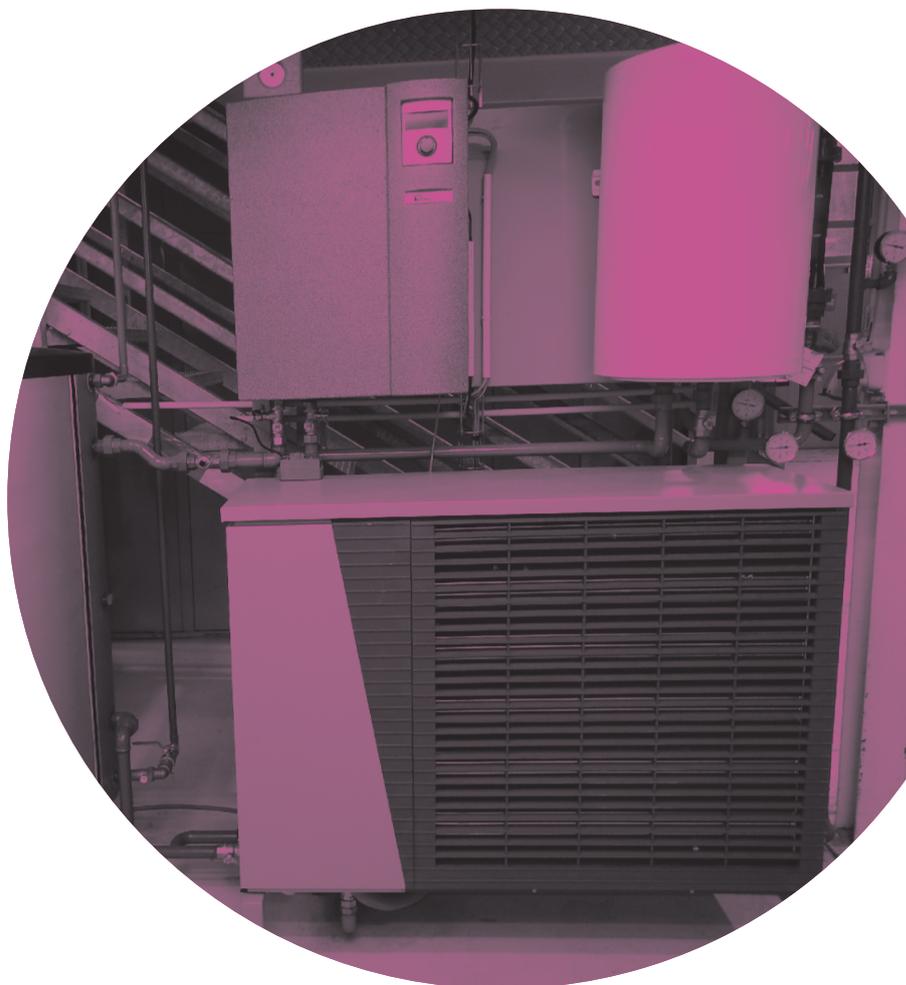


LES POMPES À CHALEUR À FLUIDE NATUREL

AVRIL 2021



AVANT-PROPOS

Avec le programme PROFEEL, la filière Bâtiment s'est rassemblée pour répondre collectivement aux défis de la rénovation énergétique. 16 organisations professionnelles ont été à l'initiative de cette démarche et, continuent aujourd'hui à porter activement.

PROFEEL se compose concrètement de 9 projets, positionnés sur trois grands enjeux : favoriser le déclenchement des travaux de rénovation, garantir la qualité des travaux réalisés et consolider la relation de confiance entre les professionnels. Ces projets s'appuient sur l'innovation, qu'elle soit technique ou numérique, afin de mieux outiller les professionnels du bâtiment, d'améliorer les pratiques sur le marché de la rénovation énergétique et de garantir la qualité des travaux réalisés. Ces outils permettront d'accompagner les acteurs durant toutes les étapes d'un projet de rénovation : en amont, pendant et après les travaux.

Dans le cadre du projet BONNES PRATIQUES, un des 9 projets PROFEEL, 14 nouveaux outils pratiques sont développés pour accompagner les professionnels dans la conception, la mise en œuvre et la maintenance de solutions techniques, clés ou innovantes de rénovation énergétique. Cette nouvelle collection d'outils s'inscrit dans la continuité des référentiels techniques produits dans le cadre de précédents programmes portés par la filière Bâtiment : PACTE et RAGE.

Le présent document est le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.

Pour plus d'information : <https://programmeprofeel.fr/>

PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics



Porteurs



Financiers



Filière Bâtiments



PROFEEL, un programme financé par le dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE)



SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	P. 4
2	CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES : FLUIDE ET LUBRIFIANT	P. 5
3	CARACTÉRISTIQUES DES FLUIDES NATURELS	P. 9
4	ÉTAT DE L'OFFRE DES ÉQUIPEMENTS CVC	P. 22
5	ÉTAT DE LA RÉGLEMENTATION EXISTANTE SUR L'USAGE DES FLUIDES NATURELS	P. 36
6	DÉFINITION DES RÈGLES D'INTERVENTION SPÉCIFIQUES	P. 38



VERSION
Édition 1

DATE DE LA PUBLICATION
Avril 2021

MODIFICATIONS

1

INTRODUCTION

Depuis quelques années, le marché de la pompe à chaleur en résidentiel connaît un essor important. C'est ainsi qu'entre 2018 et 2019, différents types de pompe à chaleur ont connu une forte évolution :

- + 27 % pour les pompes à chaleur air/air de puissance inférieure à 17 kW
- + 83 % pour les pompes à chaleur air/eau avec un marché de plus en plus important en rénovation
- + 13 % pour les chauffe-eaux thermodynamiques (CET) installés dans le neuf ou dans l'existant.

Cette étude traite de la connaissance et des bonnes pratiques relatives aux pompes à chaleur utilisant un fluide naturel et destinées à la production de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire (ECS). Toutefois, lors de l'analyse de l'offre des produits, il sera considéré les éventuelles applications réversibles et sera mentionné l'adaptation du fluide à cette application.

Comme tout système thermodynamique, le fonctionnement et les performances des pompes à chaleur et chauffe-eau thermodynamiques assurant le chauffage et/ou la production d'ECS, dépendent des caractéristiques du fluide frigorigène utilisé.

Un fluide frigorigène est une substance ou un mélange de substances utilisé dans les circuits de système thermodynamique et dont les propriétés physiques (passage en phase liquide et en phase vapeur selon les conditions de température et de pression) permettent le transfert de l'énergie.

Encore actuellement, les équipements techniques dans le résidentiel (pompe à chaleur, chauffe-eau thermodynamique, climatiseur à air) sont couverts par des fluides HFC (Hydrofluorocarbone) : le R410A et dans une moindre mesure, le R134a voire le R407C.

Or, ces fluides HFC ont un impact environnemental. Et, selon le fluide, le potentiel de réchauffement climatique

(ou potentiel de réchauffement planétaire – PRP, exprimé en kg CO₂/kg fluide), va être égal à :

- 2088 pour le R410A (cela signifie que l'émission dans l'atmosphère d'1 kg de R410A équivaut à 2088 kg de CO₂) ;
- 1774 pour le R407C ;
- 1430 pour le R134a.

En raison de l'impact des fluides frigorigènes sur l'environnement, les réglementations actuelles visent à réduire progressivement la quantité des fluides hydrofluorocarbones (HFC) mise sur le marché ainsi que les équipements utilisant ces fluides. C'est ainsi que le règlement UE N°517/2014 du 16 avril 2014 relatif aux gaz à effet de serre fluorés (appelé règlement F-Gaz) définit notamment des dates d'interdiction de mise sur le marché d'équipements. Parmi ces dates, notons :

- 1^{er} janvier 2025 : interdiction de mise sur le marché de systèmes de climatisation bi-blocs dont la charge en gaz à effet de serre fluorés < 3 kg et dont le PRP (Potentiel de Réchauffement Planétaire) ≥ 750.

Parallèlement à ces échéances, il est établi des contrôles d'étanchéité pour tout équipement présentant une certaine quantité de fluide frigorigène HFC.

Face aux restrictions croissantes imposées sur l'usage des fluides frigorigènes fluorés, le recours à des fluides à faible impact environnemental émerge. En complément des fluides HFC avec un faible PRP (a minima inférieur à 700), il se développe de nouveaux fluides de synthèse de la famille des hydrofluorooléfines (HFO).

Parallèlement à ces fluides synthétiques, le recours aux fluides naturels pourrait être considéré comme une alternative sérieuse. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude.

A noter que les fluides naturels et les fluides synthétiques HFO ne sont pas soumis aux exigences réglementaires de la F-Gaz, contrairement aux HFC.

2

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES : FLUIDE ET LUBRIFIANT

2

1

DÉFINITION

Un fluide frigorigène est une substance (ou mélange de substance) permettant d'assurer les transferts d'énergie dans un système thermodynamique. Son impact sur l'environnement extérieur est plus ou moins important.

Pour caractériser cet impact, plusieurs indicateurs existent. Le critère « ODP » d'un fluide caractérise son potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Quant au critère « GWP » (ou PRP), il caractérise son potentiel de réchauffement climatique.

Un fluide naturel est un fluide non chloré et sans halogènes (pas de Fluor par exemple). À l'opposé des fluides « synthétiques », **la dénomination « fluides naturels » va s'appliquer aux substances inorganiques pures et à certains hydrocarbures.**

Plus précisément, il s'agit des fluides suivants qui seront considérés dans la suite de cette étude :

- fluides inorganiques purs : R717 (ammoniac), R718 (eau), R744 (dioxyde de carbone - CO₂) ;
- hydrocarbures (saturés ou insaturés) : R290 (propane), R1150 (éthylène), R1270 (propylène), R600 (butane), R600a (isobutane).
- Le CO₂ et le propane sont les deux principaux fluides naturels déjà utilisés pour les applications examinées dans cette étude.

Un fluide naturel se caractérise par un impact nul sur la couche d'ozone (ODP = 0) et un faible impact sur le réchauffement climatique (effet de serre).

NOTE



En toute rigueur, l'impact environnemental des fluides comprend la **phase de production du fluide** et la **phase d'utilisation de celui-ci dans un système**. Il est défini comme le produit de la charge de fluide (charge initiale majorée pour considérer les fuites émises tout au long du cycle de vie du système) et de la valeur de l'impact issu de la donnée environnementale du fluide (valeur indiquée dans la base de données INIES www.base-inies.fr).

Chaque fluide frigorigène est désigné par une lettre R suivie d'un numéro. Les composés purs inorganiques sont définis par le numéro 700 auquel s'ajoute la masse molaire du composant.

2

2

LE FLUIDE FRIGORIGÈNE

Un fluide frigorigène a pour rôle d'assurer le transfert de chaleur entre deux milieux en subissant un ensemble de transformations thermodynamiques à l'intérieur d'une machine frigorigère. Dans l'idéal, les caractéristiques d'un

fluide frigorigène doivent satisfaire au mieux les conditions définies ci-après.

Aucun des fluides, y compris naturels, ne permet de satisfaire à l'ensemble de ces qualités.

TABLEAU 1 Synthèse des caractéristiques générales d'un fluide frigorigène

Critère général	Exemple de critères	Commentaires
Critères thermodynamiques	Pressions de fonctionnement (évaporation et condensation)	S'assurer d'une pression d'évaporation du fluide > pression atmosphérique pour maintenir le circuit en surpression et éviter toute introduction d'air et d'eau en cas de fuite. S'assurer d'une pression de condensation éloignée au maximum de la pression critique
	Chaleur latente de vaporisation	Avoir une chaleur latente élevée
	Température critique	Avoir une température critique > température de condensation afin d'éviter toute diminution des performances du système. En règle générale, chercher à s'éloigner du régime critique (P, T)
	Rapport de compression	Chercher à limiter le taux de compression afin d'optimiser le rendement volumétrique du compresseur. Ce taux est défini comme le rapport « pression refoulement/pression aspiration ».
	Température d'ébullition	Avoir une température d'ébullition assez basse permet de couvrir un champ d'application plus important
	Volume massique de vapeur saturée	Avoir un faible volume massique de vapeur saturée permet d'utiliser un compresseur et des tuyauteries réduits
	Rapport des chaleurs massiques (coefficient polytropique de compression) – ratio Cp/Cv	Avoir ce coefficient proche de 1 afin de limiter la surchauffe des vapeurs au cours de la compression. Une surchauffe trop importante peut nuire aux qualités lubrifiantes de l'huile.
Critères techniques	Conductivité thermique	Améliorer l'échange thermique grâce à une conductivité thermique élevée
	Limite Pratique	Déterminer la limite de charge maximale pour un fluide et une application spécifique
	Composition chimique stable, compatibilité entre le fluide et le lubrifiant du compresseur	
	Pas d'action sur les métaux du circuit	Vérifier la compatibilité du fluide avec les matériaux de l'installation
Critères de sécurité et environnementaux	Action faible voire limitée sur le réchauffement climatique	
	Non inflammable, non explosif, non toxique	Privilégier la classe de sécurité A1
	Limite d'exposition à une toxicité, limite de privation d'oxygène	Valeurs ATEL / ODL
Critères économiques	Facilement disponible, faible coût, facilité de production	

2

3

LE LUBRIFIANT

2.3.1 CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DU LUBRIFIANT

Dans un système thermique, la lubrification assure plusieurs fonctions :

- réduire les frottements entre les pièces mécaniques du compresseur et prévenir leur usure en permettant un bon graissage des pièces en mouvement ;
- évacuer la chaleur générée par les frottements mis en jeu lors du processus de compression ;
- contribuer à parfaire l'étanchéité.

Les propriétés essentielles de l'huile sont :

- le pouvoir lubrifiant lié à l'épaisseur du film d'huile ;
- la solubilité avec le fluide frigorigène à l'état gazeux ;
- la miscibilité avec le fluide frigorigène à l'état liquide ;
- la viscosité permettant la résistance aux variations de température.

Ces paramètres sont décrits plus précisément dans le tableau ci-après.

TABEAU 2 Caractéristiques des lubrifiants

Critères	Descriptif du critère
Viscosité	Caractérise le pouvoir lubrifiant de l'huile. Une viscosité trop faible va affecter la protection contre l'usure des pièces du compresseur. Une huile trop visqueuse peut se déposer et figer dans l'évaporateur entraînant une dégradation des échanges thermiques et une chute du niveau d'huile au niveau du compresseur. Considérer la viscosité du mélange « huile + fluide frigorigène » via les courbes « viscosité-pression-température » fournies par le producteur ou distributeur de lubrifiant.
Miscibilité	Capacité de l'huile à former un mélange homogène avec le fluide frigorigène. Elle dépend de la nature de l'huile, du fluide et de la température. En cas de miscibilité médiocre, risque d'accumulation de l'huile dans l'évaporateur avec réduction de sa surface d'échange.
Solubilité	Capacité du fluide frigorigène à se dissoudre dans l'huile et ce, pour des conditions de température et pression différentes.
Point écoulement	Température à partir de laquelle l'huile se fige. La température doit être la plus basse possible pour éviter sa rétention dans les parties les plus froides du circuit (évaporateur).
Stabilité thermique	Capacité de l'huile à conserver ses propriétés lubrifiantes à des températures élevées rencontrées en fin du compression. Capacité à résister à la répétition des cycles « basses températures – hautes températures ».
Stabilité chimique	Capacité de l'huile à ne pas entrer en réaction avec les métaux, vernis et autres matériaux présents dans le circuit. Réactivité également négligeable avec le fluide frigorigène.

La miscibilité et la solubilité du mélange « fluide/huile » sont des paramètres importants à considérer.

En ce qui concerne la miscibilité du mélange « fluide/huile », deux options sont possibles : une application « miscible » et une application « non miscible ».

En cas de mélange non miscible, il est impératif de placer au refoulement du compresseur un séparateur d'huile.

Pour les applications dites « miscibles » (systèmes sans séparateur d'huile), le mélange parcourt tout le circuit frigorifique. Ainsi, le mélange doit rester homogène jusqu'à la fin de l'évaporation afin de pouvoir revenir au compresseur.

NOTE



La classification des huiles peut se faire à partir de leur viscosité. La viscosité décrit les caractéristiques d'écoulement de l'huile et va diminuer quand la température augmente.

La classe de viscosité s'exprime comme suit : ISO VG suivi d'un numéro exprimant la viscosité cinématique moyenne à 40°C. Plus le chiffre est élevé et plus le lubrifiant est visqueux. On trouve ainsi par exemple des huiles ISO VG 32, ISO VG 42, ISO VG 68.

2.3.2 DIFFÉRENTES FAMILLES D'HUILE

Trois grands types d'huiles frigorigènes sont à distinguer :

- les huiles minérales ;
- les huiles semi-synthétiques ;
- les huiles synthétiques.

Les **huiles minérales** sont des huiles naturelles se caractérisant par une très bonne fluidité à basse température.

Il existe deux types d'huiles : les huiles naphthéniques et les huiles paraffiniques.

Les huiles naphthéniques présentent un point d'écoulement bas.

Les **huiles synthétiques** sont principalement des polymères tels que les esters et les polyols. Plusieurs sous familles existent.

TABEAU 3 Caractéristiques principales des différentes familles de lubrifiants

Type d'huile	Caractéristiques principales
Huiles minérales naphthéniques	Point d'écoulement bas Limite d'emploi fixée vers - 30 °C
Huiles minérales paraffiniques	Indice de viscosité élevé
Huiles synthétiques – Alkylbenzènes (notamment type AB)	Excellente stabilité thermique et chimique Excellente miscibilité à basse température Indice de viscosité faible
Huiles synthétiques – Polyalphaoléfinés (PAO)	Point d'écoulement bas Utilisation à basse température Excellente stabilité thermique et chimique Indice de viscosité élevé
Huiles synthétiques – Polyalkylénéglycols (PAG)	Indice de viscosité élevé Fort pouvoir hygroscopique Stabilité thermique et chimique moyenne
Huiles synthétiques – Polyolesters (POE), polyvinylesters (PVE)	Indice de viscosité élevé Pouvoir hygroscopique Excellente stabilité thermique et chimique Point d'écoulement bas

3

CARACTÉRISTIQUES DES FLUIDES NATURELS

Ce chapitre décrit les caractéristiques thermodynamiques et physico-chimiques essentielles des fluides naturels. En complément, les champs d'application potentiels sont également mentionnés.

3

1

LES COMPOSÉS INORGANIQUES PURS

3.1.1 LE R744 (DIOXYDE DE CARBONE)

Le R744 a été utilisé depuis le début du 20^{ème} siècle dans les systèmes frigorifiques. Cependant son usage a disparu au cours des années 50 compte tenu du niveau de pression très élevé nécessaire à son cycle thermodynamique.

En raison des enjeux environnementaux actuels, son utilisation est redevenue d'actualité. Il peut être utilisé en froid commercial, en réfrigération agro-alimentaire, dans les pompes à chaleur pour l'ECS.

3.1.1.1 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

Le R744 est un fluide frigorigène non toxique et non inflammable, classé A1. Il présente un PRP égal à 1.

Dans les conditions atmosphériques normales, le R744 est environ 1,5 fois plus lourd que l'air. En cas de fuite, il va se substituer à l'oxygène et entraîner un risque d'anoxie. En présence d'humidité dans le circuit, le CO₂ réagit avec l'H₂O pour former de l'acide carbonique, acide qui présente un effet corrosif sur certains matériaux.

Le fluide R744 présente des caractéristiques spécifiques :

- une température critique faible (31 °C) ;
- une pression critique élevée (73 Pa) ;
- un point triple élevé.

Le point triple, illustré sur le schéma suivant, est le point où les trois phases (solide, liquide et vapeur) peuvent coexister à des conditions de pression et de température bien précises. Un cycle thermodynamique subcritique (c'est-à-dire la plupart de ceux utilisés) va évoluer entre le point triple et le point critique.

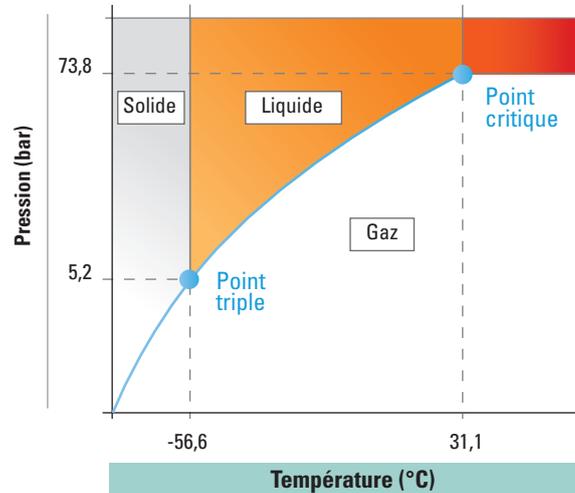


FIGURE 1 Caractéristiques du point triple et du point critique pour le R744

Dans les conditions atmosphériques normales, le CO₂ est à l'état gazeux. A une température comprise entre - 56.6 °C et + 31 °C et sous une pression au moins égale à 5.2 bar, le CO₂ peut se présenter sous l'état liquide. En-dessous de - 56.6 °C, le CO₂ peut se retrouver à l'état solide. Ces évolutions d'état sont primordiales lors de la manipulation de

ce fluide. Nous reviendrons sur ce point en dernière partie d'étude.

Compte tenu des pressions de fonctionnement élevées et de sa faible viscosité, le CO₂ est considéré comme un fluide « facilement fuyard ». Une vigilance est nécessaire quant à la conception des équipements et notamment les soudures.

