



Module 1

Technologie des pompes à chaleur

Élaboré par l'Agence de l'énergie - Plovdiv



Co-funded by
the European Union



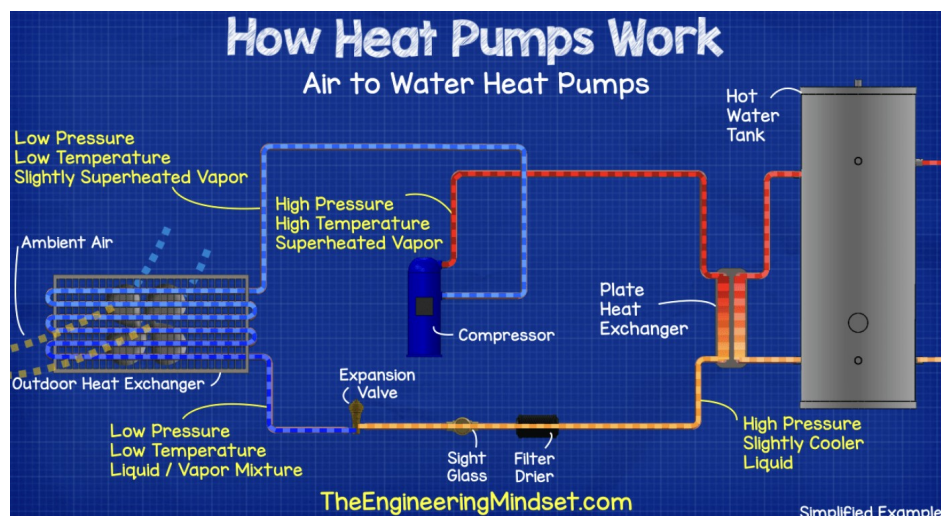
Co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.



Présentation du module 1

Ce module fournit les bases techniques nécessaires à la compréhension de la technologie des pompes à chaleur en tant que système intégré de thermodynamique et d'ingénierie. Il commence par les principes fondamentaux du transfert de chaleur et du cycle de compression de vapeur, établissant ainsi les fondements thermodynamiques du fonctionnement et des performances des pompes à chaleur.

Il examine ensuite les fluides frigorigènes et leurs classifications environnementales et de sécurité, puis propose une analyse détaillée des principaux composants du circuit de réfrigération, notamment les compresseurs, les évaporateurs, les condenseurs et les détendeurs. D'autres éléments du système, tels que les vannes d'inversion, les dispositifs de gestion de l'huile, les filtres déshydrateurs, les réservoirs, les ventilateurs, les pompes de circulation et les composants hydrauliques, sont également abordés. Ensemble, ces thèmes permettent d'acquérir une compréhension globale du fonctionnement des pompes à chaleur, de l'interaction entre leurs composants et de l'influence des choix de conception du système sur l'efficacité, la fiabilité et la sécurité de fonctionnement.



Co-funded by
the European Union



Contenu du module 3

Leçon 1	Principes fondamentaux des pompes à chaleur	Leçon 7	Autres composants du circuit frigorifique
Leçon 2	Thermodynamique du cycle de compression de vapeur	Leçon 8	Composants auxiliaires
Leçon 3	Les réfrigérants en tant que fluides de travail		
Leçon 4	Compresseurs		
Leçon 5	Échangeurs de chaleur externes (évaporateurs et condenseurs)		
Leçon 6	Dispositifs de détente		

LEÇON 1

Principes fondamentaux des pompes à chaleur



Co-funded by
the European Union



Leçon 1 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Expliquer le principe fondamental du transfert de chaleur « à contre-courant » et l'analogie entre les pompes hydrauliques et les pompes à chaleur.
2. Décrire la structure et le fonctionnement du cycle de compression de vapeur, y compris l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le dispositif de détente.
3. Distinguer les technologies de pompes à chaleur à compression mécanique, à absorption et thermoélectriques (Peltier).

Principe et analogie de la pompe à chaleur

- Une pompe à chaleur est un dispositif qui utilise un apport d'énergie pour transférer la chaleur d'une source à basse température vers un puits à haute température. Elle ne crée pas de chaleur, mais déplace plutôt l'énergie thermique existante « en amont » à l'encontre du sens naturel du flux thermique, tout comme une pompe hydraulique soulève l'eau vers une altitude plus élevée.
- Dans une pompe à chaleur, l'énergie mécanique ou électrique « améliore » la qualité de la chaleur, permettant ainsi d'extraire la chaleur de l'air ambiant froid, du sol ou de l'eau et de la transférer vers des espaces intérieurs chauffés. La figure 1.1 illustre cette analogie entre une pompe hydraulique et une pompe à chaleur thermique.

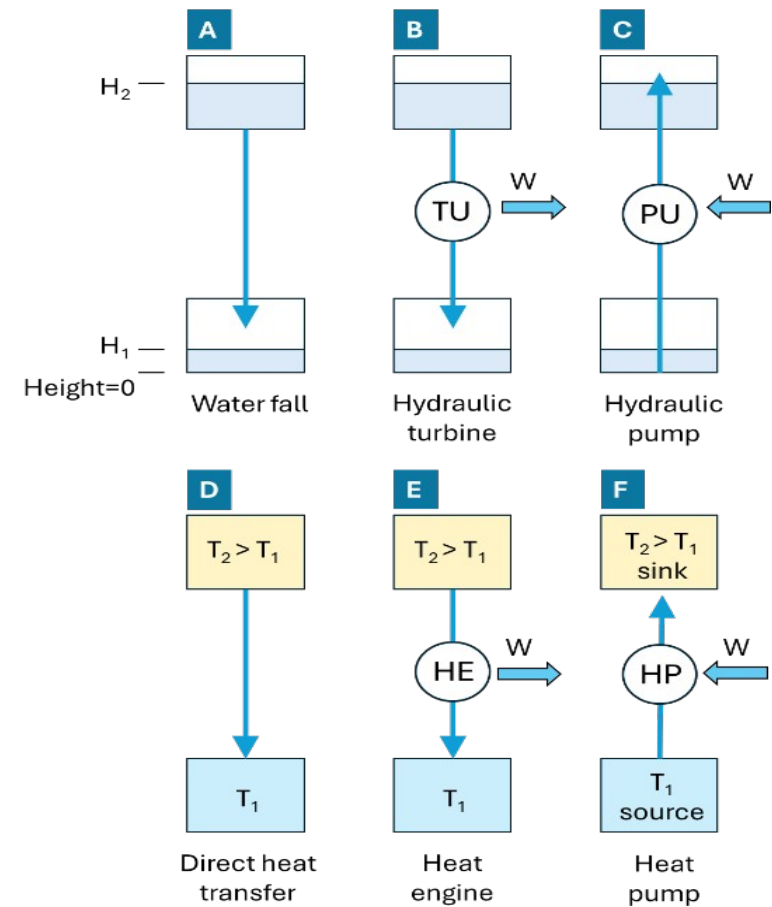


Figure 1.1. Analogie entre les systèmes hydrauliques et thermiques.

Pompe à chaleur ou chaudière

Contrairement à une chaudière classique (qui brûle du combustible pour **produire** de la chaleur), une pompe à chaleur **transfère** la chaleur. Une chaudière convertit directement l'énergie chimique en énergie thermique dans l'eau, tandis qu'une pompe à chaleur utilise un travail mécanique pour transférer la chaleur ambiante vers le circuit de chauffage.

De ce fait, une pompe à chaleur peut fournir plus d'énergie thermique que l'énergie consommée ($COP > 1$), car une grande partie de la chaleur produite provient de l'environnement extérieur. En pratique, cela signifie que les pompes à chaleur peuvent atteindre un rendement effectif plus élevé en exploitant la chaleur extérieure, tandis que les chaudières sont limitées à 100 % (ou légèrement plus avec la condensation) du contenu énergétique du combustible.

Composants et sous-systèmes d'une pompe à chaleur

Un système complet de pompe à chaleur se compose de trois sous-systèmes reliés entre eux : la **source de chaleur** (par exemple, le sol, l'air ambiant ou l'eau), le **circuit de réfrigération** et le système **de distribution de chaleur** (intérieur). Le circuit de réfrigération (circuit fermé) fait circuler un fluide de travail (réfrigérant) à travers les quatre composants principaux – évaporateur, compresseur, condenseur, détendeur – pour transférer la chaleur.

En fonctionnement, le réfrigérant absorbe la chaleur de la source dans l'évaporateur à basse pression, est comprimé (ce qui augmente sa température), puis rejette la chaleur dans le condenseur vers le système de distribution à haute pression. Le réfrigérant liquide refroidi est ensuite détendu pour redémarrer le cycle.

En coordonnant ces composants, la pompe à chaleur « pompe » l'énergie thermique à travers toutes les parties du système.

Types de pompes à chaleur

Pompes à chaleur à compression mécanique (circuit de réfrigérant)

La pompe à chaleur la plus courante utilise le **cycle mécanique de compression de vapeur** actionné par un compresseur électrique. Dans ce cycle, le fluide frigorigène circule en continu et subit des changements de phase (liquide $\leftrightarrow$ vapeur). Le compresseur augmente la pression et la température du fluide frigorigène, ce qui lui permet de libérer de la chaleur dans le condenseur. Après la condensation, le fluide frigorigène passe par un dispositif de détente afin de réduire sa pression et sa température, puis s'évapore en absorbant la chaleur à la source.

La figure 1.2. présente un schéma d'une pompe à chaleur à compression mécanique. Ces unités sont largement utilisées dans les systèmes CVC résidentiels. Elles fonctionnent sur une boucle de réfrigérant qui passe par un compresseur à entraînement

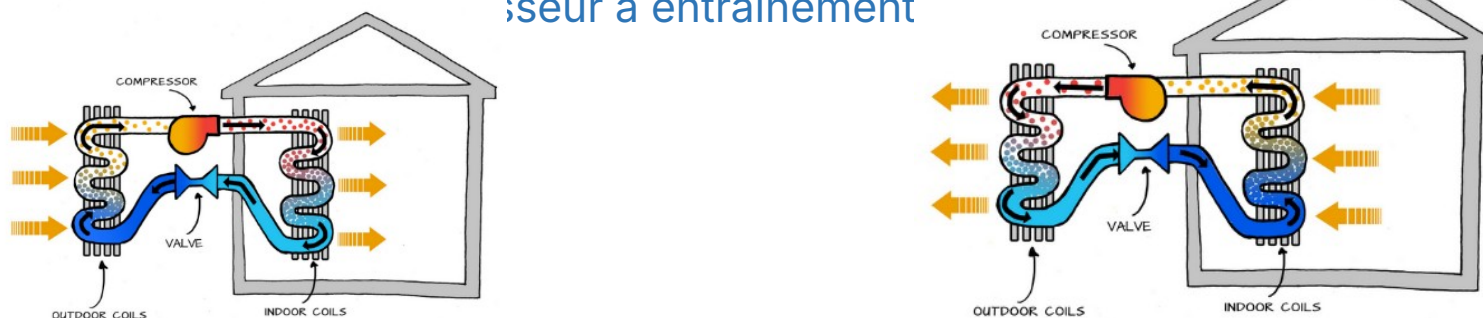


Figure 1-2. Fonctionnement de base d'une pompe à chaleur à compression mécanique (côté gauche : chauffage de la maison, côté droit : refroidissement de la maison)



Co-funded by
the European Union



Pompes à chaleur à absorption et à effet Peltier

Au-delà de la compression mécanique, il existe d'autres technologies de pompes à chaleur.

Les pompes à chaleur à absorption utilisent un générateur thermique (souvent alimenté au gaz ou par de la chaleur résiduelle) et un couple réfrigérant-absorbant (par exemple, ammoniac-eau) pour assurer la réfrigération sans compresseur électrique. La chaleur entraîne le cycle en provoquant la désorption du réfrigérant de l'absorbant (Figure 1.3.).

Les pompes à chaleur thermoélectriques (Peltier) utilisent des modules semi-conducteurs à l'état solide : lorsqu'un courant électrique traverse une jonction, la chaleur est transférée d'un côté à l'autre (Figure 1.4.). Ces technologies peuvent être utiles dans des applications de niche (par exemple, les systèmes alimentés par la chaleur résiduelle).

