



Module 3

Conception et intégration de systèmes

Développé par l'UMA (Université de Malaga)



Co-funded by
the European Union

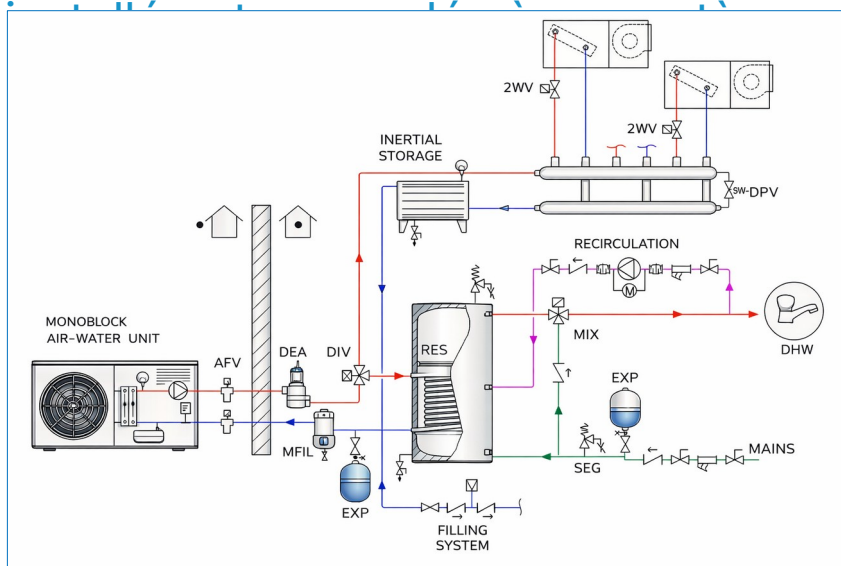


Co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.



Présentation du module 3

Ce module déplace l'accent mis sur le fonctionnement thermodynamique interne des pompes à chaleur vers leur **intégration** au sein de systèmes CVC réels dans les bâtiments. La pompe à chaleur est analysée en tant que composant interagissant avec les émetteurs, le stockage, le circuit hydraulique, les commandes et d'autres sources d'énergie. L'objectif est de comprendre les performances, les contraintes de conception et le comportement opérationnel une fois l'unité complète.



À la fin de ce module, vous comprendrez la logique des schémas tels que celui illustré, qui représente une pompe à chaleur air/eau assurant le chauffage, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire.



Co-funded by
the European Union



Contenu du module 3

Leçon 14	Aspects opérationnels des pompes à chaleur	Leçon 20	Intégration des systèmes et stratégies de régulation
Leçon 15	Émetteurs de chaleur pour les systèmes à pompe à chaleur	Leçon 21	Intégration avec d'autres sources d'énergie
Leçon 16	Production d'eau chaude sanitaire avec des pompes à chaleur	Leçon 22	renouvelables Systèmes géothermiques
Leçon 17	Systèmes de pompes à chaleur		
Leçon 18	Recueil de schémas de systèmes représentatifs		
Leçon 19	Dimensionnement des systèmes à pompe à chaleur		

LEÇON 14

Aspects opérationnels des pompes à chaleur



Co-funded by
the European Union

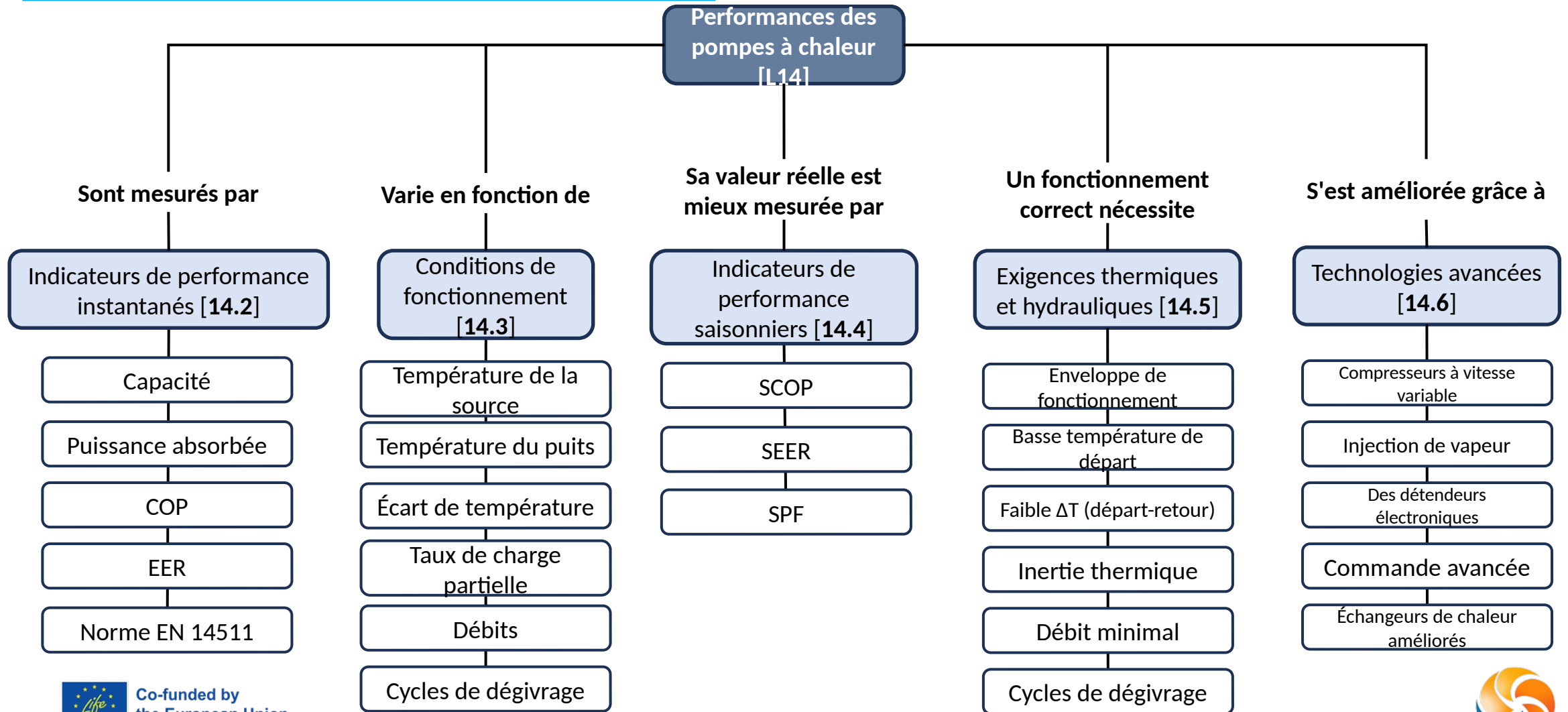


Objectifs de la leçon 14

1. Comprendre comment on évalue les performances d'une pompe à chaleur, notamment la signification des indices COP, EER et des indicateurs saisonniers, et pourquoi les valeurs nominales ne reflètent pas les conditions réelles de fonctionnement
2. Apprendre comment les variations de la température extérieure, de la température de départ, du niveau de charge et du fonctionnement en dégivrage influencent la puissance de chauffage et de refroidissement, la consommation électrique et le rendement global
3. Identifier les principales exigences de conception des systèmes pour les pompes à chaleur, telles que les limites de fonctionnement, les températures de départ, les débits et l'inertie thermique, afin de garantir un fonctionnement stable et des performances saisonnières élevées



