



Module 2

Évolution du marché des pompes à chaleur

Élaboré par le LEI (Institut lituanien de l'énergie)



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 2



Ce module passe en revue les évolutions actuelles du marché dans le domaine de la technologie des pompes à chaleur, en expliquant comment les changements en matière de fluides frigorigènes, la conception des cycles thermodynamiques et l'innovation au niveau des composants façonnent les systèmes commerciaux et domestiques d'aujourd'hui. Il décrit comment les fabricants intègrent des systèmes de compression avancés, des fluides frigorigènes naturels et des échangeurs de chaleur à haut rendement pour répondre à des exigences environnementales et de performance de plus en plus strictes.



Co-funded by
the European Union



Contenu du module 2

Leçon 9	Cycle de compression standard
Leçon 10	Cycle à injection de vapeur
Leçon 11	Systèmes de pompes à chaleur en cascade
Leçon 12	Systèmes transcritiques au CO ₂
Leçon 13	Réfrigérants naturels dans les systèmes domestiques

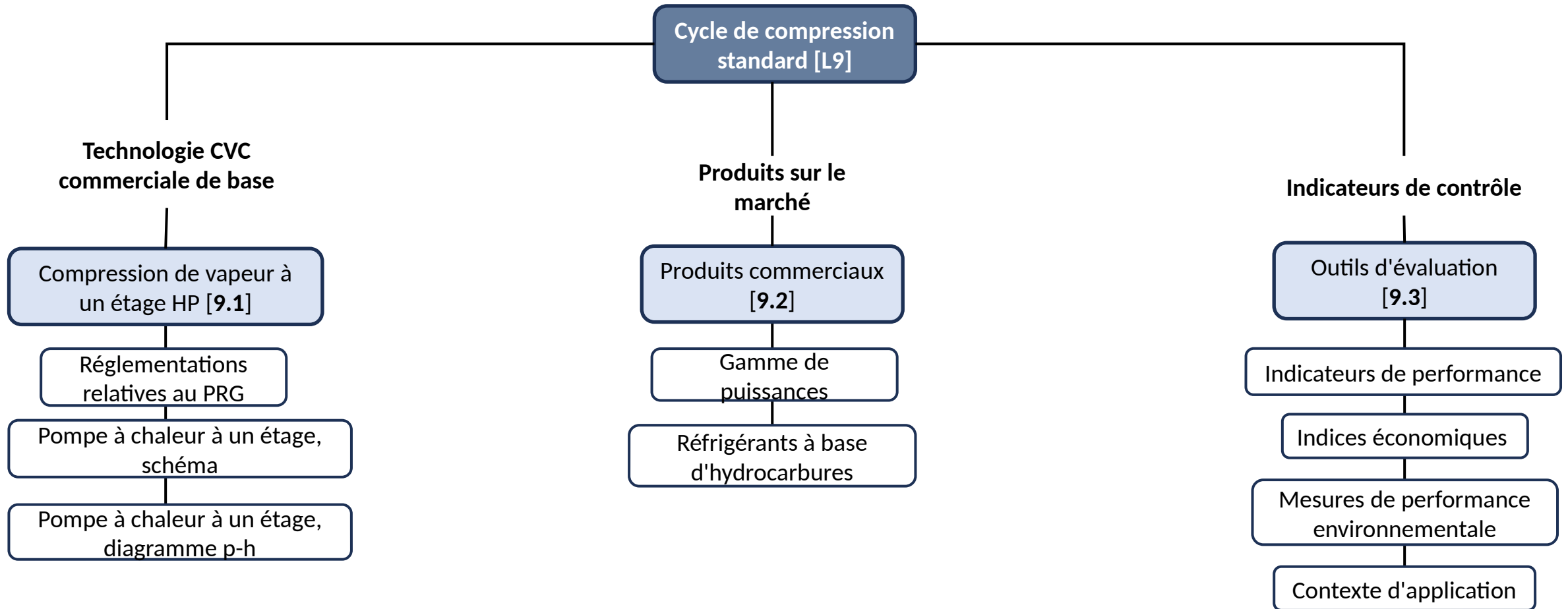
LEÇON 9

Cycle de compression standard

Objectifs de la leçon 9

1. Présenter le cycle de compression de vapeur à un seul étage
2. Aperçu des unités de pompes à chaleur commerciales typiques utilisant ce cycle
3. Principaux indicateurs caractérisant le fonctionnement d'une pompe à chaleur et ses conséquences sur l'environnement humain

Contenu de la leçon 9



9.1 Introduction

- Technologie CVC commerciale fondamentale : pompe à chaleur à compression de vapeur à un étage – base active depuis plusieurs décennies
- Priorité à la réduction du PRG et à l'amélioration du rendement des pompes à chaleur / adoption croissante de réfrigérants à faible PRG tels que le R32 et le R454B
- Expansion du marché des pompes à chaleur commerciales modulaires offrant des puissances allant jusqu'à 1 MW et au-delà

Les pompes à chaleur commerciales à un étage fonctionnent selon le cycle de compression de vapeur, qui comprend quatre composants principaux :

- évaporateur,
- compresseur,
- condenseur et
- détendeur.

9.1 Introduction

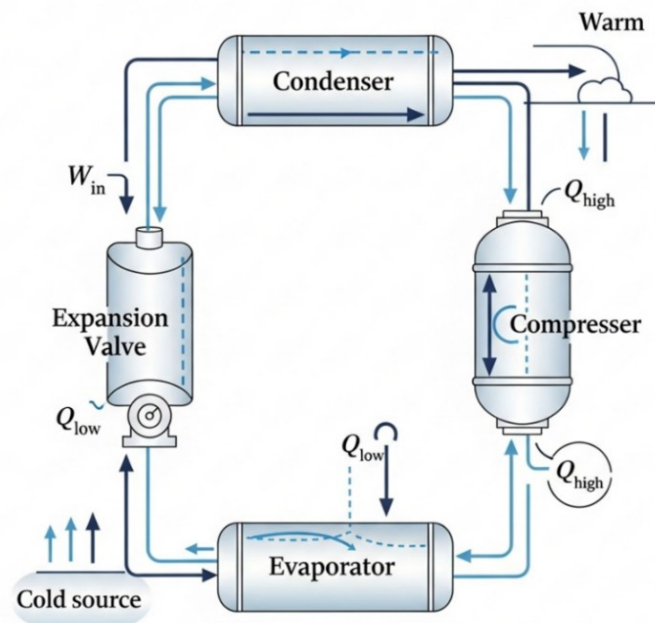


Schéma du processus

- Évaporateur :
Le liquide réfrigérant s'évapore à basse pression (~3–5 bars), absorbant la chaleur provenant de sources telles que l'air ou le sol
- Compresseur :
Le compresseur à spirale comprime la vapeur, augmentant ainsi la pression (jusqu'à 20 bars) et la température
- Condenseur :
La vapeur à haute pression se condense, transférant la chaleur vers le circuit d'eau ou de chauffage à 40–60 °C
- Détendeur :
La pression chute brusquement, le fluide frigorigène se refroidit avant de réintégrer l'évaporateur

9.1 Introduction

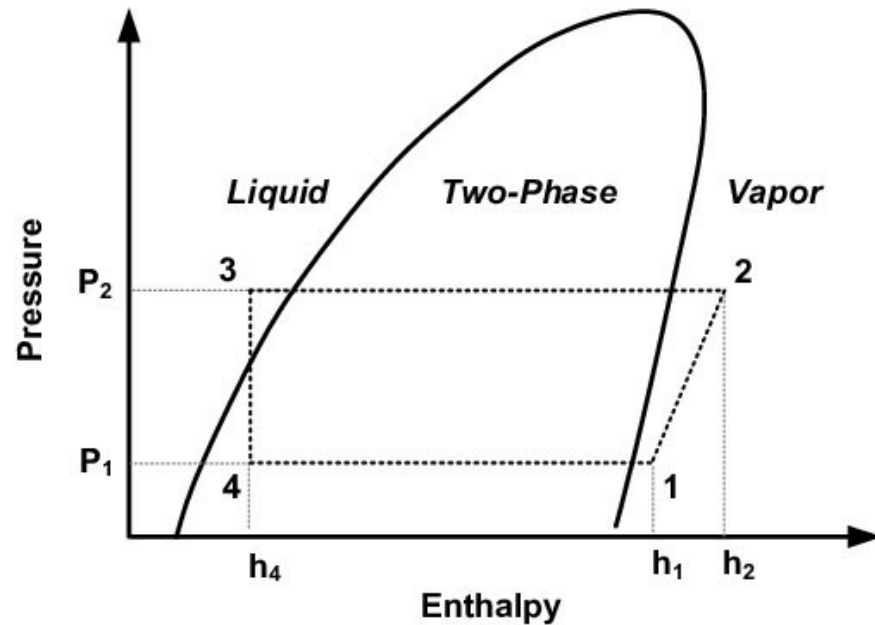


Diagramme P-h

- Compression (1→2) : compression isentropique idéale ; le travail réel dépasse le travail idéal en raison des pertes
- Condensation (2→3) : rejet de chaleur isobare
- Détente (3→4) : étranglement isenthalpique
- Évaporation (4→1) : début de l'absorption de chaleur

9.2 Produits HP destinés au marché professionnel

Marché

- À l'échelle européenne : puissances de 1 à 500 kW par unité
- Les leaders européens Danfoss, Ochsner et Bosch proposent des produits conçus pour les fluides frigorigènes R32 et R454B
- Mitsubishi Electric et Daikin (Japon) mettent l'accent sur des compresseurs à inverseur à vitesse variable de pointe, dotés de **fonctions de maintenance prédictive** et de gestion de l'énergie **basées sur l'IA**, adaptés à la fois aux bâtiments commerciaux et aux applications de chauffage urbain
- LG Electronics (Corée du Sud) intègre le fonctionnement intelligent dans un cycle à un seul étage, en mettant l'accent sur l'adaptabilité aux infrastructures urbaines et aux sources d'énergie renouvelables
- Objectif : utiliser des réfrigérants à faible PRG et maintenir des valeurs de COP élevées

9.2 Produits HP destinés au marché professionnel

Résumé

Fabricant (Région)	Plage de puissance (kW)	Réfrigérant	Température de fonctionnement maximale (°C)	Plage de COP	Innovations notables
Danfoss (Europe)	5 – 240	R32, R454B	90	3,5 – 5,0	Compresseurs à spirale avancés avec injection de vapeur pour climats froids
Ochsner (Europe)	30 – 350	R290, R32	80	4,0 – 5,2	Priorité aux fluides frigorigènes naturels et aux produits modulaires
Bosch Thermotechnik (Europe)	20 – 500	R32	75	3,6 – 4,8	Commandes intégrées et systèmes hybrides
Mitsubishi Electric (Japon)	10 – 300	R32, R410A	75	3,6 – 5,1	Compresseurs à spirale à inverseur hautement efficaces, algorithmes de dégivrage avancés
Daikin (Japon)	20 – 450	R32, R410A	85	3,8 – 5,3	Options multisplit, systèmes de contrôle basés sur l'IA pour une efficacité énergétique
LG Electronics (Corée du Sud)	10 – 300	R32, R410A	75	3,5 – 5,0	Commandes IoT intelligentes avec débit de réfrigérant variable et compatibilité avec les systèmes de chauffage urbain

9.3 Indicateurs de performance (I)

Indicateurs de performance	
<i>Coefficient de performance (COP)</i>	Le COP quantifie le rapport instantané entre la puissance calorifique utile et la puissance électrique absorbée dans des conditions définies. Les systèmes commerciaux européens récents affichent des valeurs de COP comprises entre 3,5 et 5,2 aux points de puissance nominale standard (A7/W35). Des températures ambiantes plus basses réduisent le COP en raison d'un travail accru du compresseur et de taux d'extraction de chaleur plus faibles.
<i>Facteur de performance saisonnier (SPF)</i>	Le SPF fournit une mesure moyenne de l'efficacité sur la saison de chauffage, incluant les effets transitoires tels que le fonctionnement à charge partielle et les cycles de dégivrage. Des études de terrain européennes font état de valeurs de SPF comprises entre 3,2 et 4,8, en fonction du climat et de la conception du système.
<i>Ratio d'efficacité énergétique intégré (IEER)</i>	Pertinent pour les modes à dominante refroidissement, l'IEER pondère l'EER à différents niveaux de charge partielle pour estimer l'efficacité réelle. Les valeurs IEER des unités modernes se situent entre 12 et 18.