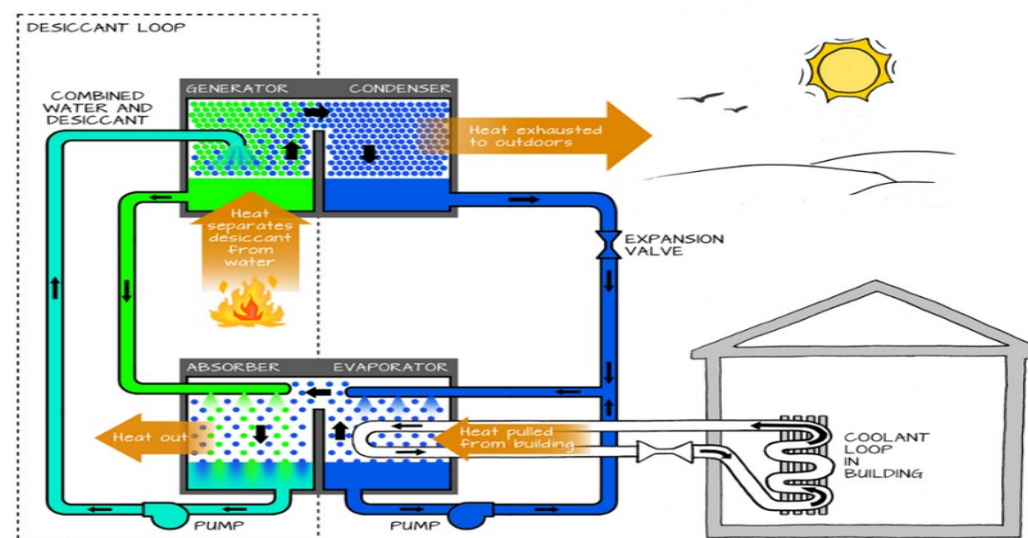


Fig. 1.3. Le double cycle d'un refroidisseur à absorption.

Source : Atelier sur la durabilité, Venture Well

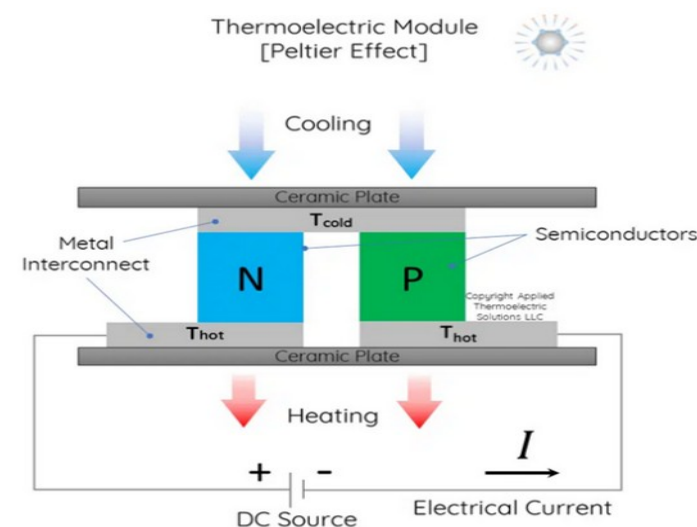


Fig. 1.4. Schéma conceptuel d'une cellule Peltier. Source : Applied Thermoelectric Solutions

Principe de fonctionnement du cycle de compression-vaporisation

Évaporateur : processus d'évaporation du réfrigérant

L'évaporateur est l'échangeur de chaleur qui **absorbe la chaleur** de la source à basse température pour la transférer au fluide frigorigène. À l'intérieur de l'évaporateur, un mélange liquide-vapeur froid et à basse pression entre en ébullition (s'évapore) à une température de saturation constante.

En circulant dans les serpentins de l'évaporateur, le réfrigérant absorbe une grande quantité de chaleur (chaleur latente de vaporisation) de l'air ou du sol qui l'entoure.

Cela provoque la transformation complète du réfrigérant en vapeur (souvent avec une légère surchauffe) au moment où il en sort. En effet, l'évaporateur convertit l'énergie thermique provenant de la source en chaleur transportée par la vapeur de réfrigérant.

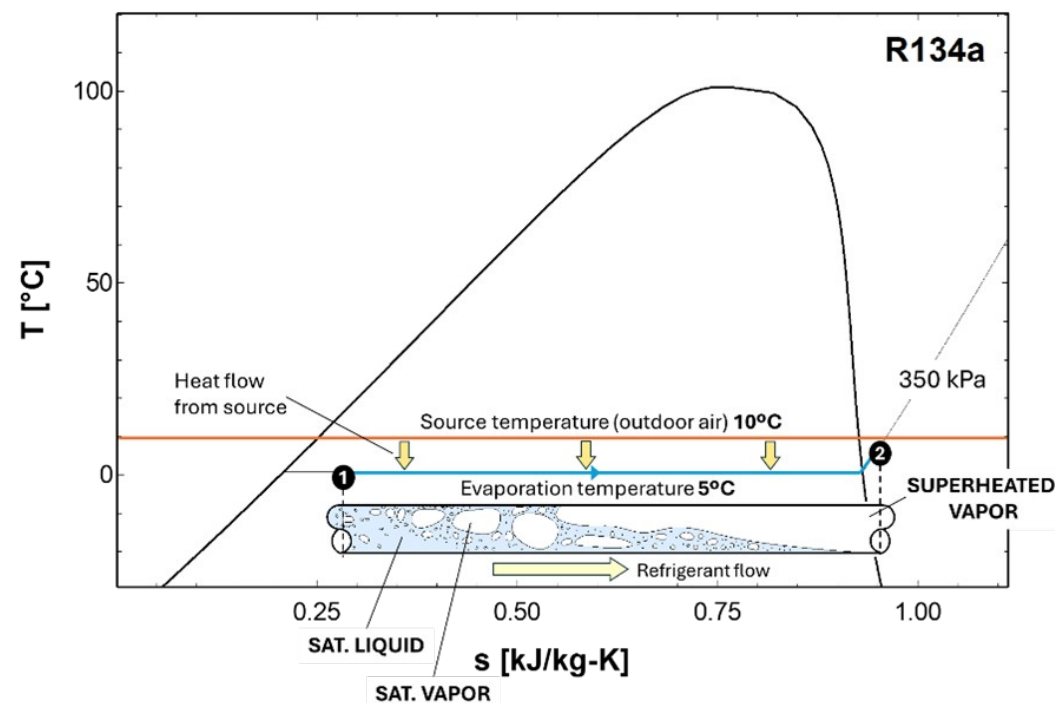


Figure 1-5. Évaporation du fluide frigorigène dans un diagramme TS



Co-funded by
the European Union



Condenseur : processus de condensation du fluide frigorigène

Le condenseur est l'échangeur de chaleur qui **rejette la chaleur** vers le dissipateur (espace intérieur ou air ambiant). La vapeur de réfrigérant chaude et sous haute pression provenant du compresseur pénètre dans le condenseur.

Comme le condenseur est maintenu à haute pression (et donc à une température de saturation élevée), le réfrigérant est à une température supérieure à celle du dissipateur. Il **se condense** alors à une température quasi constante, libérant ainsi sa chaleur. Au cours de ce changement de phase, la chaleur latente de vaporisation est transférée au dissipateur (par exemple, l'air intérieur ou l'eau).

Le fluide frigorigène quitte le condenseur sous forme de liquide à haute pression à une température légèrement inférieure. Il en résulte que la chaleur pompée depuis la source (plus le travail du compresseur) est transférée vers le dissipateur.

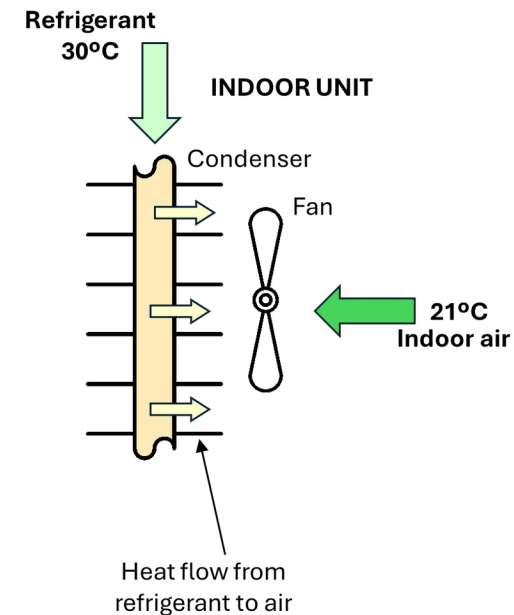


Figure 1-6. Condensation du fluide frigorigène

Cycle simple de compression de vapeur

Putting it all together, the single-stage vapor-compression cycle continuously transfers heat from the low-temperature source to the high-temperature sink (see Figure 1.7). Heat Q_0 is absorbed in the evaporator (low pressure) from the source. The compressor then raises the refrigerant's pressure (and temperature) by work input W . The condenser releases Q_c (which equals $Q_0 + W$) to the sink. Finally, the expansion valve drops the pressure back to the evaporator level. Overall, the heat pump delivers heat

$$Q_h = Q_0 + W$$

to the sink each cycle. Because Q_h includes the absorbed ambient heat Q_0 plus the work, the Coefficient of Performance ($\text{COP} = Q_h/W$) can exceed 1, highlighting the thermodynamic advantage of the heat pump.

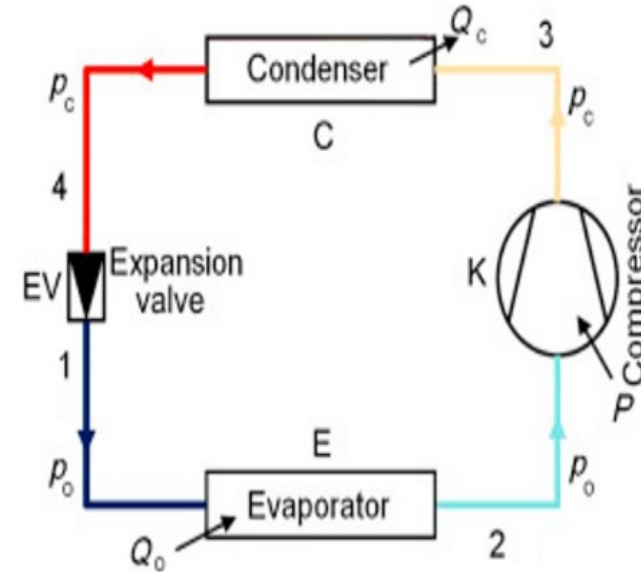


Figure 1-7. Schéma d'un système de réfrigération à compression à un étage

LEÇON 2

Thermodynamique du cycle de compression de vapeur

Leçon 2 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Expliquer le concept de gain de température et son impact sur le rendement et le COP d'une pompe à chaleur.
2. Interpréter la pompe à chaleur comme un moteur thermique inversé et définir le coefficient de performance (COP).
3. Distinguer les cycles idéaux (Carnot) des cycles réels et identifier les sources d'irréversibilité thermodynamique.

Écart de température et rendement de la pompe à chaleur

Le rendement (COP) d'une pompe à chaleur est très sensible à la **différence de température** entre la source et le puits. Une différence de température plus faible (c'est-à-dire une source plus chaude ou un puits plus froid) signifie que le compresseur doit fournir moins d'effort, ce qui se traduit par un COP plus élevé.

À l'inverse, lorsque la température de l'évaporateur descend en dessous de celle de la source (ou que la température du condenseur dépasse celle du puits), l'effort requis augmente considérablement, ce qui réduit les performances.

Les concepteurs cherchent donc à minimiser autant que possible les différences de température entre la source et le puits. En augmentant la température de la source ou en abaissant la température de distribution, la pompe à chaleur fonctionne avec des écarts de température plus faibles et un rendement nettement supérieur.

La pompe à chaleur en tant que moteur thermique inversé (concept du COP)

Une pompe à chaleur peut être considérée comme un moteur thermique fonctionnant à l'envers. Dans le cycle de Carnot idéal, le travail W sert à transférer la chaleur Q_0 d'un réservoir froid vers un réservoir chaud, fournissant ainsi de la chaleur

$$Q_h = Q_0 + W$$

au dissipateur (figure 2.1). Le **coefficient de performance** est défini comme

$$\text{COP} = Q_h/W.$$

En théorie, une pompe à chaleur de Carnot fonctionnant entre les températures de la source et du puits présente le COP maximal possible pour ces températures. Concrètement, cela signifie que pour un travail fourni donné, la pompe peut déplacer (ou « pomper ») de la chaleur de telle sorte que sa production de chaleur dépasse le travail. Les pompes à chaleur réelles s'approchent de cette limite mais sont toujours limitées par des imperfections.