TABLEAU 4 Caractéristiques du fluide R744

Caractéristiques	Fluide frigorigène R744
Masse molaire (g/mol)	44
Température ébullition (°C) (à Patm)	- 78,4
Température critique (°C)	31
Pression critique (bar)	73,7
Ratio Cp/Cv à 25 °C sous 1,013 bar	1,294
Chaleur latente de vaporisation du point d'ébullition (kJ/kg)	1367,9
Conductivité thermique à 25 °C (W/m.K)	
Liquide	0,0807
Vapeur	0,0166
Viscosité de liquide à 30 °C (10 ⁻³ Pa.s)	0,044
GWP (kg CO ₂ /kg)	1
Limite de toxicité / limite de privation d'oxygène (ATEL / ODL) (kg/m ³)	0,072
Limite pratique (kg/m ³)	0,1
Classe de sécurité	A1
Groupe de fluides DESP (Directive Equipements sous Pression : 2014/68/UE)	2

3.1.1.2 CYCLE DE FONCTIONNEMENT TRANSCRITIQUE DU R744

La faible température critique de ce fluide impose des cycles de fonctionnement spécifiques. En effet, la source chaude d'une pompe à chaleur est souvent à une température supérieure à la température critique du CO_2 . Dans ce cas-là, le cycle de fonctionnement est dit « transcritique » car il passe par une phase « supercritique » (au-dessus du point critique).

tiori une variation du coefficient de performance. Il est donc important de pouvoir optimiser cette haute pression. Ceci a été mis en évidence lors d'études paramétriques montrant l'évolution du COP en fonction de la haute pression et ce, pour différentes températures de source chaude (SC) et source froide (SF) (TOUBLANC C., 2009). Ces résultats, illustrés figure suivante, montrent qu'une

R744 Ref : W.C Reynolds : Thermodynamic Properties

Pression (bar)

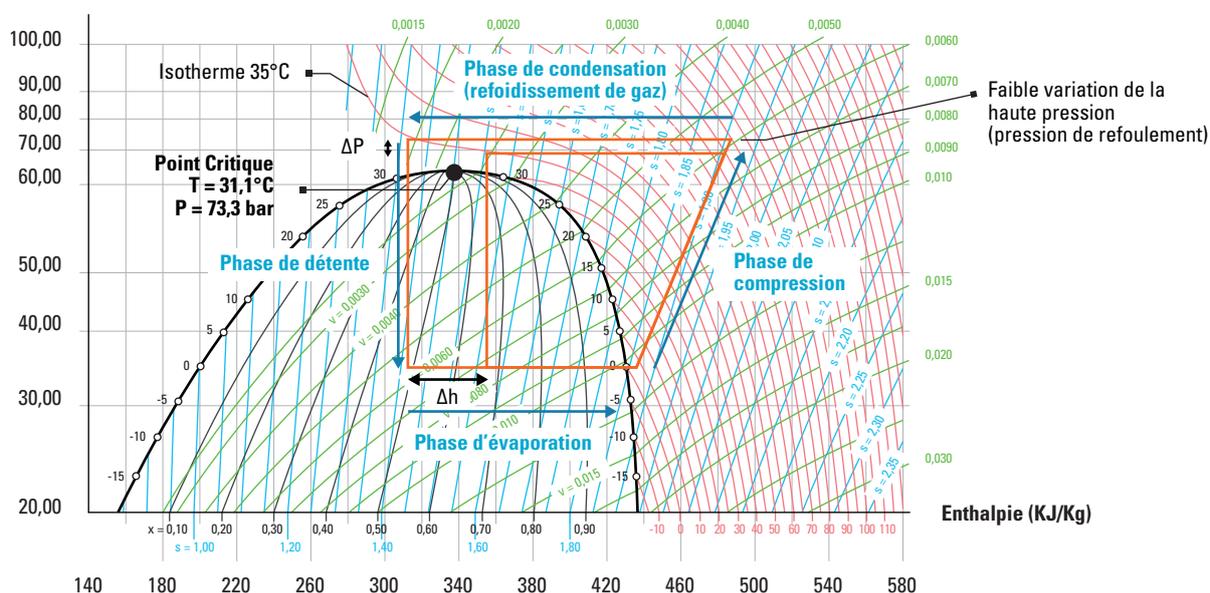


FIGURE 2 Cycle de fonctionnement transcritique du CO_2 sur le diagramme enthalpique

Source : BYRNE P. et al, Fluides frigorigènes naturels et fluides à faible GWP pour petites pompes à chaleur, 2017

Au cours de ce cycle, le CO_2 est comprimé jusqu'à une pression supercritique (haute pression) pouvant atteindre 120 bar. Puis, il est refroidi non pas dans un condenseur mais dans un échangeur appelé « refroidisseur de gaz » (ou gas cooler). La particularité de cette région supercritique est que la température n'est plus couplée à la pression.

Au-dessus du point critique, les isothermes présentent un point d'inflexion. Ainsi, par exemple, pour une température de gaz sortant du refroidisseur à 35°C , une « faible » variation de la pression de refoulement va entraîner une forte variation de la puissance aux échangeurs et a for-

« faible » augmentation de la haute pression peut engendrer un gain beaucoup plus important sur le COP. Par exemple, pour des températures de source froide et chaude égales à 0°C (T_{SF}) et 35°C (T_{SC}), le passage de la haute pression de 75 à 85 bar engendre une augmentation du COP de 1,13 à 3,47 soit une augmentation de plus de 200 %. A noter cependant qu'il existe une **haute pression optimale** à partir de laquelle, une augmentation de cette haute pression entraîne une dégradation du coefficient de performance : l'énergie de compression « prend le dessus » sur l'énergie thermique transférée.

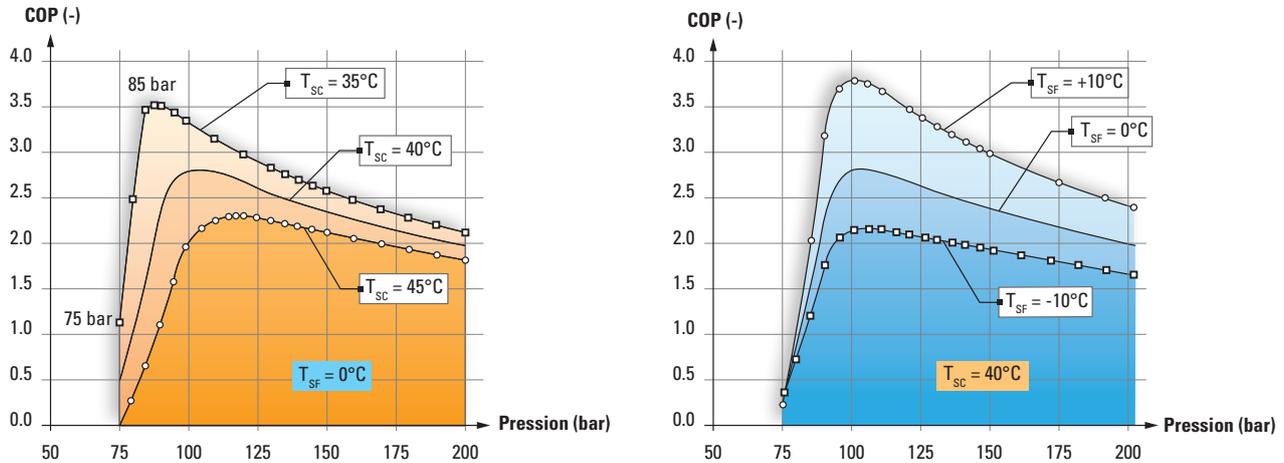


FIGURE 3 Étude paramétrique de l'évolution du COP en fonction de la haute pression et selon la température de source froide (T_{sf}) ou la température de source chaude (T_{sc})

[d'après TOUBLANC C., Amélioration du cycle transcritique au CO_2 par une compression refroidie : évaluations numérique et expérimentale, Thèse de doctorat, 2009]

Le CO_2 convient parfaitement aux systèmes de production d'eau chaude. Le cycle transcritique atteint des performances correctes à partir du moment où l'on refroidit au maximum le gaz (dans le gas cooler) comme cela a été réalisé avec les chauffe-eau thermodynamiques. Un refroidissement du CO_2 au niveau du gas cooler entre 120°C

et 20°C est mis à profit pour produire de l'ECS. Egalement, le recours à plusieurs gas cooler en série dans lesquels la température diminue progressivement peut permettre d'assurer le chauffage de l'eau pour l'ECS et la préparation d'eau pour le réseau de chauffage.

3.1.1.3 CHOIX DU LUBRIFIANT

Les huiles synthétiques Polyolesters (POE) et PAG sont les plus adaptées au R744 et pourront convenir pour les applications subcritique et transcritique. Notons toutefois que ces huiles sont très hygroscopiques. Des soins particuliers sont à apporter lors de la manipulation afin d'éviter toute absorption d'humidité.

Les huiles Polyolesters (POE), miscibles avec le R744, permettent un haut degré de solubilité avec le CO_2 ce qui contribue à une réduction de la viscosité avec risque de rupture du film d'huile. **L'utilisation des huiles POE avec le fluide R744 implique un plus haut grade ISO afin**

de pallier ces chutes de viscosité. Une huile de grade ISO VG 80 pourra être adaptée.

Dans le cas des huiles Polyalkylénéglycols (PAG), la réduction de viscosité n'est pas aussi importante que pour les huiles POE. Cela permet l'utilisation d'un lubrifiant de viscosité moindre, tel qu'un grade ISO VG 68, de sorte de protéger le compresseur. Les huiles PAG possèdent une excellente stabilité thermique qui permet de travailler dans les conditions de refoulement élevées rencontrées notamment dans le cycle de fonctionnement transcritique.

3.1.2 LE R717 (AMMONIAC)

3.1.2.1 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

L'ammoniac est un des tout premiers fluides frigorigènes utilisés. Son impact environnemental est nul concernant le réchauffement climatique et ses propriétés thermodynamiques sont excellentes. Il possède un très bon coefficient de transfert de chaleur, une température critique élevée permettant de concevoir des systèmes avec des températures de condensation très élevées. Par contre, l'ammoniac

est toxique, irritant et dans une moindre mesure, légèrement inflammable. Il est classé B2L.

Lorsque sa concentration dans l'air (à 20°C sous 1,013 bar) est comprise entre 15 % et 28 % en volume, il y a risque d'inflammabilité.

L'ammoniac est plus léger que l'air.

TABEAU 5 Caractéristiques du fluide R717

Caractéristiques	Fluide frigorigène R717
Masse molaire (g/mol)	17
Température ébullition (°C) (à Patm)	- 33,5
Température critique (°C)	132,3
Pression critique (bar)	113,5
Ratio Cp/Cv à 25 °C sous 1,013 bar	1,335
Chaleur latente de vaporisation du point d'ébullition (kJ/kg)	1367,9
Conductivité thermique à 0 °C (W/m.K)	
Liquide	0,559
Vapeur	0,023
Tension de surface à 30 °C (N/m)	0,0285
Inflammabilité	Oui
Limite inférieure inflammabilité (LFL) (kg/m ³)	0,116 (15 % en vol)
Température inflammation (°C)	630
GWP (kg CO ₂ /kg)	0
Limite de toxicité / limite de privation d'oxygène (ATEL / ODL) (kg/m ³)	0,00022
Limite pratique (kg/m ³)	0,00035
Classe de sécurité	B2L (toxique, légèrement inflammable)
Groupe de fluides DESP (Directive Equipements sous Pression : 2014/68/UE)	1

Source : www.climalife.dehon.com

A noter que l'ammoniac corrode facilement le cuivre et ses alliages. Le recours à l'acier est généralement nécessaire. La conductivité thermique du fluide est satisfaisante ce qui permet d'améliorer les échanges thermiques et peut être bénéfique lors de la conception des échangeurs. En raison de sa toxicité, il est à ce jour quasi uniquement utilisé dans les installations de froid industriel de grande

puissance. L'emploi de ce fluide dans ces conditions est parfaitement satisfaisant. Mais le véritable enjeu est sa possibilité à « investir » le marché de la petite puissance ce qui sera développer dans les chapitres suivants à travers notamment l'évolution du marché.

NOTE

Dans le cadre d'un programme de recherche, il a déjà été testé avec succès une PAC eau/eau de puissance calorifique 9 kW (0/40 °C) au R717 permettant de produire simultanément de l'eau chaude sanitaire à 60 °C (désurchauffeur) et un chauffage par le sol (condenseur) et ce, grâce à la température élevée de refoulement du fluide.

3.1.2.2 CHOIX DU LUBRIFIANT

L'ammoniac est un fluide qui chauffe beaucoup à la compression. Ainsi, le lubrifiant utilisé doit disposer de caractéristiques compatibles à cette spécificité des hautes températures et présenter notamment une haute résistance du film lubrifiant.

Il n'y a pas de miscibilité entre l'huile utilisée et l'ammoniac : l'huile entraînée dans le circuit doit donc pouvoir être réintégrée au niveau du compresseur. De plus, l'huile, plus

lourde que l'ammoniac, va se déposer en partie inférieure. L'utilisation d'un séparateur d'huile est donc nécessaire. L'ammoniac est communément utilisé avec les huiles minérales [paraffiniques et naphéniques] ainsi que les huiles synthétiques Polyalphaoléfinés (PAO) voire un mélange à base d'huiles PAO/AB. Pour les applications industrielles, un grade ISO VG 68 est généralement utilisé.

3.1.3 LE R718 (EAU)

L'eau est un fluide frigorigène non toxique, non inflammable et parfaitement respectueux de l'environnement. Il est classé A1. En termes de propriétés thermodynamiques, ce fluide possède une chaleur latente de vaporisation intéressante mais une très faible densité de vapeur ce qui le rend inadapté pour son utilisation dans un cycle de com-

pression « classique » (avec compresseur volumétrique). Il est utilisé dans les machines à absorption.

Également, ce fluide présente une température d'ébullition élevée, 100 °C à la pression atmosphérique, qui exclut toute production de froid négatif.

TABLEAU 6 Caractéristiques du fluide R718

Caractéristiques	Fluide frigorigène R718
Masse molaire [g/mol]	18
Température ébullition [°C] (à Patm)	100
Température critique [°C]	374
Pression critique [bar]	22
Ratio Cp/Cv à 25 °C sous 1,013 bar	1,33
Chaleur latente de vaporisation [5 °C] [kJ/kg]	2489
Densité de vapeur saturée [5 °C] [kg/m ³]	0,0068
Classe de sécurité	A1

3

2

LES HYDROCARBURES (SATURÉS OU INSATURÉS)

La problématique principale des hydrocarbures est leur inflammabilité. Tous les hydrocarbures sont classés A3, c'est-à-dire non toxiques mais hautement inflammables.

A ce jour, le propane (R290) et l'isobutane (R600a) sont les deux principaux hydrocarbures utilisés.

NOTE



Un fluide classé « inflammable » est uniquement inflammable dans ses limites d'inflammabilité. En dessous ou au-dessus de ces seuils, il ne présente pas de danger. Plus la valeur inférieure d'inflammabilité est élevée et plus une quantité de fluide est nécessaire dans l'air ambiant pour déclencher un incendie.

3.2.1 LE R290 (PROPANE)

Le propane présente une certaine dangerosité d'autant qu'il est plus lourd que l'air. Lorsque sa concentration dans l'air (à 20 °C sous 1,013 bar) est comprise entre 2,2 % et

9,5 % en volume, il y a risque d'inflammabilité et d'explosion. Ses principales caractéristiques sont rappelées ci-après.

TABEAU 7 Caractéristiques du fluide R290

Caractéristiques	Fluide frigorigène R290
Masse molaire (g/mol)	44
Température ébullition (°C) (à Patm)	- 42,1
Température critique (°C)	96,7
Pression critique (bar)	42,5
Ratio Cp/Cv à 25 °C sous 1,013 bar	1,136
Chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition (kJ/kg)	425,6
Conductivité thermique à 25 °C (W/m.K)	
Liquide	0,094
Vapeur sous 1,013 bar	0,018
Viscosité liquide à 25 °C (10 ⁻³ Pa.s)	0,097
Inflammabilité	Oui
Limite inférieure inflammabilité (LFL) (kg/m ³)	0,038 (2,2 %)
Température inflammation (°C)	470
Limite de toxicité / limite de privation d'oxygène (ATEL/ODL) (kg/m ³)	0,09
Limite pratique (kg/m ³)	0,008
GWP (kg CO ₂ /kg)	3
Groupe de fluides DESP (Directive Equipements sous Pression : 2014/68/UE)	1

Source : www.climalife.dehon.com, NF EN 378-1

Les propriétés thermodynamiques du R290 sont très bonnes. Une température critique élevée et une température d'ébullition très faible permettent de couvrir une large gamme d'applications. Ce fluide est utilisé pour les

installations de réfrigérations et de plus en plus pour de nombreuses pompes à chaleur (PAC air/eau et PAC eau/eau notamment) ainsi que pour des chauffe-eau thermodynamiques.

3.2.2 LE R600 (BUTANE)

Le R600 est un hydrocarbure avec un GWP (kg CO₂/kg) égal à 4. Ses principales caractéristiques sont :

- Masse molaire : 58,1 g/mol
- Température ébullition : - 0,6 °C
- Température critique (°C) : 152 °C
- Limite pratique : 0,0089 kg/m³
- Limite inférieure d'inflammabilité : 0,038 kg/m³
- Température inflammation : 365 °C

- Limite de toxicité/de privation d'oxygène (ATEL/ODL) : 0,0024 kg/m³
- Groupe de fluides DESP (directive Equipements sous Pression : 2014/68/UE) : 1

Son éventuelle utilisation pour des applications en pompe à chaleur semble peu évidente au regard du manque d'éléments présents dans la littérature scientifique.

3.2.3 LE R600A (ISOBUTANE)

Le fluide R600a est un fluide frigorigène environ deux fois plus lourd que l'air. Lorsque sa concentration dans l'air (à 20 °C sous 1,013 bar) est comprise entre 2 % et 10 % en volume, il y a risque d'inflammabilité et d'explosivité.

L'isobutane (R600a) est l'hydrocarbure le plus fréquemment utilisé dans les réfrigérateurs domestiques. Les

risques liés à son inflammabilité sont limités grâce à la petite taille des systèmes et a fortiori à la faible charge de fluide dans les équipements. Concernant cette application domestique, le fluide synthétique utilisé également pour cette application est le R134a.

Quelques caractéristiques sont récapitulées ci-après.

TABLEAU 8 Caractéristiques du fluide R600a

Caractéristiques	Fluide frigorigène R600a
Masse molaire [g/mol]	58,1
Température ébullition [°C] (à Patm)	- 11,7
Température critique [°C]	134,7
Pression critique [bar]	36,29
Ratio Cp/Cv à 25 °C sous 1,013 bar	1,105
Chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition [kJ/kg]	365,11
Conductivité thermique à 25 °C [W/m.K]	
Liquide	0,089
Vapeur sous 1,013 bar	0,017
Viscosité liquide à 25 °C [10^{-3} Pa.s]	0,151
Inflammabilité	Oui
Limite inférieure inflammabilité (LFL) [kg/m ³]	0,043 (2,2 %)
Température inflammation [°C]	460
Limite de toxicité / limite de privation d'oxygène (ATEL/ODL) [kg/m ³]	0,059
Limite pratique [kg/m ³]	0,011
GWP [kg CO ₂ /kg]	3
Groupe de fluides DESP (Directive Equipements sous Pression : 2014/68/UE)	1

Source : www.climalife.dehon.com, NF EN 378-1

3.2.4 LE R1150 (ETHYLENE)

Le fluide R1150 est le premier hydrocarbure insaturé. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Température ébullition : - 103,8 °C
- Température critique : 9,2 °C
- Limite pratique : 0,006 kg/m³

3.2.5 LE R1270 (PROPYLÈNE)

Le fluide R1270 est un hydrocarbure insaturé. Il présente une certaine dangerosité d'autant plus que ce fluide est plus lourd que l'air. Lorsque sa concentration dans l'air

- Limite inférieure d'inflammabilité : 0,036 kg/m³
- Température inflammation : 425 °C

Les niveaux de température et notamment une température critique faible limitent fortement l'attractivité de ce fluide pour les applications visées dans cette étude.

(à 20 °C sous 1,013 bar) est comprise entre 2 % et 11,2 % en volume, il y a risque d'inflammabilité et d'explosivité.

Le tableau ci-dessous récapitule quelques caractéristiques.

TABLEAU 9 Caractéristiques du fluide R1270

Caractéristiques	Fluide frigorigène R1270
Masse molaire (g/mol)	42,1
Température ébullition (°C) (à Patm)	- 47,7
Température critique (°C)	91,1
Pression critique (bar)	46,65
Chaleur latente de vaporisation	437,9 kJ/kg
Conductivité thermique (à 15 °C et 1,013 bar) (W/m.K)	0,0156
Inflammabilité	Oui
Limite inférieure inflammabilité (LFL) (kg/m ³)	0,046 (2 %)
Température inflammation (°C)	455
Limite de toxicité / limite de privation d'oxygène (ATEL / ODL) (kg/m ³)	0,0017
Limite pratique (kg/m ³)	0,008
GWP (kg CO ₂ /kg)	2
Groupe de fluides DESP (Directive Equipements sous Pression : 2014/68/UE)	1

Source : www.westfalen-france.fr, NF EN 378-1

Compte tenu de ses caractéristiques, le R1270 peut théoriquement être utilisé comme fluide frigorigène. Son domaine d'application principal est plutôt lié à la réfrigération

industrielle, voire aux pompes à chaleur en tertiaire. Pour ces applications, les principaux fluides synthétiques utilisés sont le R404A, R407C et avant le R22.

3.2.6 SYNTHÈSE DES HYDROCARBURES

Les hydrocarbures ont un faible impact sur l'environnement et présentent de bonnes propriétés thermodynamiques.

Ce sont d'excellents fluides frigorigènes.

Les températures critiques élevées et les températures d'ébullition relativement basses permettent à ces fluides de couvrir un large domaine d'application. Toutefois, compte tenu de leur caractère hautement inflammable, ces fluides restent dangereux s'ils ne sont pas correctement manipulés.

Les limites d'inflammabilité et limites pratiques des hydrocarbures présentés sont similaires et ne constituent pas un critère de sélection (vis-à-vis notamment de la NF EN 378 relative aux exigences de sécurité et d'environnement des systèmes frigorifiques et pompes à chaleur). En revanche, les températures d'ébullition à pression atmosphérique sont assez différentes selon l'hydrocarbure considéré : de l'ordre de - 40 °C pour le R290 et R1270 permettant une application en réfrigération et plutôt de l'ordre de - 10 °C pour les R600 et R600a.

La figure suivante représente l'évolution des courbes « pression-température » pour les différents hydrocarbures, en comparaison notamment au R22. Il est à remarquer que la pression de fonctionnement du R600a est inférieure à celle du R290 ce qui tend à expliquer notamment l'utilisation préférentielle du R600a dans les appareils ménagers.

Le butane et l'isobutane risquent de fonctionner à des basses pressions inférieures à la pression atmosphérique pour des températures négatives, ce qui suppose une parfaite étanchéité de l'installation pour éviter toute infiltration de l'humidité ambiante dans le circuit frigorifique.