Contenu de la leçon 14



14.1 Introduction

- Les pompes à chaleur se distinguent des chaudières conventionnelles par la manière dont leur rendement réagit aux conditions de fonctionnement.
- Les chaudières produisent de la chaleur directement par combustion à des températures de flamme très élevées, ce qui rend leur rendement relativement insensible aux conditions ambiantes. Par exemple, il est très facile de produire de l'eau à 70 °C à partir d'une flamme à 1 500 °C
- En revanche, les pompes à chaleur reposent sur le transfert de chaleur d'une source à basse température vers un puits à température plus élevée. Leurs performances sont fortement influencées par les conditions de fonctionnement : température de la source, température du puits, niveau de charge, nécessité de cycles de dégivrage et stratégie de régulation. Tous ces facteurs affectent directement à la fois la capacité thermique et la consommation électrique.
- En raison de cette sensibilité, il est essentiel de bien comprendre les aspects opérationnels pour choisir et concevoir correctement une pompe à chaleur.

14.2 Performances instantanées aux conditions nominales

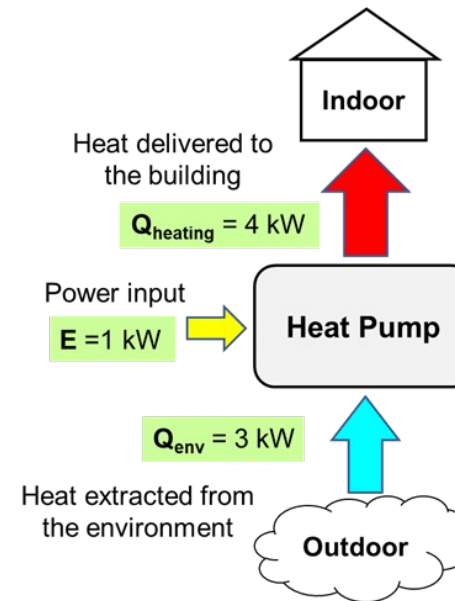
Rendements (COP et EER)

Les performances d'une pompe à chaleur sont calculées en divisant la puissance thermique utile (Q) par la puissance électrique absorbée (E) :

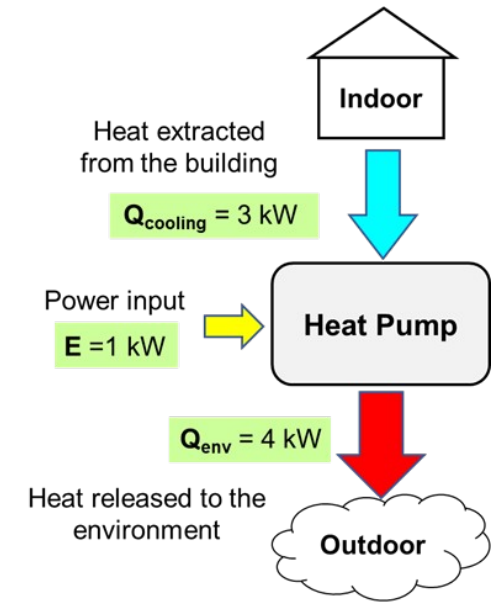
- En **mode chauffage**, le rendement est appelé **coefficient de performance (COP)**, rapport entre la puissance de chauffage et la consommation électrique
- En **mode refroidissement**, on parle de **taux de rendement énergétique (EER)**, qui correspond au rapport entre la puissance frigorifique et la consommation électrique

Ces indicateurs indiquent combien d'unités de chaleur sont fournies ou évacuées par unité d'électricité consommée. Comme les pompes à chaleur transfèrent la chaleur au lieu de la produire, les valeurs de COP et d'EER peuvent être nettement supérieures à un (généralement comprises entre 2,5 et 4).

Un COP = 3 signifie que la pompe à chaleur peut fournir 3 kW de chaleur pour chaque kW d'électricité consommé (les 2 kW supplémentaires sont extraits de l'environnement, par exemple de l'air extérieur)



$$COP = \frac{Q_{heating}}{E} = 4$$



$$EER = \frac{Q_{cooling}}{E} = 3$$

14.2 Performances instantanées dans les conditions nominales

Norme EN 14511 – COP et EER nominaux

Les valeurs du COP et de l'EER dépendent fortement des températures de fonctionnement, des débits et des conditions de charge. Afin de garantir **la comparabilité** entre différents produits, la norme européenne EN 14511 définit des conditions nominales spécifiques dans lesquelles les pompes à chaleur doivent être testées. Ces conditions normalisées spécifient les températures d'entrée pour la source de chaleur et le puits de chaleur, ainsi que les débits et les conditions d'humidité, le cas échéant.

La puissance nominale, la puissance absorbée nominale et les COP ou EER nominaux qui en résultent sont indiqués dans les catalogues des fabricants et représentent des conditions de fonctionnement typiques.

Il convient de noter que les valeurs nominales ne décrivent pas les performances dans des conditions extrêmes ou variables.

Exemple : conditions de référence pour les pompes à chaleur air-

Mode of operation	External heat exchanger		Internal heat exchanger	
	Dry Bulb Inlet °C	Wet Bulb Inlet °C	Dry Bulb Inlet °C	Wet Bulb Inlet °C
Heating	7	6	20	15 (max)
Cooling	35	24	27	19

Exemple : conditions de référence pour les pompes à chaleur air-eau

Mode of operation	External heat exchanger		Internal heat exchanger	
	Dry Bulb Inlet °C	Wet Bulb Inlet °C	Inlet Temp. °C	Outlet Temp. °C
Heating – low temperature	7	6	30	35
Heating – intermediate temperature	7	6	40	45
Heating – medium temperature	7	6	47	55
Heating – high temperature	7	6	55	65
Cooling	35	-	12	7



Co-funded by
the European Union



Pour plus de détails : voir la section 14.2.3



14.2 Performances instantanées dans les conditions de référence

Interprétation d'un catalogue du fabricant

Les informations du tableau sont extraites du catalogue commercial d'une pompe à chaleur air/air. Au point de référence EN 14511 (air extérieur 7 °C, air intérieur 20 °C), la pompe à chaleur fournit **5,40 kW de chaleur** tout en consommant **1,31 kW d'électricité**. Le **COP** qui en résulte est de $5,4/1,31 = 4,12$. Environ 4,09 kW de cette chaleur sont extraits de l'air extérieur, tandis que les 1,31 kW restants sont fournis par l'électricité au compresseur.

Cet exemple illustre (1) le bilan énergétique au point de consigne et (2) précise que le COP représente le rapport entre la chaleur totale fournie et la puissance électrique absorbée à des températures de fonctionnement spécifiques.

