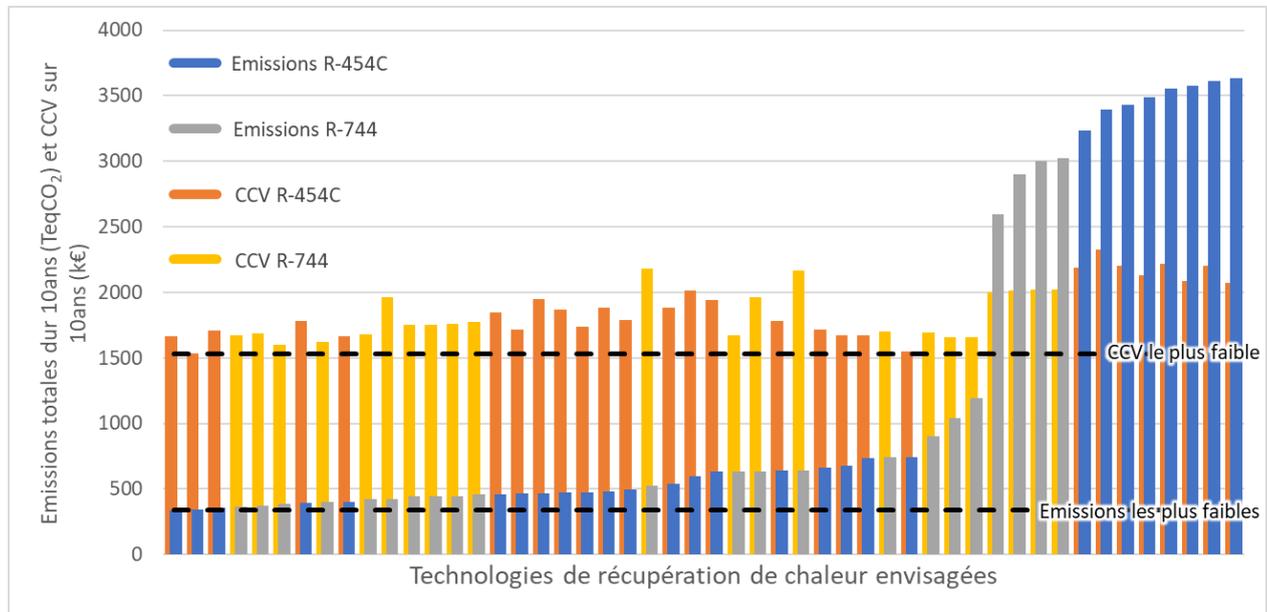


Figure 8 : Coût d'abattement pour l'Espagne selon la technologie considérée. Le point de base de comparaison est le R-404A et chaudière à gaz (1893k€ / 4465 TeqCO<sub>2</sub>)

## Le cas de la France

Tous les pays prévoient de décarboner leur production d'énergie afin de réduire leur TeqCO<sub>2</sub>. Pour simuler cela et estimer l'impact sur les résultats ci-dessus, les données des performances calculées pour l'Angleterre et l'Espagne ont été combinées avec les émissions et le coût de l'énergie en France qui a déjà atteint un facteur d'émission très bas. (Figure 9)



**Figure 9 : Emissions totales sur 10ans et CCV en utilisant les coûts et les émissions de la production d'énergie française**

On remarque ici qu'encore une fois même avec le très faible taux d'émission provoqué par la production d'énergie française les meilleures solutions qui combinent les émissions les plus faibles et le CCV le plus faible sont les solutions R-454C.

## CONCLUSION

Avec toutes ces technologies de récupération de chaleur considérées, les émissions totales sur 10ans sont très inférieures à celles de la solution de référence au R-404A avec une chaudière à gaz. Dans la majorité des cas le CCV sur 10 ans est également beaucoup plus faible que celui de la solution de référence, ce qui signifie qu'en plus de diminuer les émissions totales sur 10ans, l'utilisateur final, fera également des économies sur le long terme en utilisant la récupération de chaleur.