Le propylène (R1270) est l'hydrocarbure qui présente les pressions de saturation les plus élevées. A noter que la courbe « pression-température » du propylène est assez proche de celle du R22.

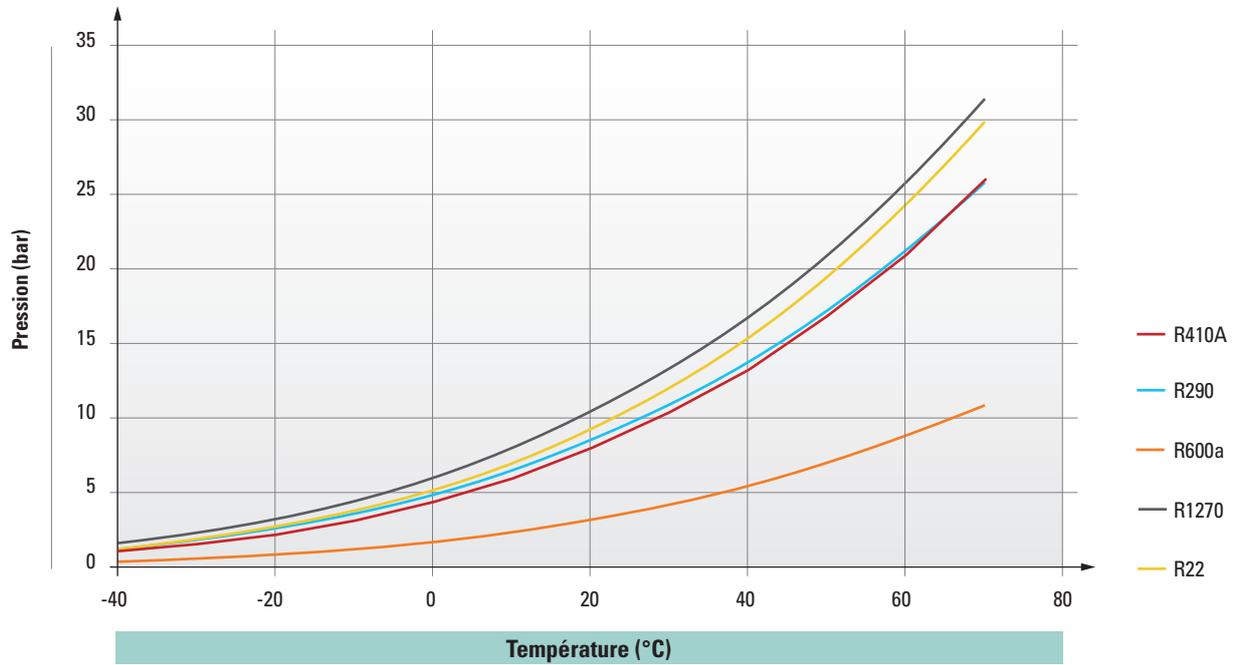


FIGURE 4 Relation Pression-Température pour différents hydrocarbures (en comparaison avec R22)

Les hydrocarbures peuvent être utilisés avec différents types d'huile :

- les huiles minérales et notamment les huiles naphténiques ;
- Les huiles synthétiques et notamment les huiles alkylbenzènes (type AB) ou encore les huiles polyalphaoléfiniques (PAO).

3

3

SYNTHÈSE

En complément de leur faible impact environnemental, les fluides naturels peuvent présenter d'excellentes propriétés thermodynamiques. La figure suivante récapitule la relation « pression-température » pour les principaux fluides

naturels. Le R744 présente des pressions nettement plus élevées que les autres fluides. Les autres fluides ont des niveaux de pression à peu près comparables à l'exception du R600a qui est en-dessous.

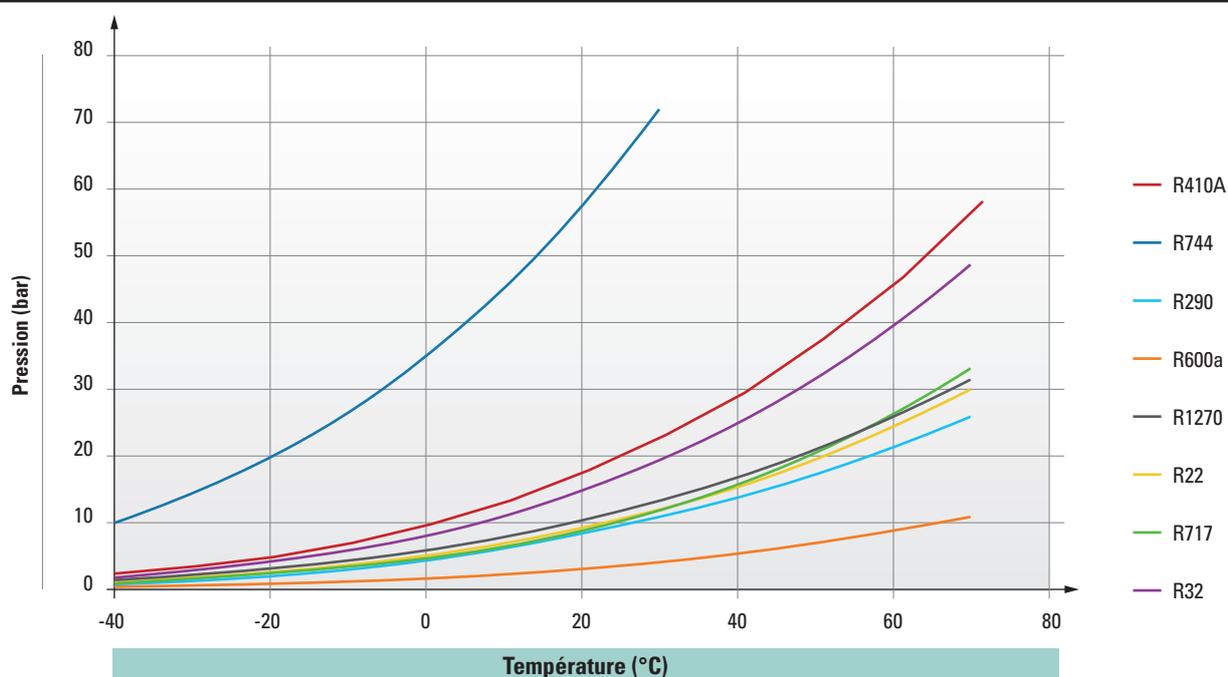


FIGURE 5 Relation pression-température pour différents fluides frigorigènes

L'ammoniac et les hydrocarbures sont des fluides frigorigènes très performants. Le caractère toxique pour l'ammoniac et le caractère hautement inflammable pour les hydrocarbures tendent actuellement à restreindre leur diffusion. Des précautions d'utilisation, une réduction de la charge de fluide dans les systèmes grâce à l'optimisation des échangeurs, peuvent aider à l'émergence de ces fluides et seront dans tous les cas indispensables pour espérer favoriser leur développement.

L'eau, en tant que fluide frigorigène, n'est pas adapté pour les systèmes à compression. Son utilisation en résidentiel pour des pompes à chaleur apparaît peu probable.

Le CO₂ est un fluide frigorigène adapté à la production d'eau chaude sanitaire à condition d'être sur un cycle

transcritique. En effet, sa faible température critique ne permet pas de l'utiliser efficacement dans un cycle thermodynamique « classique ». Ce fluide peut également être utilisé pour des applications de confort thermique moyennant de lever les contraintes relatives aux fortes pressions de fonctionnement et de maîtriser parfaitement les conditions de fonctionnement en mode transcritique et notamment le contrôle voire l'optimisation de la haute pression (pression supercritique au refoulement).

En termes de champ d'application, les fluides R290 et R744 se démarquent pour de multiples applications en résidentiel.

TABEAU 10 Quels fluides naturels selon le champ d'application

Equipements	Fluides frigorigènes synthétiques principalement utilisés à ce jour	Fluides frigorigènes naturels potentiels pour ces prochaines années
Chauffe-eau thermodynamique	R410A R134a R513A	R744 R290
Pompe à chaleur air/air	R410A	?
Pompe à chaleur air/eau	R410A	R290 R744 R1270 ?
Pompe à chaleur eau/eau	R410A R407C	R744 R290

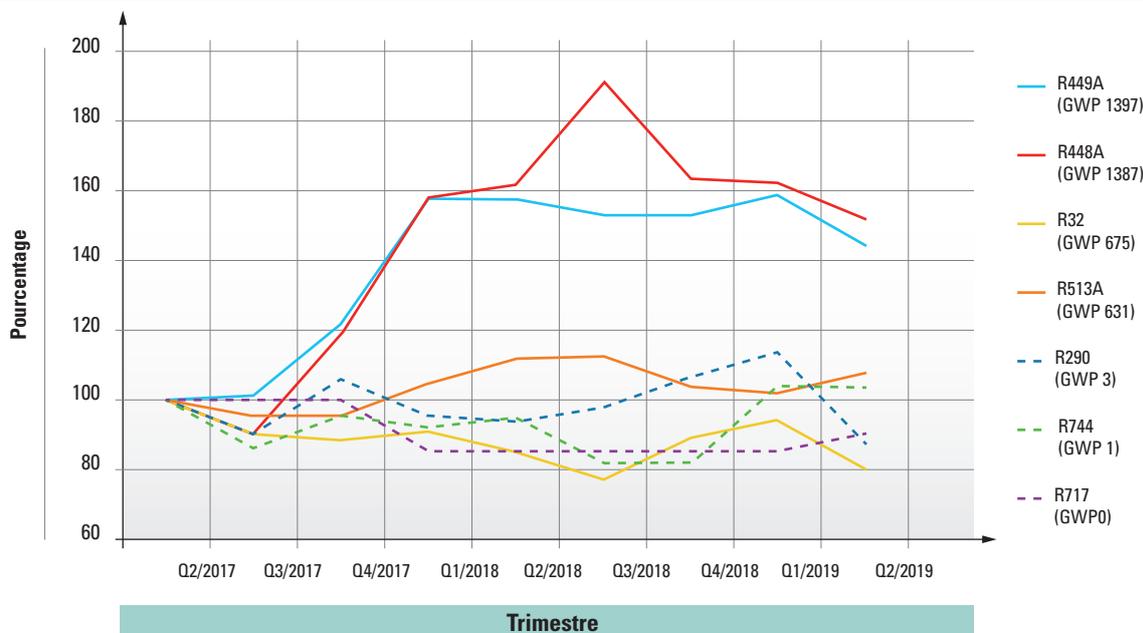
En complément des performances, les critères de disponibilité et de coût d'achat sont importants.

L'évolution des prix moyens d'achat des fluides naturels est illustrée figure suivante. Entre 2017 et 2019, comme cela a été rapporté lors de la Conférence « ATMO sphere Europe » (2019 - Warsaw, Pologne), le prix moyen d'achat des fluides naturels n'a cessé d'évoluer entre hausse et baisse raisonnables.

Le deuxième trimestre 2017, indicé 100 sur le graphe est considéré comme la référence. Le prix du propane (R 290)

a connu une augmentation constante avant de diminuer fortement au premier trimestre 2019, à l'inverse du CO₂ (R 744). L'ammoniac a subi une baisse entre 2017 et 2018 mais est très légèrement remonté au premier trimestre 2019.

Dans tous les cas, la disponibilité de ces fluides est bonne et leurs prix moyens restent très inférieurs aux fluides synthétiques HFC.

**FIGURE 6** Evolution du prix moyen d'achat des fluides alternatifs (référence prise au deuxième trimestre 2017)

Source : ATMO sphere Europe 2019 (Warsaw, Pologne) cité par LaRPF, octobre 2019

Le coût des hydrocarbures peut être inférieur de l'ordre de 30 % minimum à celui de fluides HFC (R32, R134a, R410A par exemple) (selon www.eurorefrigerant.com).

Ces tendances sont confirmées actuellement par les distributeurs de fluides. Le coût du propane est environ 60-70 % inférieur au R410A et 30 % inférieur au R32. Quant au

fluide naturel R744, son prix est inférieur aux autres fluides, jusqu'à 60 % par rapport au R290. Ci-après, quelques ordres de grandeurs de coût de fluide (ordre de grandeur défini pour des quantités similaires).

Le coût varie selon la quantité achetée et le conditionnement.

TABEAU 11 Ordre de grandeur du coût de fluide frigorigène

Fluide frigorigène	Coût (€ HT / kg)
R744 (CO ₂)	3
R290 (propane)	9
R32	14
R134a	28
R410A	30
R513A	30

Si les performances de ces fluides sont théoriquement satisfaisantes et leurs coûts attractifs, qu'en est-il vraiment sur le marché français et européen ? Quels produits, quelles

techniques sont aujourd'hui favorisés ou en train d'émerger. C'est ce que nous traitons dans le chapitre suivant.

4

ÉTAT DE L'OFFRE DES ÉQUIPEMENTS CVC

Cette partie vise à établir une analyse de l'offre des différents types de pompe à chaleur utilisant un fluide naturel.

4

1

LES POMPES À CHALEUR

4.1.1 RAPPELS

Une pompe à chaleur (PAC) permet d'assurer le chauffage et/ou la production d'eau chaude sanitaire dans un logement. Pour ce faire, la PAC va puiser les calories à l'extérieur (source extérieure appelée « source froide » : air, eau, eau glycolée) et les réinjecter à l'intérieur (source intérieure appelée « source chaude » : air, eau). La pompe à chaleur peut également assurer la climatisation du logement par inversion de son cycle de fonctionnement. Pour rappel, le champ d'application principal est le « mode chauff-

fage » (et ECS). **Même si la plupart des systèmes étudiés sont réversibles**, le scope de l'étude étant orienté rénovation en France, et compte tenu de la typologie des installations existantes en France, **les usages de ces machines en mode froid seront très rares**. Dans d'autres pays tels que l'Espagne, où les émetteurs sont principalement des ventilo-convecteurs, l'utilisation du mode froid peut très bien s'appliquer.

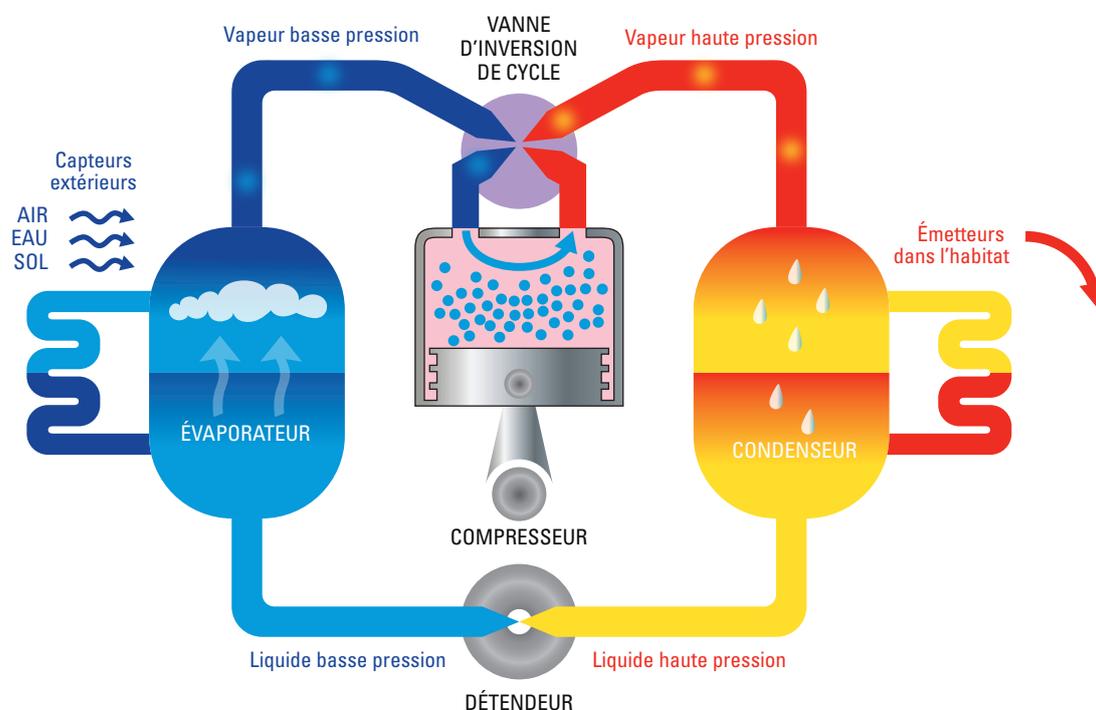


FIGURE 7 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Source : AFPAC, La pompe à chaleur en rénovation ; quelle PAC choisir pour ma maison, 2019

En rénovation, le choix de la pompe à chaleur peut être lié au mode de chauffage préalablement existant. Ainsi, en présence d'un réseau d'eau de chauffage (radiateurs, plancher chauffant), il pourra être privilégié la mise en œuvre d'une pompe à chaleur air/eau voire d'une pompe à chaleur géothermique (eau glycolée/eau ou eau/eau). Lorsque le système de chauffage initial est un chauffage

électrique, le recours à une pompe à chaleur air/air est une solution. Dans ce dernier cas, il ne s'agit pas de PAC avec un fluide naturel. En effet, les PAC air/air, système à détente directe, sont largement dominées par l'utilisation actuelle de fluides HFC : R410A et R32.

La figure suivante synthétise ces différentes options.

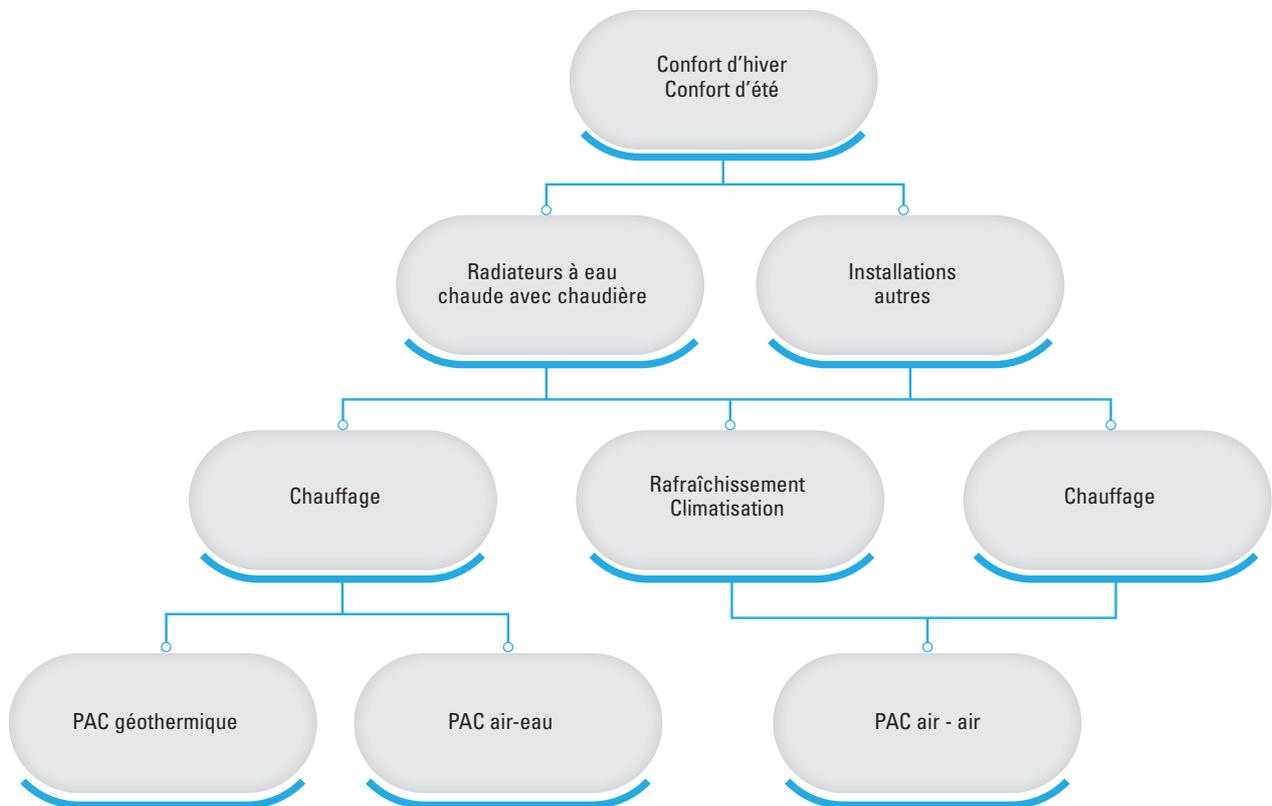


FIGURE 8 Choix de la pompe à chaleur selon l'équipement de chauffage existant

Source : AFPAC, La pompe à chaleur en rénovation ; quelle PAC choisir pour ma maison, 2019

Ainsi, les pompes à chaleur géothermiques (eau glycolée/eau ou encore eau/eau) mais également les pompes à chaleur air/eau seront traitées dans ce chapitre.

Les chauffe-eau thermodynamiques monobloc seront bien entendu traités, mais également les CETD split, bien que ces derniers s'apparentent davantage à un assemblage

d'une PAC air/eau «classique» et d'un système de stockage d'eau chaude, le tout piloté par une régulation optimisant leur fonctionnement.

Par souci de simplification, lorsque des concepts généraux seront abordés, le terme de pompe à chaleur sera utilisé pour regrouper l'ensemble de la famille des PAC et CETD.

4.1.2 LES FLUIDES RENCONTRÉS SUR LE MARCHÉ DES POMPES À CHALEUR

Cette étude a recensé les Pompes à Chaleur et Chauffe-Eau ThermoDynamiques disponibles sur le marché européen et utilisant des fluides naturels. Parmi les fluides mentionnés au paragraphe précédent, les fluides utilisés majoritairement sont le propane (R290) et le CO₂ (R744). Les avantages de ces fluides sont leurs excellentes propriétés thermodynamiques, mais également leur capacité à produire de l'eau à haute température (jusqu'à 65-70 °C). Ces produits peuvent donc être installés sans besoin de remplacer les émetteurs sur les anciennes installations, dimensionnés pour des températures élevées, et sont également compatibles avec de la production d'eau chaude sanitaire.

Certaines machines utilisent de l'ammoniac (R717), ce sont les PAC à absorption. Ces machines n'utilisent pas le principe de compression mécanique des machines thermodynamiques «usuelles», mais utilisent la réaction exothermique de la dissolution de l'ammoniac dans l'eau, et utilisent la combustion du gaz pour évaporer et séparer l'ammoniac dissout de l'eau. Ces PAC à absorption présentent donc une solution de remplacement lorsque le gaz naturel est disponible, et offre une alternative aux chaudières classiques, avec un meilleur rendement.