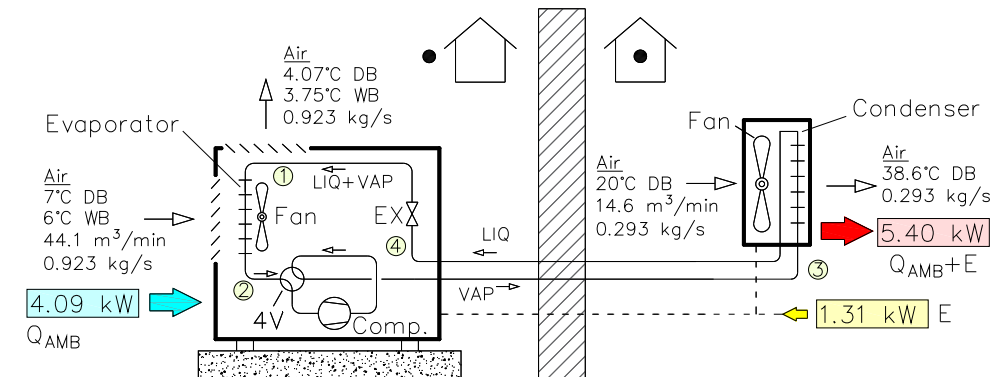
- Les valeurs nominales permettent une comparaison équitable entre les produits testés dans les mêmes conditions.

Plus de détails : lire la section 14.2.4

Extrait du catalogue

Manufacturer	DAIKIN
Type of heat pump	Split air-air
Model (indoor unit + outdoor unit)	FTXA42AW + RXA42B
Refrigerant	R32
Rated heating capacity	5.40 kW
Rated power input	1.31 kW
Rated COP	4.12
Indoor unit fan flow rate	14.6 m ³ /min
Outdoor unit fan flow rate	44.1 m ³ /min

Vue détaillée du point de référence



Pourquoi les pompes à chaleur peuvent-elles atteindre des rendements élevés ? Parce qu'elles exploitent la chaleur ambiante

14.3 Performances instantanées dans des conditions hors conception

- En fonctionnement réel, les pompes à chaleur fonctionnent rarement dans leurs conditions nominales.
- Les températures extérieures varient en permanence, les charges du bâtiment changent, et la pompe à chaleur doit adapter son débit en conséquence. Par conséquent, la puissance de chauffage et de refroidissement, la consommation électrique et le rendement ne sont pas constants.
- Les performances hors conditions de conception jouent donc un rôle crucial pour comprendre le comportement d'une pompe à chaleur tout au long de l'année et pour s'assurer que l'unité choisie peut répondre à la demande dans les conditions les plus exigeantes.
- La puissance de chauffage et de refroidissement, la consommation électrique et le COP (chauffage) ou l'EER (refroidissement) qui en résultent varient principalement en fonction :
 1. des températures de la source et du puits, et de leur différence
 2. du taux de charge partielle

La nécessité de cycles de dégivrage



Co-funded by
the European Union



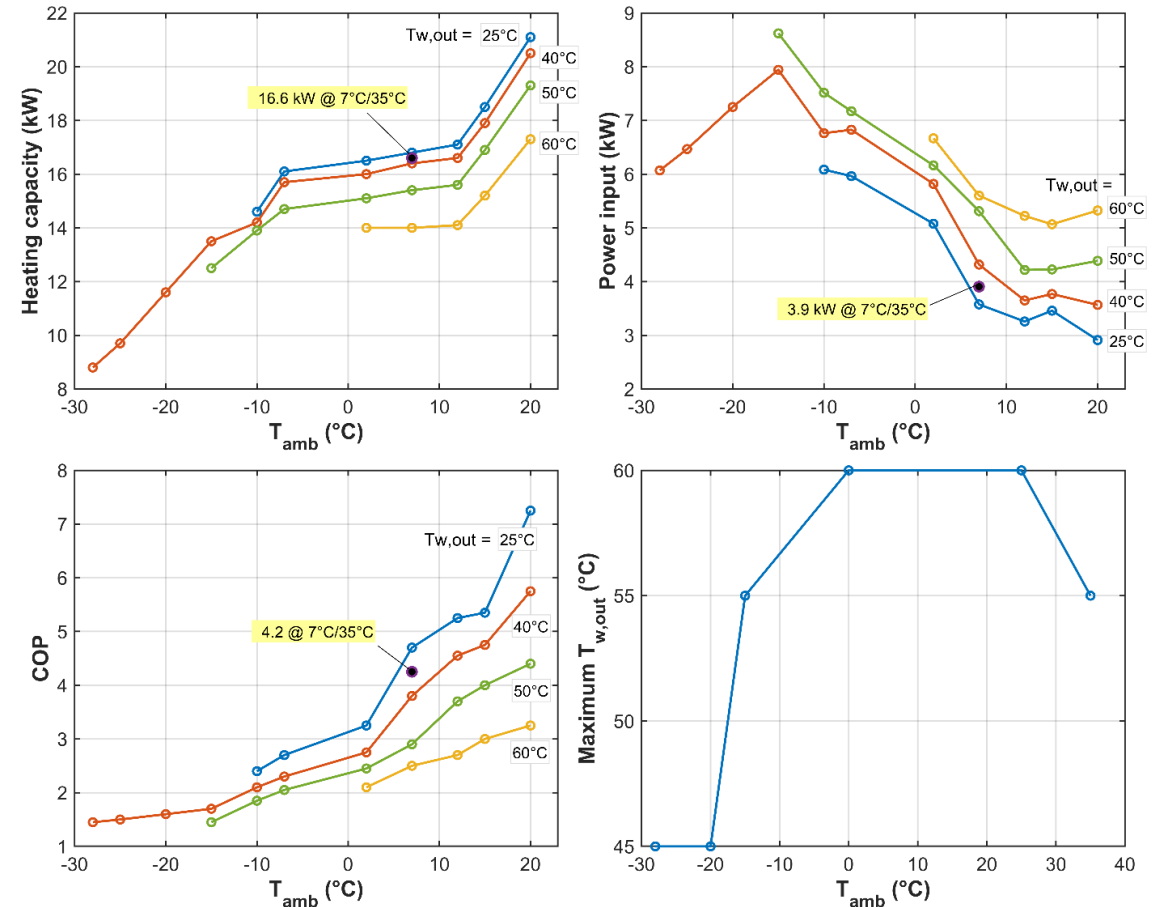
14.3 Performances instantanées dans des conditions hors conception

Effet des températures

- Un facteur clé influençant les performances est l'écart de température, défini comme la différence entre les températures de condensation (T_{cd}) et d'évaporation (T_{ev}) du fluide frigorigène.
- À mesure que l'écart de température augmente ($T_{cd} \uparrow$ et/ou $T_{ev} \downarrow$), le compresseur doit fonctionner à un rapport de pression plus élevé, ce qui augmente la consommation électrique et réduit à la fois la capacité et le rendement
- La figure présente la courbe de performance complète d'une pompe à chaleur air/eau commerciale
- Notez qu'une température ambiante plus basse ($T_{ev} \downarrow$) ou une température de sortie d'eau plus élevée ($T_{cd} \uparrow$) entraîne une baisse de la capacité $\downarrow$, une augmentation de la consommation électrique $\uparrow$ et une baisse du COP $\downarrow$