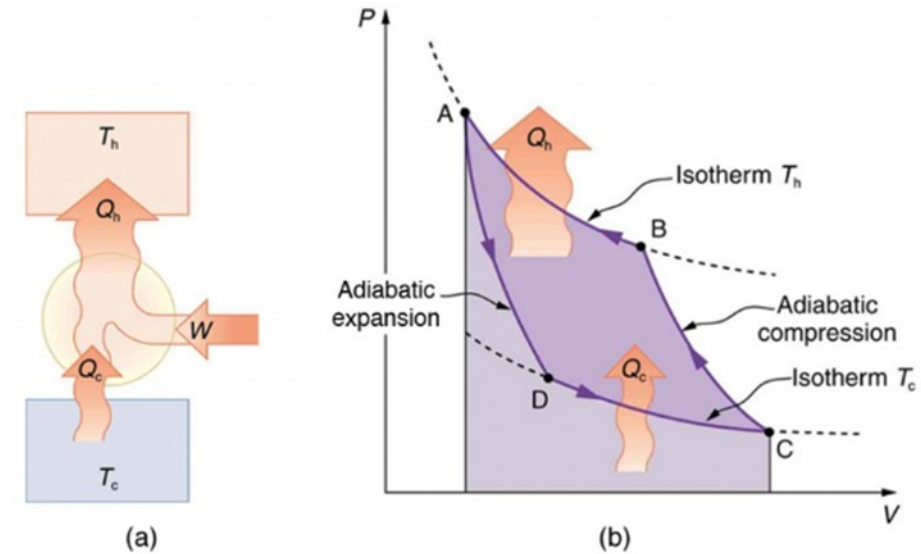


Figure 2.1. Moteur de Carnot : (a) schéma du transfert de chaleur ; (b) schéma d'un cycle de Carnot inversé

Interprétation du cycle de compression de vapeur sur un diagramme thermodynamique

Le cycle de compression de vapeur peut être représenté sur des diagrammes thermodynamiques tels que le diagramme température-entropie (T-s) (figure 2.2) ou le diagramme pression-enthalpie (p-h). Ces diagrammes permettent d'interpréter graphiquement les processus physiques qui se produisent à l'intérieur de la pompe à chaleur.

Les quatre processus principaux sont les suivants :

- Évaporation (basse pression) : le fluide frigorigène absorbe la chaleur de la source à une température quasi constante tout en passant de l'état liquide à l'état gazeux.
- Compression : le compresseur augmente la pression et la température du fluide frigorigène par un apport de travail mécanique.
- Condensation (haute pression) : le fluide frigorigène libère de la chaleur vers le puits à une température quasi constante tout en se condensant en liquide.
- Détente : le dispositif de détente réduit la pression, provoquant une baisse de température avant que le réfrigérant ne réintègre l'évaporateur.

Dans le cycle idéal, la compression est isentropique (entropie constante).

Dans les systèmes réels, l'entropie augmente en raison de la irréversibilité, ce qui réduit le rendement.

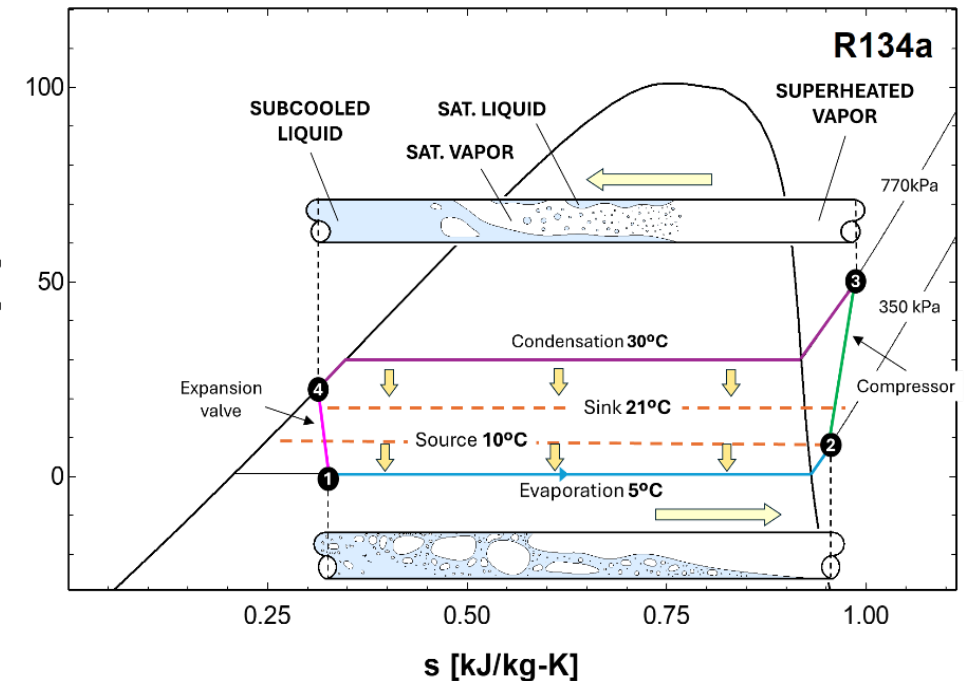


Figure 2.2. Moteur de Carnot : (a) schéma du transfert de chaleur ; (b) diagramme d'un cycle de Carnot inversé

Rendement de Carnot et irréversibilité

La figure 2.1 illustre l'effet de l'irréversibilité réelle sur la thermodynamique d'une pompe à chaleur. En pratique, la compression n'est pas isentropique (voir le trajet en pointillés par rapport au trajet en trait plein sur la figure 2.3), et les différences de température finies entre les échangeurs de chaleur entraînent une production d'entropie. Ces pertes font que le COP réel est inférieur au COP idéal de Carnot.

Par exemple, les chutes de pression et le comportement non idéal des gaz nécessitent un travail supplémentaire. Le diagramme T-s montre également l'entropie supplémentaire générée lors de la compression réelle. En résumé, tout écart par rapport au cycle réversible – tel que le transfert de chaleur en présence d'une différence de température ou le frottement dans le compresseur – réduit le rendement global et le COP.

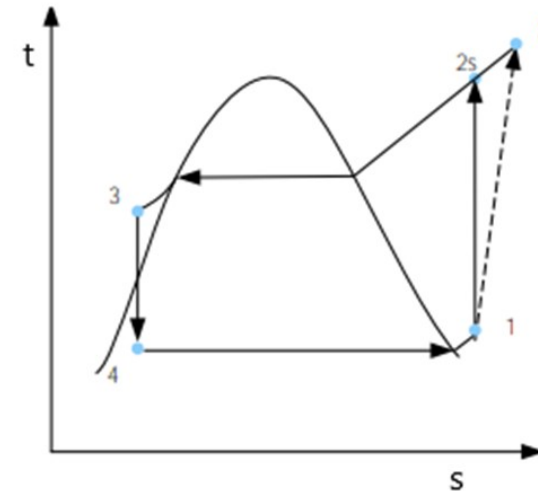


Figure 2.3. Diagramme T-s du cycle de compression de vapeur réel par rapport au cycle idéal

Implications de la conception thermodynamique sur le rendement des pompes à chaleur

Les principes thermodynamiques du cycle de compression de vapeur ont une influence directe sur la conception du système et ses performances opérationnelles.

Le coefficient de performance (COP) augmente lorsque :

- La différence de température entre la source de chaleur et le dissipateur thermique est réduite (Figure 2.4.)
- L'évaporateur fonctionne à une température plus élevée.
- le condenseur fonctionne à une température plus basse

Les phénomènes irréversibles, tels que la compression non isentropique, les chutes de pression et les transferts de chaleur impliquant de grandes différences de température, réduisent le rendement du système.

Concrètement, cela signifie que :

- Des températures de départ du système de chauffage plus basses améliorent les performances.
- Des températures de source plus élevées (par exemple, le sol par rapport à l'air froid) augmentent le rendement.
- Un dimensionnement adéquat de l'échangeur de chaleur réduit l'écart de température et améliore le COP.

L'optimisation thermodynamique est donc directement liée aux choix de conception du système et à la sélection des composants.

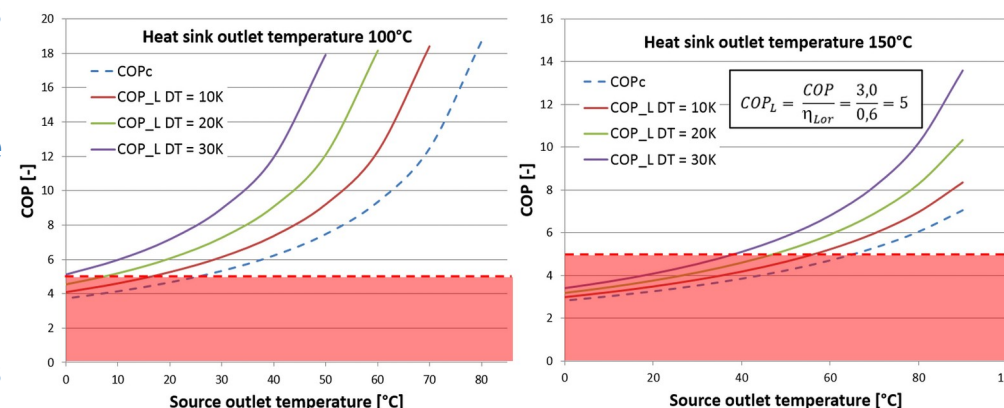


Figure 2.4. COP en fonction de la variation de température à la fois à la source et au puits



Co-funded by
the European Union



LEÇON 3

Les réfrigérants en tant que fluides de travail

Leçon 3 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Décrire les critères thermodynamiques, de sécurité et environnementaux utilisés dans le choix des fluides frigorigènes.
2. Interpréter les systèmes de classification des fluides frigorigènes (ASHRAE/ISO), y compris les catégories de toxicité et d'inflammabilité.
3. Analyser les tendances actuelles en faveur des fluides frigorigènes à faible PRG (potentiel de réchauffement global) et leurs implications pour la conception et la sécurité des pompes à chaleur.

Rôle et critères des réfrigérants

- Les réfrigérants sont les fluides de travail qui transportent la chaleur dans le cycle de compression-vaporisation. Leurs propriétés thermodynamiques (point d'ébullition, chaleur latente, densité, chaleur spécifique) ont une incidence directe sur la conception et le rendement du système.
- Les bons réfrigérants présentent une chaleur latente élevée, une capacité volumétrique élevée (permettant ainsi de concevoir des équipements compacts) et un comportement stable et prévisible. Le choix dépend également de facteurs non thermodynamiques : sécurité (faible toxicité, inflammabilité acceptable), stabilité chimique, compatibilité des matériaux et impact environnemental (potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (**ODP**) nul et faible potentiel de réchauffement global (**GWP**)).
- Tous ces critères doivent être équilibrés : l'amélioration d'une propriété nécessite souvent de faire des compromis sur une autre. Dans les systèmes modernes, **un ODP nul** est la norme, et les réfrigérants sont choisis pour minimiser le GWP tout en répondant aux exigences de performance et de sécurité.

Dénomination des fluides frigorigènes et classification de sécurité

- Les fluides frigorigènes sont identifiés par des numéros R ASHRAE/ISO (par exemple R-410A, R-134a, R-290). Le système de numérotation de l'ASHRAE correspond à la composition chimique : par exemple, le R-134a est du tétrafluoroéthène, le R-290 est du propane.
- La sécurité est classée à l'aide d'une lettre (toxicité) et d'un chiffre (inflammabilité) conformément à la norme ASHRAE 34 (ISO 817). Les réfrigérants de classe A sont peu toxiques, ceux de classe B le sont davantage ; « 1 » = ininflammable, « 2L » = faible inflammabilité, « 3 » = haute inflammabilité.
- Par exemple, le propane (R-290) est de classe A3 (faible toxicité, haute inflammabilité), le R-134a est de classe A1 (ininflammable) et l'ammoniac (R-717) est de classe B2L (toxique, légèrement inflammable). La figure 3.1 illustre la convention de numérotation de l'ASHRAE et donne des exemples de numéros R.