4.1.3 CARACTÉRISTIQUES ET PERFORMANCES DES ÉQUIPEMENTS

4.1.3.1 LES PAC AIR/EAU

Ce type de machines est le plus répandu à l'heure actuelle pour l'utilisation des fluides naturels. Pour les comparer, la norme EN 14825 définit la démarche permettant de calculer un rendement saisonnier, basé sur des mesures de performances à charge partielle pour différentes conditions extérieures (-7, -2, +7 et +12 °C). Également, les machines peuvent être comparées en fonction de leur application (à 35 ou 55 °C) et de leur climat d'utilisation (-22, -10 ou +2 °C). De ces valeurs, il est possible de calculer

l'efficacité énergétique saisonnière η_s (%) qui s'apparente au SCOP au facteur près de conversion énergie primaire/finale (coefficient de 2,5).

Ainsi, cette efficacité saisonnière offre la meilleure méthode pour comparer les machines entre elles.

L'étiquette énergétique définit également des seuils d'efficacité pour classer les performances des catégories G à A+++.

TABLEAU 12 Classes d'efficacité pour l'application basse température (35°C)

Classe d'efficacité énergétique saisonnière pour le chauffage des locaux	Efficacité énergétique saisonnière pour le chauffage des locaux η_s en %
A+++	$\eta_s \geq 175$
A++	$150 \leq \eta_s < 175$
A+	$123 \leq \eta_s < 150$
A	$115 \leq \eta_s < 123$
B	$107 \leq \eta_s < 115$
C	$100 \leq \eta_s < 107$
D	$61 \leq \eta_s < 100$
E	$59 \leq \eta_s < 61$
F	$55 \leq \eta_s < 59$
G	$\eta_s < 55$

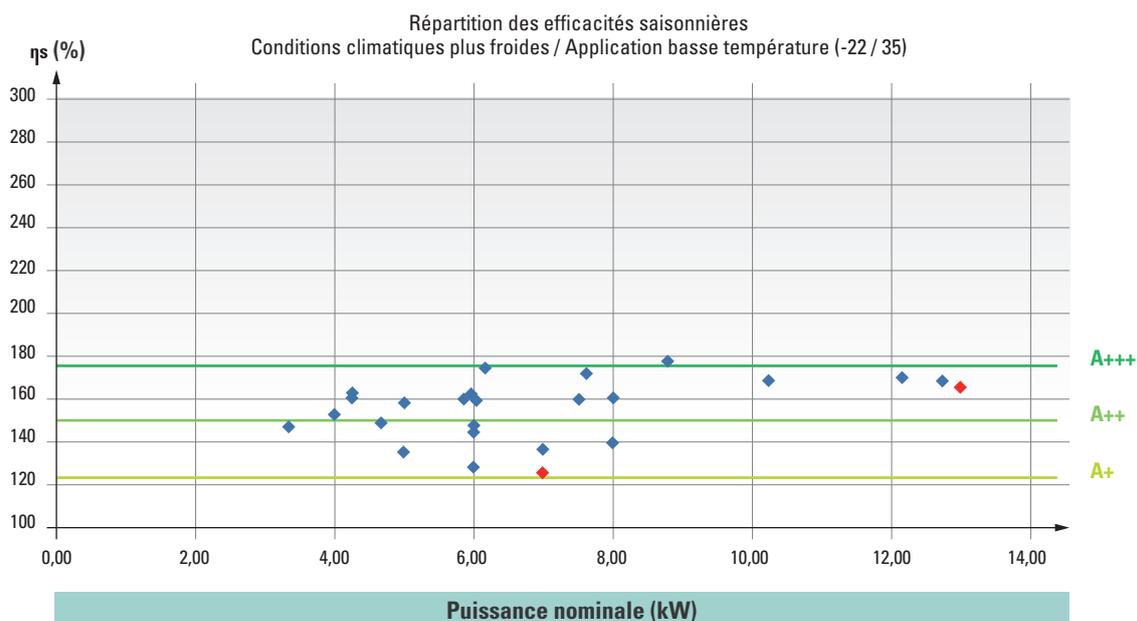
TABEAU 13 Classes d'efficacité pour l'application température intermédiaire (55°C)

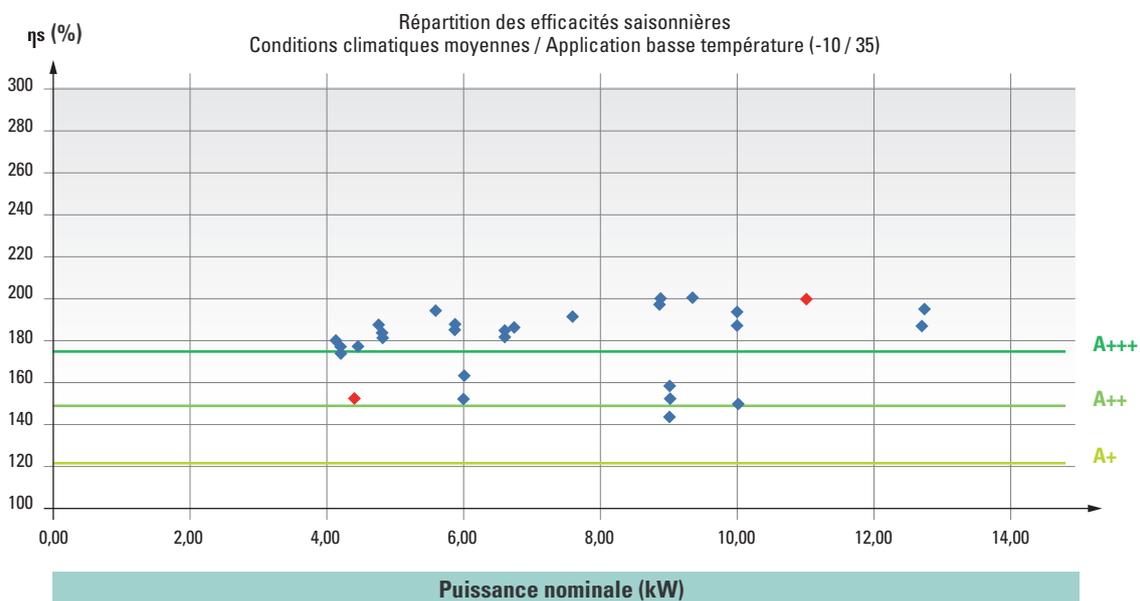
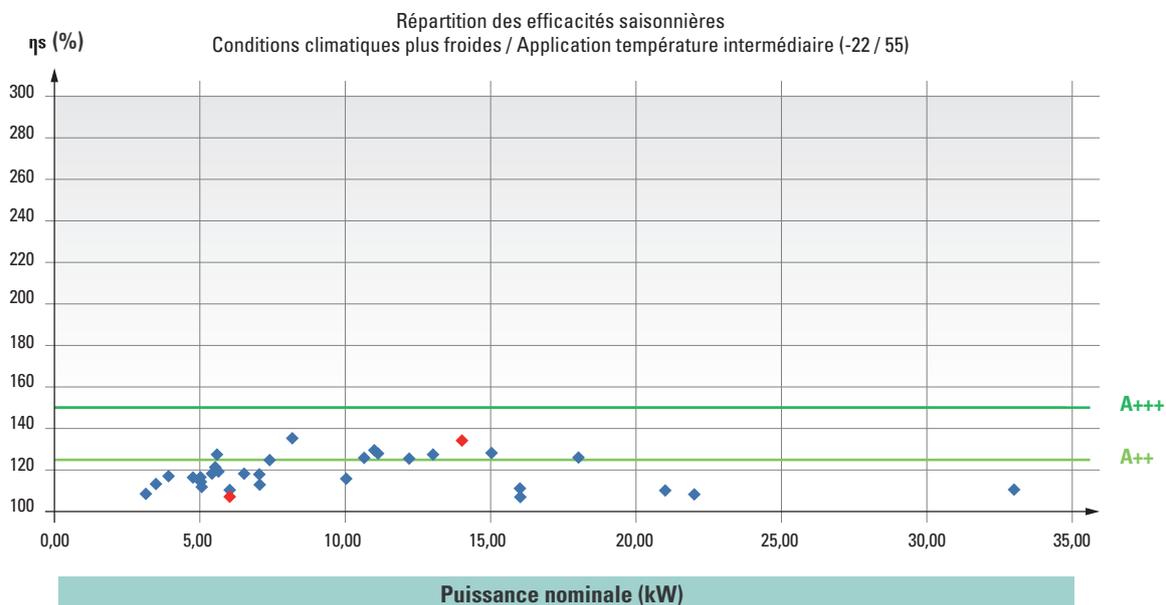
Classe d'efficacité énergétique saisonnière pour le chauffage des locaux	Efficacité énergétique saisonnière pour le chauffage des locaux η_s en %
A ⁺⁺⁺	$\eta_s \geq 150$
A ⁺⁺	$125 \leq \eta_s < 150$
A ⁺	$98 \leq \eta_s < 125$
A	$90 \leq \eta_s < 98$
B	$82 \leq \eta_s < 90$
C	$75 \leq \eta_s < 82$
D	$36 \leq \eta_s < 75$
E	$34 \leq \eta_s < 36$
F	$30 \leq \eta_s < 34$
G	$\eta_s < 30$

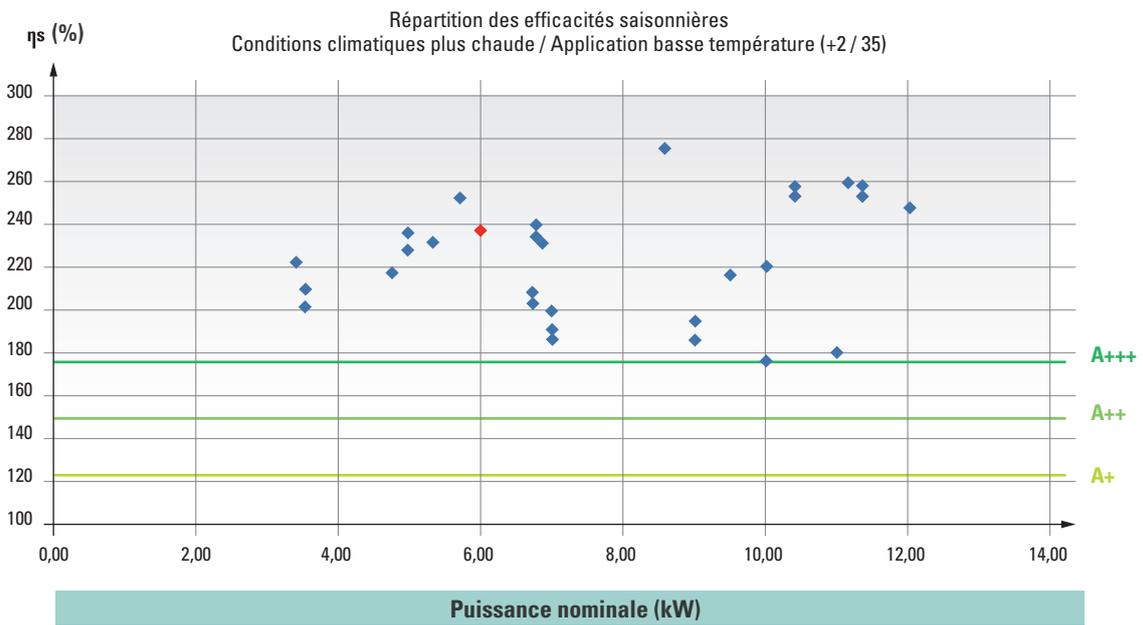
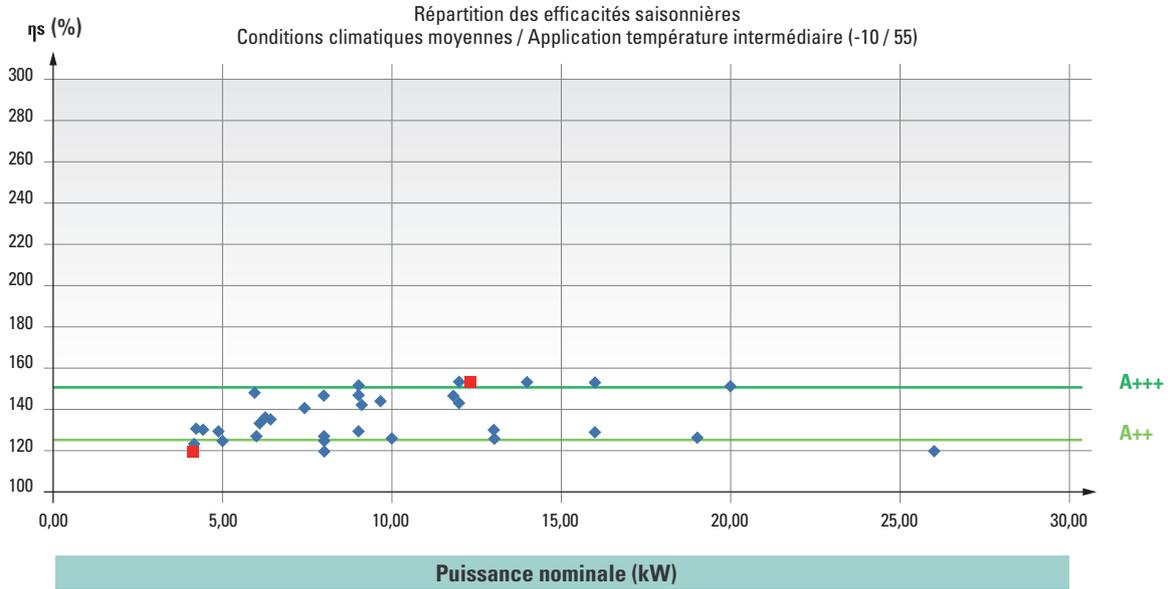
Le recensement effectué a permis d'identifier 6 fabricants de PAC Air/Eau au propane, pour une soixantaine de références de produits, tenant compte des variantes de puissance, d'alimentation (mono ou triphasé) ou de mode de régulation.

Une autre PAC Air/Eau au CO₂ a également été identifiée, mais elle trouve des applications principalement en production d'eau chaude sanitaire. Elle sera donc traitée dans les CET.

Les graphiques ci-après présentent les efficacités saisonnières de ces machines, en fonction de leur puissance et ce, pour chacune des conditions citées ci-dessus (points bleus). En complément, et à titre de comparaison, 2 produits au R410A ont également été ajoutés à ces graphiques : ils sont repérés par les points rouges. En parallèle, sur ces graphiques ont été intégrés les seuils de classes énergétiques.







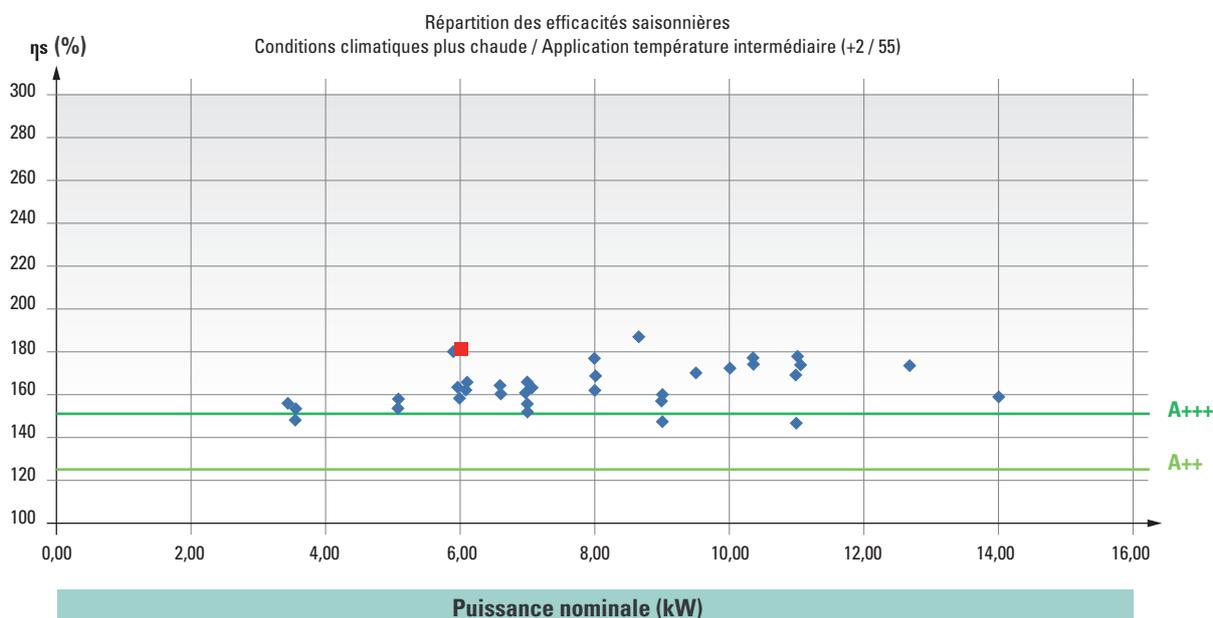


FIGURE 9 Efficacités saisonnières des PAC air/eau au propane (point bleu) [et PAC air/eau au R410A - point rouge] selon différentes consignes de température

De ces graphiques, il est possible de tirer quelques enseignements :

- les performances à température intermédiaire (régime d'eau 47/55), sont bien inférieures à celles à basse température, de l'ordre de 30 à 70 points de perte d'efficacité. Ceci amène donc à privilégier, autant que faire se peut, un régime d'eau 30/35, afin de limiter la consommation d'énergie du logement. En rénovation, il convient donc d'étudier la possibilité de diminuer les besoins en chauffage par une meilleure isolation thermique, et de changer les émetteurs, si les précédents s'avèrent surdimensionnés avec la nouvelle configuration ;

- pour une plage de puissance donnée, il est possible d'évaluer l'éventail de performances des machines. Ainsi, pour les applications à température intermédiaire, les places d'efficacité saisonnières sont assez homogènes quelle que soit la puissance, et s'étalent sur environ 40 points d'efficacité. En revanche, pour les applications à basse température, les écarts d'efficacité peuvent atteindre 60 points, voire 100 points pour le climat plus chaud.

Concernant les charges de fluides, ces machines étant installées en extérieur, il n'y a pas de réelles contraintes de sécurité liées à la quantité de fluide, et les charges s'étalent de 600 g à 3,4 kg selon les produits.

4.1.3.2 LES PAC SOL/EAU

Le marché des PAC Sol/Eau est très restreint. Seul un fabricant en met à disposition, à deux niveaux de puissance (10 et 15 kW). Les efficacités saisonnières (η_s), sont de l'ordre de 270 % à 35 °C et de 186 % à 55 °C. Cette machine est à détente directe, c'est-à-dire que le fluide frigorigène

circule dans un serpentin enterré. La charge en propane va de 2,8 à 3,6 kg selon les variantes.

Les performances sont donc dans la fourchette haute des PAC Air/Eau, mais le calcul est effectué pour une température de source froide constante à 4 °C toute l'année.

4.1.3.3 LES CETD

La comparaison des CET s'effectue sur des essais réalisés selon la norme EN 16147 et fournit également une efficacité pour le chauffage de l'eau pour un profil de puisage donné. Le profil de puisage est une séquence de puisages réalisés sur 24 heures, représentant une consommation

d'eau chaude moyenne au cours d'une journée. Selon les besoins, et donc le volume puisé sur la journée, les profils s'échelonnent de tailles XXXS (3XS) à XXXXL (4XL) (tableaux ci-après).

TABLEAU 14 Profils de puisage selon l'EN 16147

h	M				L				XL			
	Q _{tap}	f	T _m	T _p	Q _{tap}	f	T _m	T _p	Q _{tap}	f	T _m	T _p
	kWh	l/min	°C	°C	kWh	l/min	°C	°C	kWh	l/min	°C	°C
07:00	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
07:05	1.4	6	40		1.4	6	40					
07:15									1.82	6	40	
07:26									0.105	3	25	
07:30	0.105	3	25		0.105	3	25					
07:45					0.105	3	25		4.42	10	10	40
08:01	0.105	3	25						0.105	3	25	
08:05					3.605	10	10	40				
08:15	0.105	3	25						0.105	3	25	
08:25					0.105	3	25					
08:30	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
08:45	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
09:00	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
09:30	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
10:00									0.105	3	25	
10:30	0.105	3	25	40	0.105	3	25	40	0.105	3	25	40
11:00									0.105	3	25	
11:30	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
11:45	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
12:00												
12:30												
12:45	0.315	4	10	55	0.315	4	10	55	0.315	4	10	55
14:30	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
15:00									0.105	3	25	
15:30	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
16:00									0.105	3	25	
16:30	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
17:00									0.105	3	25	
18:00	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
18:15	0.105	3	40		0.105	3	40		0.105	3	40	
18:30	0.105	3	40		0.105	3	40		0.105	3	40	
19:00	0.105	3	25		0.105	3	25		0.105	3	25	
19:30												
20:00												
20:30	0.735	4	10	55	0.735	4	10	55	0.735	4	10	55
20:45												
20:46									4.42	10	10	40
21:00					3.605	10	10	40				
21:15	0.105	3	25						0.105	3	25	
21:30	1.4	6	40		0.105	3	25		4.42	10	10	40
21:35												
21:45												
Qref		5.845				11.655				19.07		

h	XXL				3XL				4XL			
	Q _{tap}	f	T _m	T _p	Q _{tap}	f	T _m	T _p	Q _{tap}	f	T _m	T _p
	kWh	l/min	°C	°C	kWh	l/min	°C	°C	kWh	l/min	°C	°C
07:00	0.105	3	25		11.2	48	40		22.4	96	40	
07:05												
07:15	1.82	6	40									
07:26	0.105	3	25									
07:30												
07:45	6.24	16	10	40								
08:01	0.105	3	25		5.04	24	25		10.08	48	25	
08:05												
08:15	0.105	3	25									
08:25												
08:30	0.105	3	25									
08:45	0.105	3	25									
09:00	0.105	3	25		1.68	24	25		3.36	48	25	
09:30	0.105	3	25									
10:00	0.105	3	25									
10:30	0.105	3	25	40	0.84	24	10	40	1.68	48	10	40
11:00	0.105	3	25									
11:30	0.105	3	25									
11:45	0.105	3	25		1.68	24	25		3.36	48	25	
12:00												
12:30												
12:45	0.735	4	10	55	2.52	32	10	55	5.04	64	10	55
14:30	0.105	3	25									
15:00	0.105	3	25									
15:30	0.105	3	25		2.52	24	25		5.04	48	25	
16:00	0.105	3	25									
16:30	0.105	3	25									
17:00	0.105	3	25									
18:00	0.105	3	25									
18:15	0.105	3	40									
18:30	0.105	3	40		3.36	24	25		7.72	48	25	
19:00	0.105	3	25									
19:30												
20:00												
20:30	0.735	4	10	55	5.88	32	10	55	11.76	64	10	55
20:45												
20:46	6.24	16	10	40								
21:00												
21:15	0.105	3	25									
21:30	6.24	16	10	40	12.04	48	40		24.08	96	40	
21:35												
21:45												
Qref		24.53				46.76				93.52		

L'étiquette énergétique définit également des seuils d'efficacité pour classer les performances des catégories G à A+++ en fonction du profil de puisage.