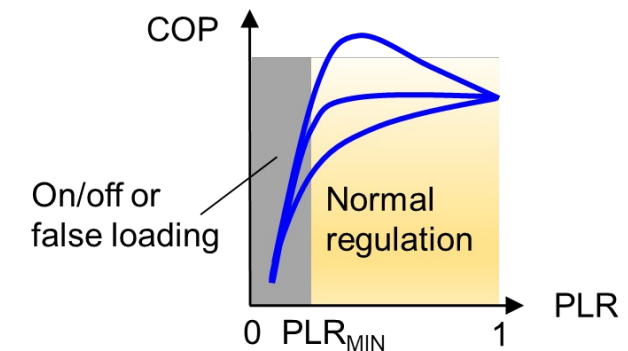
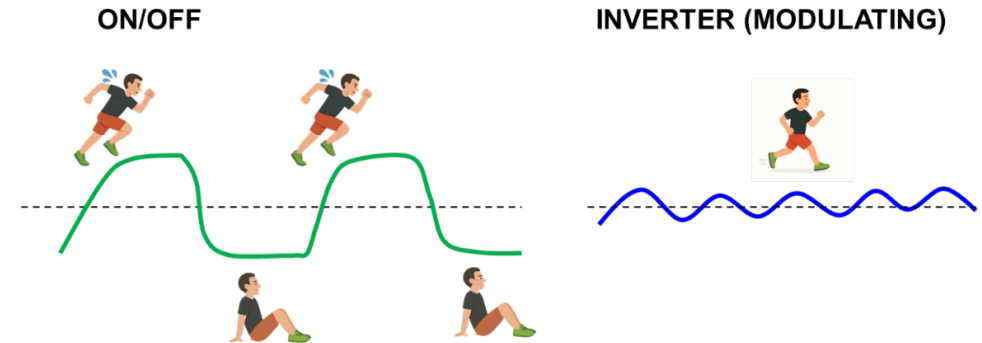
Pour plus de détails : voir la section 14.3.1



14.3 Performances instantanées dans des conditions hors régime nominal

Effet de la charge partielle

- Un autre aspect important du fonctionnement hors conditions de conception est le comportement en charge partielle.
- Les bâtiments ne nécessitent généralement la pleine capacité de chauffage ou de refroidissement que dans des conditions météorologiques extrêmes ; la plupart du temps, les pompes à chaleur fonctionnent à charge partielle
- Le rapport de charge partielle est défini comme le rapport entre la charge réelle et la capacité disponible de la pompe à chaleur.
- Si le compresseur de la pompe à chaleur est à **vitesse fixe**, les conditions de charge partielle sont gérées par des cycles de marche et d'arrêt du compresseur, ce qui entraîne des pertes de rendement dues aux démarrages fréquents
- Les compresseurs à variateur, en revanche, ajustent leur vitesse en fonction de la charge, ce qui permet un fonctionnement continu avec des pertes réduites et un rendement généralement plus élevé, en particulier à des taux de charge partielle modérés
- Les compresseurs à variateur ne peuvent pas réduire leur vitesse en dessous d'environ 30 % de la vitesse maximale en raison de problèmes de retour d'huile dans le circuit frigorifique

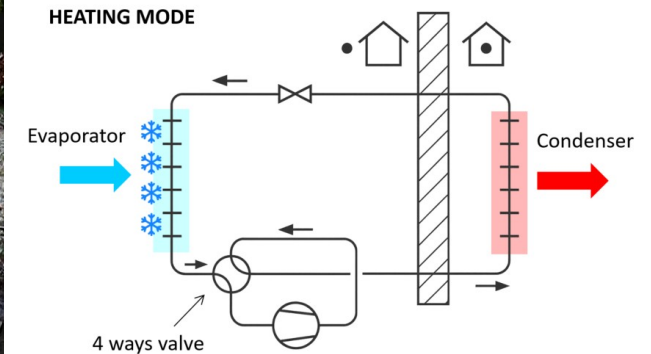


14.3 Performances instantanées dans des conditions hors conception

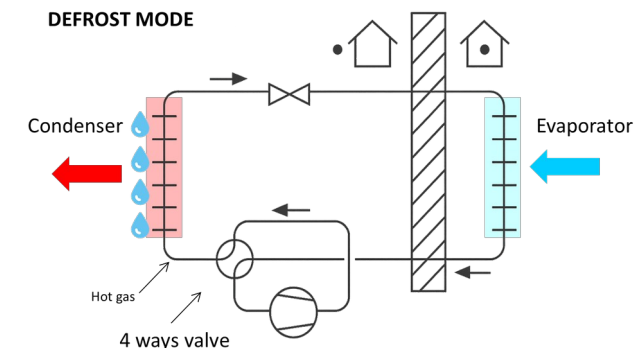
Effet des cycles de dégivrage

- Les pompes à chaleur aérothermiques peuvent nécessiter des cycles de dégivrage en mode chauffage, car l'échangeur de chaleur extérieur fait office d'évaporateur. Lorsque la température de sa surface descend en dessous du point de rosée de l'air ambiant, l'humidité présente dans l'air se condense sur le serpentin. Si les températures descendent en dessous de zéro, ce condensat se transforme en glace, obstruant les canaux d'air et nuisant au transfert de chaleur.
- Pour éliminer le givre, le système passe périodiquement en **mode dégivrage**. La méthode courante consiste à inverser le cycle du fluide frigorigène. Pendant le dégivrage, le chauffage utile est temporairement réduit ou interrompu, et une énergie supplémentaire est consommée.
- C'est pourquoi la norme EN 14511 exige que le fonctionnement en dégivrage soit inclus dans les mesures de performance en conditions de givrage.

Formation de givre dans l'unité extérieure



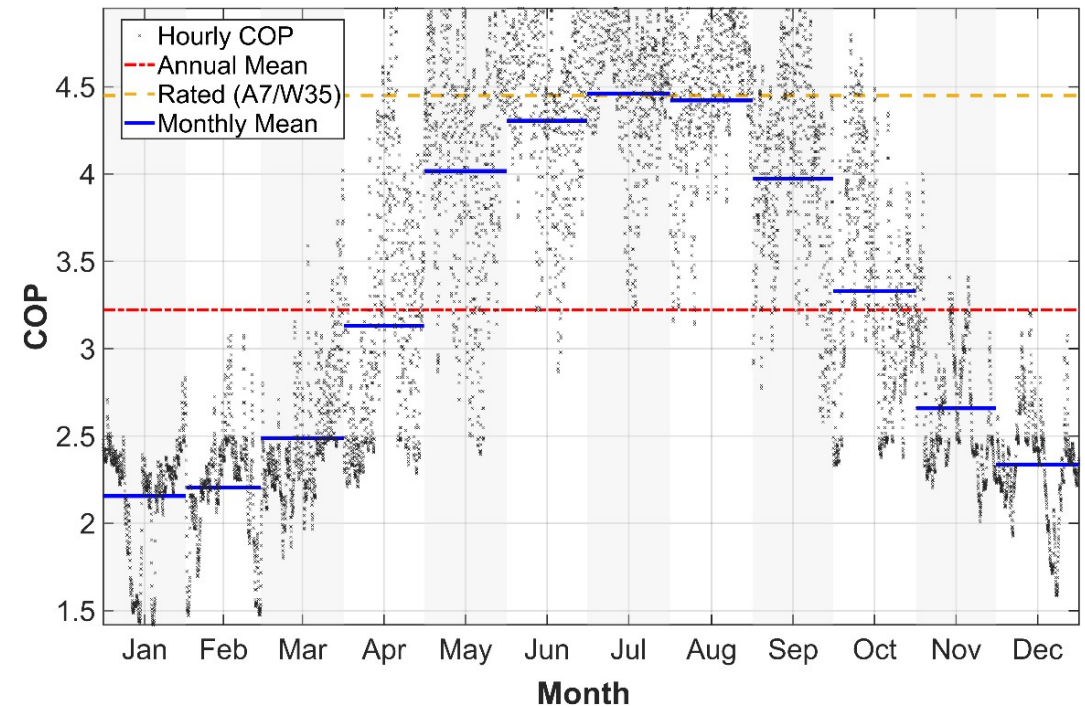
Inverser le cycle pour dégivrer l'unité extérieure en pompant la chaleur du bâtiment vers l'échangeur de chaleur extérieur