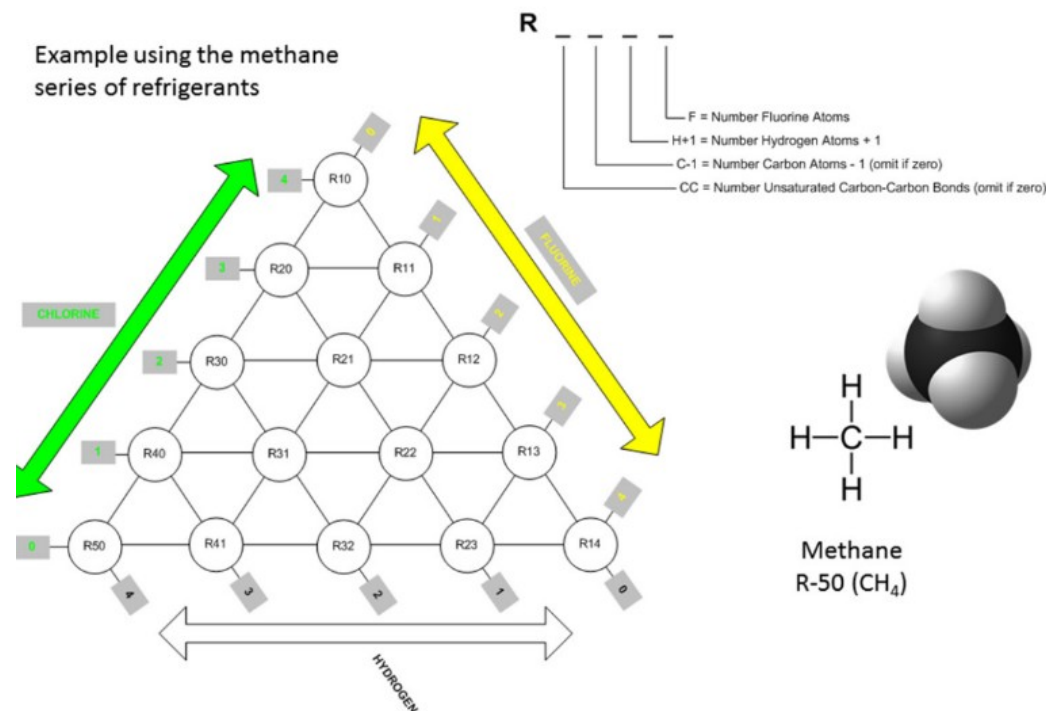


Figure 3.1. Exemple de système de dénomination des réfrigérants

Principales propriétés thermodynamiques et environnementales

- Les propriétés critiques des fluides comprennent le point d'ébullition, la pression et la température critiques, ainsi que la chaleur latente ; celles-ci déterminent les pressions de fonctionnement et le dimensionnement des équipements. Par exemple, une température critique plus élevée permet d'atteindre des pressions de condensation plus élevées.
- Les indicateurs environnementaux sont tout aussi importants : les fluides modernes ont tous un ODP = 0, mais leur GWP varie considérablement. Le CO₂ (R-744) a un GWP d'environ 1, tandis que les HFC traditionnels ont des GWP de plusieurs milliers. De nouveaux réfrigérants à faible GWP (par exemple les HFO, les réfrigérants naturels) sont adoptés pour se conformer à la réglementation.
- Les propriétés de sécurité (inflammabilité, toxicité) limitent également les choix. Le tableau 3.1 du module met en

Réfrigérant	Type	PRG	ODP	Sécurité	Application typique	Principaux avantages	Principales limites
R-410A	Mélange de HFC	2088	0	A1	Pompes à chaleur air/eau	Ininflammable, fiable	PRG élevé
R-32	HFC	675	0	A2L	Pompes à chaleur air/eau	Haute efficacité, faible PRG	Légèrement inflammable
R-454B	Mélange HFC/HFO	466	0	A2L	Nouveaux systèmes	Faible PRG, rendement	Légèrement inflammable
R-290	HC	3	0	A3	Usage domestique / commercial	Très faible PRG, efficace	Très inflammable
R-744	CO2	1	0	A1	Industriel, commercial	Ininflammable, PRG nul	Haute pression, baisse de rendement à haute température
R-134a	HFC	1430	0	A1	Chauffe-eau, sèche-linge	Ininflammable, fiable	PRG élevé

Tableau 3.1. Propriétés thermophysiques des fluides frigorigènes à faible PRG

Tendances vers les réfrigérants à faible PRG

- Les réglementations internationales (Protocole de Montréal/Amendement de Kigali, règlement européen sur les gaz fluorés) entraînent un abandon rapide des HFC à fort PRG. L'industrie se tourne vers des alternatives à très faible PRG : les hydrofluoro-oléfines (HFO) telles que le R-1234yf (PRG ~4), et les fluides naturels (CO₂, ammoniac, hydrocarbures). Des mélanges hybrides (HFC/HFO) sont également utilisés comme solutions de transition. Ces nouveaux fluides sont généralement plus inflammables (A2L ou A3) mais présentent un ODP/GWP négligeable.
- En conséquence, les pompes à chaleur modernes intègrent des mesures de sécurité renforcées : détection des fuites améliorée, ventilation et limites de charge, ainsi que la conformité aux nouvelles normes de sécurité (par exemple, la norme CEI 60335-2-40 pour les fluides frigorigènes A2L).
- La recherche vise à égaler les performances des réfrigérants traditionnels ; par exemple, des composants de cycle avancés (éjecteurs, compression en parallèle, sous-refroidissement dédié) peuvent aider les systèmes au CO₂ à atteindre des rendements comparables à ceux des anciens systèmes au HFC.

LEÇON 4

Compresseurs



Co-funded by
the European Union



Leçon 4 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Expliquer le rôle du compresseur dans le cycle de compression de vapeur et son influence sur les performances du système.
2. Comparer les compresseurs à pistons, rotatifs, à spirale et à vis en termes de principes de fonctionnement et d'applications.
3. Évaluer l'impact de l'irréversibilité de la compression et du rendement isentropique sur le COP d'une pompe à chaleur.

Rôle du compresseur dans les pompes à chaleur

Le compresseur est le **cœur** d'une pompe à chaleur à compression de vapeur. Il augmente la pression et la température du fluide frigorigène (de la pression de l'évaporateur à celle du condenseur) en effectuant un travail. Cela établit la différence de pression qui entraîne l'ensemble du cycle. À l'entrée du compresseur, le fluide frigorigène est un gaz à basse pression ; après compression, il en ressort sous forme de gaz à haute pression et à haute température, prêt à être condensé.

Le choix du type de compresseur dépend du débit et du rapport de pression requis. Par exemple, un compresseur rotatif convient à un débit élevé et un rapport faible, tandis qu'un compresseur à piston alternatif gère un débit plus faible et un rapport élevé. La figure 4.1. montre un cylindre de compresseur à piston alternatif de base.

Compresseurs à pistons (Figure 4.1.)

Un compresseur à piston utilise un piston coulissant dans un cylindre pour comprimer le réfrigérant. Lors de la course d'admission, le piston se déplace vers l'extérieur, aspirant le réfrigérant par l'orifice d'aspiration. Lors de la course de compression, le piston se déplace vers l'intérieur, comprimant le gaz et le forçant à sortir par l'orifice de refoulement.

Ce mouvement pulsatoire se répète en continu. Les compresseurs à pistons sont courants dans les applications de moyenne à haute puissance, où ils fournissent des surpressions élevées. Ils sont relativement simples et bien connus, mais comportent généralement davantage de pièces mobiles et nécessitent une lubrification.

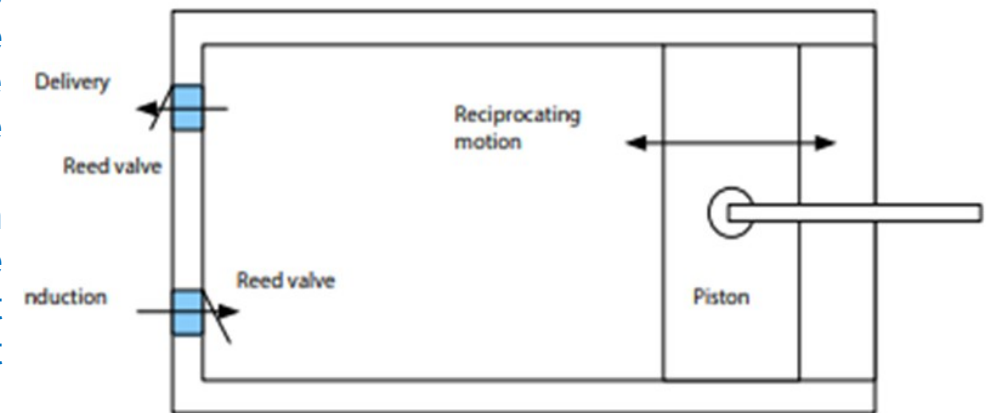


Fig. 4.1. Cylindre d'un compresseur à piston.

Compresseurs rotatifs et à spirales

- Les compresseurs rotatifs (figure 4.2) utilisent un rotor en rotation muni d'ailettes ou de vis. Dans un compresseur rotatif à ailettes, un rotor excentré muni d'ailettes coulissantes emprisonne et comprime le fluide frigorigène dans des chambres dont le volume diminue continuellement au fur et à mesure de sa rotation.
- Parmi les autres types de compresseurs rotatifs, on trouve les compresseurs à vis (vis engrenées) et les compresseurs à spirale (deux spirales entrelacées). Ces conceptions offrent un débit régulier (en particulier à basse vitesse), un fonctionnement silencieux et une grande fiabilité. Dans les pompes à chaleur résidentielles modernes, les compresseurs à double rotor (rotatifs jumelés) sont courants : deux rotors sur un seul arbre permettent un rendement élevé à basse vitesse, réduisant ainsi les pertes de cycle et le bruit.
- La figure 4.2 illustre un compresseur rotatif à palettes simple.

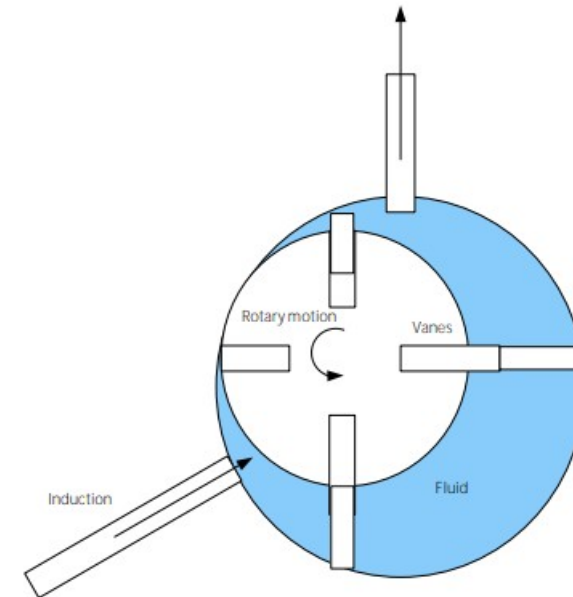


Figure 4.2. Un compresseur rotatif à palettes

Irréversibilité de la compression (figure 4.3)

- Les processus réels de compression ne sont pas idéaux. Les frottements, les transferts de chaleur et les pertes mécaniques rendent la compression irréversible. Sur un diagramme $T-s$ (figure 4.3), la trajectoire de compression réelle (en pointillés) s'écarte de la trajectoire isentropique idéale (en gras). L'entropie à la fin de la compression est plus élevée dans la réalité, ce qui signifie qu'un travail plus important a été nécessaire que dans le cas idéal.
- Le rapport entre le travail idéal et le travail réel correspond au rendement isentropique du compresseur.
- Un rendement plus faible signifie une puissance d'entrée plus importante pour une même élévation de pression, ce qui réduit le COP global. La figure 4.3 du module illustre ces pertes pour un cycle de réfrigération type.

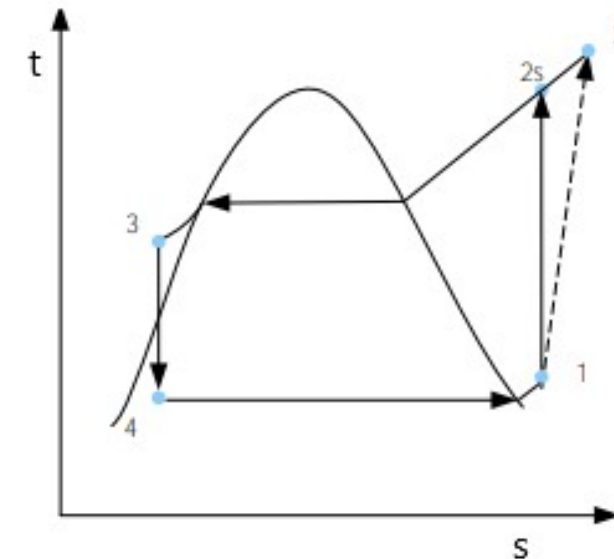


Figure 4.3. Diagramme $T-s$ du cycle de réfrigération par compression de vapeur, incluant le rendement isentropique du compresseur

Types courants de compresseurs (Figure 4.4)

La figure 4.4 résume les principaux types de compresseurs utilisés dans les pompes à chaleur : **rotatifs** (courants dans les petits systèmes), **à spirale** (largement utilisés dans les pompes à chaleur de petite et moyenne taille pour un fonctionnement silencieux et efficace), **à pistons** (pour les installations de moyenne à grande taille) et **à vis** pour les systèmes à haute capacité. Chacun présente des avantages : les compresseurs à spirale sont compacts et sans huile, les compresseurs à piston supportent des pressions élevées, tandis que les compresseurs à vis sont utilisés dans les très grands refroidisseurs. Le choix dépend de la taille, de la puissance requise et du coût. Les compresseurs modernes sont souvent hermétiques ou semi-hermétiques (boîtiers scellés) pour plus de compacité, bien que cela rende le remplacement du moteur plus difficile.