9.3 Indicateurs de performance (I)

Indices économiques	
<i>Période de récupération simple (SPP)</i>	Calculée comme le rapport entre le coût d'investissement supplémentaire et les économies annuelles de coûts énergétiques, les pompes à chaleur commerciales en Europe présentent généralement des durées de récupération de 3 à 5 ans lorsqu'elles remplacent des chaudières à combustibles fossiles, ce qui reflète la baisse des coûts d'investissement et la hausse des prix des combustibles.
<i>Coût actualisé de la chaleur (LCOH)</i>	Le LCOH intègre les dépenses d'investissement, les coûts de maintenance, les coûts d'exploitation et les prix de l'énergie sur toute la durée de vie du système, normalisés par rapport à la puissance thermique. Les installations commerciales de l'UE font état d'un LCOH compris entre 0,04 et 0,07 EUR/kWh.

9.3 Indicateurs de performance (I)

Indicateurs de performance environnementale	
<i>Impact total équivalent de réchauffement (TEWI)</i>	Le TEWI regroupe les émissions directes de réfrigérant, les émissions indirectes dues à la consommation d'électricité et les pertes de réfrigérant en fin de vie sur l'ensemble du cycle de vie. Pour une pompe à chaleur type de 200 kW utilisant le réfrigérant R32 et présentant 2 % de fuites, le TEWI est d'environ 0,45 à 0,6 t CO ₂ -eq/kW-an, largement dominé par les émissions indirectes.
<i>Potentiel de réchauffement global (PRG)</i>	Le passage du R410A (GWP 2088) à des réfrigérants à faible GWP tels que le R32 (GWP 675) et le R454B (GWP 466) réduit considérablement les émissions directes, ce qui constitue un facteur important pour la conformité aux réglementations et l'acceptation par le marché.
<i>Ratio d'énergie primaire (PER)</i>	Le PER évalue l'efficacité énergétique par rapport à la consommation d'énergie primaire en tenant compte des pertes du réseau. Avec des facteurs de réseau européens d'environ 2,5, les pompes à chaleur commerciales atteignent des valeurs de PER comprises entre 1,5 et 2,0, ce qui indique des économies d'énergie primaire substantielles.

9.3 Contextes d'application (II)

Indicateurs de performance environnementale																													
Bâtiments de bureaux et commerciaux	Les capacités typiques varient entre 50 et 350 kW, avec des systèmes conçus pour un fonctionnement air-eau, fournissant de la chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. La modularité et la technologie des compresseurs à inverseur permettent de s'adapter à des charges variables et à des extensions progressives.																												
Procédés industriels légers	Les pompes à chaleur sont adaptées au chauffage de processus à basse et moyenne température (jusqu'à 85–95 °C), remplaçant les chaudières à combustibles fossiles et permettant des économies d'énergie pouvant atteindre 50 % à 70 %, avec les réductions d'émissions correspondantes.																												
Réseaux de chauffage urbain	Les pompes à chaleur modulaires à grande échelle d'une puissance supérieure à 500 kW s'intègrent aux réseaux de chauffage urbain, fournissant de la chaleur renouvelable pour la charge de base. Les essais sur le terrain actuellement menés en Europe mettent en avant l'intégration avec la flexibilité du réseau et le stockage saisonnier. <table><tr><th>Application</th><th>Capacity Range (kW)</th><th>COP Range</th><th>SPF Range</th><th>GWP Refrigerant</th><th>Max Temp (°C)</th><th>Typical Payback (years)</th></tr><tr><td>Office Buildings</td><td>50–350</td><td>3.8–4.5</td><td>3.5–4.2</td><td>R32, R454B</td><td>60</td><td>3–5</td></tr><tr><td>Light Industry</td><td>100–500</td><td>3.5–4.8</td><td>3.2–4.5</td><td>R410A, R134a</td><td>85</td><td>4–6</td></tr><tr><td>District Heating</td><td>500–2000</td><td>4.0–5.5</td><td>3.8–5.0</td><td>R717, R290</td><td>90</td><td>5–8</td></tr></table>	Application	Capacity Range (kW)	COP Range	SPF Range	GWP Refrigerant	Max Temp (°C)	Typical Payback (years)	Office Buildings	50–350	3.8–4.5	3.5–4.2	R32, R454B	60	3–5	Light Industry	100–500	3.5–4.8	3.2–4.5	R410A, R134a	85	4–6	District Heating	500–2000	4.0–5.5	3.8–5.0	R717, R290	90	5–8
Application	Capacity Range (kW)	COP Range	SPF Range	GWP Refrigerant	Max Temp (°C)	Typical Payback (years)																							
Office Buildings	50–350	3.8–4.5	3.5–4.2	R32, R454B	60	3–5																							
Light Industry	100–500	3.5–4.8	3.2–4.5	R410A, R134a	85	4–6																							
District Heating	500–2000	4.0–5.5	3.8–5.0	R717, R290	90	5–8																							



Co-funded by
the European Union



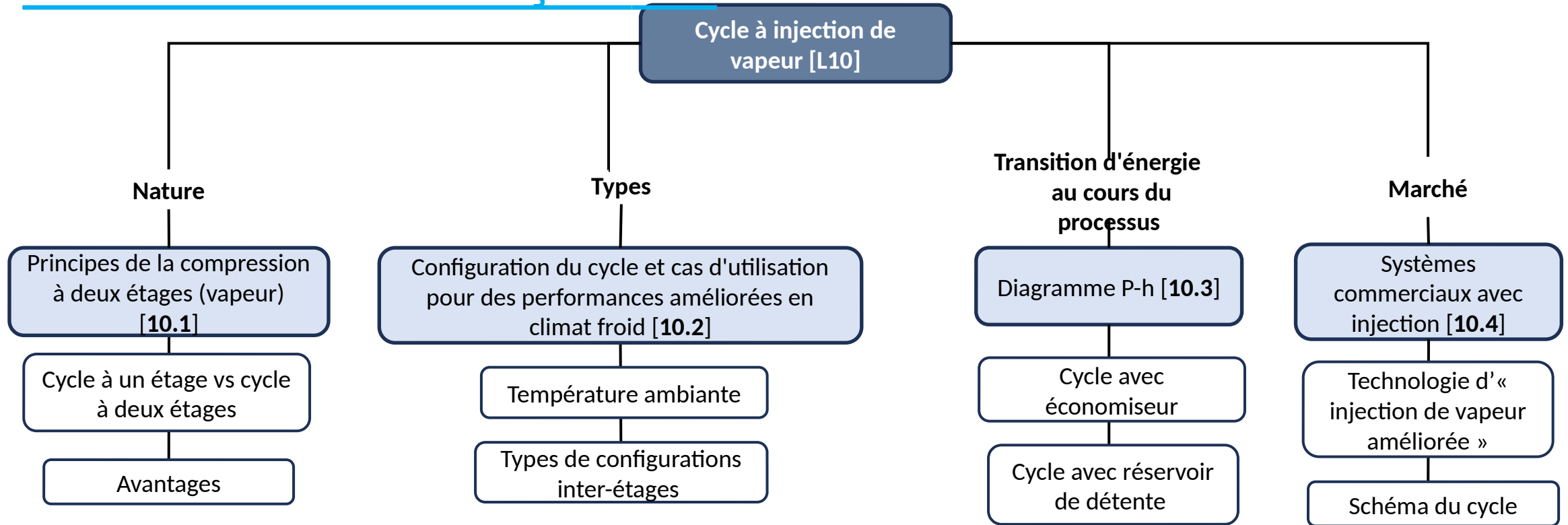
LEÇON 10

Cycle d'injection de vapeur

Objectifs de la leçon 10

1. Présenter la compression en deux étages avec injection de vapeur
2. Présenter différentes configurations d'économiseur et de réservoir de détente, et expliquer leurs effets sur les pressions inter-étages, la température de refoulement et la capacité en climat froid
3. Mise en œuvre possible de différents éléments dans les compresseurs à injection de vapeur améliorés

Contenu de la leçon 10



10.1 Principes de la compression en deux étages avec injection de vapeur

Objectif - aspect économique



Les applications HP nécessitent :

- des températures d'évaporation très basses
- des températures de condensation très élevées

ce qui entraîne →

- des rapports de pression du compresseur élevés par rapport aux cycles HP à un seul étage
- de faibles coefficients de performance (COP) et... des risques de dommages



Solution - cycle de pompe à chaleur à deux étages :

- température de fonctionnement du compresseur ↓
- degré de sous-refroidissement du cycle frigorifique ↑
- COP du système ↑

10.1 Principes de la compression en deux étages avec injection de vapeur

Contexte → injection de vapeur de réfrigérant à l'emplacement intermédiaire du compresseur

Avantages :

- Amélioration de la capacité dans les climats rigoureux (chauffage à une température ambiante inférieure à 0 °C et refroidissement à une température ambiante supérieure à 35 °C)
- Flexibilité du système grâce au contrôle du débit massique du fluide frigorigène injecté (économies d'énergie)
- La température de refoulement du compresseur d'un cycle à injection de vapeur est inférieure à celle d'un cycle conventionnel à un seul étage

Compression en deux étages (étage basse pression/haute pression) :

- Le rapport de pression géré par chaque compresseur est réduit (le rendement volumétrique est amélioré, les températures de refoulement sont réduites, fonctionnement stable à des hauteurs de refoulement élevées)
- Injection de vapeur entre les étages : de la vapeur surchauffée est injectée à un étage intermédiaire, ce qui permet un débit massique supplémentaire vers l'étage haute pression. Cela permet de récupérer de l'énergie, d'augmenter la densité de la vapeur comprimée et d'améliorer le COP du système.

10.2 Configuration du cycle et cas d'utilisation pour améliorer les performances en climat froid

Technologie de compression de vapeur à deux étages

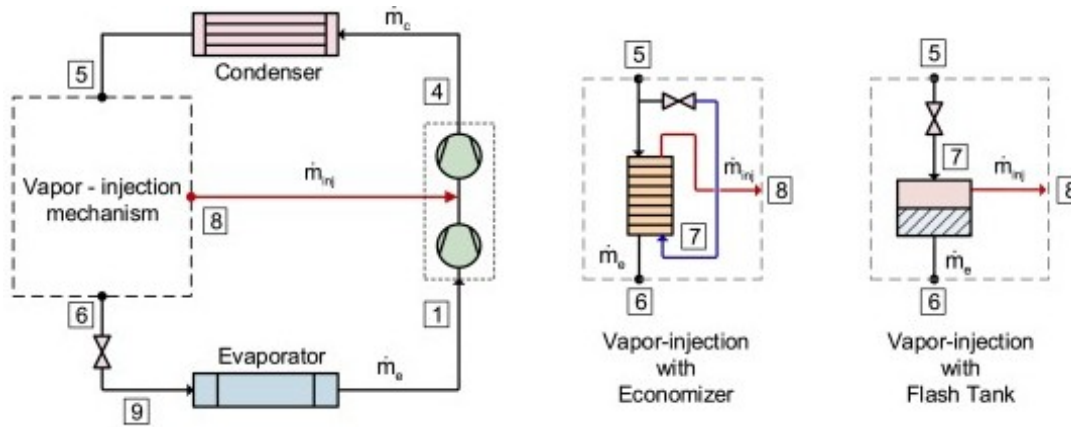


en particulier pour les pompes à chaleur en climat froid. Il existe plusieurs types de configurations inter-étages

Configuration courante → injection de vapeur avec réservoir de détente et injection de vapeur avec économiseur (échangeur de chaleur interne).



10.2 Configuration du cycle et cas d'utilisation pour améliorer les performances en climat froid

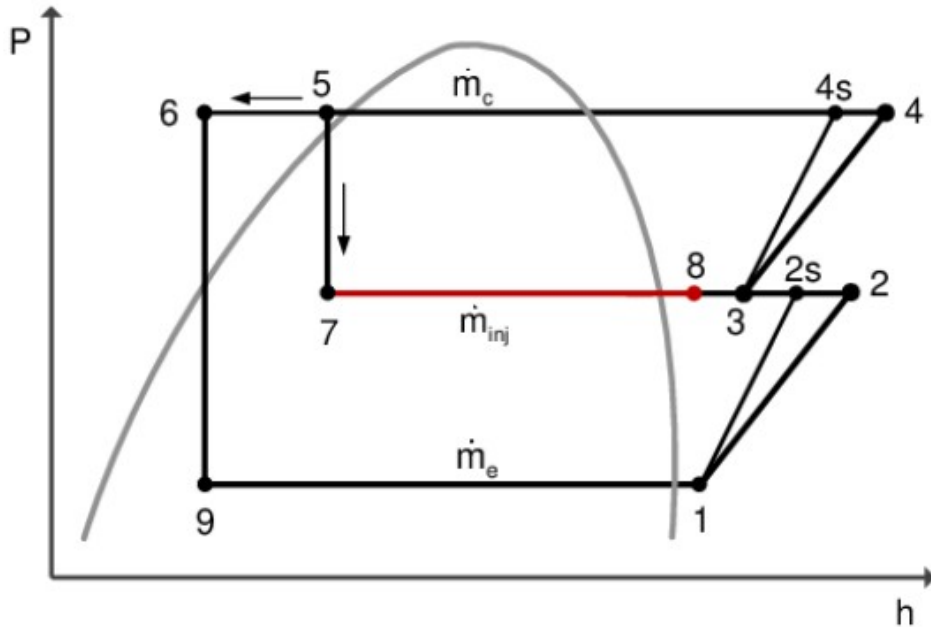


Cycle de compression de vapeur à deux étages avec injection de vapeur

Combinaisons :

- Dans le cycle avec réservoir de détente, le fluide frigorigère est détendu à une pression intermédiaire, puis les phases liquide et vapeur du fluide frigorigère sont séparées dans le réservoir de détente. La vapeur de fluide frigorigère est injectée dans l'étage intermédiaire de compression, tandis que la partie liquide est détendue à la pression d'évaporation.
- Dans le cycle avec économiseur, une partie du fluide frigorigère est extraite vers la sortie du condenseur et détendue à une pression intermédiaire. Cette partie du fluide frigorigère est vaporisée dans l'économiseur par échange thermique avec le reste du fluide frigorigère, puis injectée dans l'étage intermédiaire de compression.
- Dans les deux configurations de cycle, le débit massique d'injection ne peut pas se détendre jusqu'à la pression de l'évaporateur ; par conséquent, le travail de compression de cette partie du réfrigérant est moindre, ce qui se traduit par une amélioration du COP.