14.4 Indicateurs de performance saisonniers

- Les pompes à chaleur fonctionnant dans des conditions en constante évolution (températures, charge partielle et cycles de dégivrage éventuels), les valeurs instantanées de COP ou d'EER ne peuvent pas refléter correctement les performances réelles.
- Les indicateurs de performance saisonniers pallient cette limitation en intégrant l'énergie utile fournie et l'énergie électrique consommée sur une période prolongée (saison, année, etc.).
- Le coefficient de performance saisonnier (SCOP) est utilisé pour le chauffage, tandis que le taux d'efficacité énergétique saisonnier (SEER) est utilisé pour le refroidissement.
- Ces indicateurs, définis par la norme EN 14825, tiennent compte du fonctionnement à charge partielle, des conditions climatiques et de la consommation électrique auxiliaire. Par conséquent, les rendements saisonniers fournissent une estimation plus réaliste des performances annuelles et sont généralement inférieurs aux valeurs nominales.

COP à différents niveaux de temps : instantané (horaire dans ce cas), mensuel et annuel. La valeur nominale est indiquée à titre de référence



$$SCOP = \frac{\sum_{period} Q_{heating}}{\sum_{period} E}$$



Co-funded by
the European Union

Pour plus de détails : voir la section 14.4



14.5 Exigences thermiques et hydrauliques des pompes à chaleur

Les pompes à chaleur ont des exigences de fonctionnement thermiques et hydrauliques spécifiques qui doivent être respectées pour garantir leur efficacité, leur fiabilité et leur longue durée de vie.

Une conception correcte du système doit tenir compte :

- la plage de fonctionnement de la machine,
- les températures d'alimentation et de retour d'eau,
- Le débit d'eau minimal,
- l'inertie thermique minimale du circuit d'eau.

Si ces conditions ne sont pas remplies, même une pompe à chaleur à haut rendement peut présenter des performances médiocres, des cycles fréquents ou des arrêts de sécurité.

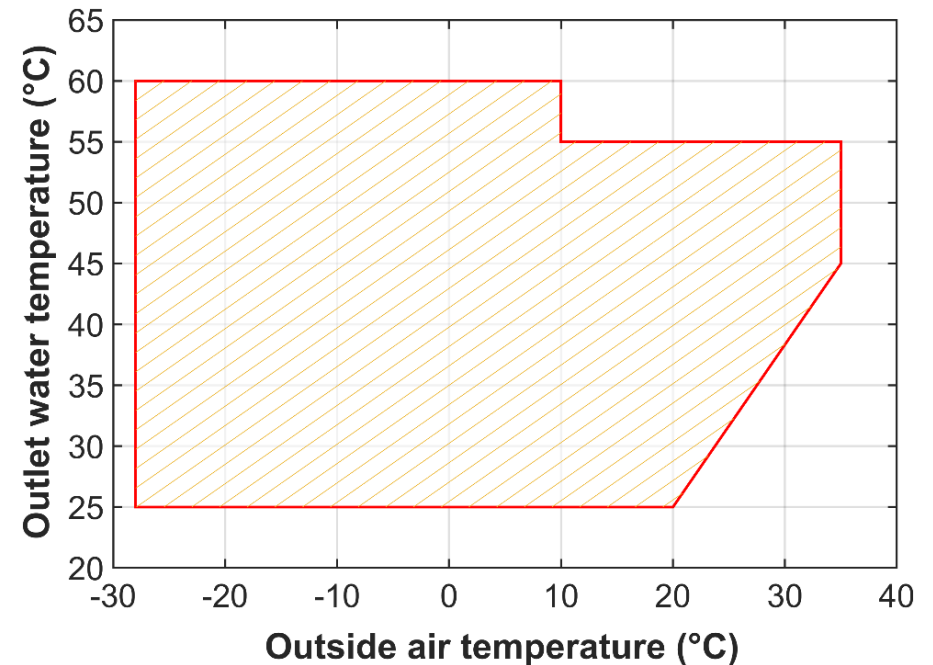
Cette section présente les principales contraintes de conception qui relient la pompe à chaleur au système de distribution de chauffage ou de refroidissement.

14.5 Exigences thermiques et hydrauliques des pompes à chaleur

Enveloppe de fonctionnement

- Les pompes à chaleur ne peuvent fonctionner de manière fiable que dans une plage de fonctionnement définie, qui spécifie la plage admissible des températures de la source et du puits. Cette plage est déterminée par les limites de pression du compresseur, les propriétés du fluide frigorigène et les contraintes de contrôle et de sécurité.
- Un fonctionnement en dehors de ces limites entraîne une dégradation rapide du rendement et peut déclencher des arrêts de sécurité.
- Une conception correcte du système doit donc garantir que la pompe à chaleur fonctionne la plupart du temps dans les zones favorables de l'enveloppe, où le rendement est élevé et les contraintes mécaniques limitées.

Exemple d'enveloppe de fonctionnement

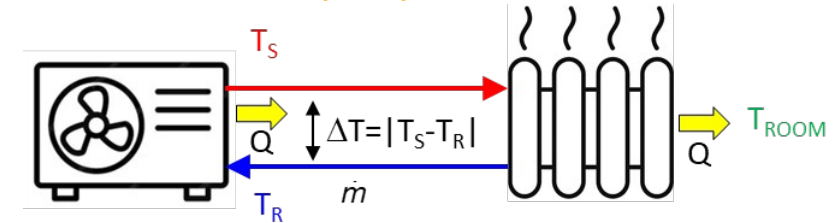


14.5 Exigences thermiques et hydrauliques des pompes à chaleur

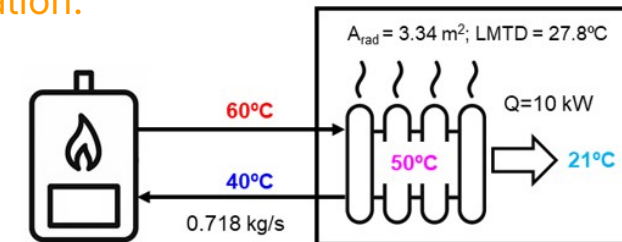
Température de départ et écart de température