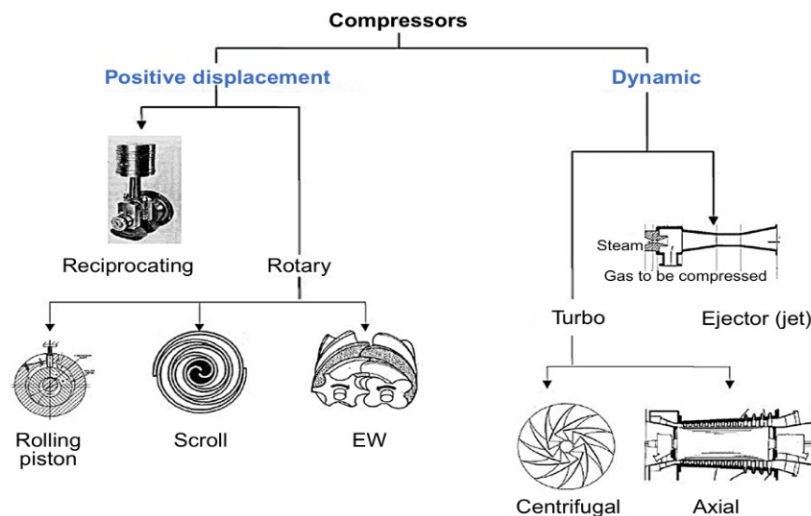


Figure 4.4. Types de compresseurs pour pompes à chaleur

LEÇON 5

Échangeurs de chaleur externes

Leçon 5 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Décrire le rôle thermodynamique des évaporateurs et des condenseurs dans l'absorption et le rejet de chaleur.
2. Comparer les configurations des échangeurs de chaleur refroidis par air et par eau, ainsi que leurs applications.
3. Expliquer les mécanismes de formation de givre sur les évaporateurs à air et les principes du dégivrage.

Fonctionnement de l'évaporateur

- Le rôle de l'évaporateur est **d'absorber la chaleur** de l'environnement extérieur pour la transférer au fluide frigorigène. Le fluide frigorigène liquide à basse pression pénètre dans l'évaporateur, où il entre en ébullition (s'évapore) en absorbant la chaleur de l'air ambiant, du sol ou de l'eau.
- Ce changement de phase nécessite une grande quantité d'énergie (chaleur latente), de sorte que le serpentin de l'évaporateur devient très froid, absorbant la chaleur de son environnement.
- Le fluide frigorigène s'évapore à une température de saturation constante, sortant sous forme de vapeur froide. En mode chauffage, l'évaporateur est généralement situé à l'extérieur (source de chaleur de l'air ou du sol) ; en mode refroidissement, il peut être à l'intérieur (absorbant la chaleur de la pièce). Dans tous les cas, l'évaporateur permet l'absorption de chaleur en abaissant la pression et la température du fluide frigorigène.

Fonctionnement du condenseur

- Le rôle du condenseur est de **rejeter la chaleur** du fluide frigorigène vers le dissipateur. En mode chauffage, il transfère la chaleur vers l'air intérieur ou l'eau ; en mode refroidissement, il rejette la chaleur à l'extérieur. La vapeur à haute pression provenant du compresseur pénètre dans le condenseur.
- Comme il est maintenu à haute pression (et à haute température), le fluide frigorigène est plus chaud que le dissipateur. En circulant à travers les serpentins ou les plaques du condenseur, il dégage de la chaleur et se condense en liquide. Cette chaleur libérée réchauffe l'eau ou l'air de chauffage du bâtiment.
- Le fluide frigorigène liquéfié retourne ensuite vers le détendeur. En mode inverse (refroidissement), le serpentin intérieur fait office d'évaporateur et le serpentin extérieur de condenseur. Le condenseur fonctionne toujours à haute pression, ce qui permet une évacuation efficace de la chaleur.

Types de condenseurs : à refroidissement par air

La conception du condenseur dépend de l'application. **Les condenseurs refroidis par air** (Figure 5.1.) utilisent l'air ambiant pour absorber la chaleur. Ils se composent de tubes à ailettes et de ventilateurs qui soufflent de l'air sur le serpentin. Les unités refroidies par air sont courantes dans les petits systèmes commerciaux et résidentiels car elles sont simples et peu coûteuses.

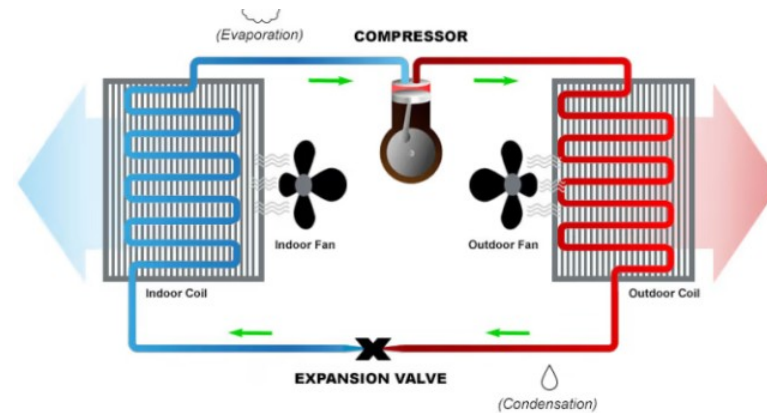


Figure 5.1. Condenseur de pompe à chaleur air-air

Types de condenseurs : refroidis à l'eau

Les condenseurs refroidis à l'eau ou à la saumure (figure 5.2) transfèrent la chaleur à un liquide (eau ou glycol). On peut utiliser des échangeurs de chaleur à plaques ou à calandre et tubes, avec des pompes de circulation pour faire circuler le liquide. Les condenseurs refroidis à l'eau offrent des coefficients de transfert thermique plus élevés et sont utilisés là où l'eau est disponible (par exemple, boucles souterraines ou tours de refroidissement). La figure 5.2 montre un condenseur à plaques air-eau typique. Le choix dépend de la complexité de l'installation et des besoins en matière d'efficacité.

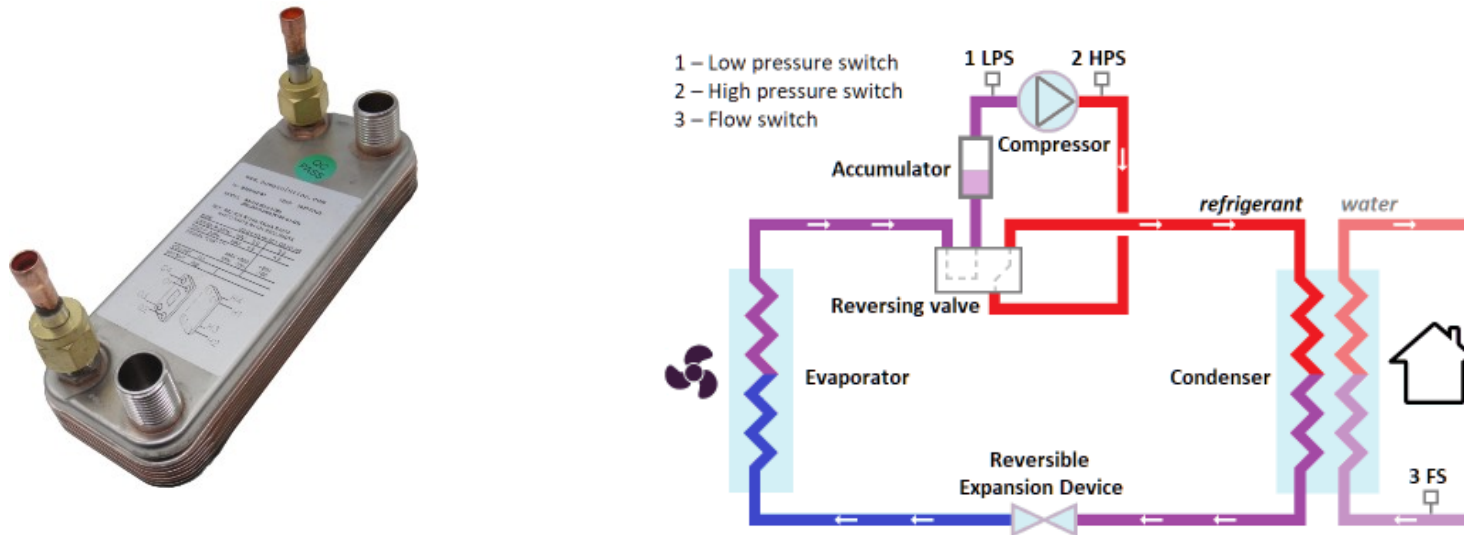


Figure 5.2. Condenseur à plaques pour pompe à chaleur air-eau et sol-eau

Conception des serpentins d'évaporateur/condenseur

La conception des serpentins d'échangeurs de chaleur varie en fonction de leur fonction. La plupart des serpentins utilisent **des tubes en cuivre avec des ailettes en aluminium** : le cuivre pour la conductivité thermique, l'aluminium pour la légèreté et le coût. **Les nouveaux serpentins en aluminium à microcanaux** sont utilisés dans les unités compactes pour un transfert de chaleur élevé dans un espace réduit.

Les serpentins d'évaporateur extérieurs sont souvent dotés de revêtements hydrophiles ou antigel afin de favoriser l'évacuation de l'humidité et de retarder la formation de givre. Les serpentins de condenseur intérieurs (eau-air) peuvent bénéficier de traitements antitartre dans les applications où l'eau est dure. La forme et la taille diffèrent également : les évaporateurs extérieurs sont généralement plus grands (pour compenser la faible densité thermique extérieure), tandis que les condenseurs sont plus compacts. La figure 5.4 présente des exemples typiques de plaques de pompes à chaleur air-eau et sol-eau. Une conception adéquate des serpentins (géométrie, matériau) est essentielle pour un transfert de chaleur efficace et la performance du système.



Figure 5.3. Exemples d'évaporateurs de pompes à chaleur à air



Figure 5.4. Configuration des serpentins d'évaporateur et de condenseur

Formation de givre et dégivrage sur les évaporateurs des pompes à chaleur aérothermiques

Dans les climats froids, l'humidité présente dans l'air extérieur peut se transformer en givre sur le serpentin de l'évaporateur. L'accumulation de givre isole le serpentin, réduisant ainsi l'absorption de chaleur et le débit d'air. Les pompes à chaleur à air doivent donc **être dégivrées** périodiquement pour maintenir leurs performances.

Une stratégie courante est **le dégivrage par gaz chaud** : le compresseur continue de fonctionner, mais le fluide frigorigène est dérivé de sorte que le gaz chaud de refoulement circule à contre-courant dans le serpentin extérieur (givré), faisant fondre la glace.

Des résistances électriques (moins courantes) peuvent également être utilisées. Le contrôle du dégivrage est généralement déclenché par une minuterie ou par la détection de la température du serpentin. La figure 5.5 illustre le flux de chaleur dans l'évaporateur ; pendant le dégivrage, ce processus est inversé. Des stratégies de dégivrage efficaces sont essentielles pour un fonctionnement fiable par temps froid.

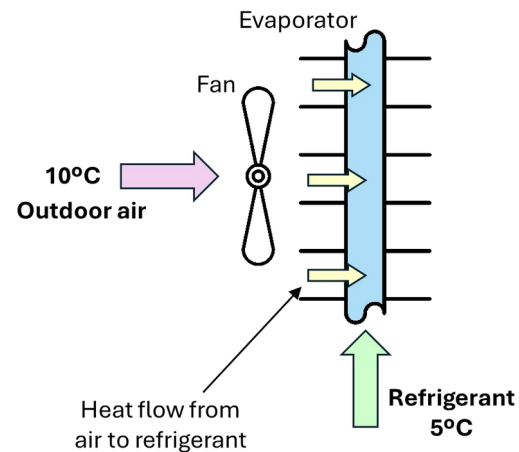


Figure 5.5. Sens du flux thermique dans l'évaporateur

LEÇON 6

Dispositifs d'expansion



Co-funded by
the European Union



Leçon 6 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Expliquer le rôle des dispositifs de détente dans la réduction de la pression et le contrôle du débit de réfrigérant.
2. Comparer les tubes capillaires, les détendeurs thermostatiques (TXV), les détendeurs électroniques (EEV) et les détendeurs automatiques (AEV).
3. Analyser l'importance du contrôle de la surchauffe pour la protection du compresseur et l'efficacité du système.

Fonctionnement et présentation du détendeur

Le dispositif de détente relie les côtés haute pression et basse pression du système. Son rôle principal est de réduire la pression (et donc la température) du fluide frigorigène avant l'évaporateur et de doser le débit. Cela crée la différence de pression nécessaire.

Les dispositifs de détente simples (tels que les tubes capillaires) ont un orifice de taille fixe, **tandis que les détendeurs thermostatiques (TXV)** et **les détendeurs électroniques (EEV)** régulent activement le débit en fonction de la surchauffe. En contrôlant le débit de réfrigérant entrant dans l'évaporateur, ces dispositifs maintiennent l'évaporateur à la surchauffe souhaitée, protégeant ainsi le compresseur contre les coups de bélier et optimisant le rendement.