10.3 Diagrammes P-h

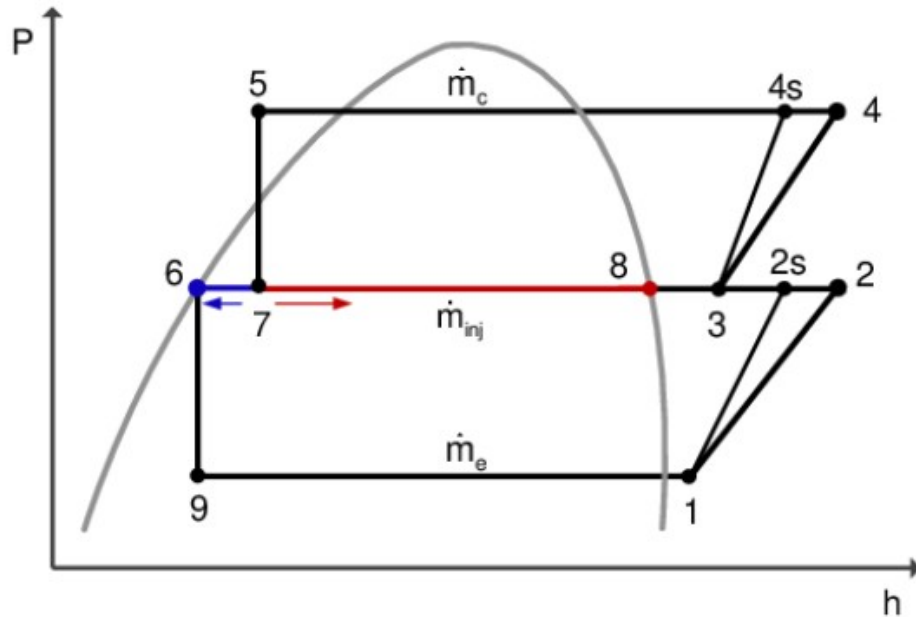


Cycle à injection de vapeur à deux étages avec économiseur

Cycle avec économiseur :

- une partie du fluide frigorigène est extraite (état 5) et détendue à une pression intermédiaire (état 7).
- Cette partie du fluide frigorigène est vaporisée dans l'économiseur (processus 7 – 8) par échange thermique avec le reste du fluide frigorigène,
- puis elle est injectée (état 8) dans l'étage intermédiaire de compression.
- L'état 3 résulte du mélange de la vapeur de réfrigérant (états 8 et 2) avant le compresseur de deuxième étage
- Autres processus :
 - le processus 9 – 1 correspond à l'évaporation et à la surchauffe dans l'évaporateur, 1 – 2 correspond à la première étape de compression (1 – 2s – compression isoentropique), 3 – 4 correspond à la deuxième étape de compression (3 – 4s – compression isoentropique), l'état 3 résulte du mélange de vapeur de réfrigérant (état 8 et état 2) et 4 – 5 correspond aux processus de condensation et de sous-refroidissement dans le condenseur.

10.3 Diagrammes P-h



Cycle à injection de vapeur en deux étapes avec réservoir de détente

! Dans les deux configurations de cycle, le débit massique d'injection ne doit pas s'étendre jusqu'à la pression de l'évaporateur

Cycle avec réservoir de détente :

- Le fluide frigorigène condensé (état 5) est détendu jusqu'à une pression intermédiaire (état 7)
- Les phases liquide (état 6) et vapeur (état 8) du fluide frigorigène sont séparées dans le réservoir de détente
- Le réfrigérant sous forme de vapeur est injecté dans l'étage intermédiaire de compression, tandis que la partie liquide est détendue jusqu'à la pression d'évaporation (état 9)
- Autres processus :
 - 9 – 1 correspond à l'évaporation et à la surchauffe dans l'évaporateur
 - 1 – 2 correspond à la première étape de compression (1 – 2s – compression isoentropique)
 - 3 – 4 correspond à la deuxième étape de compression (3 – 4s – compression isoentropique)
 - l'état 3 résulte du mélange de vapeur de réfrigérant (état 8 et état 2)
 - 4 – 5 correspond aux processus de condensation et de sous-refroidissement dans le condenseur

10.4 Systèmes commerciaux à injection

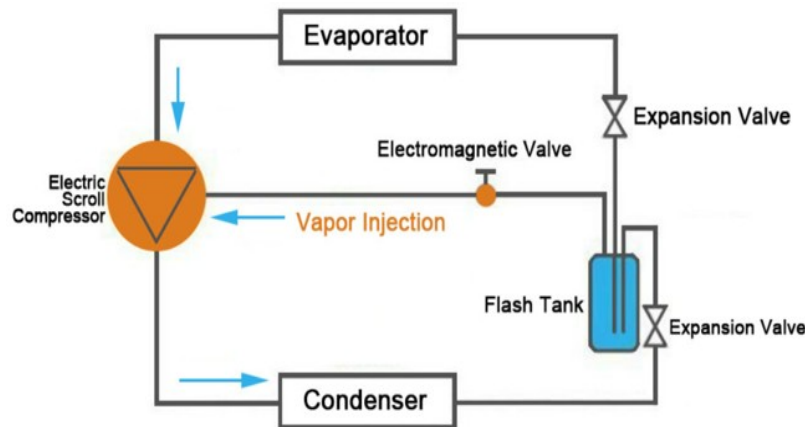
Surnom : « injection de vapeur améliorée », c'est-à-dire un système destiné aux pompes à chaleur à air dans les climats froids.

Il s'agit d'un système complet de pompe à chaleur équipé d'un compresseur spécial à injection de vapeur améliorée (orifice d'aspiration de vapeur supplémentaire)

Cette option consiste essentiellement à diviser le processus de compression à un étage d'origine en un processus de compression quasi-biphasé en utilisant de la vapeur.

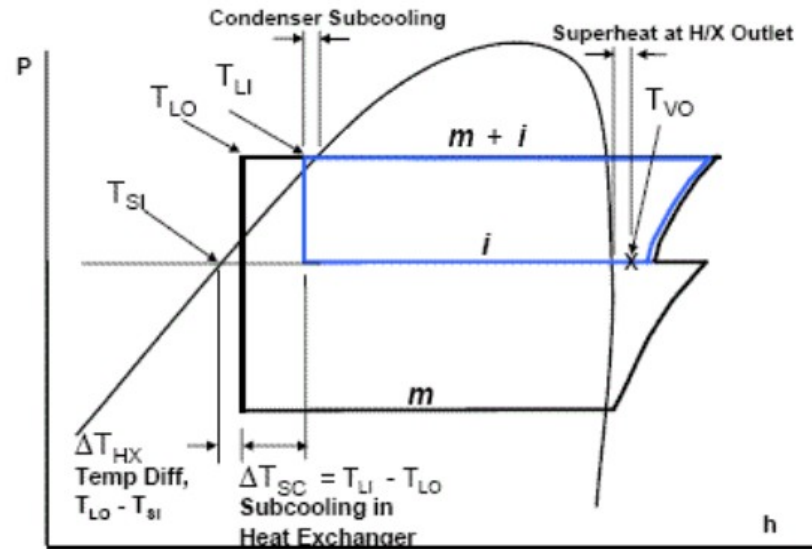
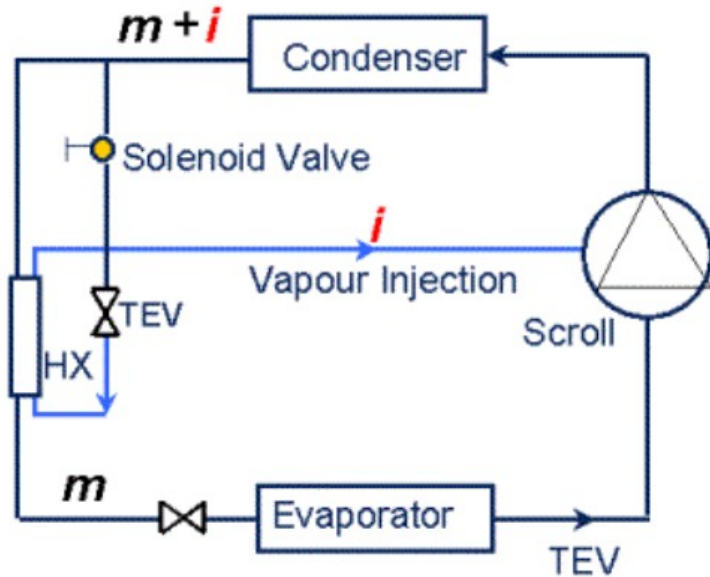
Procédé :

- **Étape 1** : le compresseur reçoit l'énergie A absorbée par l'évaporateur à partir de l'air et la comprime.
- **Étape 2** : activer la boucle auxiliaire d'injection de vapeur, et la vapeur traverse le compresseur.
- **Étape 3** : la partie de l'énergie A en cours de compression par le compresseur est mélangée à la vapeur entrante. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la chambre de travail du compresseur soit séparée de l'orifice d'entrée. À ce moment-là, la vapeur est entièrement mélangée à l'énergie A et devient une nouvelle énergie B.
- **Étape 4** : Une fois que la chambre de compression du compresseur est séparée de l'orifice d'injection de vapeur, l'énergie B subit une compression en deux étapes, puis l'énergie B entre finalement dans le condenseur pour un échange thermique avec l'eau.



Technologie « injection de vapeur améliorée »

10.4 Systèmes commerciaux à injection



Version courante avec injection de vapeur : système avec économiseur et compresseur de conception spéciale doté d'un orifice d'injection supplémentaire

Schéma de circuit et cycle d'un système avec compresseur à spirale à injection de vapeur

- La seule différence réside dans le fait qu'au lieu de deux compresseurs distincts, on utilise un seul compresseur doté d'un orifice d'injection supplémentaire.
- On utilise le plus souvent des compresseurs à spirale pour cela, car il est plus facile d'y mettre en œuvre une injection intermédiaire.
- Dans les systèmes de plus grande taille, on utilise également des compresseurs à vis.