TABEAU 15 Classes d'efficacité énergétique pour le chauffage de l'eau, selon le profil de soutirage

	3XS	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL
A+++	$\eta_{wh} \geq 62$	$\eta_{wh} \geq 62$	$\eta_{wh} \geq 69$	$\eta_{wh} \geq 90$	$\eta_{wh} \geq 163$	$\eta_{wh} \geq 188$	$\eta_{wh} \geq 200$	$\eta_{wh} \geq 213$
A++	$53 \leq \eta_{wh} < 62$	$53 \leq \eta_{wh} < 62$	$61 \leq \eta_{wh} < 69$	$72 \leq \eta_{wh} < 90$	$130 \leq \eta_{wh} < 163$	$150 \leq \eta_{wh} < 188$	$160 \leq \eta_{wh} < 200$	$170 \leq \eta_{wh} < 213$
A*	$44 \leq \eta_{wh} < 53$	$44 \leq \eta_{wh} < 53$	$53 \leq \eta_{wh} < 61$	$55 \leq \eta_{wh} < 72$	$100 \leq \eta_{wh} < 130$	$115 \leq \eta_{wh} < 150$	$123 \leq \eta_{wh} < 160$	$131 \leq \eta_{wh} < 170$
A	$35 \leq \eta_{wh} < 44$	$35 \leq \eta_{wh} < 44$	$38 \leq \eta_{wh} < 53$	$38 \leq \eta_{wh} < 55$	$65 \leq \eta_{wh} < 100$	$75 \leq \eta_{wh} < 115$	$80 \leq \eta_{wh} < 123$	$85 \leq \eta_{wh} < 131$
B	$32 \leq \eta_{wh} < 35$	$32 \leq \eta_{wh} < 35$	$35 \leq \eta_{wh} < 38$	$35 \leq \eta_{wh} < 38$	$39 \leq \eta_{wh} < 65$	$50 \leq \eta_{wh} < 75$	$55 \leq \eta_{wh} < 88$	$60 \leq \eta_{wh} < 85$
C	$29 \leq \eta_{wh} < 32$	$29 \leq \eta_{wh} < 32$	$32 \leq \eta_{wh} < 35$	$32 \leq \eta_{wh} < 35$	$36 \leq \eta_{wh} < 39$	$37 \leq \eta_{wh} < 50$	$38 \leq \eta_{wh} < 55$	$40 \leq \eta_{wh} < 60$
D	$26 \leq \eta_{wh} < 29$	$26 \leq \eta_{wh} < 29$	$29 \leq \eta_{wh} < 32$	$29 \leq \eta_{wh} < 32$	$33 \leq \eta_{wh} < 36$	$34 \leq \eta_{wh} < 37$	$35 \leq \eta_{wh} < 38$	$36 \leq \eta_{wh} < 40$
E	$22 \leq \eta_{wh} < 26$	$23 \leq \eta_{wh} < 26$	$26 \leq \eta_{wh} < 29$	$26 \leq \eta_{wh} < 29$	$30 \leq \eta_{wh} < 33$	$30 \leq \eta_{wh} < 34$	$30 \leq \eta_{wh} < 35$	$32 \leq \eta_{wh} < 36$
F	$19 \leq \eta_{wh} < 22$	$20 \leq \eta_{wh} < 23$	$23 \leq \eta_{wh} < 26$	$23 \leq \eta_{wh} < 26$	$27 \leq \eta_{wh} < 30$	$27 \leq \eta_{wh} < 30$	$27 \leq \eta_{wh} < 30$	$28 \leq \eta_{wh} < 32$
G	$\eta_{wh} < 19$	$\eta_{wh} < 20$	$\eta_{wh} < 23$	$\eta_{wh} < 23$	$\eta_{wh} < 27$	$\eta_{wh} < 27$	$\eta_{wh} < 27$	$\eta_{wh} < 28$

Dans cette section, on retrouve des PAC air/eau vues précédemment, mais qui peuvent être utilisées en production d'ECS lorsqu'elles sont couplées à un ou plusieurs ballons. Les efficacités rencontrées se situent entre 75 et 132 % pour des profils de puisage allant de M à XXL et en climat moyen. Cela correspond aux classes A à A++.

Le graphique ci-après présente les efficacités saisonnières de ces machines, en fonction de leur profil de puisage

et ce, pour les conditions climatiques moyennes (points bleus). En complément, et à titre de comparaison, des produits au R32 ou au R134a ont également été ajoutés à ces graphiques : ils sont repérés par les points rouges. En parallèle, sur ces graphiques ont été reportés les seuils de classes énergétiques.

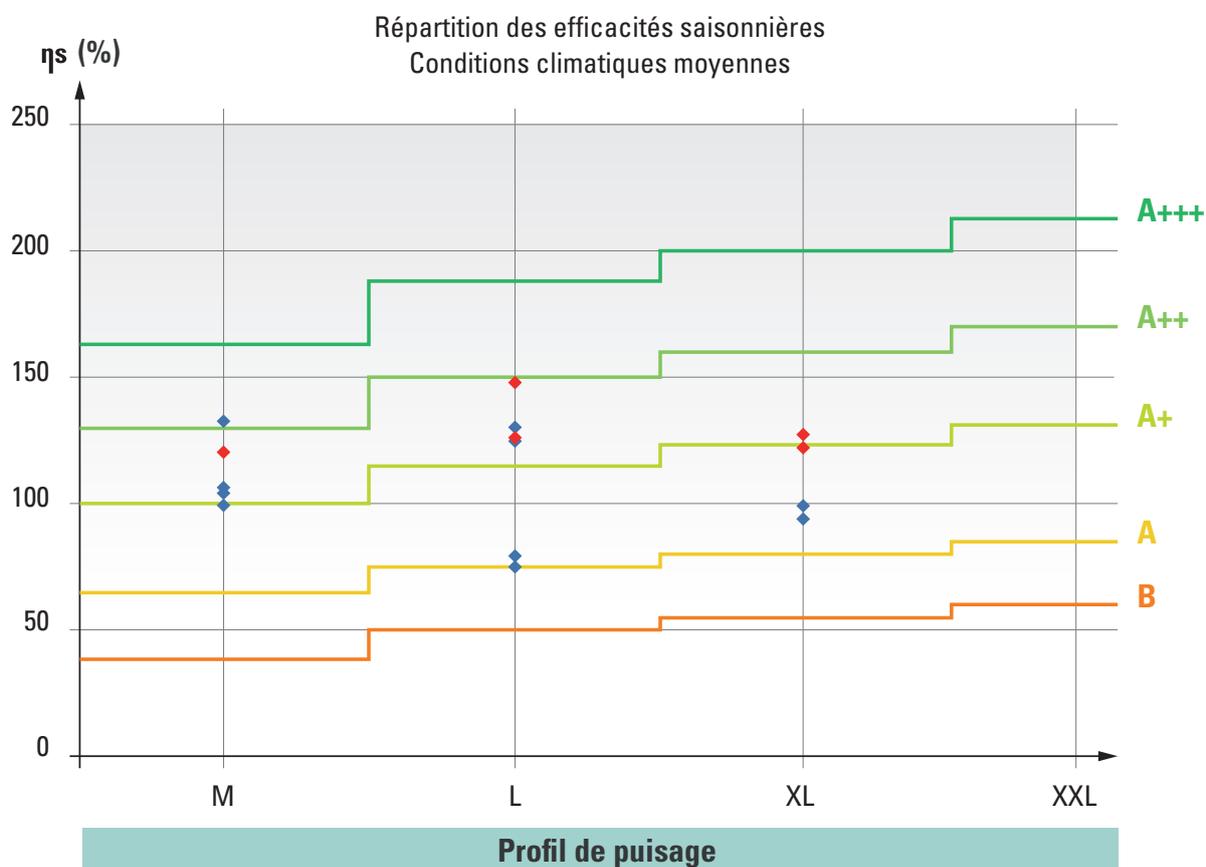


FIGURE 10 Efficacités saisonnières des CET selon le profil de puisage (M, L, XL) et pour des conditions climatiques moyennes

4.1.3.4 LES PAC DOUBLE SERVICE SUR AIR EXTRAIT

Un seul fabricant a été référencé comme fabricant des machines sur air extrait au propane, et produisant de l'eau chaude sanitaire et du chauffage. L'avantage de ce produit est que ses performances ne sont pas dépendantes des conditions extérieures.

Cependant, les performances se situent légèrement en deçà des machines air extérieur/eau : cela est dû au fait que ce produit a été développé dans les années 80, sans grande évolution depuis, avec un compresseur tout ou rien et des échangeurs moins performants que ceux réalisés de nos jours.

Toutefois, ce produit est intéressant dans le sens où son développement a rendu possible l'installation d'une

machine au propane en intérieur, tout en satisfaisant les exigences réglementaires liées au risque d'inflammabilité du propane.

Il est donc envisageable qu'à l'avenir d'autres constructeurs se mettent sur ce marché, au fur et à mesure du développement de l'utilisation du propane.

Les fonctions chauffage et production d'eau chaude sanitaire des PAC double service (quelle que soit leur technologie) sont évaluées indépendamment. Les échelles de classes énergétiques pour chacune des deux fonctions sont identiques à celles des appareils « mono-fonction ».

4.1.4 LES CONTRAINTES D'INSTALLATION ET DE MAINTENANCE

4.1.4.1 LE PROPANE (R290)

La plupart voire la totalité des produits rencontrés sont des machines monobloc, scellées en usine. Aussi, l'installation s'apparente en tout point à l'installation d'une machine utilisant un fluide plus fluoré, puisqu'aucune intervention

sur le circuit frigorifique n'est nécessaire : seuls les raccordements en eau et en électricité sont à assurer. Et même au-delà de ce point, le propane n'étant pas un HFC, il n'y a pas besoin de qualification particulière pour l'ins-

tallation de ces équipements. Les plombiers-chauffagistes sont aptes à les installer ; nul besoin d'être frigoriste.

La spécificité de ce fluide se manifeste lorsqu'il est nécessaire d'effectuer une intervention sur le circuit frigorifique (changement de composant, recharge, etc.). Dans ce cas, l'utilisation de matériel compatible avec le propane est obligatoire (à cause de son caractère inflammable et explosif). Les équipements tels que les pompes à vide et les stations de transfert doivent être compatibles avec le propane. De même, les bouteilles de récupération à utiliser sont spécifiques aux hydrocarbures (pour éviter les risques d'accident lors du retraitement), ainsi que les

détecteurs de fuites (les détecteurs courants ne détectent que le Chlore ou le Fluor).

Une formation à la manipulation de ce type de fluide est nécessaire, mais il n'existe pas encore de module spécifique à la manipulation des hydrocarbures au sein d'un programme de formation «standard». Certains fabricants proposent ou imposent une formation spécifique pour leurs installateurs agréés.

Il n'est pas possible de rétrofiter une machine fonctionnant aux HFC avec du propane. Le risque d'incompatibilité des composants avec le propane est trop grand. Les machines au propane sont développées pour être en conformité à l'utilisation de ce fluide.

4.1.4.2 LE CO₂ (R744)

De même que les systèmes au propane, les systèmes au CO₂ sont monobloc. L'installation ne présente donc pas de difficultés particulières.

Toutefois, certains points de vigilance sont à noter :

- Le risque majeur que présente le CO₂ est le risque d'anoxie en cas de fuite ou de dégazage. Aussi, il est préférable d'installer des détecteurs de CO₂ dans les locaux fermés.
- Un autre risque est lié aux pressions élevées rencontrées dans les circuits transcritiques. Une rupture peut occasionner des dégâts sur les biens et les personnes.

En ce qui concerne la maintenance, les sociétés de maintenance les plus importantes sont a priori familières avec cette technologie, et les particularités vont plutôt dans le sens d'une facilité d'entretien, puisque le dégazage dans l'air est autorisé, et les recharges se font directement en sortie de bouteille sans groupe de transfert.

Les autres composants de ces machines sont assez similaires à ceux des machines aux HFC ; l'entretien est donc similaire aux systèmes fonctionnant aux HFC.

4

2

QUEL AVENIR POUR LE CO₂ (R744) ET LE PROPANE (R290) ?

4.2.1 LES FREINS AU DÉVELOPPEMENT DU PROPANE

La machine thermodynamique au propane est une technologie qui n'est pas aussi récente que l'on pourrait le croire. Elle est utilisée depuis plus de 20 ans, principalement dans les pays scandinaves, et est également bien développée en Allemagne et en Autriche.

Le premier gros frein à la conception de telles machines, fut la disponibilité de composants compatibles avec le R290, tels que les compresseurs. Maintenant que les principaux compressoristes ont développé des gammes au R290, il devient plus simple pour les fabricants de concevoir des machines au propane. Les machines recensées sont majoritairement équipées d'un compresseur scroll.

Actuellement, **les principaux freins au développement du propane que l'on peut retrouver sont : une réglementation restrictive et une appréhension par méconnaissance du risque.**

Concernant l'appréhension des utilisateurs ou installateurs, celle-ci tend à s'effacer devant les retours d'expérience de plus en plus nombreux et l'avantage environnemental que présente le propane.

Du point de vue réglementaire, les normes EN 378 et EN 60335-2-40 sont encore restrictives vis-à-vis des fluides inflammables, et a fortiori du propane. Toutefois, devant l'expérience croissante des constructeurs, l'IEC 60335-2-40 a été révisée en 2018 et sera transposable au niveau européen en 2021 pour devenir EN 60335-2-40 et permettra d'assouplir les contraintes de charges limites pour les machines au propane.

Tout semble donc aller vers un développement des produits au R290, et ce dans un avenir proche. Les constructeurs actuels voient leurs volumes de ventes augmenter.

4.2.2 LES FREINS AU DÉVELOPPEMENT DU CO₂

Le principal frein au développement du CO₂ est le coût de fabrication (et donc d'achat). En effet, le cycle transcritique engendre des pressions très importantes. Aussi, tout le circuit est dimensionné pour résister à des pressions très importantes de l'ordre de 140 bars, ce qui présente un surcoût non négligeable. Pour des applications résidentielles, le recours à ce fluide est limité car plutôt réservé pour des applications « haut de gamme ».

En dehors de ce point, il n'y a pas de contraintes techniques particulières. Ce qui peut faire pencher la balance en faveur de ces solutions réside principalement dans l'expertise de régulation de l'entreprise fabricante, pour garantir des performances importantes.

5

ÉTAT DE LA RÉGLEMENTATION EXISTANTE SUR L'USAGE DES FLUIDES NATURELS

Cette étude ne vise pas à traiter en détail la réglementation existante sur les fluides frigorigènes et notamment les fluides naturels. Ceci est hors cadre de l'étude. Mais il va plutôt s'agir ici de définir les textes réglementaires et para-réglementaires utilisables en présence de fluides frigorigènes naturels pour une application en résidentiel. L'état de l'offre mené dans le chapitre précédent fait état d'une utilisation actuelle et probablement future des fluides naturels hydrocarbures (R290 en particulier) voire R744 pour des applications CET « haut de gamme ». Dans ces conditions, nous allons nous intéresser à ces deux types de fluides dont les particularités sont :

- l'inflammabilité (R290) ;
- une pression de fonctionnement élevée (R744).

Le domaine réglementaire et normatif appliqué à ces fluides concerne les aspects sécurité et environnement.

Les fluides naturels ne sont pas soumis au règlement UE N°517/2014 du 16 avril 2014, appelé règlement F-GAS. Plus précisément, cela signifie qu'ils **ne sont pas soumis réglementairement** aux points suivants :

- le contrôle périodique d'étanchéité ;
- la récupération du fluide.

Toutefois, l'Arrêté du 24 juillet 2020 relatif à l'entretien des systèmes thermodynamiques dont la puissance nominale est comprise entre 4 kW et 70 kW inclus, stipule l'obligation d'assurer un entretien des systèmes avec notamment **la réalisation d'un contrôle d'étanchéité du circuit de fluide frigorigène et ce, pour tout fluide frigorigène non concerné par le règlement UE N°517/2014 du 16 avril 2014. Cette exigence d'entretien s'applique donc notamment aux fluides naturels.**

A l'issue de la prestation, le professionnel fournit, à titre informatif, des conseils sur le système, sa régulation...mais également sur le fluide frigorigène.

Le premier entretien d'un système thermodynamique est effectué au plus tard deux ans après son installation ou son remplacement. Ainsi, par exemple, le premier entretien des systèmes existants au 1er juillet 2020 est effectué au

plus tard le 1er juillet 2022. La période séparant deux entretiens ne peut pas excéder deux ans.

A noter que les systèmes thermodynamiques destinés uniquement à la production d'eau chaude pour un seul logement ne sont pas soumis à ces dispositions.

A travers **les sections 9 et 14 (à partir de l'article R.557-9-1), le Code de l'Environnement** traite des **équipements sous pression**. Ces articles s'inspirent de la directive européenne 2014/68/UE relative aux équipements sous pression (DESP). L'arrêté du 20 novembre 2017 relatif « au suivi en service des équipements sous pression et des récipients à pressions simples » complète ces articles.

Cette réglementation concerne la conception, les tests et fabrication d'équipements sous pression. Les équipements concernés sont les équipements dont la pression maximale est > à 0,5 bar.

Selon le type de fluide, les équipements sous pression sont répartis selon deux groupes, fonction de la nature du fluide : 1 et 2.

Les hydrocarbures entrent dans la catégorie des fluides frigorigènes de groupe 1. Le R744 est dans le groupe 2.

Les équipements et ensembles soumis aux exigences des appareils sous pression sont classés en 4 catégories (I à IV où le risque est le plus élevé) selon :

- la pression maximale admissible (dans tous les cas > à 0,5 bar) ;
- le volume de l'équipement ou la dimension nominale de la tuyauterie ;
- le groupe du fluide auquel est destinée l'installation.

En termes de sécurité et d'environnement, la norme essentielle à considérer est la NF EN 378 « Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur – exigences de sécurité et d'environnement ». La NF EN 378 est une norme à visée environnementale et de sécurité révisée en 2017. Elle vise à réduire les dangers possibles des systèmes frigorifiques pour les personnes (installateurs, utilisateurs et techniciens), les biens et l'environnement. Elle se décompose selon 4 parties :

TABLEAU 16 Éléments principaux traités dans la NF EN 378

Norme (NF EN 378, 2017)		Éléments traités en relation avec les fluides naturels
NF EN 378-1	Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 1 : Exigences de base, définitions, classification et critères de choix	Classification (fluides frigorigènes, emplacement des systèmes) Quantité de fluide Limites de charge
NF EN 378-2	Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 2 : Conception, construction, essais, marquage et documentation	Essais, Protection haute pression (harmonisée avec DESP) Protection risques incendie (référence à EN 60079-10-1 « Atmosphères explosives – Classification des espaces. Atmosphère de gaz explosifs)
NF EN 378-3	Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 3 : Installation in-situ et protection des personnes	Mesures de sécurité (alarmes, vannes d'isolement) Ventilation DéTECTEURS de fluides frigorigènes
NF EN 378-4	Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 4 : Fonctionnement, maintenance, réparation et récupération	Réparation de systèmes utilisant des fluides frigorigènes inflammables Compétences du personnel

La quantité de fluide dans une installation est déterminante en cas d'incident. C'est pour cette raison que la NF EN 378 prévoit des restrictions de charge en fonction de 4 critères :

- le type de bâtiment et son accessibilité au public (catégorie d'accès) ;
- l'emplacement du système frigorifique dans le bâtiment (emplacement) ;
- la nature du fluide (toxicité, inflammabilité) ;
- le champ d'application (climatisation de confort, process...).

Il s'agit d'éviter une accumulation de fluide pouvant entraîner des risques d'incendie, d'explosion, d'asphyxie.

La limite de charge est calculée selon la toxicité et l'inflammabilité du fluide. Pour le R744 (A1), sa limite de charge est déterminée par rapport à sa toxicité. Pour un hydrocarbure, sa charge limite est déterminée par rapport à son inflammabilité.

Les pompes à chaleur utilisant actuellement du R290 pour des applications résidentielles sont des PAC air/eau monobloc dont l'ensemble des composants du système est

placé à l'air libre. Dans ces conditions, la charge limite de propane dans le système est 5 kg.

En complément de la NF EN 378 dont le champ couvre une multitude de systèmes et d'application, la norme EN 60335-2-40 qui est une norme « produits » traite de règles de sécurité pour les pompes à chaleur, climatiseurs et déshumidificateurs. Cette norme s'applique en amont lors des phases de conception.

Conformément aux dispositions de l'article L. 6321-1 du Code du travail, l'employeur est dans l'obligation d'organiser la formation de ses salariés afin qu'ils puissent adapter leur comportement à la situation rencontrée. **Compte tenu des caractéristiques dangereuses propres à ces fluides, il est essentiel que les professionnels soient formés à la connaissance et à la manipulation de ces fluides naturels. Cette formation est d'autant plus importante qu'elle va permettre de répondre aux exigences de l'arrêté du 24 juillet 2020 relatif à l'entretien des systèmes thermodynamiques en termes de test d'étanchéité et de conseils apportés sur le fluide frigorigène.**

6

DÉFINITION DES RÈGLES D'INTERVENTION SPÉCIFIQUES

Compte tenu des spécificités des fluides naturels à savoir une haute pression, une toxicité ou encore une inflammabilité, il est indispensable de connaître et maîtriser les pratiques de manipulation de ces fluides.