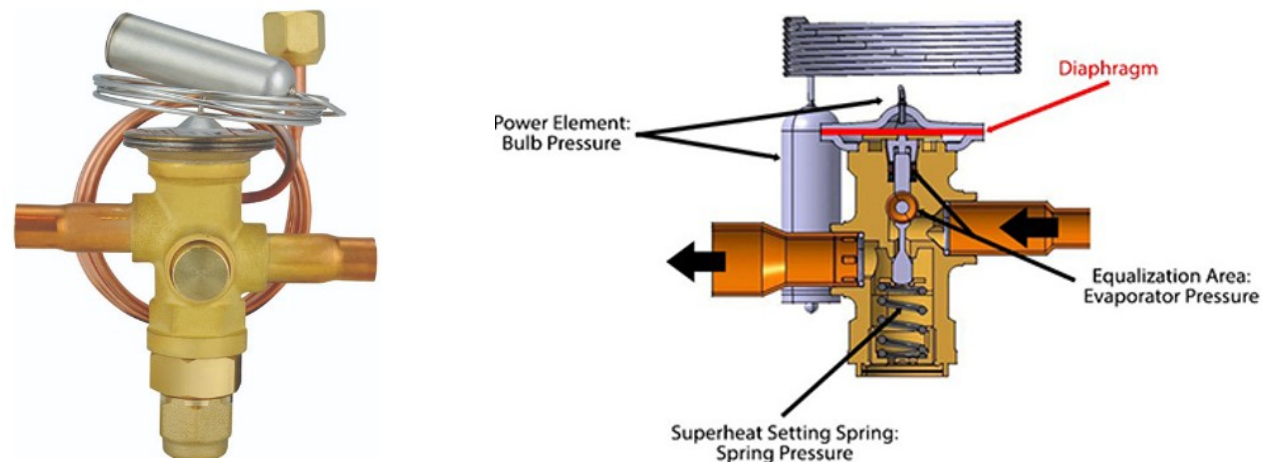


Figure 6. 1. Ensemble typique de détendeur thermostatique

Détente par tube capillaire

Un tube capillaire est le dispositif de détente le plus simple. Il s'agit simplement d'un long tube de cuivre étroit (Figure 6.2.) dans lequel circule le fluide frigorigène liquide. Son diamètre minuscule crée une chute de pression fixe. Les tubes capillaires sont très peu coûteux, durables et ne comportent aucune pièce mobile. Cependant, comme la section de passage est fixe, il n'y a pas de régulation par réaction : ils ne peuvent pas adapter le débit aux variations de charge.

La longueur et le diamètre intérieur du tube sont choisis en fonction d'une charge de réfrigérant et de conditions de fonctionnement spécifiques ; une modification des conditions de fonctionnement (par exemple, la température ambiante) peut entraîner des performances sous-optimales. Les tubes capillaires sont couramment utilisés dans les petits systèmes simples (tels que les réfrigérateurs domestiques ou les petits climatiseurs) où la charge est relativement constante.



Figure 6. 2. Dispositif de détente à tube capillaire

Vanne d'expansion thermostatique (TXV)

La TXV est une vanne active à réglage automatique. Elle détecte la température à la sortie de l'évaporateur (via un bulbe à distance) et module le débit afin de maintenir une **surchauffe** quasi constante. À l'intérieur de la TXV (Figure 6.1), un diaphragme est soumis à trois pressions : la pression du bulbe (proportionnelle à la température de sortie), la pression du ressort (préréglée) et la pression d'aspiration de l'évaporateur.

Si la sortie du fluide frigorigène est trop froide (surchauffe faible), la pression du bulbe augmente et ferme la vanne ; si la sortie se réchauffe (surchauffe élevée), la pression du bulbe diminue et la vanne s'ouvre davantage. Cette rétroaction maintient l'évaporateur à une surchauffe optimale malgré les variations de charge.

Les TXV sont largement utilisées dans les applications de réfrigération et de pompes à chaleur. La figure 6.3 illustre les forces agissant sur une membrane de TXV. En maintenant une surchauffe adéquate, les TXV protègent le compresseur et améliorent la stabilité du système.

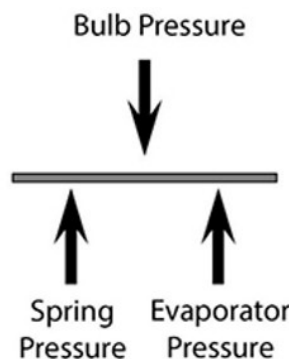


Figure 6.3. Forces agissant sur la membrane d'une TXV

Détendeur électronique (EEV)

Les EEV sont des vannes motorisées commandées par un régulateur électronique. Elles permettent un réglage rapide et précis du débit de réfrigérant. Comparées aux TXV, les EEV offrent une réponse rapide et une large plage de fonctionnement. Elles sont particulièrement avantageuses dans les pompes à chaleur modernes à **variateur** : le régulateur peut adapter activement le débit à la vitesse variable du compresseur.

L'ensemble EEV comprend un moteur pas à pas ou un servomoteur, un contrôleur et parfois des capteurs (Figure 6.4.). En fonctionnement, la carte de commande ajuste l'ouverture de la vanne en fonction de la surchauffe ou d'autres données du système. Il en résulte un contrôle plus précis de la surchauffe et un meilleur rendement en charge partielle. Essentiellement, une EEV remplit la même fonction qu'une TXV, mais avec une commande électronique programmable.



Figure 6.4. Détendeurs électroniques pour pompes à chaleur domestiques

Détendeur automatique (AEV)

L'AEV est une vanne mécanique plus simple qui régule le débit en utilisant uniquement la pression. Elle ne comporte pas de bulbe de détection externe. À la place, elle ajuste son ouverture en fonction de la pression de l'évaporateur : lorsque la pression de l'évaporateur augmente, la vanne se ferme légèrement pour maintenir la pression (et donc la surchauffe) stable.

Les AEV maintiennent automatiquement une pression (et une surchauffe) relativement constantes au niveau de l'évaporateur. Elles fonctionnent mieux dans les systèmes à charge quasi constante, tels que les applications de réfrigération fixe ou de refroidisseurs industriels.

Les AEV sont moins adaptées aux fortes variations de charge (par exemple, les systèmes CVC classiques), mais on les trouve encore dans certains réfrigérateurs et congélateurs commerciaux. La figure 6.5. montre un exemple représentatif de détendeur automatique.



Figure 6.5. Détendeur automatique

LEÇON 7

Autres composants du circuit frigorifique



Co-funded by
the European Union



Leçon 7 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Expliquer le fonctionnement des composants auxiliaires de la réfrigération, tels que les détendeurs, les électrovannes, les clapets anti-retour et les filtres déshydrateurs.
2. Décrire le rôle des séparateurs d'huile et des réservoirs de liquide dans le maintien de la fiabilité et des performances du système.
3. Interpréter l'importance opérationnelle des voyants et des indicateurs d'humidité dans le diagnostic et la maintenance.

Vanne d'inversion à quatre voies (chauffage $\Leftrightarrow$ refroidissement)

Une vanne d'inversion à quatre voies est le composant clé qui permet à une pompe à chaleur de basculer entre les modes chauffage et refroidissement. Elle dirige le flux de réfrigérant de manière à ce que les serpentins intérieur et extérieur échangent leurs rôles.

Sur le plan structurel, elle comporte quatre orifices (vers le compresseur, le serpentin intérieur, le serpentin extérieur et l'aspiration) et un élément coulissant interne (voir figure 7.1.). Lorsque la bobine du solénoïde est alimentée (ou déconnectée), le tiroir se déplace, inversant ainsi le cycle. En **mode chauffage**, le serpentin extérieur devient l'évaporateur (absorbant la chaleur extérieure) et le serpentin intérieur le condenseur. En **mode refroidissement**, c'est l'inverse.

Bien qu'indispensable, la vanne d'inversion entraîne une certaine perte de charge et peut présenter des fuites internes. Les nouvelles conceptions de vannes visent à minimiser ces pertes (ce qui pourrait améliorer le COP jusqu'à 60 % rien qu'en termes de perte de charge).

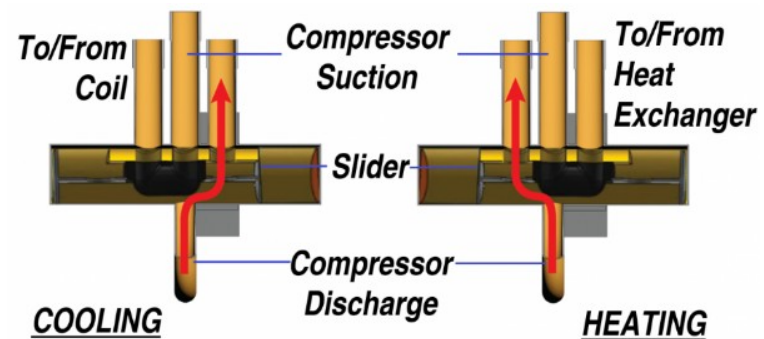


Figure 7. 1. Détendeur automatique

Électrovannes

Les électrovannes utilisent un actionnement électromagnétique pour ouvrir ou fermer les circuits de réfrigérant. Une électrovanne à action directe contient un plongeur actionné par une bobine (Figure 7.2.), tandis qu'une électrovanne pilotée utilise un petit débit pilote pour commander une vanne plus grande (permettant ainsi de contrôler des débits à haute pression).

Ces vannes ont de multiples fonctions : elles peuvent isoler le fluide frigorigène (pour la vidange ou l'entretien), contrôler le dégivrage en dirigeant le gaz chaud, ou arrêter le débit de fluide frigorigène en cas de défaillance. Par exemple, lors d'un cycle de dégivrage, le régulateur peut alimenter une électrovanne pour envoyer le gaz chaud de refoulement du compresseur à travers le serpentin extérieur.

Les électrovannes sont essentielles pour la régulation automatisée et la sécurité. La figure 7.2. montre la structure interne d'une électrovanne de réfrigération type. Les pompes à chaleur modernes intègrent souvent plusieurs électrovannes pour ces fonctions.

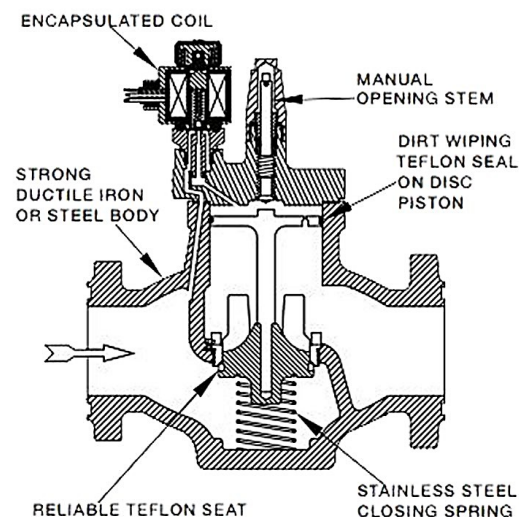


Figure 7.2. Coupe transversale d'une électrovanne

Clapets anti-retour

Les clapets anti-retour permettent un écoulement dans un seul sens, empêchant ainsi le reflux. Ils sont placés dans le circuit frigorifique (ou les conduites d'huile) afin de maintenir un écoulement unidirectionnel.

Les types courants comprennent les clapets anti-retour à bille (une bille sur un ressort qui assure l'étanchéité sous contre-pression), les clapets anti-retour à battant (un disque articulé) et les clapets anti-retour à piston (un piston guidé qui assure l'étanchéité). La figure 7.3 illustre les composants internes typiques d'un clapet anti-retour.

Les clapets anti-retour sont utilisés, par exemple, pour garantir le retour de l'huile vers le carter du compresseur et pour empêcher le reflux du fluide frigorigène lors de l'arrêt. Pour fonctionner correctement, leur installation nécessite une orientation correcte et des tronçons de tuyauterie suffisamment droits en amont et en aval. Les systèmes à haute pression (tels que les unités transcritiques au CO₂) utilisent des clapets anti-retour spécialement conçus pour résister à des pressions extrêmes.