LEÇON 11

Systèmes de pompes à chaleur en cascade



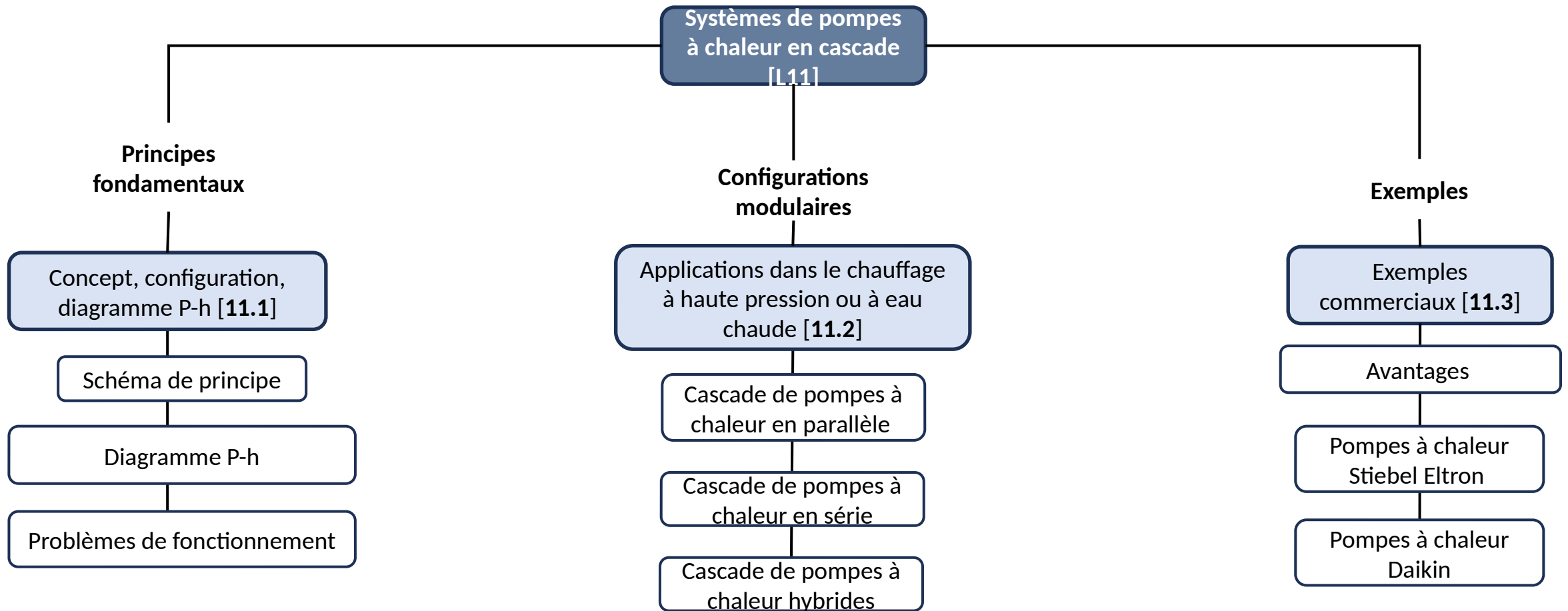
Co-funded by
the European Union



Objectifs de la leçon 11

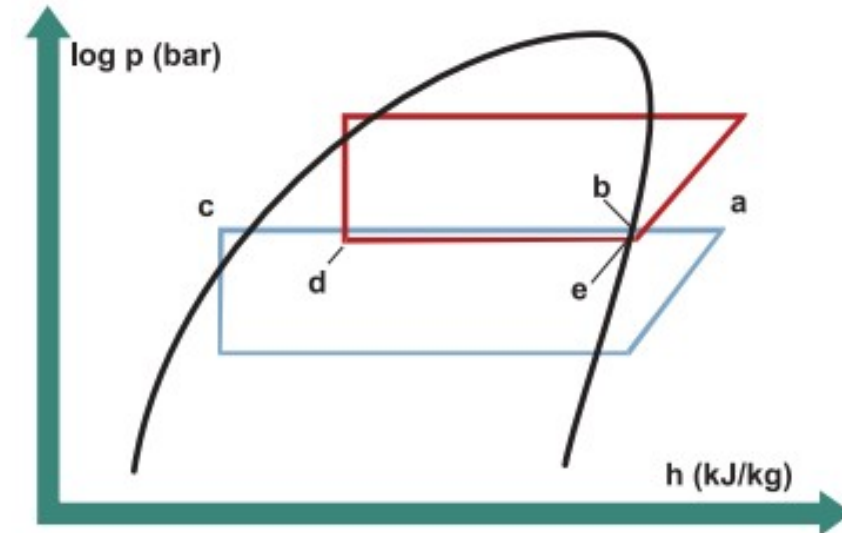
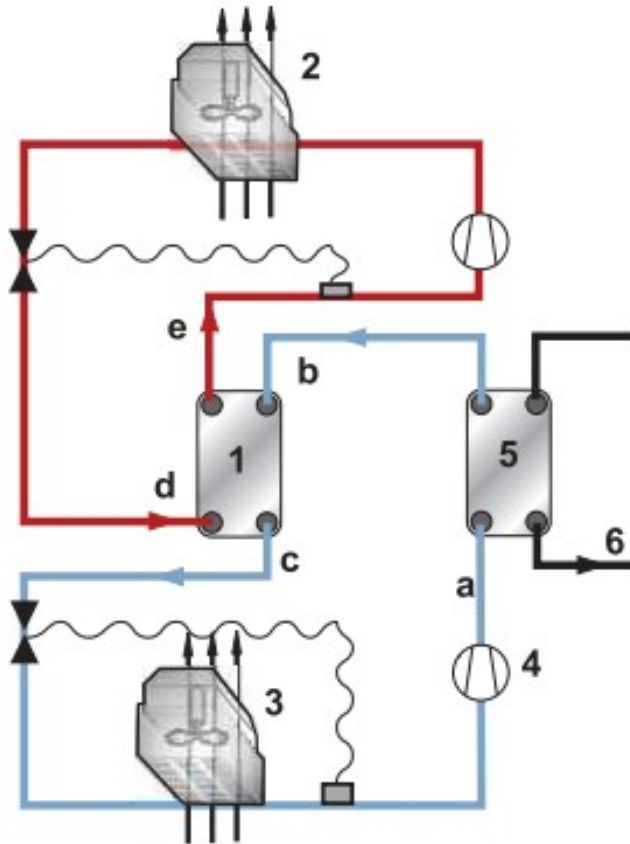
1. Présenter le concept des systèmes en cascade, en décrivant la séparation des circuits à basse et haute température
2. Interprétation du diagramme P-h
3. Décrire le fonctionnement de l'échangeur de chaleur en cascade et le choix du fluide frigorigène
4. Comprendre les différentes applications nécessitant des niveaux de température élevés ou échelonnés, y compris les configurations en parallèle, en série et hybrides

Contenu de la leçon 11



11.1 Concept, configuration des cycles en cascade, diagramme P-h

- (1) Unité en cascade
- (2) Condenseur à air ambiant
- (3) Évaporateur à air à basse température
- (4) Étage de compression à basse température
- (5) Désurchauffeur à plaques et tubes
- (6) Eau chaude sanitaire



- (a) température de refoulement pour le cycle à basse température
- (b) température de la vapeur à l'entrée de l'unité en cascade après le désurchauffeur
- (c) température de sortie du condensat pour le cycle froid
- (d) température après le détendeur dans le cycle chaud
- (e) température d'évaporation dans le cycle chaud

11.1 Principe, configuration des cycles en cascade, diagramme P-h

choix du fluide frigorigène

Cycles de réfrigération à plusieurs étages

- Le même réfrigérant doit fonctionner aux niveaux de pression les plus élevés et les plus bas. Le choix du réfrigérant pour éviter des pressions excessivement élevées dans le condenseur ambiant et des pressions d'évaporation inférieures à une atmosphère dans l'évaporateur froid peut s'avérer difficile.
- Risque accru de pénétration d'air et d'humidité dans le système, entraînant une baisse des performances du système.
- Risque accru de répartition inégale de l'huile.

Systèmes en cascade

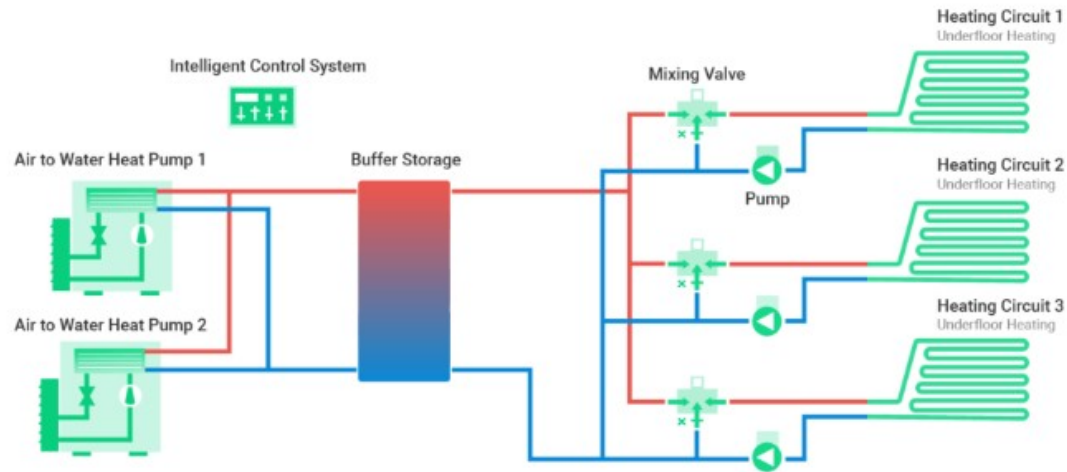
Avantage principal : les deux étages ne contiennent pas nécessairement les mêmes fluides frigorigènes.

- L'échangeur de chaleur en cascade est soumis à des fluctuations de T et de p.
- Pour éviter le risque de fatigue thermique à l'intérieur de l'unité en cascade dû à un ΔT très élevé, l'installation d'un désurchauffeur (5) est recommandée.
- Le désurchauffeur réduit la température du gaz à l'entrée du côté condensation de l'unité en cascade, tout en utilisant l'énergie de surchauffe pour produire de l'eau à haute température (6).

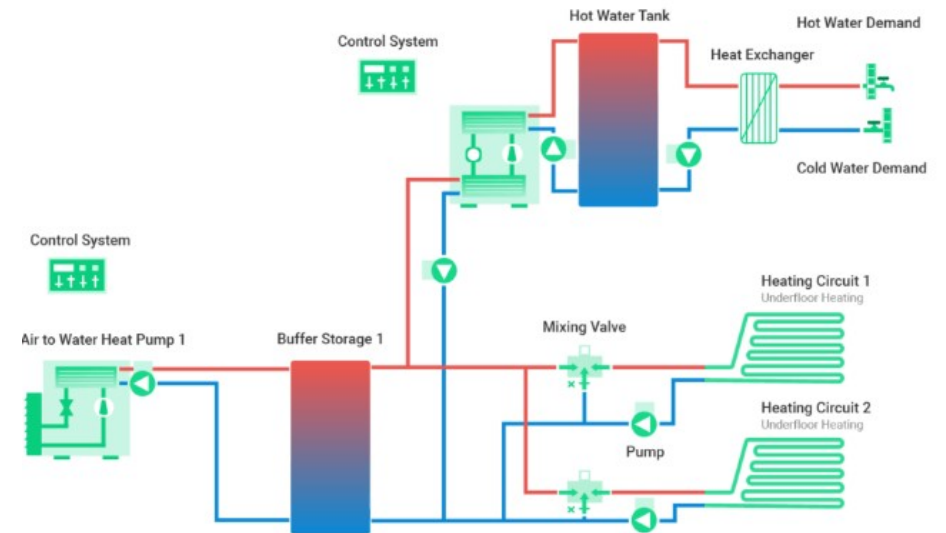
11.2 Applications dans le chauffage à haute pression ou à eau chaude

Un système de chauffage en cascade est une configuration dans laquelle plusieurs pompes à chaleur sont raccordées en série ou en parallèle, au lieu d'utiliser une seule grande unité.

Ces systèmes sont prévus lorsque des puissances élevées sont requises, lorsque les besoins en chauffage, en eau chaude sanitaire et en refroidissement fluctuent considérablement, ou lorsque les grands systèmes atteignent leurs limites.

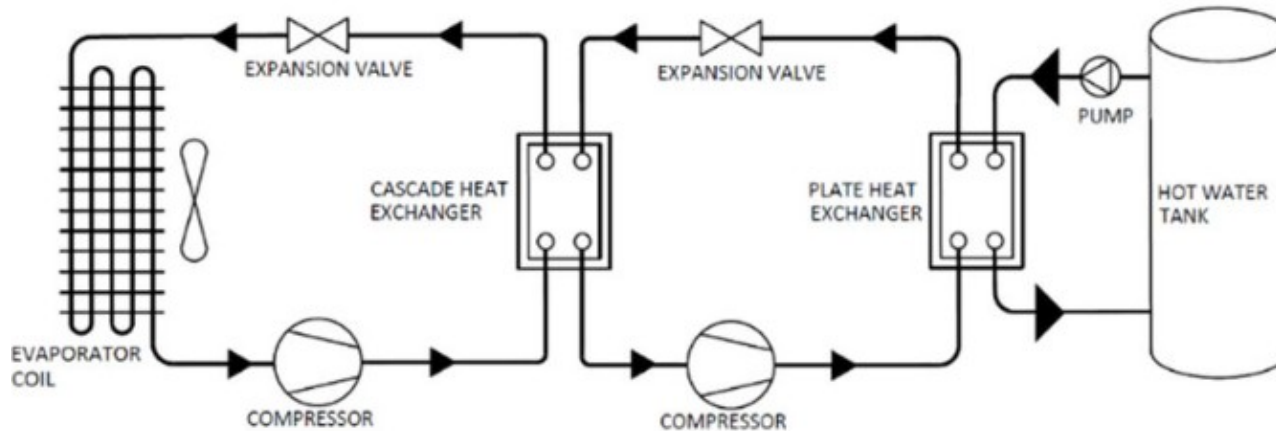


Cascade de pompes à chaleur en parallèle



Cascade de pompes à chaleur en série

11.2 Applications dans le chauffage à haute pression ou à eau chaude



Cascade de pompes à chaleur hybrides (air-eau)

Le système de pompe à chaleur en cascade se compose de deux cycles de réfrigérant : le cycle à basse pression et le cycle à haute pression, reliés par un échangeur de chaleur en cascade.