En considérant le niveau d'émission actuel des productions d'énergie, les technologies utilisant un fluide frigorigène à faible PRG à base de HFO tel que le R-454C offrent le plus faible niveau d'émissions totales quel que soit le climat considéré ; le tempéré anglais ou chaud espagnol. Dans le cas des conditions climatiques de l'Angleterre, 9 technologies différentes (dont 7 utilisant du R-454C) permettent une réduction d'au moins 40% des émissions comparé à la solution de base au R-404A couplé à une PAC à air. Pour le climat espagnol 6 d'entre elles (toutes au R-454C) atteignent une réduction des émissions d'au moins 35% comparé à cette même base.

En combinant les réductions d'émissions avec le CCV afin de calculer un coût d'abattement de  $T_{eq}CO_2$  nous avons montré que l'utilisateur final peut bénéficier d'économies de l'ordre de 79€ à 90€/T<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> en utilisant le R-454C pour les besoins froids et en installant une récupération de chaleur associée à cette production. La solution de récupération de chaleur la plus efficace en termes de coûts (avec le coût d'abattement le plus faible) dépend des conditions extérieures même si dans les deux régions la solution avec condensation partielle et pression HP minimum contrôlée pour une température extérieure équivalente à +25°C est optimale, mais pour le cas anglais l'utilisation d'une chaudière gaz comme source supplémentaire d'énergie est plus avantageuse, tandis que pour le cas espagnol c'est la PAC à air qui est la meilleure option.

L'utilisation d'une source d'énergie avec de faibles émissions de CO<sub>2</sub> va trivialement beaucoup réduire les chiffres des émissions totales sur 10 ans, d'autant plus dans les cas où l'utilisation d'une PAC est prévue comme source de chaleur complémentaire. Même dans ce cas-là les technologies fonctionnant au R-454C donneront encore le taux d'émissions sur 10 ans le plus faible associé au moindre CCV.

Les résultats de cette étude démontrent clairement que l'utilisation de réfrigérants à faible PRG à base de HFO, tels que le R-454C, peut être associée à une stratégie de récupération de chaleur et que ces fluides sont capables de surpasser les performances d'autres fluides à faible PRG tels que le R-744.

## REFERENCES

- Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases.
- The Path to Reducing Climate Change Emissions for Commercial Refrigeration, Chemours White Paper, October 2019.
- CO<sub>2</sub> - The Inconvenient Truth, Chemours White Paper, March 2020.
- Cameron, S., Churchyard, B., Cook, N., 2020, The Environmental Impact and Performance of HFO R454A in Retail Supermarkets, IIR International Rankine 2020 Conference, IIR, Paper ID 1230.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Eurostat (May 2019), <https://www.businesselectricityprices.org.uk/europe/>
- UK combined electricity conversion (emissions) factor, as applied to Leicester, is a 2018 UK Government figure according to DEFRA/BEIS.
- Association of Issuing Bodies (AIB), 2017.
- Meurer, C, 2011, European Advances in Supermarket Refrigeration Leak Reduction, , EFCTC Publications, <https://www.fluorocarbons.org/publication/european-advances-supermarket-refrigeration-leak-reduction/#.XclrzzP7SUK>
- SWEP International AB, 2019, SSPG8 Braze Plate Heat Exchanger Selection Software.

Les informations figurant dans le présent document sont fournies à titre gratuit et sont établies sur la base de données techniques jugées fiables par Chemours. Elles sont destinées à être utilisées, à leur seul risque, par des personnes possédant les compétences techniques requises. Les conditions d'utilisation de ce produit n'étant pas placées sous notre contrôle, nous ne donnons aucune garantie, expresse ou implicite, et n'entendons assumer une quelconque responsabilité quant à l'usage qui sera fait de ces informations. Le présent document ne constitue pas une licence d'utilisation ni une incitation à violer un brevet existant.

© 2021 The Chemours Company FC, LLC. Opteon™ et tout logo associé sont des marques ou copyrights de The Chemours Company FC, LLC. Chemours™ et le logo Chemours sont des marques de The Chemours Company.