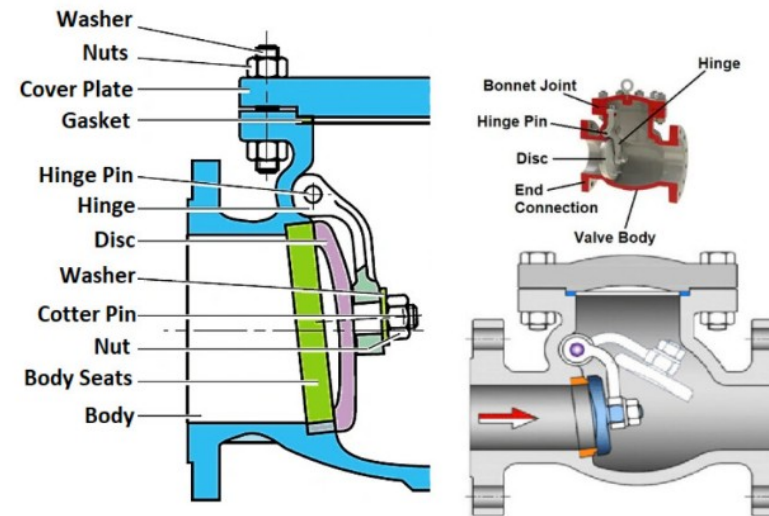


Figure 7.3. Composants internes d'un clapet anti-retour

Filtres déshydrateurs

Les filtres déshydrateurs éliminent l'humidité, les acides et les particules du fluide frigorigère. Ils se composent d'une enveloppe en acier remplie de dessiccant (généralement un tamis moléculaire et de l'alumine activée) et de tamis métalliques. Lorsque le fluide frigorigère les traverse, la vapeur d'eau et les acides sont adsorbés chimiquement, tandis que les particules solides sont piégées. L'élimination des contaminants est cruciale : l'humidité peut geler ou provoquer de la corrosion, et les débris peuvent obstruer les détendeurs.

Les filtres déshydrateurs standard sont installés sur la conduite de liquide entre le condenseur et le détendeur. Dans les pompes à chaleur (circuit réversible), on utilise **des filtres déshydrateurs à double flux** (Figure 7.4.) ; ceux-ci sont équipés de lits de dessiccant aux deux extrémités afin que le fluide frigorigère puisse circuler dans les deux sens. La Figure 7.4. montre une vue en coupe d'un déshydrateur à double flux.

Le dimensionnement correct est essentiel : un sécheur sous-dimensionné entraîne une forte chute de pression et une baisse des performances.



Figure 7.4. Coupe transversale d'un filtre déshydrateur à double flux

Hublots

Les voyants permettent de vérifier visuellement l'état du fluide frigorigène dans la conduite de liquide. Ils permettent aux techniciens de s'assurer que la charge de fluide frigorigène est correcte et que le système est sec. La présence de bulles indique la présence de vapeur (sous-charge ou évaporation) ; un liquide limpide indique que la charge est complète.

De nombreux voyants sont équipés d'un indicateur d'humidité (un disque de couleur) qui change de couleur (par exemple, du vert au jaune) en présence d'eau. La figure 7.5 montre un voyant type avec indicateur.

Les voyants sont particulièrement utiles lors de la charge ou de l'entretien : la présence de bulles signale une sous-charge, tandis qu'un indicateur d'humidité signale la saturation du déshydrateur ou des fuites. Dans les circuits de pompes à chaleur, les voyants sont placés après le filtre déshydrateur et avant le dispositif de détente (liquide sous-refroidi). Les modèles modernes intègrent également des indicateurs de débit avec des capteurs pour une surveillance intelligente.

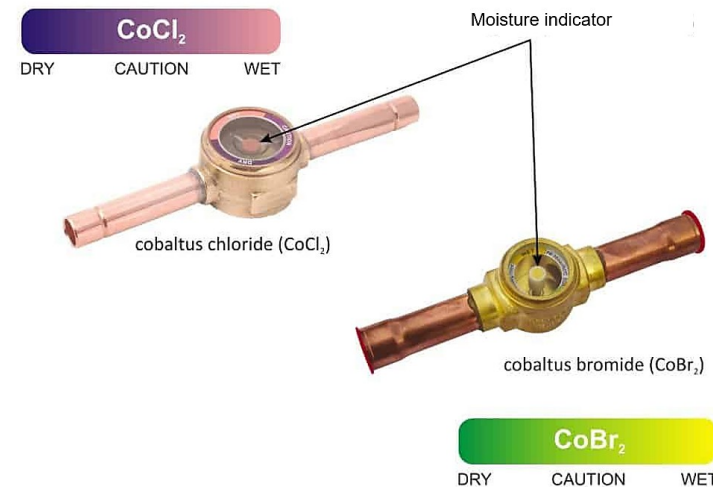


Figure 7.5. Coupe transversale d'un filtre déshydrateur à double flux

Séparateurs d'huile

Les séparateurs d'huile sont installés à la sortie du compresseur afin de séparer l'huile entraînée de la vapeur de réfrigérant. Ils utilisent des mécanismes centrifuges ou hélicoïdaux : un flux de gaz à grande vitesse tourne à l'intérieur de la cuve (Figure 7.6.), forçant les gouttelettes d'huile à se déplacer vers l'extérieur pour se déposer sur les parois. L'huile séparée s'accumule au fond, où un flotteur ou un clapet anti-retour la renvoie vers le carter du compresseur. Cela garantit une circulation adéquate de l'huile et empêche celle-ci de s'accumuler dans l'évaporateur (ce qui réduirait le transfert de chaleur).

Les séparateurs d'huile sont particulièrement importants dans les systèmes à compresseurs multiples ; ils peuvent être associés à des réservoirs d'huile et à des régulateurs pour équilibrer la quantité d'huile entre les compresseurs. Les séparateurs modernes sont conçus pour les hautes pressions (R410A, R744) et intègrent souvent des capteurs de surveillance du niveau d'huile.

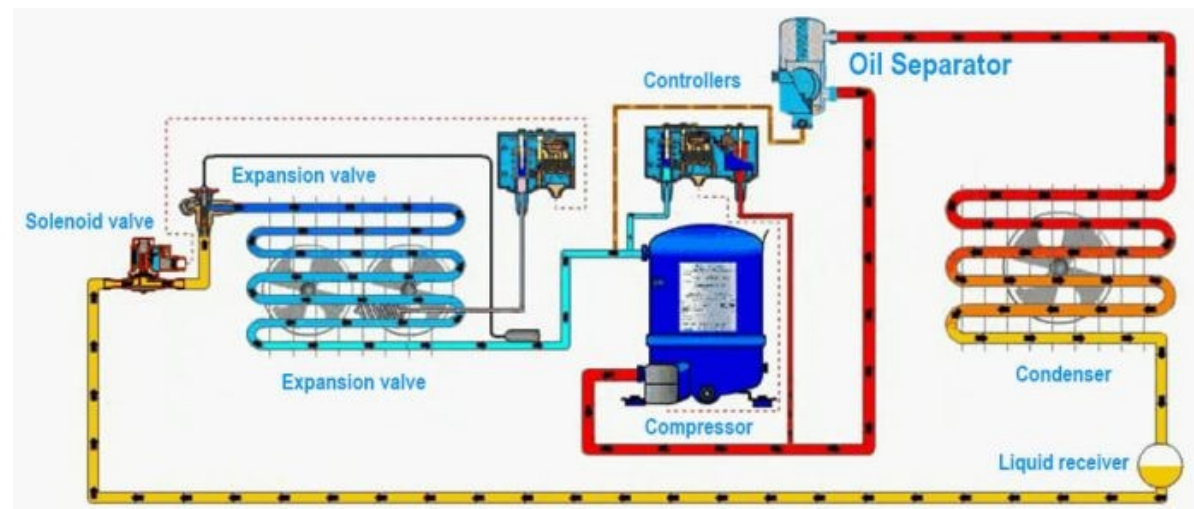


Figure 7. 6. Schéma d'un séparateur d'huile

Réservoirs de liquide

Les récepteurs de liquide sont des réservoirs situés sur la conduite de liquide haute pression (en aval du condenseur). Leur rôle est d'assurer un apport régulier et sans bulles de réfrigérant liquide vers le détendeur.

En cas de faible charge, l'excès de liquide peut s'accumuler dans le récepteur ; en cas de forte demande, celui-ci libère le liquide stocké pour maintenir un débit adéquat. Cela évite le manque de liquide dans l'évaporateur et les à-coups du compresseur. Les récepteurs sont disponibles en version verticale ou horizontale (Figure 7.7.) et leur dimensionnement dépend des fluctuations prévues du volume de réfrigérant.

De nombreux récepteurs sont équipés d'un voyant et de vannes de service pour faciliter la charge. Le dimensionnement correct du récepteur est essentiel : s'il est trop petit, il peut fonctionner à sec ; s'il est trop grand, il ajoute des coûts et de l'espace sans apporter d'avantage.



Figure 7.7. Différents types de récepteurs de liquide

LEÇON 8

Composants auxiliaires et intégration hydronique

Leçon 8 – Objectifs pédagogiques

À la fin de cette leçon, les participants seront capables de :

1. Expliquer le rôle des ventilateurs et des pompes de circulation dans le transfert de chaleur et le rendement du système.
2. Décrire la fonction des commutateurs de débit, des vases d'expansion et des réservoirs tampons pour garantir un fonctionnement sûr et stable.
3. Analyser l'importance de l'intégration hydraulique et des stratégies de contrôle intelligentes dans les systèmes modernes de pompes à chaleur.

Ventilateurs dans les pompes à chaleur aérothermiques

- Les ventilateurs servent à faire circuler l'air à travers les serpentins extérieurs et intérieurs des pompes à chaleur aérothermiques. Les systèmes modernes ont de plus en plus recours à **des ventilateurs à vitesse variable à commutation électronique (EC)**. En ajustant la vitesse du ventilateur, le système peut s'adapter efficacement aux variations de charge.
- La figure 8.1 compare le COP saisonnier (SCOP) d'une pompe à chaleur aérothermique à vitesse fixe et d'une pompe à chaleur à vitesse variable, montrant une efficacité jusqu'à 10 % supérieure avec la commande par onduleur (en particulier dans les configurations à eau glycolée variable).
- Deux types principaux de ventilateurs sont utilisés : **les ventilateurs axiaux**, qui déplacent de grands volumes d'air à basse pression (courants dans les unités extérieures), et **les ventilateurs centrifuges**, qui génèrent des pressions plus élevées (utilisés lorsque des conduits ou une pression statique élevée sont nécessaires). Une commande adéquate du ventilateur (par exemple, une accélération ou une décélération progressive) contribue également à minimiser le givrage de l'évaporateur en évitant des températures inutilement basses sur le serpentin.

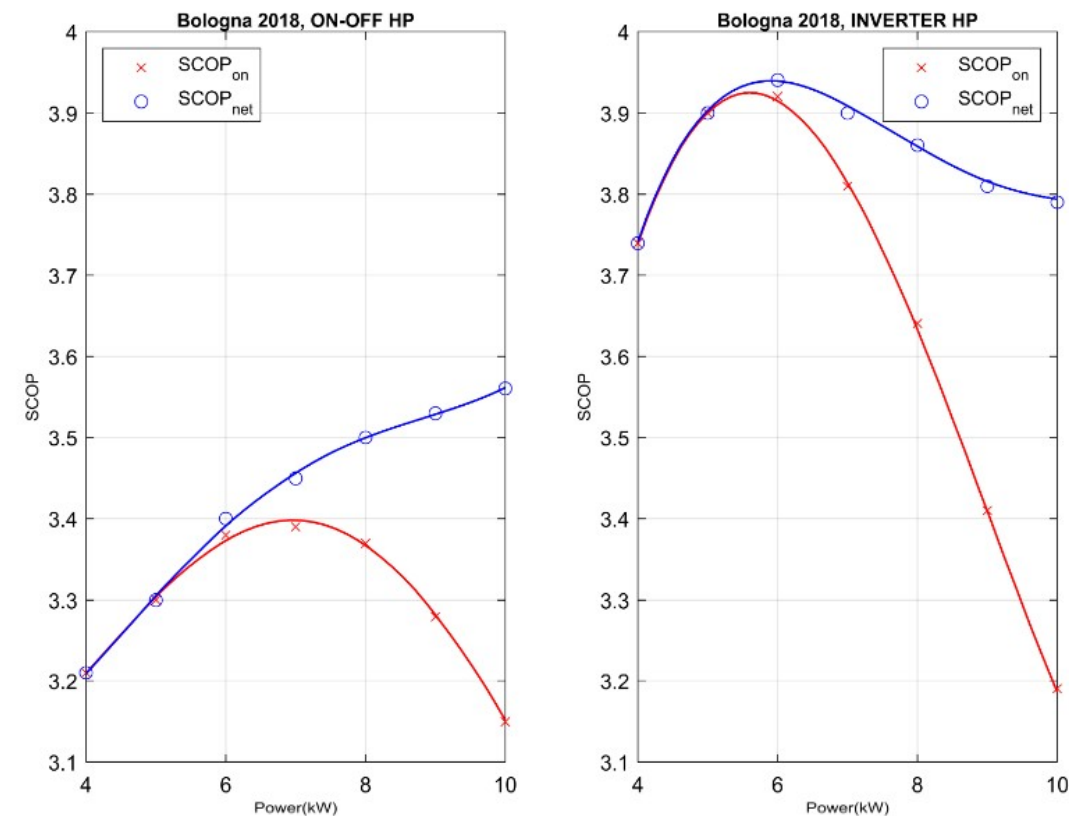


Figure 8.1. Comparaison du SCOP entre une pompe à chaleur à marche/arrêt et une pompe à chaleur à onduleur



Co-funded by
the European Union



Pompes de circulation et intégration hydraulique

Les pompes de circulation acheminent le fluide caloporteur (eau ou glycol) entre la pompe à chaleur et le système de distribution du bâtiment (radiateurs, serpentins de plancher, etc.). Les pompes ECM à vitesse variable sont la norme ; elles ajustent le débit en fonction de la demande (différence de pression ou de température). Ces pompes améliorent l'efficacité énergétique en ralentissant lorsque la charge est faible.