En règle générale, avant toute manipulation de fluide, il faut consulter la « Fiche Déclaration Sécurité » (FDS) du fluide. Les équipements de protection individuelle sont indispensables ; **une protection pour les mains (gants spécifiques pour éviter tout risque de brûlure par le chaud**

ou par le froid) et pour les yeux (lunettes de protection) sont un minimum.

Dans ce qui suit, nous nous attacherons à décrire les opérations propres aux deux principaux fluides naturels qui peuvent être présents dans les applications de pompes à chaleur air/eau en résidentiel : R744, R290. Ces tendances ont été mises en avant précédemment lors de la phase « état de l'offre des équipements ».

NOTE



Les pompes à chaleur destinées au marché du résidentiel individuel sont actuellement des systèmes monoblocs étanches proposés sous la forme d'un package selon le principe « Plug and Play » et qui ne nécessitent pas d'intervention sur le circuit frigorifique lors de son installation. Sur ces configurations, il peut être envisagé une intervention lors des phases de maintenance.

6

1

CONDITIONS GÉNÉRALES DE TRANSPORT ET DE STOCKAGE

Les dangers inhérents aux différents types de fluides frigorigènes nécessitent de prendre des précautions concernant le transport et le stockage de ces produits. Selon la

nature du fluide, les dangers sont différents : risque d'asphyxie, intoxication, risque d'inflammation voire d'explosion.

6.1.1 LE TRANSPORT

Le transport routier de marchandises dangereuses est réglementé au niveau européen par l'ADR (Accord européen concernant le droit international du transport de marchandises dangereuses par route). Sur le territoire, l'ADR est complété par l'arrêté du 29 mai 2009 relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (dit « arrêté TMD »).

Chaque marchandise dangereuse relève d'un ou plusieurs types particuliers de dangers et possède un numéro dit « numéro ONU », précédé de la mention « UN ».

Différentes classes de danger (entre 1 et 9) sont définies : les **fluides frigorigènes sont en classe 2 (gaz)**. En termes d'étiquettes, une distinction est faite selon le danger du gaz transporté :

- 2.1 : gaz inflammables ;
- 2.2 : gaz non inflammables, non toxiques ;
- 2.3 : gaz toxiques.

En complément, un code de classification existe en fonction de la nature du gaz :

TABLEAU 17 Code de classification pour les gaz

Classe	Groupe (lettre, légende)		Groupe (lettre, légende)	
2	A	Asphyxiant (exemple : R744)	TC	Toxique, corrosif
	O	Comburant	TO	Toxique, comburant
	F	Inflammable (exemple : R290)	TFC	Toxique, inflammable, corrosif
	T	Toxique	TOC	Toxique, comburant, corrosif
	TF	Toxique, inflammable		

Cette réglementation prévoit des exemptions pour faciliter le transport, par les entreprises, de petites quantités de fluides destinées à leur usage propre. **Dans la majorité des cas, les transports effectués par les entreprises du bâtiment et notamment du génie climatique (plombier**

- chauffagiste) s'inscrivent dans ces exemptions. Parmi les principales exemptions, notons celle liée aux quantités maximales transportées. Les dispositions applicables dans ces conditions sont résumées ci-après.

TABLEAU 18 Dispositions applicables en présence de quantités inférieures ou égales aux seuils d'application de la réglementation

Dispositions concernées		Conditions de transport selon régime d'exemption lié aux quantités transportées
Colis	Emballage agréé	Oui
	N°ONU	Oui
	Etiquette	Oui
Documents	Document de transport	Non
	Consignes de sécurité	Non
Véhicules	Extincteur	Oui (2 kg poudre)
	Equipements divers (cales, signaux avertisseurs)	Non
	Etiquettes / marques	Non
	Panneaux orange	Non
	Aération pour véhicules fermés	Oui pour les gaz inflammables
	Transport de passagers	Possible : veiller à ce que les produits soient séparés physiquement de l'habitacle
Intervenants	Formation ADR 1.3	Oui
Conducteur	Formation ADR 8.2 de base	Non

Le transport routier doit se faire dans un véhicule de préférence ouvert voire fermé avec des ventilation haute et basse. Le véhicule doit disposer d'une séparation entre l'habitacle et le chargement et être équipé d'un extincteur adapté.

Les principales dispositions à satisfaire avant et pendant le chargement sont :

- s'assurer de l'absence de fuite d'une bouteille avant son chargement ;
- vérifier que le robinet de la bouteille est fermé et que les équipements (détendeur, flexibles) sont retirés ;
- disposer les bouteilles en position verticale et attachées.

Lors de ces opérations, l'opérateur doit porter des chaussures de sécurité et des gants de sécurité. Également, il est primordial d'apporter aucune source d'inflammation dans le véhicule (interdiction de fumer, d'utiliser une flamme nue à l'intérieur ou à proximité du véhicule).

- Les quantités maximales varient selon la nature et la dangerosité des matières transportées. A titre informatif, **les quantités maximales pour les fluides R744 et R290 sont respectivement 1000 kg et 333 kg**, c'est-à-dire par exemple :
 - 20 bouteilles B50 de R744 ;
 - 9 bouteilles de propane de 35 kg chacune.

Pour plus de renseignements, des fiches de prévention relatives à cette problématique de transport de matières dangereuses sont réalisées par l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTP).

NOTE



L'ADR est régulièrement révisé. Depuis le 1^{er} janvier 2019, la nouvelle version de l'ADR (ADR 2019) est applicable, et est obligatoire depuis le 1^{er} juillet 2019.

Parmi les évolutions, notons l'ajout de catégorie de transport de marchandises dangereuses (UN 3537 à UN 3548). Ainsi, à partir du 1^{er} janvier 2023, le transport de pompes à chaleur contenant un fluide inflammable sera concerné en partie par l'ADR et sera nommé sous la catégorie UN3537 : objet contenant du gaz inflammable.

6.1.2 LE STOCKAGE

Chaque bouteille de fluide doit comporter une étiquette informative apposée par le fournisseur. Elle contient notamment les informations relatives aux dangers des gaz à considérer lors des phases transport et stockage. La nature des gaz et leurs dangers sont définis comme suit :

- gaz inerte (R744) : risque d'asphyxie, gaz sous pression ;
- gaz inflammable (hydrocarbures) : risque d'inflammation, d'explosion ;

- gaz toxique (R717) : risque d'intoxication.

Les bouteilles de fluides doivent être stockées dans un espace dédié, frais, sec et protégé du risque d'incendie, de la lumière directe du soleil et des sources directes de chauffage. Pour réduire tout risque d'accumulation du gaz en cas de fuite, le local de stockage doit être ventilé.

Il convient de fermer le robinet du conteneur et de le protéger lorsque celui-ci n'est pas utilisé.

6

2

CHANGEMENT DE FLUIDE DANS UNE INSTALLATION EXISTANTE

La reconversion d'une installation existante a pour objectif de prolonger la durée de vie d'une installation en remplaçant son fluide frigorigène d'origine par un fluide notamment plus vertueux. A travers une opération de reconversion, il s'agit de pouvoir garder les éléments coûteux de l'installation tout en maintenant au mieux les performances thermodynamiques.

Seuls les constructeurs d'équipements peuvent autoriser ou non le remplacement du fluide d'origine par un autre fluide et ce, notamment pour des questions de garantie.

Le changement de type de fluide dans une installation est abordé dans la NF EN 378-4. Ainsi, la sélection du nouveau fluide doit prendre en compte divers critères parmi lesquels :

- la compatibilités des matériaux utilisés, des composants (échangeurs, compresseur...), du lubrifiant, avec le nouveau fluide ;
- la pression admissible du système à ne pas dépasser ;
- les performances, puissances délivrées en accord avec les exigences initiales.

En raison de caractéristiques très éloignées des fluides HFC (inflammabilité, pressions), le retrofit d'un système existant avec un fluide naturel (CO₂, hydrocarbures) n'est pas envisageable.

La mise sur le marché de fluides HFO permet de répondre plus facilement aux opérations de reconversion des installations existantes.

Indépendamment des critères précédents, **l'opération de retrofit est principalement à envisager lorsque la durée de vie résiduelle de l'installation est suffisamment longue.** Cela se pose principalement pour des machines de fortes puissances avec une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. La question du retrofit se pose moins pour les applications résidentielles où le coût et la durée de vie sont plus limités et les fabrications effectuées en « grande série ».

6

3

OPÉRATIONS PRÉLIMINAIRES À LA CHARGE D'UNE INSTALLATION

Avant d'effectuer la charge d'une installation, il est important d'effectuer un test d'étanchéité et un tirage au vide. Ces opérations restent similaires pour tous les fluides.

6.3.1 TEST D'ÉTANCHÉITÉ

NOTE



Pour les fluides naturels, la procédure d'étanchéité est rendue obligatoire dans le cadre de l'entretien des systèmes thermodynamiques dont la puissance nominale est ≥ 4 kW et ≤ 70 kW (arrêté du 24 juillet 2020 – parution au JO le 31 juillet 2020).

La réduction de fuites sur une installation est importante pour des raisons de sécurité (risques liés à l'inflammabilité, la toxicité) et de maintien des performances du système. L'impact environnemental direct des fluides naturels est moindre en raison de leur faible GWP.

Le test d'étanchéité consiste à monter en pression le circuit avec un gaz neutre et sec et vérifier la tenue de la pression. Plus précisément, l'installation est mise sous pression avec de l'azote déshydraté. L'installation doit s'avérer étanche à une pression au moins égale à la

pression maximale admissible (PS) pour laquelle elle est dimensionnée. Le test d'étanchéité tel que défini dans la norme EN 378-2 nécessite de se référer à la pression de service du fluide.

TABLEAU 19 Détermination des températures à considérer

Conditions ambiantes (extérieur)	$\leq 32^{\circ}\text{C}$	$\leq 38^{\circ}\text{C}$	$\leq 43^{\circ}\text{C}$	$\leq 55^{\circ}\text{C}$
Côté HP avec condenseur refroidi à l'air	55°C	59°C	63°C	67°C
Côté HP avec condenseur refroidi à l'eau et PAC à eau	T°C maximale de départ de l'eau + 8°C			
Côté HP avec condenseur évaporatif	43°C	43°C	43°C	55°C
Côté BP avec échangeur de chaleur exposé à la température ambiante extérieure	32°C	38°C	43°C	55°C
Côté BP avec échangeur de chaleur exposé à la température ambiante intérieure	27°C	33°C	38°C	38°C

Selon la nature du système (PAC air/air, PAC air/eau...), la pression de service du fluide à prendre en compte sera fonction de la température à considérer.

Dans une installation, sans électrovanne pour séparer les deux parties, la plus petite des pressions sera considérée afin de ne pas détériorer les éléments constitutifs du circuit BP. Une pression comprise entre 8 et 10 bars permet généralement de ne pas entraîner de dommage pour les éléments. A vérifier selon l'installation.

La procédure se déroule comme suit :

- mettre en place, à proximité du circuit, la bouteille d'azote munie d'un manodétendeur ;
- raccorder, à l'aide d'un flexible, la bouteille d'azote à la vanne de service du manifold, les vannes BP et HP du manifold respectivement aux vannes d'aspiration et de refoulement du compresseur ;
- ouvrir les vannes BP et HP (manifold) et la vanne de la bouteille pour permettre le transfert, par différence de pression, du gaz vers l'installation ;
- fermer les vannes lorsque la pression souhaitée est obtenue ;
- enlever la bouteille d'azote ;
- surveiller une éventuelle chute de pression (1 jour voire plus).

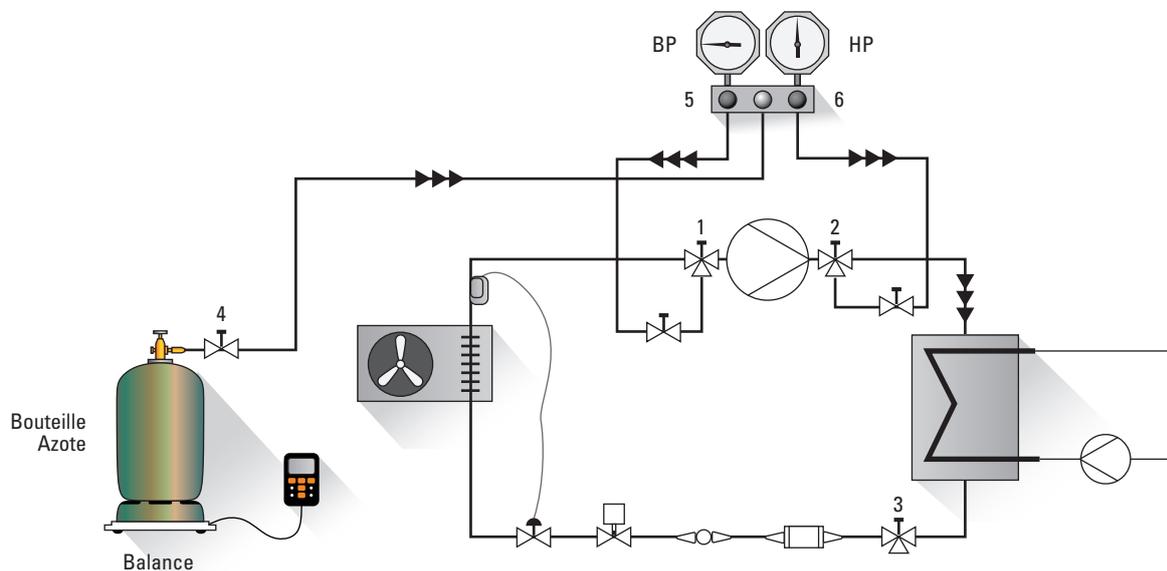


FIGURE 11 Procédure de mise sous pression d'une installation sans électrovanne avec de l'azote

En présence d'une électrovanne sur l'installation, la procédure de mise sous pression d'azote se fera dans un premier côté HP avec la pression de service côté HP et la vérification de l'étanchéité de la partie du circuit (y compris sortie compresseur) puis dans un second temps côté BP avec la pression adaptée à la BP.

Une fois la vérification effectuée, le rejet de l'azote se fait dans un endroit ventilé ou en extérieur. Avant la charge, un tirage au vide de l'installation doit être réalisé.

6.3.2 TIRAGE AU VIDE

La procédure d'intervention est similaire pour tous les fluides. **Seul le matériel (pompe à vide notamment, flexibles) peut être différent selon la nature du fluide et ses spécificités : hydrocarbures ou autres fluides. En présence d'hydrocarbures et pour des petites installations (< 300 g de fluide environ), une pompe à vide manuelle peut être utilisée.**

Le tirage au vide s'effectue selon la procédure suivante :

- raccorder les vannes BP et HP du manifold respectivement aux vannes d'aspiration et de refoulement du compresseur ;
- ouvrir les vannes BP et HP ;

- relier à l'aide d'un flexible la pompe à vide et la voie de service du manifold ;
- placer le vacuomètre au niveau de la pompe à vide ;
- ouvrir la vanne au niveau de la pompe à vide ;
- mettre en fonctionnement la pompe à vide ;
- observer la pression dans le circuit via le vacuomètre [jusqu'à l'obtention du niveau de vide voulu dans le circuit] – cette pression doit être inférieure à la valeur de saturation de l'eau fonction de la température ambiante ;
- fermer les vannes BP et HP ;
- arrêter la pompe à vide.

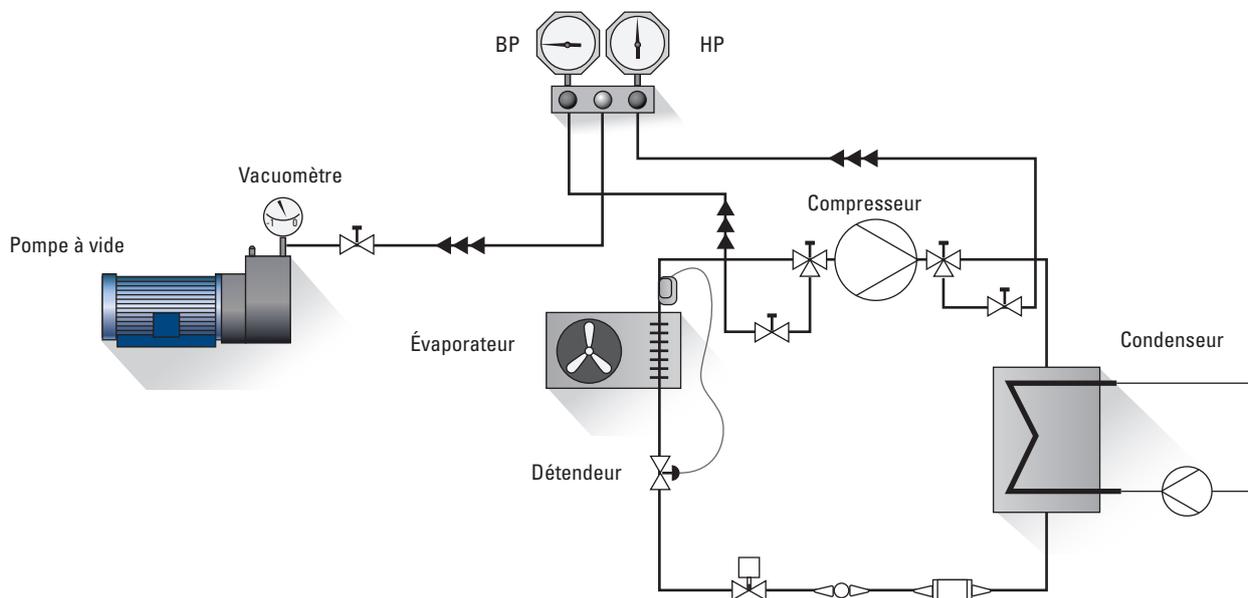


FIGURE 12 Procédure de tirage au vide d'une installation

Le tirage au vide d'une installation est destiné à évacuer l'air mais surtout l'humidité du circuit. Le niveau de vide à atteindre est fonction des conditions ambiantes. Ci-contre, les valeurs de pression minimales à obtenir selon

la température ambiante. La pression doit toujours être inférieure à la pression nécessaire au passage de l'eau de l'état liquide vers l'état vapeur.

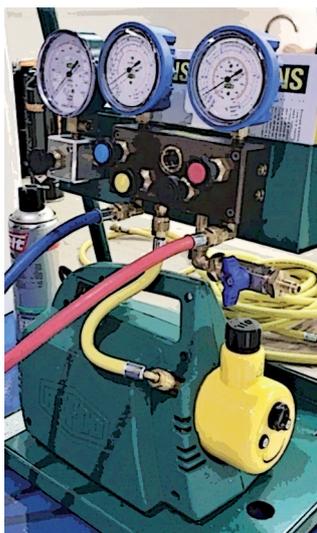
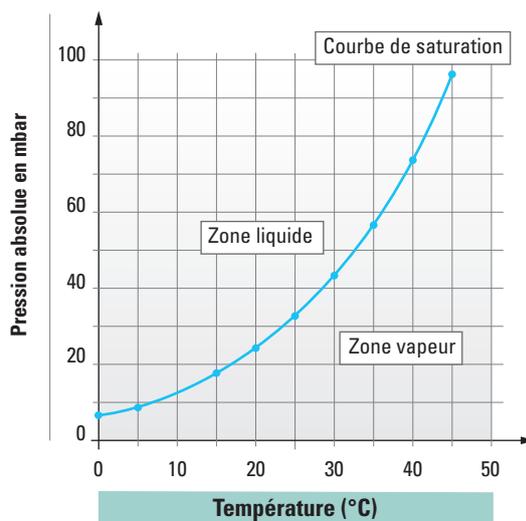


FIGURE 13 Station de charge et pompe à vide adaptée aux fluides A3 (d'après REFCO)



NOTE



Penser également au tirage au vide des flexibles.

Après le tirage au vide d'une installation, il est nécessaire d'effectuer rapidement la charge de l'installation. Il ne faut jamais laisser une installation en dépression.

Les procédures de charge et de vidange [récupération, rejet en extérieur] d'une installation peuvent différer selon la nature du fluide. Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux deux principaux fluides naturels ayant un intérêt à

moyen et long terme en résidentiel : le R744 (CO₂) et le R290 (propane). Ces procédures sont décrites dans les deux chapitres suivants.

A noter que les procédures visant les autres hydrocarbures (R1270, R600, R600a) restent similaires à celles du propane.

6

4

RÈGLES D'INTERVENTION APPLIQUÉES AU R744

6.4.1 OUTILLAGES ET SECURITE

Le fluide R744 se caractérise par des pressions de fonctionnement élevées. L'outillage utilisé doit résister à ces fortes pressions. En particulier, le manomètre et les flexibles sont spécifiques à ce fluide.

La graduation côté basse pression est de 0 à 80 bars et la graduation côté haute pression est de 0 à 160 bars. A titre informatif, les manomètres utilisés avec les autres fluides

et adaptés aux pressions moindres possèdent plutôt une graduation en haute pression jusqu'à 30-40 bars et une graduation en basse pression d'une dizaine de bars. Les flexibles sont des flexibles « haute pression » résistant à une pression de 210 bars (50-60 bars en général pour les flexibles « classiques »).

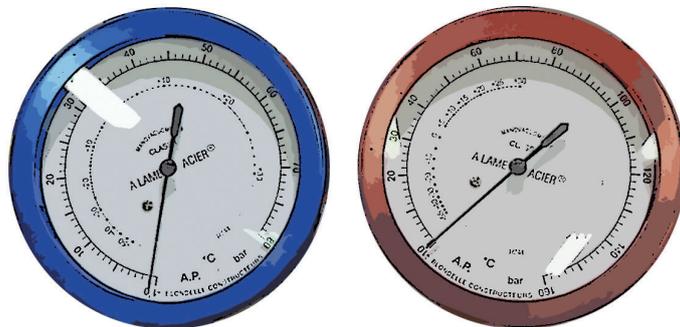


FIGURE 14 Manomètre spécifique au R744

Les principaux risques à appréhender sur une installation au CO₂ sont :

- le risque lié à une haute pression de fonctionnement ;
- le risque de brûlures ;
- le risque d'anoxie (faible teneur en oxygène dans un espace confiné).

En conformité avec la Directive des Equipements Sous Pression (DESP), des soupapes de décharge doivent être installées sur le circuit :

- les soupapes de sécurité installées sur les parties liquides sont à relier au réservoir de CO₂ ;
- les soupapes de sécurité sur la ligne gazeuse peuvent déboucher directement à l'air libre.