- La température de départ du système de chauffage ou de refroidissement a une influence majeure sur le rendement de la pompe à chaleur.
- Température de départ du chauffage :** pour les systèmes à pompe à chaleur, la température de départ doit être maintenue aussi basse que possible tout en répondant à la charge, car des températures plus basses réduisent la pression de condensation et améliorent le COP. Les valeurs typiques sont d'environ 35 °C pour le chauffage par le sol, 45–55 °C pour les radiateurs et les ventilo-convecteurs, et >50 °C pour l'eau chaude sanitaire.
- Différentiel de température de l'eau (ΔT) :** les valeurs de conception typiques pour ΔT sont de 5 à 10 K (elles étaient de 20 K avec les chaudières). Des différences de température plus importantes réduisent le gradient de température entre les émetteurs et la pièce, ce qui nécessite des surfaces d'émission de chaleur surdimensionnées pour fournir la même puissance thermique.
- Fonctionnement en refroidissement :** en mode refroidissement, la température de l'eau d'alimentation doit être aussi élevée que possible afin d'améliorer le taux de rendement énergétique (EER) en réduisant le travail du compresseur. Les températures d'alimentation typiques varient entre 7 et 18 °C, avec un $\Delta T \approx 4\text{--}6$ K, en fonction de l'unité terminale, des exigences de confort intérieur et du risque de condensation d'eau sur les surfaces froides.

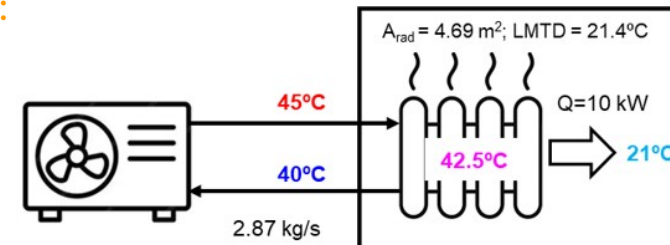
Températures d'alimentation et de retour et ΔT dans le circuit d'eau d'une pompe à chaleur



Niveaux typiques dans les systèmes de chaudières à condensation:



Niveaux typiques dans les systèmes à pompe à chaleur:



14.5 Exigences thermiques et hydrauliques des pompes à chaleur

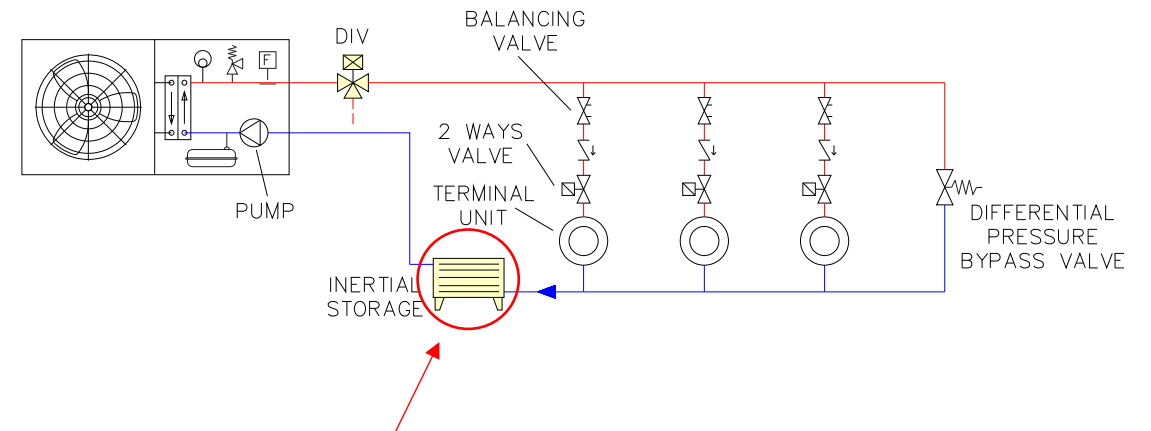
Débits minimaux et nominaux, inertie thermique

- Un débit d'eau adéquat dans l'échangeur de chaleur de la pompe à chaleur est essentiel pour un fonctionnement sûr et efficace. Chaque unité a un **débit minimal admissible** en dessous duquel le transfert de chaleur devient insuffisant et des dommages au compresseur peuvent survenir. Cette exigence est très importante pour la conception hydraulique du circuit d'eau (Leçon 17)
- Une inertie thermique** suffisante dans le circuit d'eau est nécessaire pour éviter les cycles courts (mise en marche/arrêt rapide du compresseur), en particulier en fonctionnement à charge partielle. L'inertie thermique peut être assurée par le volume d'eau du système lui-même ou par l'installation d'un réservoir tampon. Le fabricant de la pompe à chaleur indiquera toujours le volume d'eau minimum dont la pompe à chaleur doit disposer pour fonctionner. Les valeurs indicatives pour les pompes à chaleur modernes sont de 2,5 à 3,5 litres/kWt

Débit d'eau minimal indicatif traversant la pompe à chaleur

Heat pump nominal power (kW)	3 – 4	5 – 6	7 – 8	9 – 10	11 – 12	14 – 16	18 – 25
Minimum flow rate as a percentage of the nominal flow rate	80 %	70%	60%	55%	50%	45%	40%

Exemple de circuit de distribution d'eau



Petit réservoir d'eau (par exemple 30 litres pour une pompe à chaleur de 10 kW) assurant l'inertie thermique minimale ; plus de détails dans la leçon 17