L'échangeur de chaleur en cascade fonctionne comme un condenseur pour le cycle à basse pression et comme un évaporateur pour le cycle à haute pression.

La combinaison de systèmes de pompes à chaleur en série et en cascade parallèle est utilisée dans les systèmes de chauffage plus complexes ou de plus grande envergure, présentant des exigences variables en matière de modulation de puissance, de niveaux de température ou de redondance.

Applications typiques :

- Niveaux de température élevés et bas
- Chaleur industrielle ou eau chaude sanitaire
- Systèmes de chauffage hybrides avec récupération de chaleur
- Systèmes réversibles pour le chauffage et le refroidissement

11.3 Exemples d'applications commerciales



Exemple de système de pompes à chaleur en cascade



Co-funded by
the European Union



Les pompes à chaleur constituent de plus en plus une option populaire et fiable pour un chauffage efficace ; cependant, les grands bâtiments commerciaux ayant des besoins importants en chauffage et en eau chaude trouvent souvent qu'une seule pompe à chaleur est insuffisante. Pour ces situations à forte demande, un système de pompes à chaleur en cascade peut être la solution idéale.

Ces systèmes sont conçus pour ajuster leur puissance de manière dynamique : lorsque la demande est élevée, toutes les unités peuvent fonctionner ensemble pour fournir une puissance combinée importante, tandis que pendant les périodes de faible demande, elles peuvent fonctionner individuellement ou à capacité réduite. Cette flexibilité améliore l'efficacité énergétique en évitant toute consommation inutile.



11.3 Exemples commerciaux

Températures élevées.

Les systèmes en cascade atteignent des températures élevées, ce qui les rend particulièrement efficaces pour la production d'eau chaude sanitaire. Répondre aux variations de la demande en température. Les systèmes en cascade peuvent fournir une large gamme de températures, allant de basses températures (en utilisant uniquement le premier étage) à des températures élevées (en utilisant les deux étages à leur maximum). Cela permet d'assurer une régulation du chauffage en fonction des conditions météorologiques de manière très flexible.



Exemple de système en cascade de pompes à chaleur Stiebel Eltron.



Co-funded by
the European Union



Solution de pompes à chaleur en cascade Daikin pour des températures d'eau élevées.

Le système en cascade Daikin consiste en une solution comprenant une unité refroidie par air et une unité refroidie par eau fonctionnant ensemble pour atteindre des températures de sortie d'eau élevées, ce qui le rend adapté aux projets de rénovation. Pour les bâtiments anciens ne faisant pas l'objet de travaux d'isolation, des températures d'eau plus élevées peuvent être nécessaires pour s'aligner sur celles fournies par la chaudière existante. Daikin peut fournir jusqu'à 75 °C dans une solution en cascade où les pompes à chaleur air-eau et eau-eau fonctionnent ensemble.



LEÇON 12

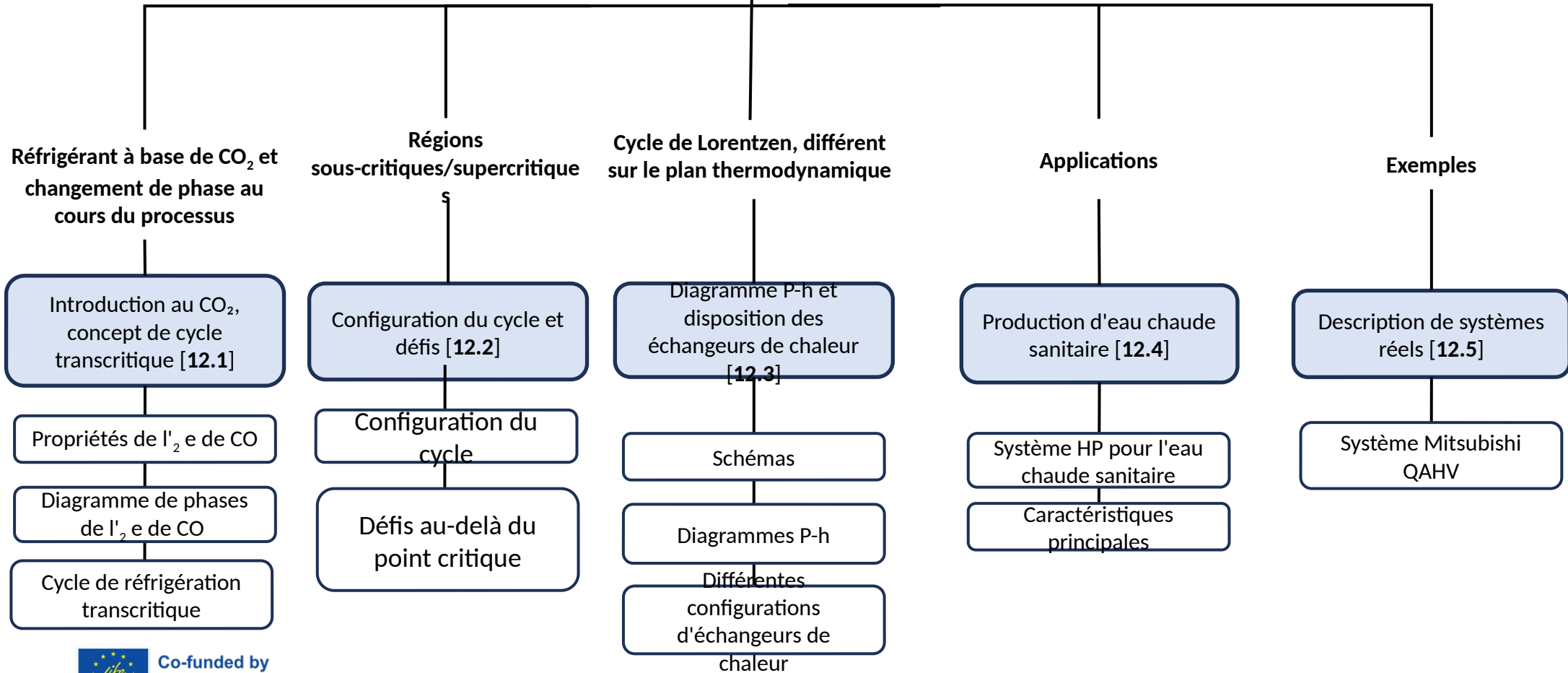
Systèmes transcritiques au CO₂

Objectifs de la leçon 12

1. Présentation des systèmes transcritiques utilisant le CO₂ comme réfrigérant
2. Présenter le concept du cycle transcritique, le diagramme de phase, le cycle de réfrigération, en détaillant le rôle du refroidisseur de gaz, le fonctionnement à haute pression et l'influence des points critiques et triples du CO₂
3. Présentation du cycle HP transcritique au CO₂ réel (cycle de Lorentzen)
4. Comparer plusieurs architectures à base de CO₂ et présenter des systèmes commerciaux de production d'eau chaude sanitaire à haute température (par exemple, Mitsubishi QAHV).

Contenu de la leçon 12

Systèmes transcritiques au CO₂ [L12]



12.1 Introduction au CO₂ en tant que réfrigérant et au concept de cycle transcritique

Le CO₂ est l'un des fluides frigorigènes naturels pouvant être utilisés comme fluide de travail dans diverses applications de réfrigération, au même titre que l'ammoniac et les hydrocarbures.

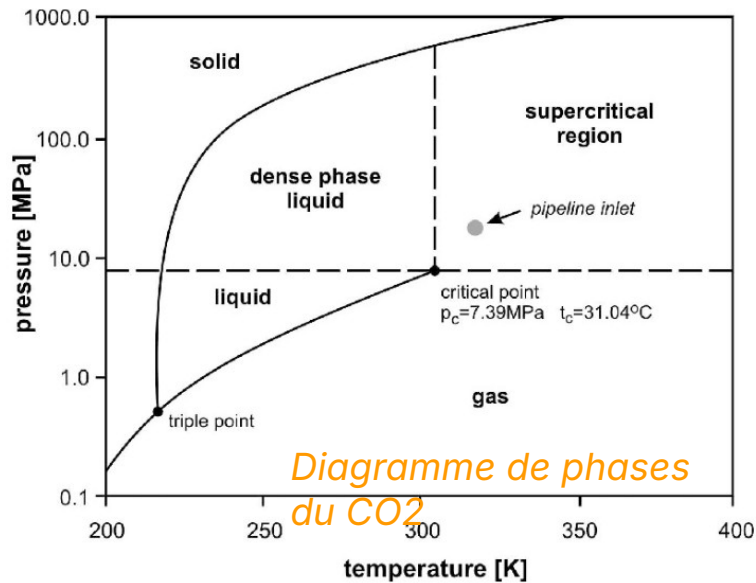
Avantages

- Sécurité : le CO₂ est non toxique et ininflammable ;
- Thermodynamique : (a) le CO₂ présente une température d'_{cr} relativement basse (31,1 °C) et une pression de fonctionnement élevée (7,38 MPa);
(b) le cycle transcritique présente certaines caractéristiques uniques, comme le processus de refroidissement par gaz en phase unique qui se produit lors du rejet de chaleur, et le refroidissement par gaz offre un écart de température plus important, ce qui convient mieux au processus de chauffage eau/air ;
(c) la capacité volumétrique est assez importante, ce qui permet d'utiliser des composants plus petits pour obtenir un système plus compact et plus efficace ;
(d) la conductivité thermique du CO₂ est relativement élevée → ce qui indique un meilleur transfert de chaleur.
- Aspects écologiques : son caractère écologique et sa meilleure compatibilité avec les lubrifiants courants.
- Aspects économiques : prix plus bas

Défis

- nécessite des composants robustes et un compresseur stable

12.1 Introduction au CO₂ en tant que fluide frigorigène et au concept de cycle transcritique



Le point triple correspond à la condition dans laquelle les trois phases peuvent coexister en équilibre (5,2 bar ; 56,6 °C).

En dessous de la température du point triple, le liquide ne peut pas exister.

À la pression atmosphérique, le CO₂ ne peut exister que sous forme solide ou gazeuse.

Le point critique marque la limite supérieure des processus de transfert de chaleur basés sur l'évaporation ou la condensation.

À des valeurs de T et p supérieures à celles du point critique – cette zone est appelée « zone fluide » –, on se trouve en conditions supercritiques.

Cycle de réfrigération transcritique : se produit lorsqu'une partie du processus de réfrigération se déroule au-dessus de T_{cr} . L'absorption de chaleur au niveau de l'évaporateur a lieu en dessous de p_{cr} . Le rejet de chaleur au sein du refroidisseur de gaz a lieu au-dessus de p_{cr} . De ce fait, la chaleur est rejetée sur une plage de températures. Cela contraste avec les systèmes à compresseur conventionnels où le rejet de chaleur a lieu à une température fixe.