La figure 8.2. montre un circuit hydraulique type pour une pompe à chaleur air/eau : il comprend la pompe principale, des découpleurs hydrauliques et des dispositifs de sécurité (commutateur de débit, clapet anti-retour). Le placement correct des pompes est essentiel : par exemple, les pompes doivent être positionnées de manière à éviter les courts-circuits hydrauliques (par exemple, en pompant à travers un réservoir tampon plutôt que directement à travers les serpentins).

Dans les systèmes plus grands ou à circuits multiples, des schémas de pompage primaire/secondaire ou plusieurs petites pompes garantissent un débit stable et empêchent qu'une boucle ne prive une autre de débit.

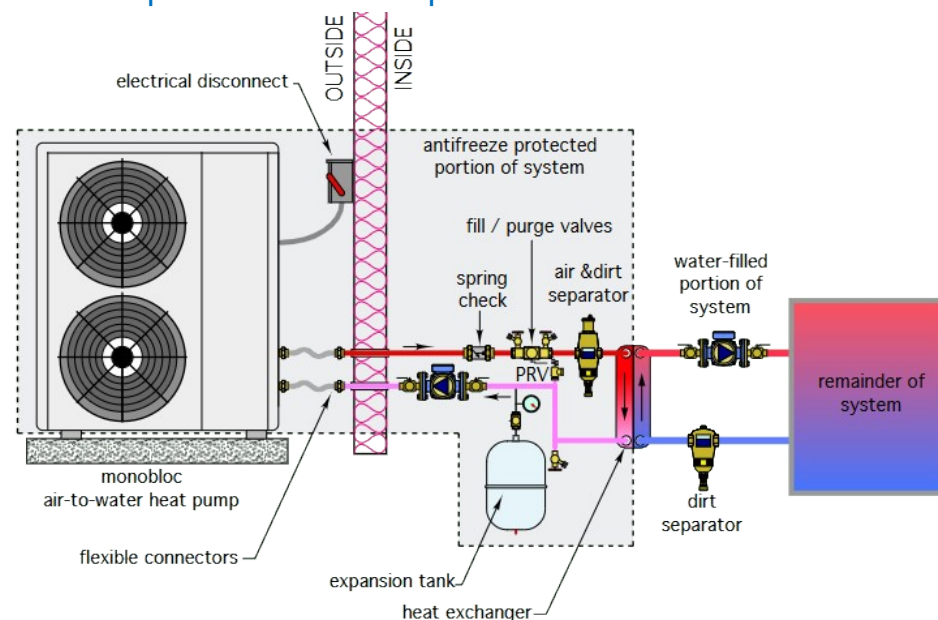


Figure 8. 2. Schéma du circuit hydronique avec pompe et composants de sécurité

Détecteurs de débit et dispositifs de sécurité

Les commutateurs de débit garantissent qu'un débit de fluide suffisant est présent avant que le compresseur ou le ventilateur ne se mette en marche. Un modèle courant est le commutateur à palette (Figure 8.3.), qui se déclenche en présence d'un débit d'eau. Si le débit tombe en dessous d'un seuil (par exemple, en cas d'arrêt de la pompe ou d'obstruction), le commutateur signale au contrôleur d'arrêter l'unité, protégeant ainsi les échangeurs de chaleur contre le gel et les compresseurs contre le fonctionnement à sec.

Parmi les autres dispositifs de sécurité connexes, on trouve les soupapes de décharge, les coupe-circuits haute/basse pression et les capteurs de gel. Les systèmes modernes peuvent utiliser **des capteurs de débit électroniques** pour une surveillance plus précise. Tous ces dispositifs peuvent être intégrés au système de commande pour la détection des défauts. Par exemple, un capteur de débit électronique peut détecter de légères baisses de débit et permettre une maintenance proactive. Les normes (par exemple EN 378) exigent de tels contrôles de sécurité. Une intégration adéquate des commutateurs de débit et de pression dans la logique de commande est cruciale pour un fonctionnement fiable et sûr.

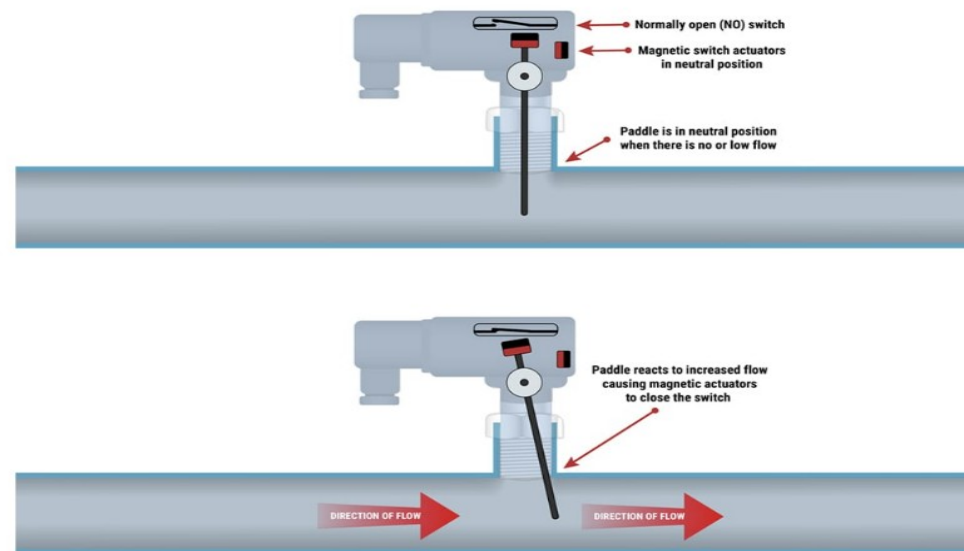


Figure 8. 3. Fonctionnement d'un commutateur de débit à palette

Réservoirs d'expansion et tampons

Les vases d'expansion (réservoirs sous pression équipés d'une vessie d'air) compensent la dilatation thermique de l'eau dans les circuits fermés. Lorsque l'eau est chauffée, elle se dilate ; sans vase d'expansion, la pression augmenterait dangereusement. Le coussin d'air du vase absorbe ce changement de volume, maintenant ainsi la pression du système stable.

Les réservoirs tampons (à inertie) servent à découpler la pompe à chaleur du système de distribution. En augmentant le volume total d'eau, ils atténuent les variations de température et empêchent les cycles courts. Par exemple, une petite pompe à chaleur soumise à une charge intermittente pourrait effectuer des cycles courts sans réservoir tampon. Le réservoir fournit une réserve d'eau chauffée, maintenant le débit lorsque la demande diminue. Un dimensionnement correct est essentiel : un réservoir trop petit n'a aucun effet ; un réservoir trop grand augmente les coûts et ralentit la réponse. La figure 8.4. montre un exemple de circuit avec un réservoir tampon et une chaudière d'appoint.

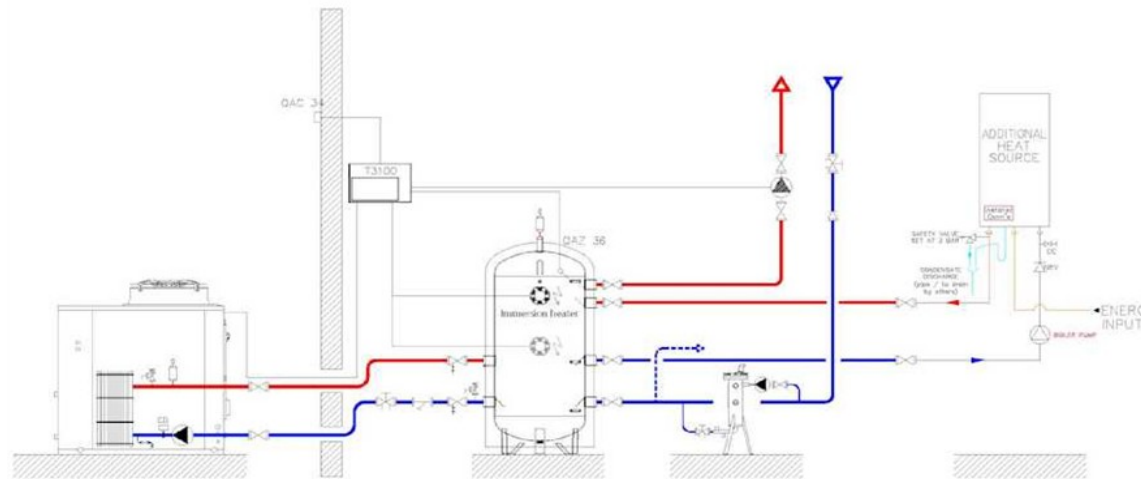


Figure 8.4. Schéma du système avec réservoir tampon et chaudière

Intégration moderne et tendances

Dans les installations modernes, bon nombre de ces composants hydrauliques sont livrés préassemblés sous forme de modules compacts (combinant des fonctions d'expansion et de tamponnage, des vannes pré-raccordées, etc.) pour une installation rapide.

La commande numérique s'étend également aux pompes et aux vannes : par exemple, les variateurs de vitesse des pompes et les commutateurs de débit peuvent communiquer via les systèmes de gestion technique des bâtiments.

La tendance générale va vers des commandes plus intelligentes (optimisation des débits, réponse à la demande, maintenance prédictive) et une intégration plus étroite des dispositifs de sécurité pour un SCOP et une fiabilité accrus.

À mesure que les systèmes de pompes à chaleur évoluent, les ventilateurs, les pompes, les capteurs et les réservoirs sont considérés comme des éléments à part entière d'un système CVC intelligent plutôt que comme de simples composants passifs.

Références

- **Comité européen de normalisation.** (2017). *EN 12831-1 : Performance énergétique des bâtiments – Méthode de calcul de la charge thermique de conception*. Bruxelles.
- **Organisation internationale de normalisation.** (2017). *ISO 52016-1 : Performance énergétique des bâtiments – Besoins énergétiques pour le chauffage et le refroidissement*. Genève.
- **Commission européenne.** (2018). *Directive (UE) 2018/844 modifiant la directive EPBD*. Bruxelles.
- **Commission européenne.** (2020). *Stratégie « Vague de rénovation » pour l'Europe*. COM(2020) 662 final.
- **AIE.** (2022). *Pompes à chaleur – Suivi des progrès en matière d'énergie propre*. Paris.
- **AIE.** (2023). *L'avenir des pompes à chaleur*. Paris.
- **EHPA.** (2022). *Les pompes à chaleur dans les bâtiments – Applications, efficacité et intégration des systèmes*. Bruxelles.
- **EHPA.** (2023). *Guide des meilleures pratiques : Rénovation des pompes à chaleur dans les bâtiments résidentiels*. Bruxelles.
- **REHVA.** (2012). *Guide n° 7 – Chauffage à basse température et refroidissement à haute température*. Bruxelles.
- **REHVA.** (2018). *Guide n° 23 – Rénovation des bâtiments équipés de systèmes CVC*. Bruxelles.
- **Fraunhofer ISE.** (2020). *Systèmes de pompes à chaleur dans les bâtiments existants – Performances et stratégies de conception*. Fribourg.
- **Fraunhofer ISE.** (2022). *Résultats de suivi des rénovations avec pompes à chaleur en Europe*. Fribourg.
- **ASHRAE.** (2020). *Manuel ASHRAE – Systèmes et équipements CVC*. Atlanta.
- **ASHRAE.** (2021). *Manuel ASHRAE – Principes fondamentaux*. Atlanta.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). *Chauffage urbain de 4e génération*. **Energy**, 68, 1–11.
- Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). *Systèmes de chauffage et de refroidissement urbains de 5e génération*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 104, 504–522.
- Brandl, D., Mach, T., Karmann, C., & Struck, C. (2016). *Évaluation du confort thermique et de la performance énergétique des systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement*. **Energy and Buildings**, 109, 351–363.
- Union européenne. (2019). *Lignes directrices de l'UE pour les bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (nZEB)*. Office des publications de l'Union européenne.
- **IDAIE.** (2023). *Guide technique sur les pompes à chaleur dans la rénovation des bâtiments*. Madrid.
- Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). *Une revue des systèmes de chauffage de l'eau par pompe à chaleur*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13(6–7), 1211–1229.



Co-funded by
the European Union