LEÇON 15

Émetteurs de chaleur pour les systèmes à pompe à chaleur



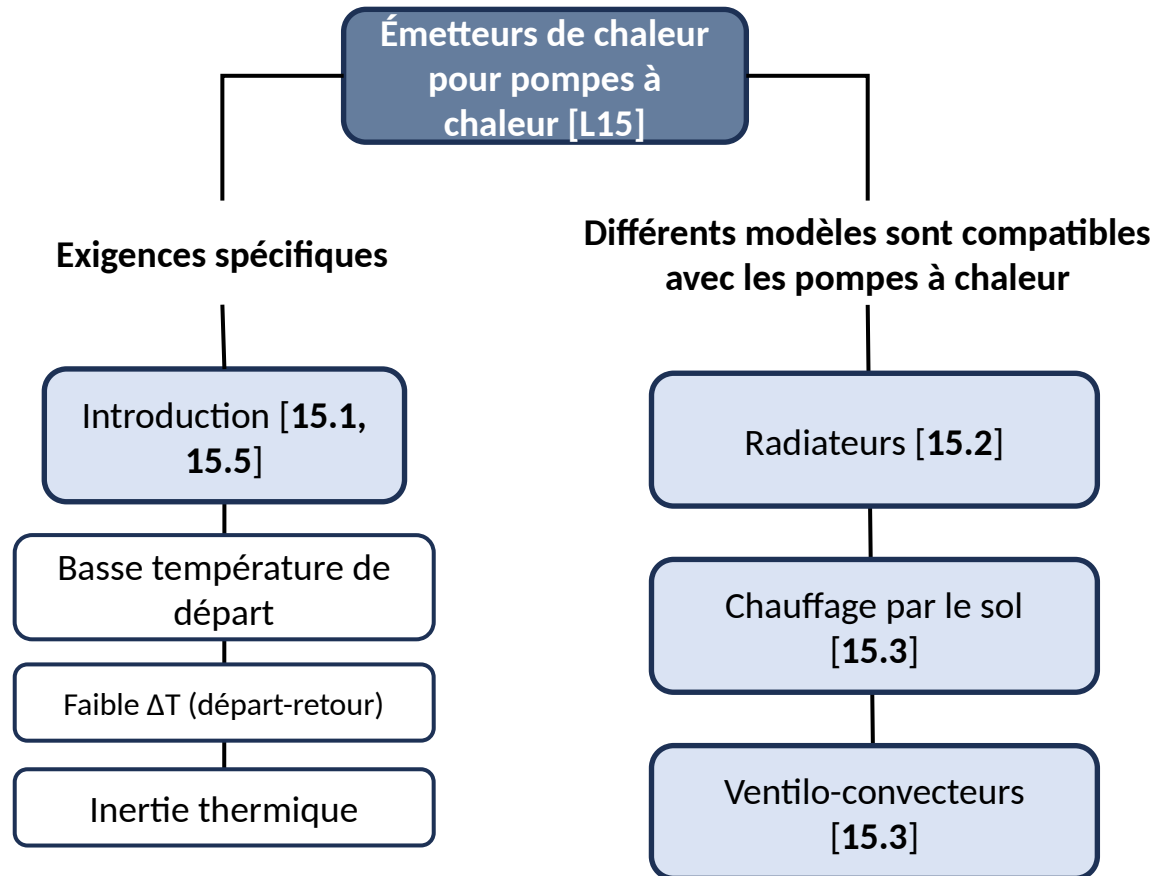
Co-funded by
the European Union



Objectifs de la leçon 15

1. Comprendre le rôle des émetteurs de chaleur (unités terminales) dans les systèmes de pompes à chaleur hydroniques et comment leurs températures de fonctionnement influent sur le rendement global du système.
2. Comparer les radiateurs, le chauffage par le sol et les ventilo-convecteurs en termes de mécanismes de transfert de chaleur, d'inertie thermique et d'adéquation au fonctionnement des pompes à chaleur à basse température.
3. Analyser les implications de la conversion des systèmes à haute température existants en pompes à chaleur, y compris les impacts sur la puissance calorifique, les débits d'eau et les choix de conception du système.

Contenu de la leçon 15



Co-funded by
the European Union



15.1 Introduction

- Les émetteurs de chaleur, également appelés unités terminales, sont les composants d'un système de chauffage ou de refroidissement hydronique qui transfèrent l'énergie thermique du circuit d'eau de la pompe à chaleur vers les espaces intérieurs climatisés.
- Leur choix est une décision de conception cruciale, car les pompes à chaleur fonctionnent de manière plus efficace à des températures de départ relativement basses (départ < 50 °C)
- Le type d'émetteur utilisé a donc un impact direct sur les performances globales, le rendement saisonnier et le confort fournis par le système.
- Dans les projets de rénovation, les émetteurs de chaleur constituent une contrainte majeure, car les systèmes initialement conçus pour des chaudières à haute température doivent souvent fonctionner à des températures plus basses lorsqu'une pompe à chaleur est installée. Il est donc essentiel d'évaluer la compatibilité des émetteurs existants pour garantir la faisabilité technique et économique de la rénovation.

Cette leçon se concentre sur les unités terminales les plus couramment utilisées dans les systèmes à pompe à chaleur et analyse leur adéquation tant pour les nouvelles installations que pour les projets de



Pour plus de détails : lire la section 15.1



15.2 Radiateurs

Définition

- Les radiateurs sont des terminaux hydroniques dans lesquels de l'eau chauffée circule à travers un corps métallique qui diffuse la chaleur dans la pièce par une combinaison de convection et de rayonnement thermique. Dans les bâtiments résidentiels, la convection représente généralement la plus grande partie du transfert de chaleur.
- Les performances d'un radiateur dépendent de ses matériaux et de sa construction. Les radiateurs **en fonte** présentent une inertie thermique élevée et une réponse lente, les radiateurs à **panneaux en acier** ont une inertie modérée et sont largement utilisés, tandis que **les radiateurs en aluminium** ont une faible inertie thermique et une réponse dynamique rapide.
- Les radiateurs sont traditionnellement évalués à une différence de température ΔT de 50 °C, ce qui correspond aux températures de départ élevées typiques des systèmes de chaudière (ΔT est la différence entre la température moyenne du radiateur et la température ambiante)

Radiateur en aluminium (à gauche), radiateur en acier (au centre), radiateur en fonte (à droite)



Co-funded by
the European Union



Pour plus de détails : voir la section 15.2



15.2 Radiateurs

Puissance thermique

- La puissance thermique d'un radiateur dépend du coefficient global de transfert thermique, de la surface d'émission et de la différence de température entre le radiateur et la pièce. Les coefficients globaux de transfert thermique varient généralement entre 10 et 15 W/m²K (convection + rayonnement)
- Les fabricants indiquent généralement la puissance thermique par élément de radiateur pour différentes valeurs de ΔT . Par exemple, dans le modèle de la figure, un seul élément de radiateur émet 63,7 W pour $\Delta T = 30$ °C. Pour répondre à une charge thermique de pointe de 900 W, il faudrait au total 15 éléments
- L'équation caractéristique, utilisant un exposant (**n**) généralement compris entre 1,25 et 1,35, permet d'estimer la puissance du radiateur à différents niveaux de température lorsqu'un seul point de référence est

Exemple de tableau de dimensionnement des radiateurs

Model	Heat emission					
	ΔT 20	ΔT 30	ΔT 40	ΔT 50	ΔT 60	ΔT 70
	W/elem.	W/elem.	W/elem.	W/elem.	W/elem.	W/elem.
350/100	28,6	48,0	69,4	92,4	116,8	142,3
500/100	37,6	63,7	92,7	124,0	157,2	192,1
600/100	43,5	73,8	107,3	143,5	181,9	222,3
700/100	48,3	82,6	120,9	162,5	206,8	253,6
800/100	52,7	90,3	132,4	178,2	227,1	278,8

Model	Code	Width	Height	Axis-axis	Length	Connection diameter	Water content	Exponent	Coefficient
		(C) mm	(B) mm	(A) mm	(D) mm	inches	l/liter/elem.	n	Km
350/100	VC05xx014	97	407	350	80	G1	0,24	1,2818	0,613
500/100	VC05xx034	97	557	500	80	G1	0,27	1,3027	0,758
600/100	VC05xx044	97	657	600	80	G1	0,29	1,3015	0,882
700/100	VC05xx054	97	757	700	80	G1	0,35	1,3238	0,915
800/100	VC05xx064	97	857	800	80	G1	0,38	1,3301	0,979

$$Q = Q_{nom} \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{nom}} \right)^n$$

15.2 Radiateurs

Radiateurs dans les projets de rénovation

- Dans les projets de rénovation, les radiateurs initialement conçus pour les systèmes de chaudière fonctionnent souvent à des températures réduites lorsqu'ils sont raccordés à une pompe à chaleur