12.2 Configuration du cycle et défis au-delà du point critique

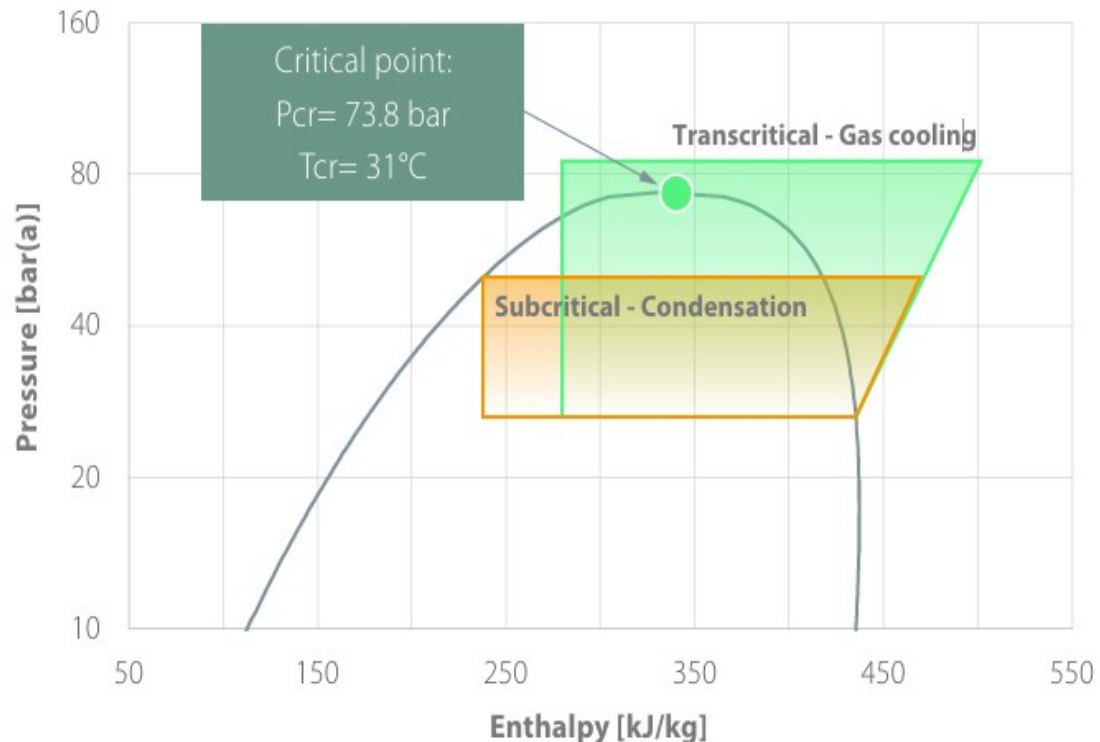


Diagramme P-h

Les pompes à chaleur transcritiques ont la même configuration de base que n'importe quelle pompe à chaleur à compression de vapeur. Elles nécessitent toutefois une température de retour basse ($< 30\text{ °C}$) et peuvent fournir des températures de départ élevées ($> 80\text{ °C}$).

- Dans les cycles à compression de vapeur, les fluides frigorigènes fonctionnent généralement dans des conditions sous-critiques. Un cycle transcritique est capable de fonctionner à la fois en mode sous-critique et en mode supercritique
- En mode sous-critique, le rejet de chaleur s'effectue par condensation, tandis qu'en mode transcritique, il s'effectue par refroidissement du gaz.
- Pour ce faire, les systèmes de réfrigération au CO₂ utilisent un échangeur de chaleur spécifique : un refroidisseur de gaz. Le refroidisseur de gaz joue un rôle essentiel dans le système de réfrigération au CO₂ en facilitant un transfert de chaleur efficace pendant le processus de refroidissement du gaz.

12.3 Diagramme P-h et schéma d'un échangeur de chaleur spécifique aux systèmes au CO₂

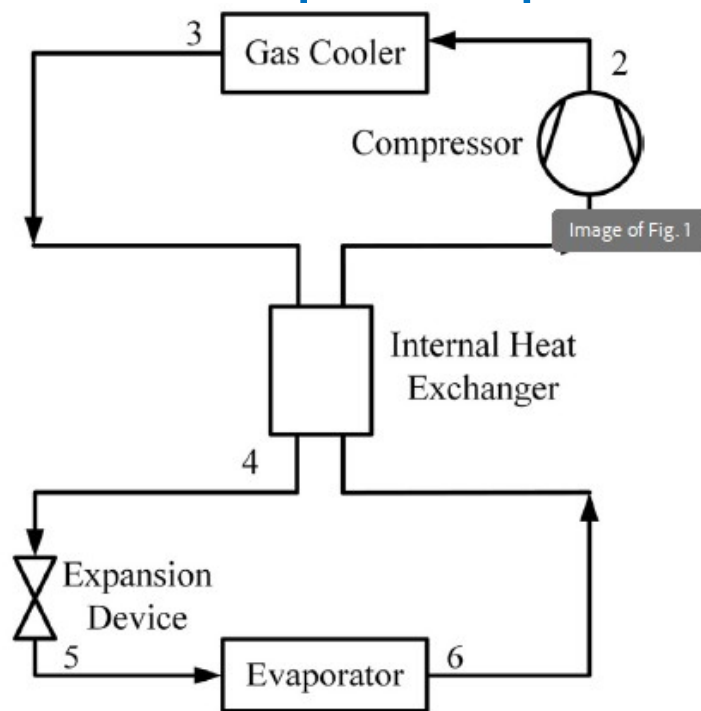


Schéma d'une pompe à chaleur au CO₂ avec IHX

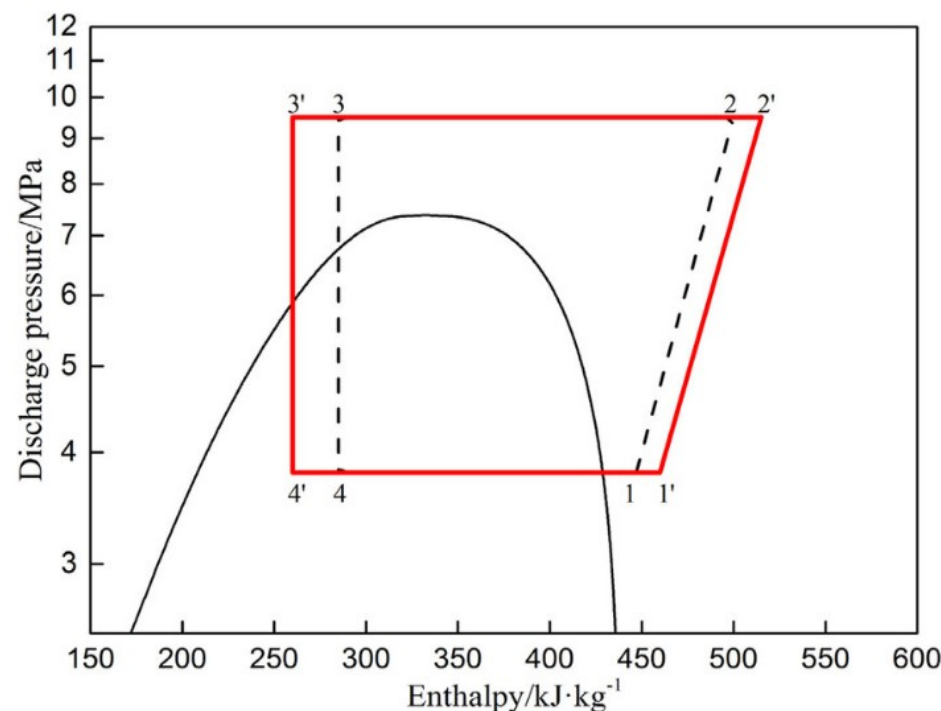


Diagramme pression-enthalpie

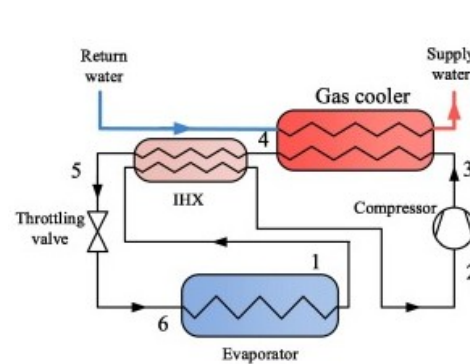
1-2-3-4-1 : système sans IHX
1'-2'-3'-4'-1' : système avec IHX

Le cycle théorique :

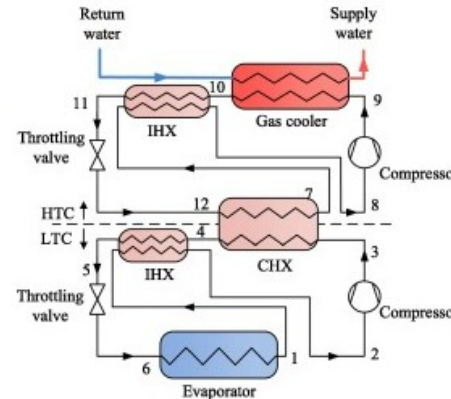
- 1-2 (1' -2') : Compression isentropique dans le compresseur
- 2-3 (2' -3) : dégagement de chaleur sans changement de phase dans le refroidisseur de gaz
- 3-4 (3' -4) : processus d'étranglement isenthalpique dans le détendeur
- 4-1 (4' -1) : absorption de chaleur avec changement de phase dans l'évaporateur
- 3-3' et 1-1' : transfert de chaleur dans l'échangeur de chaleur interne

PS. Les systèmes de pompes à chaleur à air transcritiques à CO₂ sont utilisés pour fournir de l'eau chaude à des fins de chauffage domestique.

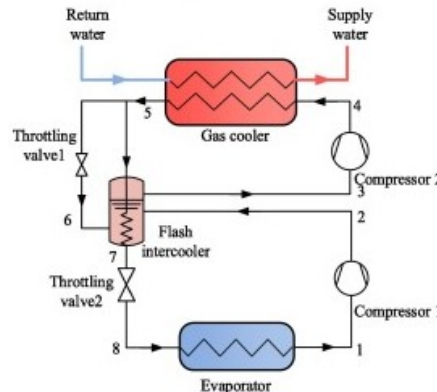
12.3 Diagramme P-h et schéma de l'échangeur de chaleur spécifiques aux systèmes au CO₂



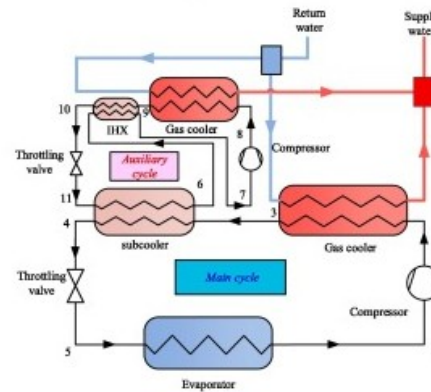
(a) BASE



(b) CHPS



(c) TSCHPS



(d) MSHPS

Schémas des systèmes de pompes à chaleur au CO₂

BASE : système HP transcritique au CO₂ classique,

CHPS : système HP à cascade CO₂/CO₂,

TSCHPS : système de pompe à chaleur à détente intermédiaire à compression en deux étages au CO₂,

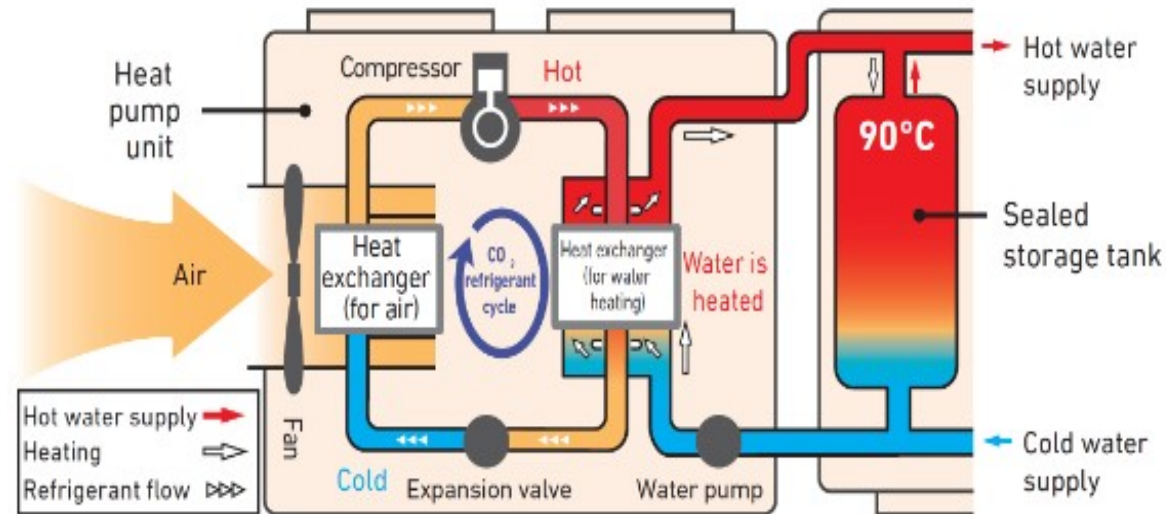
MSHPS : système de pompe à chaleur à sous-refroidissement mécanique CO₂/CO₂.