6.4.2 PROCÉDURE DE CHARGE

Le tirage au vide réalisé en amont doit permettre d'éliminer surtout toute trace d'humidité. En effet, **la présence d'humidité entraîne des risques de corrosion liés à la transformation du CO₂ en acide carbonique**. La pompe à vide et le vacuomètre, nécessaire pour évaluer précisément la valeur du vide atteint, ne sont pas spécifiques au R744.

La mise en place d'un détecteur de fluide permet de limiter tout risque sanitaire. En effet, bien que le CO₂ ne soit pas classé comme toxique, une présence prolongée dans un local fermé où la concentration en gaz est supérieure à 5 % peut avoir des effets néfastes sur la santé. La faible taille des molécules de CO₂, couplée aux fortes pressions de fonctionnement, accentue le potentiel de fuites.

Lors de toute manipulation, une bonne aération est nécessaire.

En complément, une protection adaptée des yeux (lunettes de protection) et des mains (gants de protection) est nécessaire. Des bouchons d'oreille sont également à utiliser lors des opérations de rejet.

Les flexibles de charge pour le CO₂ en application transcritique sont des flexibles « haute pression » spécifiques (inox) avec un câble anti-fouet pour sécuriser la connexion. Le stockage du fluide R744 s'effectue dans des bouteilles en acier de couleur grise. La bouteille a un robinet à raccord double permettant d'effectuer le remplissage d'une installation en phase gazeuse et en phase vapeur.

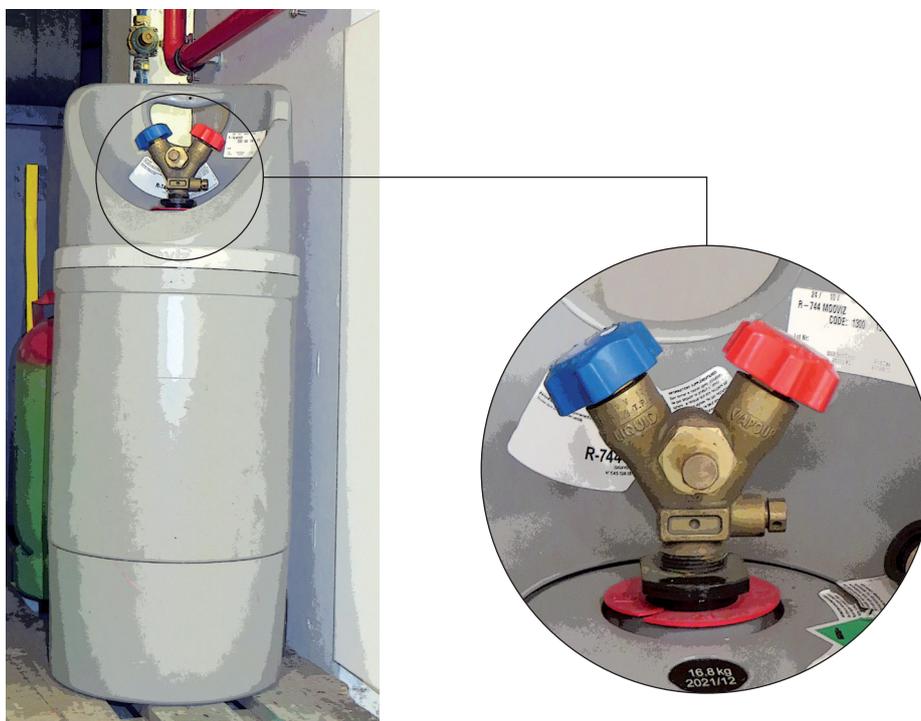


FIGURE 15 Bouteille de fluide R744 avec robinet double phase (phase liquide à gauche – robinet bleu et phase gazeuse à droite – robinet rouge)

La charge d'une installation au CO₂ va s'effectuer **en phase vapeur puis en phase liquide**. La procédure de charge est la suivante (installation à l'arrêt) :

- mettre en place à proximité du circuit à charger, la bouteille de fluide placée au préalable sur une balance ;
- placer un manodétendeur sur la bouteille afin de limiter la pression de celle-ci et éviter tout risque de rupture des flexibles ;
- raccorder à l'aide d'un flexible le **robinet de vapeur de la bouteille** à la voie de service du manifold ;
- ouvrir les vannes pour introduire, par différence de pression, le fluide en phase gazeuse et ce, jusqu'à une pression située au-delà du point triple qui est de 5,2 bars. Cette pression est nécessaire pour éviter la formation de neige carbonique (phase solide) dans le circuit et les flexibles ;
- fermer les vannes ;
- raccorder à l'aide du flexible le **robinet de liquide de la bouteille** à la voie de service du manifold ;
- ouvrir les vannes pour introduire, par différence de pression, le fluide en phase liquide et terminer la charge ;
- fermer les vannes ;
- enlever la bouteille de fluide.

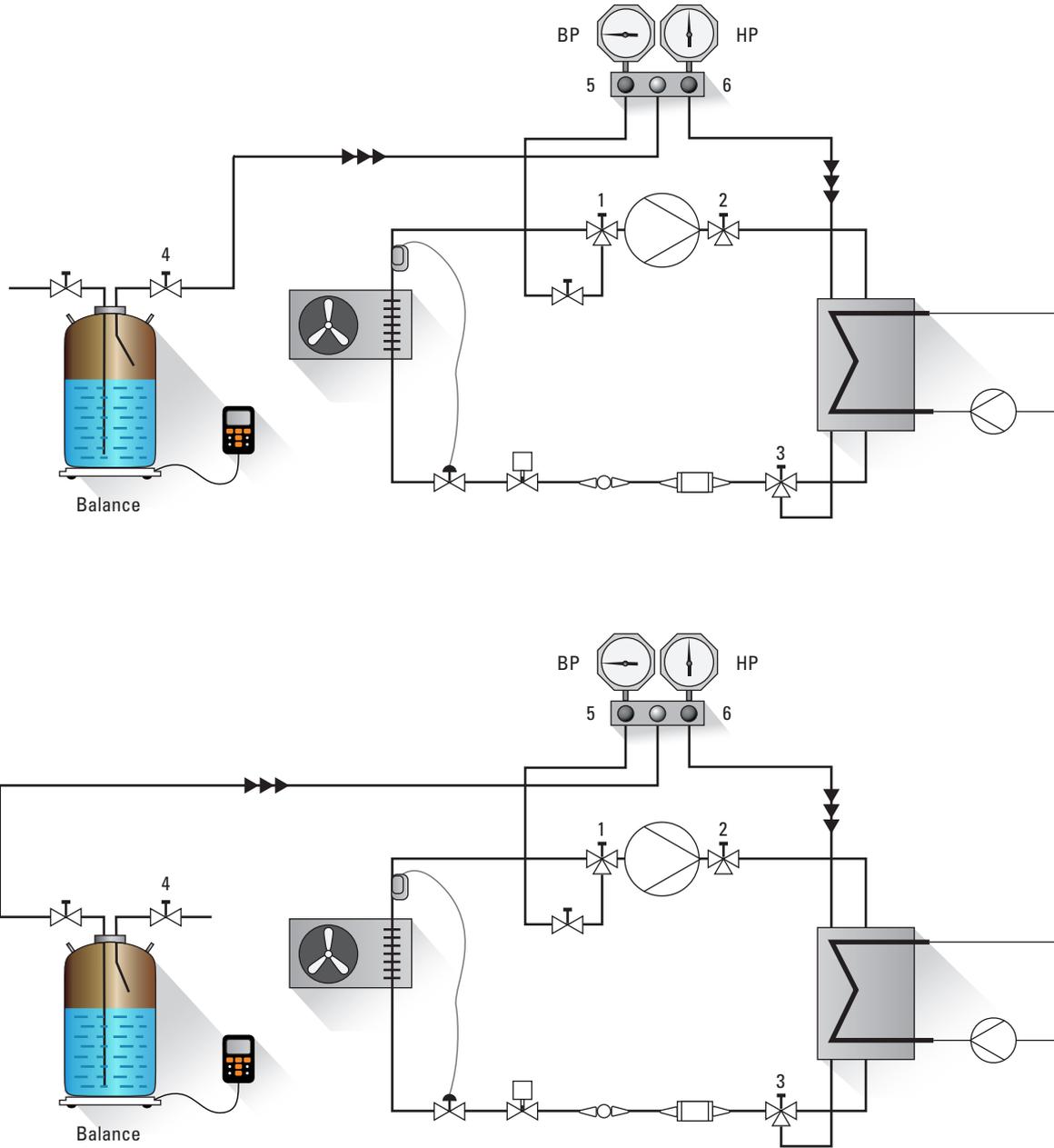


FIGURE 16 Procédure de charge au CO₂ en phase vapeur puis en phase liquide

Attention, de la neige carbonique peut se former lorsque du CO₂ liquide se détend sous la pression de 5,2 bar (pression du point triple). Cette formation peut fausser les mesures. Également, la présence de neige carbonique dans les tuyauteries peut provoquer des blocages pouvant entraîner des risques d'explosion lorsque la pression augmente.

Si la charge n'est pas finalisée lors de l'équilibre des pressions, **un complément de charge est à effectuer après la mise en route de l'installation. Le complément de charge est effectué en phase vapeur côté BP.** Le mode opératoire est le suivant :

- mettre en place à proximité du circuit à charger, la bouteille de fluide placée au préalable sur une balance ;
- raccorder le **robinet de vapeur de la bouteille à la voie de service du manifold** ;
- ouvrir les vannes (côté BP) pour permettre le transfert à l'état vapeur de la quantité nécessaire de fluide ;
- surveiller par pesée la quantité de fluide introduite ;
- fermer les vannes ;
- enlever la bouteille de fluide.

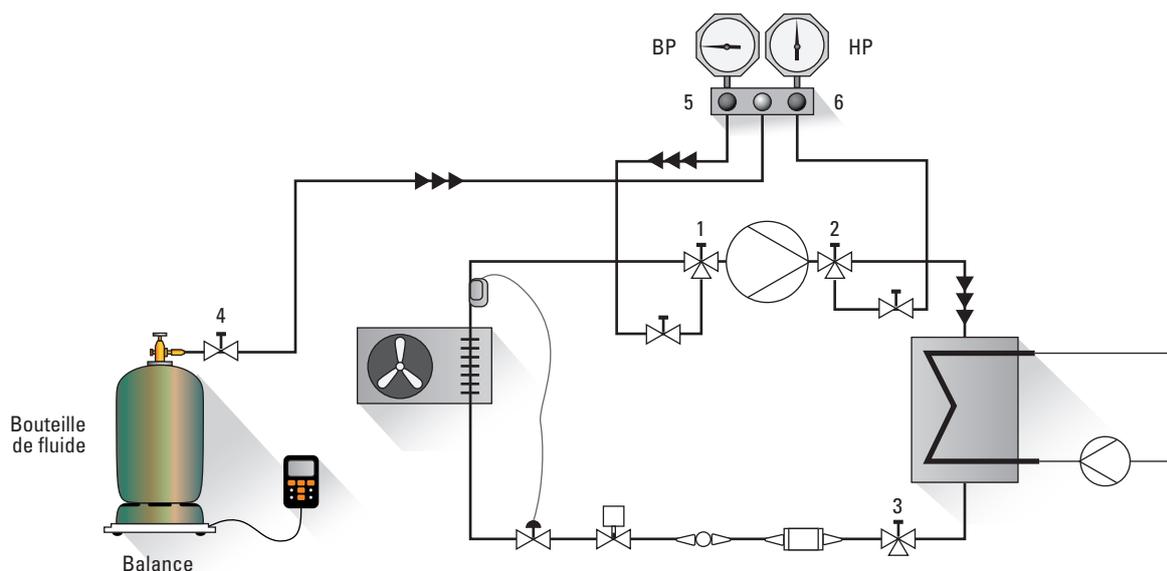


FIGURE 17 Complément de charge en phase vapeur

6.4.3 PROCÉDURE DE VIDANGE (REJET, RÉCUPÉRATION)

A ce jour, la récupération du fluide R744 n'est soumise à aucune obligation réglementaire. Le rejet dans l'atmosphère n'a pas de conséquence néfaste sur l'environnement. **Le fluide peut ainsi être rejeté directement dans le local ou de préférence dans l'environnement extérieur. Le rejet à l'extérieur du bâtiment sera toujours privilégié** pour éviter toute accumulation de fluide dans l'espace intérieur. Lorsque la purge en CO₂ d'une partie de l'installation est faite directement dans le local fermé, il faut absolument s'assurer de la bonne ventilation de celui-ci et éventuellement ouvrir tout ouvrant donnant sur l'extérieur. Le CO₂ est plus lourd que l'air ; en cas de fuite, il aura tendance à s'accumuler en partie basse du local.

L'évacuation du fluide s'effectue via les vannes de service de l'installation. Les principales étapes sont :

- raccorder les vannes BP et HP du manifold respectivement aux vannes BP (côté évaporation) et HP (côté condensation) de l'installation via des flexibles ;
 - relier à l'aide d'un flexible muni d'un manodétendeur, la voie de service du manifold à l'environnement extérieur (hors de toute zone de risque) ;
 - ouvrir les vannes BP et HP du manifold (dégazage est effectué en premier par la vanne de service côté BP).
- Des bouchons d'oreille sont nécessaires lors de la phase de rejet du fluide dans l'atmosphère.

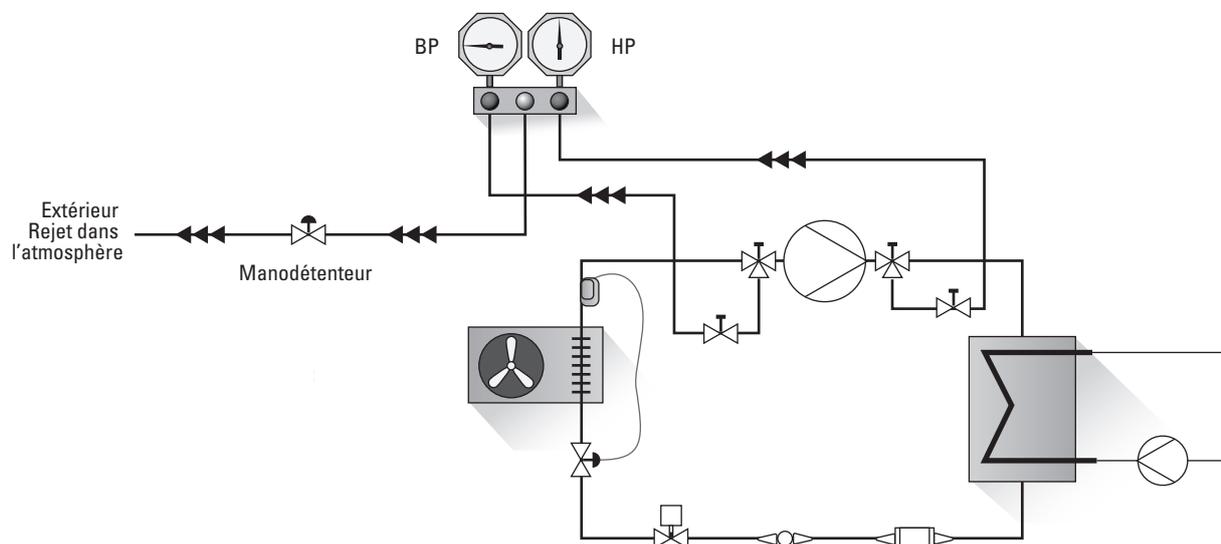


FIGURE 18 Procédure de rejet à l'atmosphère de fluide R744

Cependant, pour des raisons diverses, **la récupération du fluide est tout à fait possible**. La **récupération** se fait dans une bouteille adaptée au fluide récupéré. La machine de récupération est une machine vapeur-liquide/liquide qui permet d'effectuer indépendamment la récupération en phase liquide ou en phase vapeur.

Une récupération en phase liquide est plus rapide et sera donc privilégiée autant que possible. Toutefois, pour des petites installations comme celles rencontrées en résidentiel (charge < 5 kg), la récupération en phase gazeuse est tout à fait possible.

Une récupération en phase liquide permet d'aspirer le liquide et de l'envoyer vers la bouteille de stockage via l'unité de récupération. A titre informatif, le mode opératoire pour effectuer une telle opération est :

- raccorder le manifold ;
- mettre en place à proximité du circuit à traiter l'unité de récupération et la bouteille de récupération placée au préalable sur une balance ;
- raccorder le flexible entre l'unité de récupération et la vanne liquide de la bouteille de récupération ;
- raccorder le flexible entre la vanne de service du manifold et l'unité de récupération ;
- fermer la vanne (électrovanne) sur la conduite liquide située entre le condenseur et le détendeur afin d'éviter toute circulation de fluide ;
- récupérer toute la charge de fluide dans le condenseur (ou dans la bouteille de liquide de l'installation) jusqu'à lire une pression BP de 0 bar (récupération via le fonctionnement du compresseur de l'installation) ;
- arrêter l'installation à vider ;
- mettre en fonctionnement l'unité de récupération ;
- terminer la phase de récupération en phase vapeur ;
- arrêter l'opération de récupération lorsque la pression absolue du circuit à vider est de l'ordre de 0,4 bar (pression correspondant en général à l'arrêt automatique de l'unité de récupération) ;
- fermer les différentes vannes de raccordement.

6

5

RÈGLES D'INTERVENTION APPLIQUÉES AU R290

6.5.1 OUTILLAGES ET SECURITE

Comme tous les fluides inflammables, la manipulation du R290 va nécessiter un outillage spécifique ne produisant pas d'étincelle et étant utilisable dans une atmosphère explosive. Tout l'outillage électrique doit être approuvé « A3 ».

Le matériel nécessaire à la charge et récupération est du matériel spécifique :

- une station de récupération spécifique fluide A3 ;
- une bouteille de récupération spécifique pour les fluides inflammables (bouteille reconnaissable à son « col rouge » et son pictogramme rouge).

NOTE



Pour des raisons de sécurité, les bouteilles de fluides frigorigènes inflammables utilisent des raccords munis de pas de vis inversés à gauche.



FIGURE 20 Bouteille de fluide R290 (couleur rouge pour l'ogive et étiquette rouge : inflammable)

Les principaux risques à appréhender sur une installation au R290 sont :

- le risque d'incendie, explosion ;
- le risque de brûlures ;
- le risque d'asphyxie.

NOTE



Dans tous les cas, il est primordial d'empêcher la formation d'atmosphères explosives, en évitant notamment toute source d'inflammation.

Un risque d'explosion existe lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément :

- présence de comburant (oxygène) ;
- présence d'un combustible (fluide frigorigène) et de son état physique (vapeur, brouillard) ;
- domaine d'explosivité du combustible : domaine de concentration à l'intérieur duquel l'explosion est possible. Les limites inférieure et supérieure d'inflammabilité du combustible définissent le domaine d'explosivité ;
- présence d'une source d'inflammation ;
- confinement « suffisant ».

Outre le matériel spécifique à la manipulation du R290 incluant également gants et lunettes de protection, l'intervention sur une installation chargée en propane doit être menée en veillant à :

- signaler la zone de travail pour alerter les personnes du danger (pas de cigarettes, de flammes nues) ;
- définir un « périmètre de sécurité » de 2-3 mètres autour de la zone d'intervention ;
- disposer d'un détecteur de fuite adapté, fonctionnant en permanence et placé en partie basse pour détecter, en cas de fuite, l'accumulation de fluide au niveau du sol (gaz plus lourd que l'air) ;
- être dans une zone ventilée.

Le détecteur du fluide frigorigène propane (R290) doit déclencher une alarme pour un niveau de concentration inférieur à $0,0095 \text{ kg/m}^3$ (25 % LFL).

NOTE



La combustion d'un hydrocarbure peut être initiée par une flamme nue (flamme de chalumeau, d'allumette, de briquet ou encore de cigarette) ou encore par une étincelle électrique. L'étincelle électrique peut être provoquée par un pressostat ou encore la mise en marche/arrêt d'un interrupteur (de pompe à vide, de machine de récupération, prises électriques...).

6.5.2 PROCÉDURE DE CHARGE

Selon la taille de l'installation, la procédure de charge s'effectue par différence de pression (installation arrêtée)

puis éventuellement par mise en fonctionnement de l'installation pour effectuer un complément de charge.



FIGURE 21 Préparation à la charge suite au tirage au vide de l'installation (-1 Pa sur le manomètre)

La différence de pression existant entre la bouteille de fluide et le circuit tiré préalablement au vide peut suffire pour effectuer la charge complète de petites installations. La charge d'une installation peut s'effectuer différemment selon la présence ou non d'une vanne de charge (sur la conduite liquide).

En l'absence de vanne de charge sur l'installation, la charge s'effectue selon la procédure suivante :

- mettre en place à proximité du circuit à charger, la bouteille de fluide placée au préalable sur une balance ;
- raccorder à l'aide d'un flexible le robinet de liquide de la bouteille à la vanne de service du manifold ;
- ouvrir les vannes 4 et 6 pour permettre le transfert du fluide vers l'installation côté refoulement du compresseur (HP) ;
- fermer les vannes 4 et 6 ;
- enlever la bouteille de fluide.

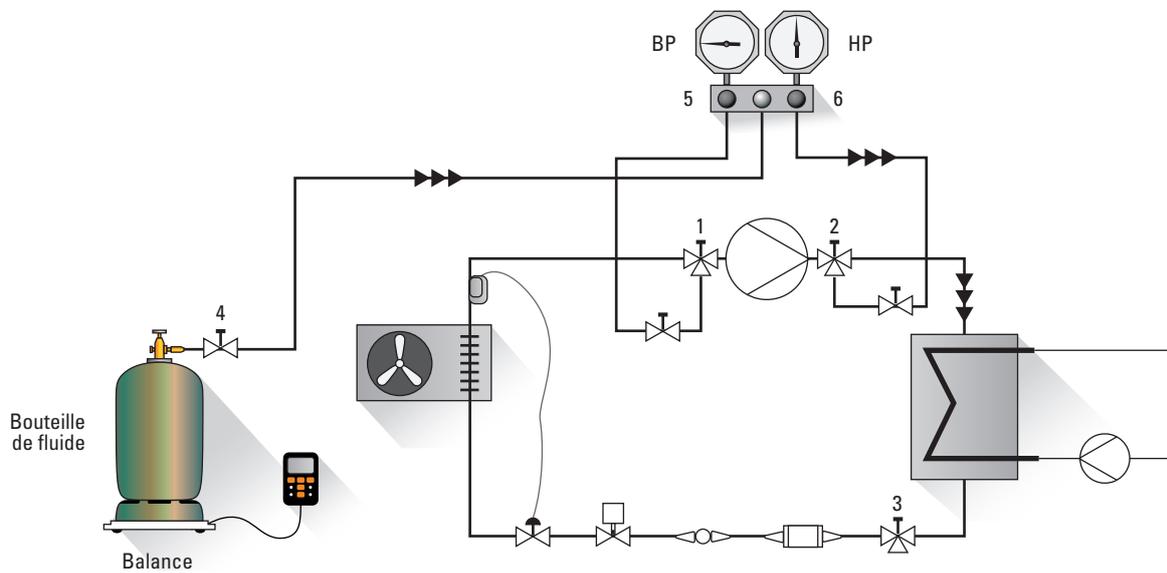


FIGURE 22 Procédure de charge au R290

Attention, ne pas utiliser de ceinture chauffante avec ce fluide hautement inflammable.