Co-funded by
the European Union



12.4 Cas d'application : production d'eau chaude sanitaire



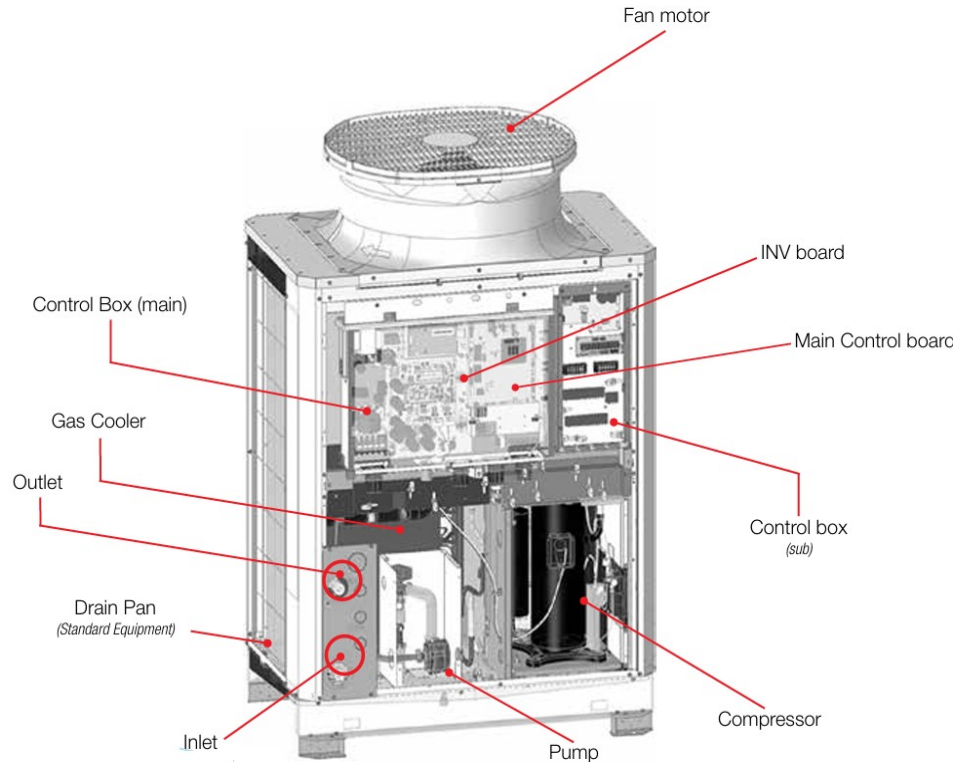
Système de pompe à chaleur à haute température au CO₂ pour l'eau chaude sanitaire

La technologie des pompes à chaleur au CO₂ a été continuellement améliorée et offre désormais d'importantes possibilités d'économies d'énergie et de chauffage durable.

Systèmes de production d'eau chaude sanitaire à pompe à chaleur au CO₂ :

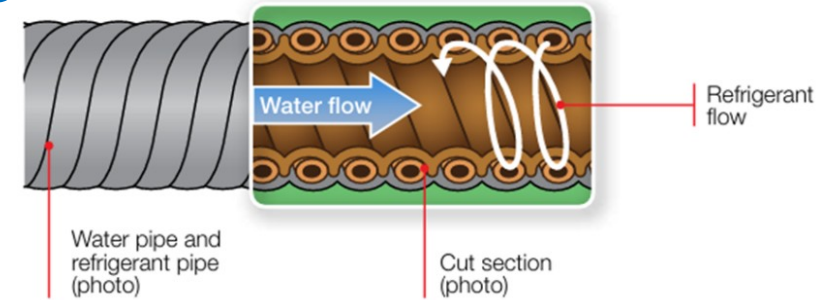
- utilisent le CO₂, un gaz réfrigérant naturel et respectueux de l'environnement
- garantissent un haut niveau de sécurité (l'absence de combustion réduit le risque d'incendie)
- produisent de l'eau chaude avec un COP moyen pouvant atteindre 4,2
- transforment 1 kW d'énergie d'entrée en 3,9 kW d'énergie de sortie
- produisent de l'eau chaude jusqu'à 90 °C, même lorsque la température ambiante descend jusqu'à -25 °C
- fournit des solutions écoénergétiques pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux dans les applications industrielles, commerciales et résidentielles

12.5 Description des systèmes réels



*Mitsubishi
QAHV*

- conçu uniquement pour produire de l'eau chaude sanitaire,
- avec une température de départ de 65 °C, le QAHV est environ 70 % plus efficace que le CAHV de Mitsubishi,
- capable de fournir une température de départ maximale supérieure de 20 °C à celle des autres chaleur pour eau



*Refroidisseur de gaz à spirale et torsadé
Mitsubishi QAHV*

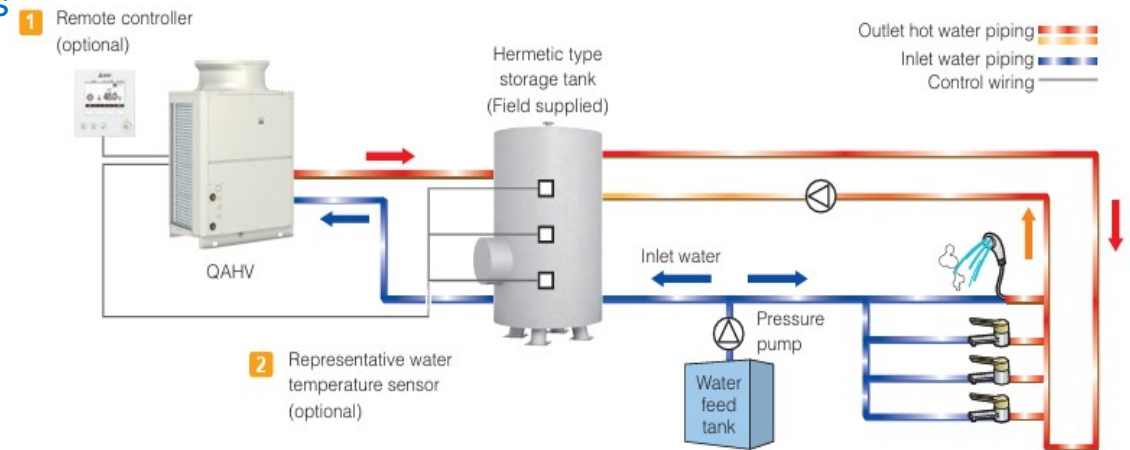


Schéma du système Mitsubishi QAHV



Co-funded by
the European Union



LEÇON 13

Les réfrigérants naturels dans les systèmes domestiques



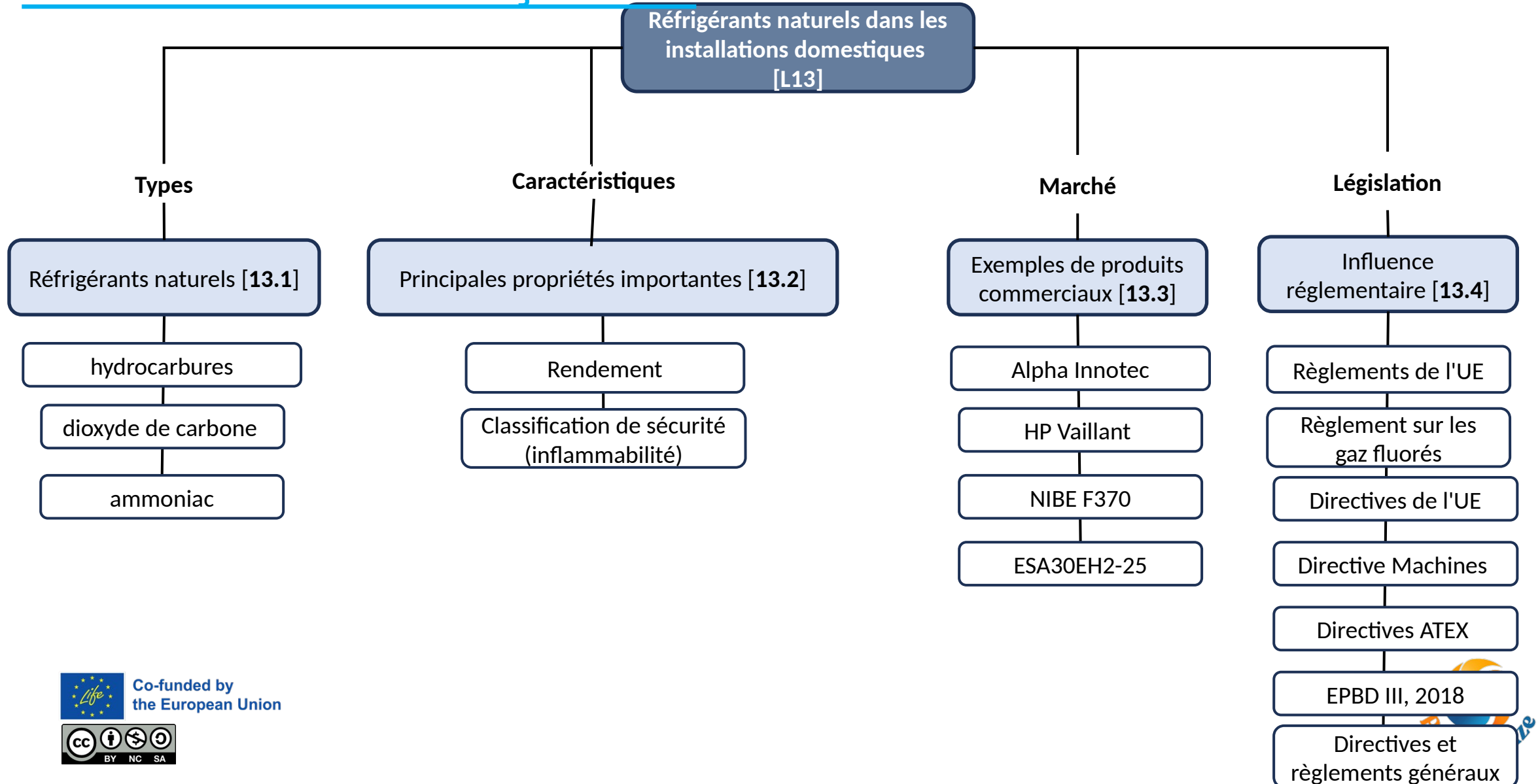
Co-funded by
the European Union



Objectifs de la leçon 13

1. passer en revue les réfrigérants naturels en abordant leur comportement thermodynamique, leurs classes de sécurité, ainsi que la gestion de leur inflammabilité et de leur toxicité
2. Présenter les produits disponibles sur le marché
3. donner un aperçu des cadres réglementaires de l'UE qui facilitent le choix des fluides frigorigènes et la conception des systèmes

Contenu de la leçon 13



13.1 Réfrigérants naturels

Les 3 réfrigérants naturels les plus courants :

1. les hydrocarbures
(adaptés aux petites pompes à chaleur, aux monoblocs, aux climatiseurs split simples, aux systèmes collectifs et aux applications industrielles ; moins adaptés aux grands systèmes multisplit et VRF – coûts élevés et mesures de sécurité accrues).
2. dioxyde de carbone CO2
(adapté aux températures de sortie plus élevées, tant pour les petites que pour les grandes pompes à chaleur)
3. l'ammoniac
(convient principalement aux pompes à chaleur industrielles. À l'avenir, pourrait être utilisé dans des pompes à chaleur domestiques hybrides de haute technologie fonctionnant au gaz naturel).

(1) réfrigérants hydrocarbures

Name	R number	Atmospheric boiling point (°C)	Pressure at 25°C in bar(a)	Comments
Ethane	R170	-89	24	Rarely used, high pressure
Propane	R290	-42	9.6	Most common
Propene (propylene)	R1270	-48	11.5	Rarely used, specific odour
Butane	R600	0	2.5	High-temperature heat pumps
Isobutane	R600a	-12	3.5	Suitable for small appliances
n-Pentane	R601	36	0.6	High-temperature heat pumps
Propaene	R433A	-44	10.3	Mixture of R290 and R1270, specific odour

PS : tous de classe de sécurité A3 (hautement inflammables)

Les hydrocarbures les plus couramment utilisés ont des propriétés très similaires à celles des (H)CFC, HFC et HFO conventionnels (à l'exception de l'inflammabilité).

Le choix de l'huile pose rarement problème.

13.1 Réfrigérants naturels

(2) Le dioxyde de carbone (CO₂, R744)

l'un des réfrigérants les plus anciens au monde. Le CO₂ est classé dans la catégorie A1 (faible toxicité, ininflammable). Le CO₂ possède des propriétés spécifiques qui le distinguent nettement des autres réfrigérants. Ces propriétés particulières sont parfois avantageuses, mais peuvent aussi s'avérer désavantageuses ou restrictives :

- le point triple (solide-liquide-vapeur, à -56,6 °C)
- la glace carbonique (solide-vapeur, à -78,4 °C)
- le point critique (différence/pas de différence entre le liquide et la vapeur, à 31 °C).