Si nécessaire, un complément de charge est réalisé après la mise en route de l'installation.

Dans ces conditions, une lecture des pressions HP et BP conformes au régime de fonctionnement de l'installation et au type de fluide considéré, permet de valider la bonne charge de l'installation.

Le **complément de charge** d'une installation peut s'effectuer :

- à l'aspiration du compresseur en phase vapeur ;
- à l'aspiration du compresseur en phase liquide.

6.5.2.1 COMPLÉMENT DE CHARGE EN PHASE VAPEUR

Ce complément de charge est à réserver aux fluides purs (tels que les fluides naturels) et aux mélanges azéotropes. Le mode opératoire est le suivant :

- mettre en place à proximité du circuit à charger, la bouteille de fluide placée au préalable sur une balance ;
- raccorder le **robinet de vapeur de la bouteille à la voie de service du manifold** ;

- mettre en fonctionnement l'installation ;
- ouvrir les vannes 3 et 4 (côté BP) pour permettre le transfert à l'état vapeur de la quantité nécessaire de fluide ;
- surveiller par pesée la quantité de fluide introduite ;
- fermer les vannes 3 et 4 ;
- enlever la bouteille de fluide.

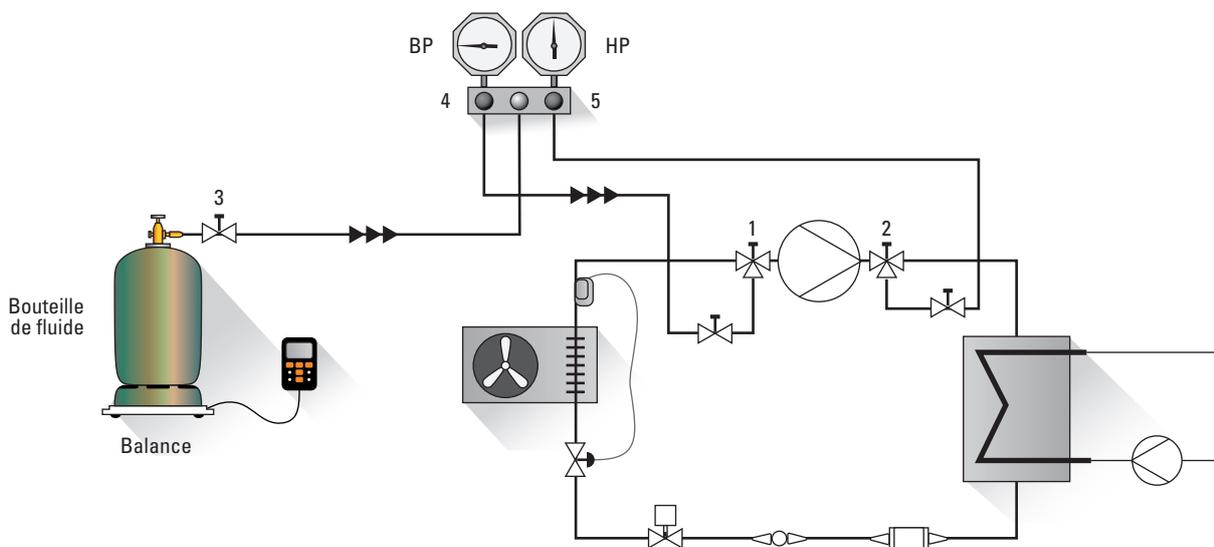


FIGURE 23 Procédure de complément de charge en phase vapeur

6.5.2.2 COMPLÉMENT DE CHARGE EN PHASE LIQUIDE

Le robinet de liquide de la bouteille est relié à la voie de service du manifold.

Ce complément de charge en phase liquide s'effectue comme suit :

- mettre en place à proximité du circuit à charger, la bouteille de fluide placée au préalable sur une balance ;
- raccorder le robinet de liquide de la bouteille à la voie de service du manifold ;
- mettre en fonctionnement l'installation ;
- ouvrir la vanne 4 (côté BP) ;

- ouvrir légèrement la vanne 3 afin de provoquer une détente du liquide et de pouvoir l'introduire en vapeur saturée au niveau de la vanne BP du manifold ;
- surveiller par pesée la quantité de fluide introduite ;
- fermer les vannes 3 et 4 ;
- enlever la bouteille de fluide.

Ce complément de charge se fait par à-coups (via BP, installation en fonctionnement) afin d'éviter tout risque de coup de liquide au niveau du compresseur.

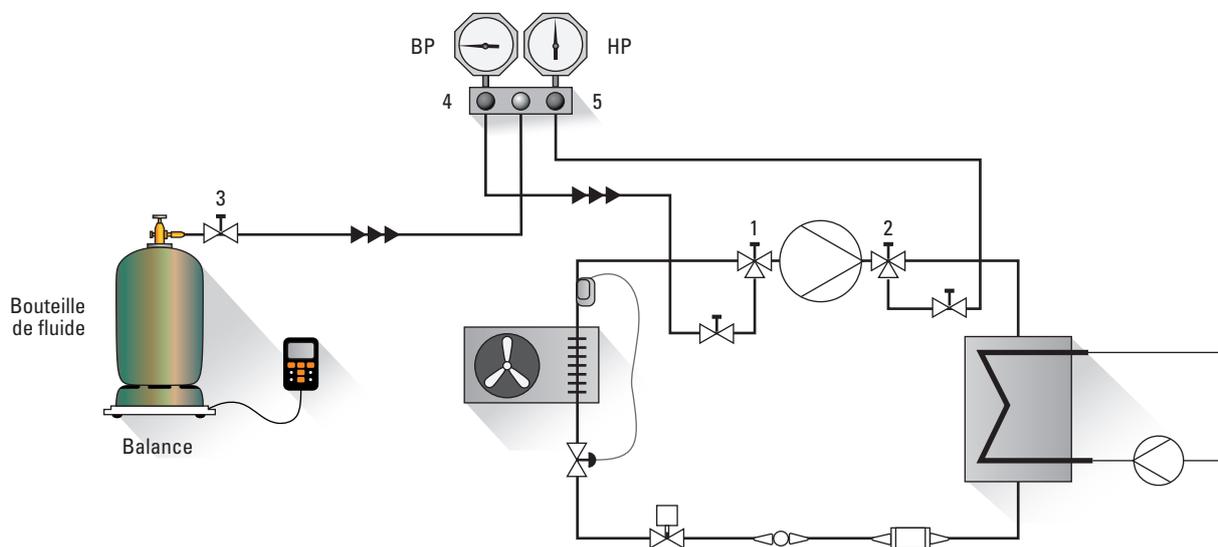


FIGURE 24 Procédure de complément de charge en phase liquide

CONSEILS



Après la charge complète de l'installation, fermer le robinet de la bouteille de fluide et procéder au tirage au vide des flexibles.
Aspirer le fluide restant dans le flexible de charge par la vanne BP du manifold (installation en fonctionnement)
Penser à « réintégrer » la quantité de gaz présent dans les flexibles du manifold au travers du fonctionnement de l'installation (côté BP)

6.5.3 PROCÉDURE DE VIDANGE (REJET, RÉCUPÉRATION)

A ce jour, la récupération du fluide R290 (comme le R744) n'est soumise à aucune obligation réglementaire. Le rejet dans l'atmosphère n'a pas de conséquence néfaste sur l'environnement.

Compte tenu de ses caractéristiques, deux possibilités existent pour assurer la vidange d'une installation au R290 :

- rejeter le fluide vers l'extérieur ;
 - assurer sa récupération dans une bouteille spécifique.
- Ces trois possibilités sont décrites ci-après.

Lors de la phase de rejet du fluide, il est primordial de s'assurer au préalable que la « zone de rejet » en extérieur du bâtiment ne contienne aucune source d'inflammation. Un panneau d'avertissement du danger (gaz inflammable, ne pas fumer, pas de flammes nues) est à disposer dans la zone où l'hydrocarbure est rejeté. De plus, il faut s'assurer que le fluide évacué, plus lourd que l'air, ne puisse pas se concentrer et être piégé dans des « endroits bas au niveau du sol ».

Les étapes pour un rejet du fluide vers l'extérieur sont :

- raccorder les vannes BP et HP du manifold respectivement aux vannes BP (côté évaporation) et HP (côté condensation) de l'installation via des flexibles ;
- relier à l'aide d'un flexible muni d'un manodétendeur, la voie de service du manifold à l'environnement extérieur (hors de toute zone de risque) ;
- ouvrir les vannes BP et HP du manifold (dégazage est effectué en premier par la vanne de service côté BP).

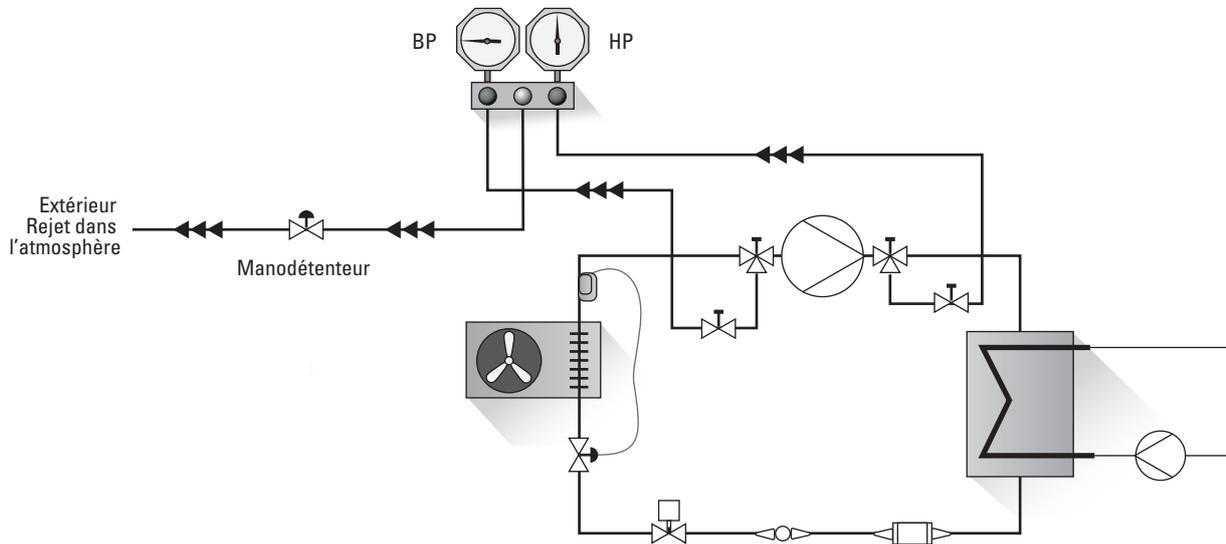


FIGURE 25 Procédure de rejet du fluide en extérieur

En dernière solution, le fluide peut être récupéré dans une bouteille de récupération spécifique aux fluides inflammables (comme tout le matériel à utiliser avec ce type de fluide). La récupération du fluide se fera de façon privilégiée en phase liquide, phase de récupération plus rapide. Cette méthode de récupération permet d'aspirer le liquide et de l'envoyer vers la bouteille de stockage via l'unité de récupération. La procédure d'intervention, similaire aux autres fluides, est la suivante :

- raccorder le manifold ;
- mettre en place à proximité du circuit à traiter l'unité de récupération et la bouteille de récupération placée au préalable sur une balance ;
- raccorder le flexible entre l'unité de récupération et la vanne liquide de la bouteille de récupération ;
- raccorder le flexible entre la vanne de service du manifold et l'unité de récupération ;
- fermer la vanne (électrovanne) sur la conduite liquide située entre le condenseur et le détendeur afin d'éviter toute circulation de fluide ;
- récupérer toute la charge de fluide dans le condenseur (ou dans la bouteille de liquide de l'installation) jusqu'à lire une pression BP de 0 bar (récupération via le fonctionnement du compresseur de l'installation) ;
- arrêter l'installation à vidanger ;
- mettre en fonctionnement l'unité de récupération ;
- terminer la phase de récupération en phase vapeur ;
- arrêter l'opération de récupération lorsque la pression absolue du circuit à vider est de l'ordre de 0,4 bar (pression correspondant en général à l'arrêt automatique de l'unité de récupération) ;
- fermer les différentes vannes de raccordement.

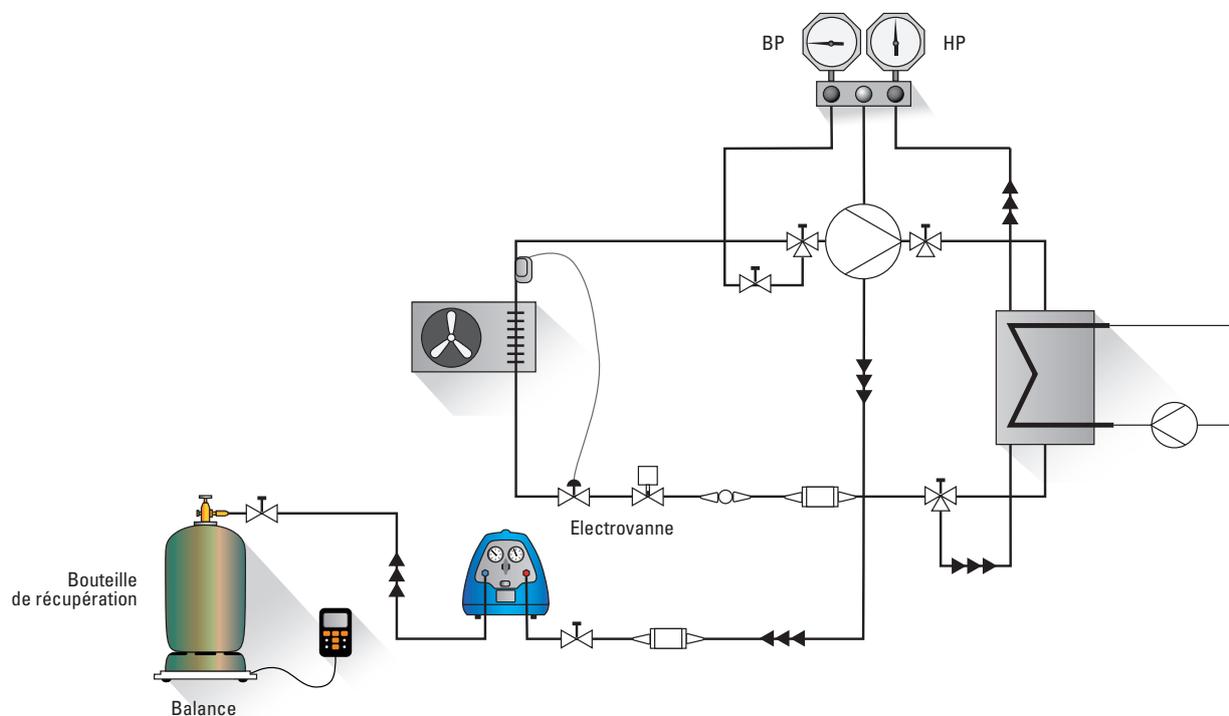


FIGURE 26 Procédure de récupération en phase liquide

NOTE



La gestion des déchets est encadrée par l'utilisation de Bordereaux de Suivi (BSD). Le BSD « CERFA 12571*01 » est à utiliser entre autres pour les fluides frigorigènes naturels (et notamment les hydrocarbures).

II De manière analogue au CO₂, la spécificité du matériel nécessaire à la manipulation du propane et l'absence actuelle d'obligation réglementaire font que la récupération de ce fluide est une procédure peu utilisée à ce jour.

TABLe DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	P. 4
2	CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES : FLUIDE ET LUBRIFIANT	P. 5
	2.1 Définition	5
	2.2 Le fluide frigorigène	6
	2.3 Le lubrifiant	7
	2.3.1 Caractéristiques essentielles du lubrifiant	7
	2.3.2 Différentes familles d'huile	8
3	CARACTÉRISTIQUES DES FLUIDES NATURELS	P. 9
	3.1 les composés inorganiques purs	9
	3.1.1 Le R744 (dioxyde de carbone)	9
	3.1.2 Le R717 (ammoniac)	12
	3.1.3 Le R718 (eau)	14
	3.2 Les hydrocarbures (saturés ou insaturés)	14
	3.2.1 le R290 (propane)	14
	3.2.2 Le R600 (butane)	15
	3.2.3 Le R600a (isobutane)	15
	3.2.4 Le R1150 (éthylène)	16
	3.2.5 Le R1270 (propylène)	16
	3.2.6 Synthèse des hydrocarbures	17
	3.3 Synthèse	19
4	ÉTAT DE L'OFFRE DES ÉQUIPEMENTS CVC	P. 22
	4.1 Les pompes à chaleur	22
	4.1.1 Rappels	22
	4.1.2 Les fluides rencontrés sur le marché des pompes à chaleur	24
	4.1.3 Caractéristiques et performances des équipements	25
	4.1.4 Les contraintes d'installation et de maintenance	33
	4.2 Quel avenir pour le CO ₂ (R744) et le propane (R290) ?	34
	4.2.1 Les Freins au développement du propane	34
	4.2.2 Les freins au développement du CO ₂	35
5	ÉTAT DE LA RÉGLEMENTATION EXISTANTE SUR L'USAGE DES FLUIDES NATURELS	P. 36

TABLE DES MATIÈRES

6	DÉFINITION DES RÈGLES D'INTERVENTION SPÉCIFIQUES	P. 38
6.1	Conditions générales de transport et de stockage	38
6.1.1	Le transport	38
6.1.2	Le stockage	40
6.2	Changement de fluide dans une installation existante	40
6.3	Opérations préliminaires à la charge d'une installation	41
6.3.1	Test d'étanchéité	41
6.3.2	Tirage au vide	42
6.4	Règles d'intervention appliquées au R744	44
6.4.1	Outillages et securite	44
6.4.2	Procédure de charge	45
6.4.3	Procédure de vidange (rejet, récupération)	48
6.5.1	Outillages et securite	51
6.5	Règles d'intervention appliquées au R290	51
6.5.2	Procédure de charge	52
6.5.3	Procédure de vidange (rejet, récupération)	55

LES POMPES À CHALEUR À FLUIDE NATUREL

Le marché de la pompe à chaleur en rénovation connaît un essor important. Parallèlement, les exigences réglementaires imposent progressivement l'utilisation de fluides frigorigènes à faible impact environnemental. Dans ce contexte, les fluides naturels sont une alternative intéressante.

La dénomination « fluides naturels » s'applique aux substances inorganiques pures (R744, R717, R718) et aux hydrocarbures (R290, R600a, R1270 notamment). Les fluides naturels ne sont pas soumis au règlement UE N°517/2014 du 16 avril 2014, appelé F-GAS. Cela implique qu'ils ne sont pas soumis réglementairement aux opérations de récupération et au contrôle périodique d'étanchéité. En revanche, via l'arrêté du 24 juillet 2020 relatif à l'entretien des systèmes thermodynamiques dont la puissance nominale est comprise entre 4 et 70 kW inclus, ces systèmes utilisant les fluides naturels sont soumis à un contrôle d'étanchéité.

Les caractéristiques thermodynamiques, le choix du lubrifiant ainsi que les spécificités de chacun de ces fluides sont détaillés dans cette étude. Les hydrocarbures et l'ammoniac (R717) sont des fluides frigorigènes très performants compte tenu de leurs propriétés physico-chimiques. Le R744 (dioxyde de carbone) est plutôt adapté à la production d'eau chaude sanitaire moyennant un cycle de fonctionnement transcritique. Sa faible température critique limite fortement le recours à un cycle thermodynamique classique.

Le R290 et le R744 sont à ce jour les deux principaux fluides naturels utilisés dans des systèmes destinés au résidentiel. Le type de machine le plus répandu actuellement pour l'utilisation de ces fluides est la PAC air/eau. Environ soixante produits ont été recensés ; il s'agit principalement de PAC air/eau au R290. Ces systèmes présentent des efficacités saisonnières très satisfaisantes avec une classe énergétique supérieure à A+ et

ce, pour une application basse température (35 °C) voire une température intermédiaire (55 °C). Toutefois, les performances à température intermédiaire sont inférieures à celles à basse température, de l'ordre de 30 à 70 points. En rénovation, il sera donc à privilégier au maximum la possibilité de diminuer les besoins de chauffage (isolation thermique à renforcer) avant de changer les émetteurs.

Le marché actuel est dominé par les machines monoblocs scellées en usine dont l'installation et la mise en service ne posent pas de problèmes particuliers. En revanche, toute intervention sur le circuit frigorifique nécessite des dispositions spécifiques. En présence d'un hydrocarbure, fluide hautement inflammable, toute manipulation devra être faite avec un matériel adapté au risque et en veillant à être dans une zone ventilée sans présence de sources d'inflammation à proximité du système. Les bouteilles de fluides inflammables présentent un raccord muni d'un pas de vis inversé afin « d'alerter » l'opérateur avant toute manipulation. Les risques associés à l'inflammabilité du fluide et une réglementation restrictive sont des freins à un développement plus important.

L'utilisation du R744 dans les pompes à chaleur implique également des précautions propres à ce fluide. En raison de pressions de fonctionnement élevées, l'outillage doit être adapté : un manomètre avec une graduation de 0 à 160 bars côté HP (et 0 à 80 bars côté BP) est indispensable. Également, la charge d'une telle installation doit s'effectuer en phase vapeur jusqu'à une pression située au-dessus de 5.2 bars (point critique) puis en phase liquide. Indépendamment de ces précautions, le développement futur des machines au CO₂ en résidentiel est principalement freiné par le coût de fabrication lié aux systèmes devant résister à ces fortes pressions.