(3) L'ammoniac (R717, NH₃)

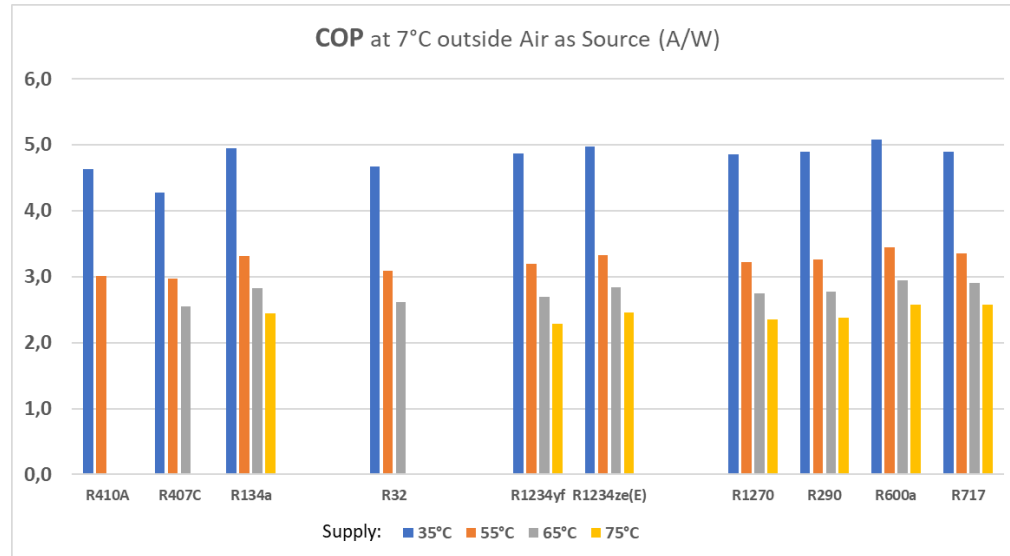
l'un des plus anciens réfrigérants, était très répandu dans les premiers systèmes de réfrigération mécaniques. La technologie continue d'évoluer, c'est un domaine propice à l'innovation et à la concurrence sur le marché. Il est très efficace, ne produit pas de gaz à effet de serre et a un impact environnemental négligeable. L'odeur âcre de l'ammoniac constitue un avertissement efficace en cas de fuite mineure.

Inconvénients :

- le cuivre (matériau couramment utilisé pour les tuyaux de réfrigérant) ne peut pas être utilisé avec l'ammoniac. Cela implique l'utilisation de matériaux (acier) et de raccords (soudure) plus coûteux.
- l'ammoniac est toxique et légèrement inflammable (problèmes de sécurité sociale, risques de corrosion).

13.2 Rendement, classification de sécurité et inflammabilité

Rendement

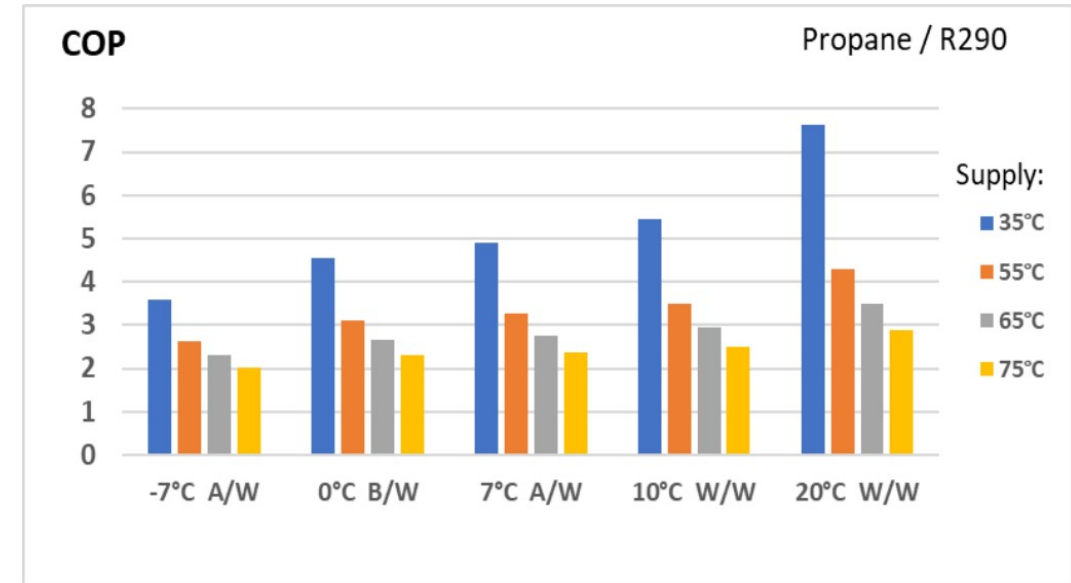


COP selon le réfrigérant

Remarque :

Les performances énergétiques des pompes à chaleur sont principalement déterminées par la source et la température d'alimentation ; les conditions d'utilisation et le comportement de l'utilisateur jouent également un rôle important. Toutes conditions externes égales par ailleurs : COP théorique.

Une température d'alimentation plus élevée (en utilisant du propane ou du CO₂) aura évidemment aussi un impact.



Influence des conditions de fonctionnement pour le propane (R290)



Co-funded by
the European Union



13.2 Rendement, classification de sécurité et inflammabilité

Classification de sécurité

Pour les fluides frigorigènes naturels (hydrocarbures), ces risques sont principalement liés à l'inflammabilité.

Pour le dioxyde de carbone, ils sont liés aux pressions élevées et à la formation de dioxyde de carbone solide (glace carbonique).

Pour l'ammoniac, ils sont liés à la toxicité.

A2L (R-410A. Exemples clés : R-32, R-454B et R-1234yf) : faible inflammabilité, faible toxicité, faible PRG, plus sûr que l'ammoniac et les hydrocarbures, plus économe en énergie que les systèmes R-410A et CO₂

A3 (R290, R600a, R-170, R-290, R-600, R-600A) : faible toxicité et haute inflammabilité. La classe A3 nécessite des mesures de sécurité strictes en raison de sa nature hautement inflammable, en particulier pour le R290 et le R600a, par rapport aux fluides de classe A2L.

F L A M M A B I L I T Y	SAFETY GROUP	
	Higher Flammability	A3 B3
	Flammable	A2 B2
	Lower Flammability	A2L B2L
	No Flame Propagation	A1 B1
	Lower Toxicity	Higher Toxicity
	INCREASING TOXICITY	

Classification de sécurité
ASHRAE

13.3 Exemples de produits disponibles dans le commerce

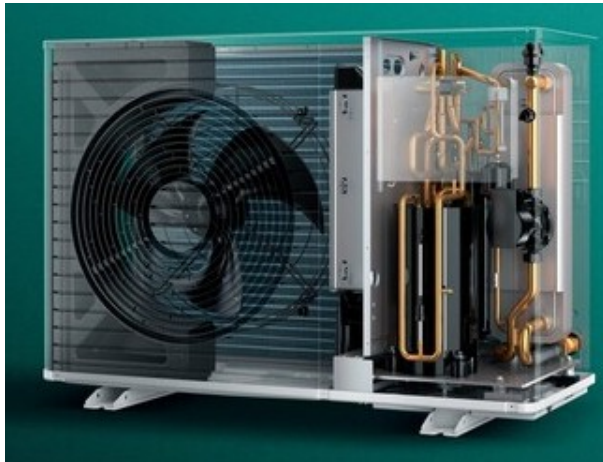
Les fluides frigorigènes naturels ne sont pas issus de la nature. Ils sont fabriqués industriellement, mais ce sont des substances qui existent directement dans la nature. Les plus couramment utilisés sont l'ammoniac, le dioxyde de carbone et les hydrocarbures.



Fabricant, Alpha Innotec

Pompe à chaleur Alpha Innotec – LWDV à fluide frigorigène naturel (propane – 8 kW), largement utilisée sur le marché domestique et dans les petites entreprises.

Avantages : la meilleure de sa catégorie – polyvalente et efficace ; fonctionne toujours à la demande ; permet d'atteindre des températures de départ élevées, ce qui la rend idéale pour les projets de rénovation.



Fabricant – HP Vaillant

Pompe à chaleur air-eau : pompe à chaleur aérothermique aroTHERM plus 12 kW. Elle utilise le fluide frigorigène naturel R290 pour atteindre des températures de départ plus élevées, jusqu'à 75 °C. Adaptée à toutes les applications, cette pompe à chaleur aérothermique peut utiliser les radiateurs existants et fonctionne jusqu'à -25 °C.

L'uniTOWER est un ballon intégré de 190 litres avec composants hydrauliques qui peut facilement fournir suffisamment d'eau chaude pour les besoins d'une famille de cinq personnes, y compris l'utilisation de douches à effet pluie. Grâce à ses dimensions peu encombrantes, ce système est le choix idéal pour les constructions neuves.

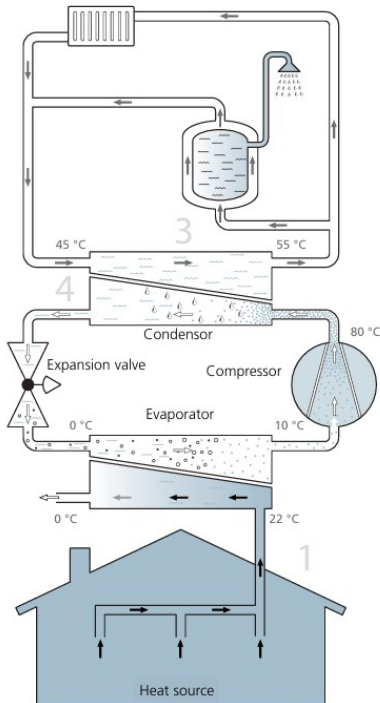


Co-funded by
the European Union



13.3 Exemples de produits commerciaux

Réfrigérants naturels - non dérivés de la nature. Ils sont fabriqués industriellement, mais ce sont des substances présentes directement dans la nature. Les plus couramment utilisés sont l'ammoniac, le dioxyde de carbone et les hydrocarbures.

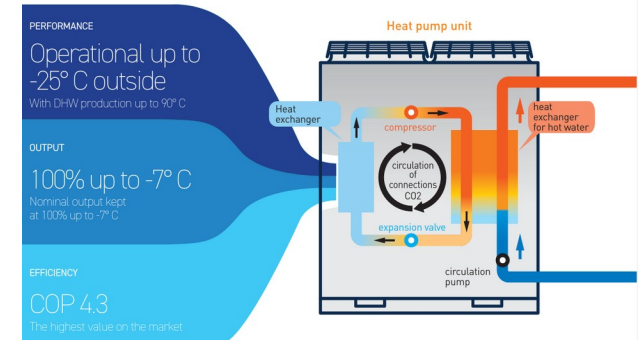


← Fabricant, NIBE F370

un ventilateur à courant continu intégré + chauffe-eau avec protection anticorrosion, + un thermoplongeur intégré. Il est destiné aux circuits de radiateurs dimensionnés pour les basses températures et/ou au chauffage par le sol. Le NIBE F370 peut être raccordé au chauffage urbain, au bois, au fioul et au gaz. Il utilise le réfrigérant R290 (propane), respectueux de l'environnement.

Fabricant, MHI

air-eau, Q-ton | ESA30EH2-25, eau chaude sanitaire. Compresseur GSR à deux étages. Jusqu'à 16 unités extérieures peuvent être contrôlées via une seule commande. Puissance maximale : 480 kW. Installations possibles dans de grands immeubles d'habitation neufs ou dans de très grands immeubles d'habitation équipés de systèmes de chauffage urbain existants.



Co-funded by
the European Union



13.4 Impact réglementaire

Réglementations de l'UE relatives aux fluides frigorigènes : actes législatifs qui s'appliquent automatiquement et uniformément et qui sont juridiquement contraignants pour tous les États membres de l'UE ; la couche d'ozone - les obligations du Protocole de Montréal.

Règlement sur les gaz fluorés : obligations du Protocole de Kyoto concernant les substances contribuant à l'effet de serre. Ce règlement vise à garantir que, d'ici 2030, les émissions européennes de gaz fluorés soient réduites d'au moins 60 % par rapport aux émissions de 2005.

Directives de l'UE : les exigences essentiels. Les pays de l'UE sont responsables de leur mise en œuvre. Pour les systèmes de réfrigération, les pompes à chaleur et leurs composants, les directives les plus importantes sont celles relatives aux machines, aux équipements sous pression, aux équipements électriques et électroniques, à l'efficacité énergétique et, dans certains cas, aux atmosphères potentiellement explosives.

Directive Machines 2006/42/CE (juin 2006) : définit les exigences auxquelles doivent se conformer les machines destinées au marché européen ; contient un grand nombre d'exigences en matière de sécurité et de santé. Les fabricants sont tenus de respecter les exigences de la directive.

Directives ATEX (ATmosphère EXplosible) : couvrent toutes les situations présentant un risque d'explosion de gaz ou de poussières.

Directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD III, 2018) : cette directive vise à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et à réduire ainsi la consommation d'énergie.

Directives et règlements généraux : les directives européennes suivantes s'appliquent généralement aussi aux systèmes de réfrigération et aux pompes à chaleur, sans aspects spécifiques au secteur.