Exemple :

Installation d'origine

Générateur de chaleur : chaudière à gaz
Température de départ/retour : 70 °C/50 °C ($\Delta T_{\text{eau}} = 20 \text{ °C}$)
Température ambiante = 20 °C
Différence entre la température du radiateur et la température ambiante
 $(\Delta T) = (70+50)/2 - 20 = 40 \text{ °C}$
Puissance calorifique = **800 W**
Débit d'eau = 0,57 litre/min

Installation rénovée

Générateur de chaleur : pompe à chaleur
Température aller/retour : 50 °C/40 °C ($\Delta T_{\text{eau}} = 10 \text{ °C}$)
Température ambiante = 20 °C

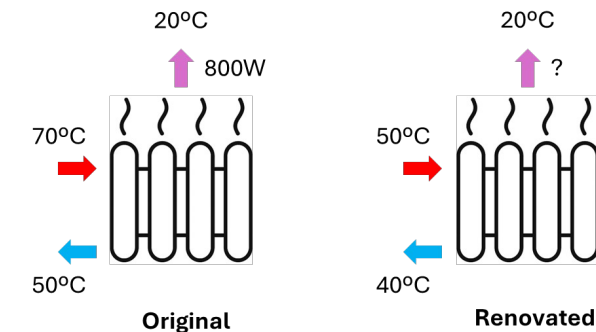
Radiator – room temperature difference

$$(\Delta T) = (50+40)/2 - 20 = 25 \text{ °C}$$

Heat emission. Assuming $n=1.3$ and applying the characteristic equation

$$Q = 800 \left(\frac{\Delta T}{40} \right)^{1.3} = \left(\frac{25}{40} \right)^{1.3} = \mathbf{434.24W}$$

Water flow = 0.62 liter/min for the new Q and ΔT_{water}



- Les radiateurs existants peuvent rester viables s'ils sont surdimensionnés, si les besoins en chauffage du bâtiment sont réduits grâce à l'isolation et à la rénovation des fenêtres, ou si des émetteurs supplémentaires ou à ventilation assistée sont installés.

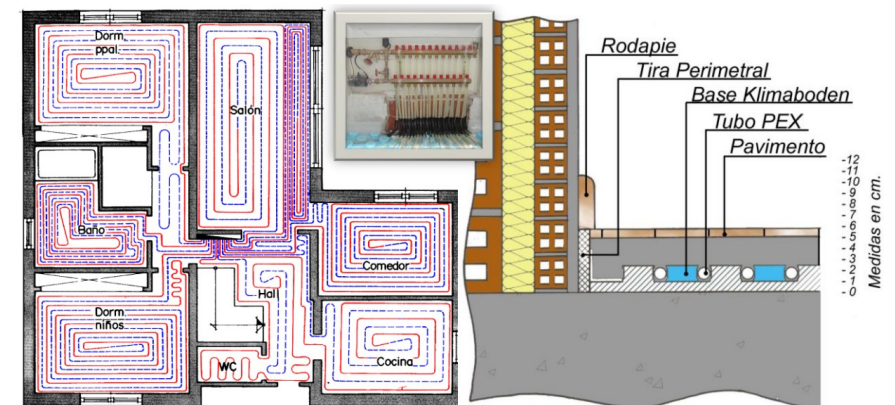
15.3 Chauffage par le sol

- Le chauffage par le sol est un système de chauffage par rayonnement dans lequel de l'eau chaude circule dans des tuyaux en plastique encastrés dans le sol des pièces, transférant ainsi la chaleur sur une grande surface.
- Grâce à cette grande surface, le chauffage par le sol peut assurer un chauffage adéquat des pièces avec des températures d'eau d'alimentation basses, généralement comprises entre 30 °C et 45 °C. Les flux thermiques maximaux varient généralement entre 50 et 70 W/m², ce qui est suffisant pour la plupart des bâtiments bien isolés.
- Les températures de surface du sol sont généralement limitées à environ 29 °C pour des raisons de confort et de sécurité.
- Les systèmes de chauffage par le sol ont une masse thermique élevée et des temps de réponse lents, dépassant souvent une heure, mais ils offrent des températures intérieures très stables et sont **parfaitement compatibles avec le fonctionnement d'une pompe à chaleur**.

Exemple de tuyauterie au sol



Exemple de répartition des circuits dans une maison



Co-funded by
the European Union



Pour plus de détails : voir la section 15.3

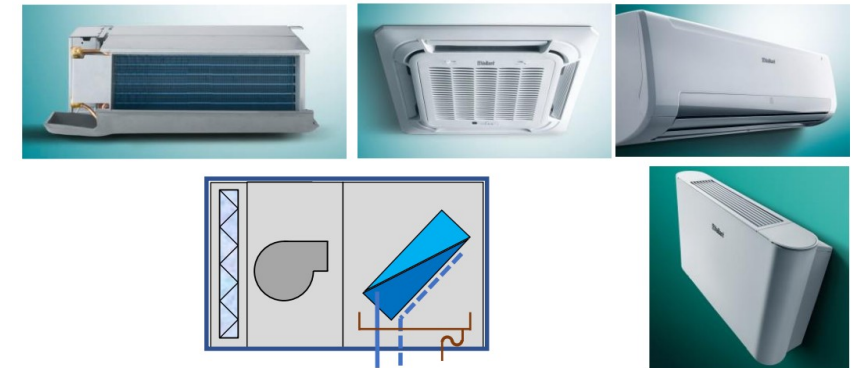


15.4 Ventilo-convecteurs

- Les ventilo-convecteurs sont des terminaux hydroniques qui utilisent la convection à air pulsé pour transférer la chaleur entre le circuit d'eau et l'air intérieur.
- Ils se composent d'un échangeur de chaleur à ailettes et d'un ventilateur intégré qui fait circuler activement l'air à travers le serpentin.
- En **mode chauffage**, les ventilo-convecteurs modernes peuvent fonctionner efficacement avec des températures d'eau comprises entre 45 et 50 °C, ce qui les rend adaptés aux systèmes à pompe à chaleur.
- En **mode refroidissement**, les ventilo-convecteurs utilisent généralement de l'eau glacée à environ 7–12 °C, ce qui permet à la fois un refroidissement sensible et une déshumidification par condensation.

Cette double fonctionnalité rend les ventilo-convecteurs particulièrement utiles dans les systèmes nécessitant un chauffage et un refroidissement tout au long de l'année.

Différents modèles de ventilo-convecteurs (source : ATECYR)



Co-funded by



Pour plus de détails : voir la section 15.4



15.5 Niveaux de température

- Les systèmes à pompe à chaleur fonctionnent à **des niveaux de température** nettement **inférieurs à ceux des systèmes à chaudière traditionnels**.
- Les radiateurs adaptés aux pompes à chaleur utilisent généralement des températures d'alimentation et de retour d'environ 55 °C/45 °C, tandis que les ventilo-convecteurs fonctionnent à environ 45 °C/40 °C en mode chauffage. Les systèmes de chauffage par le sol fonctionnent généralement à 30 °C/25 °C.
- Pour les applications de refroidissement, les planchers radiants fonctionnent généralement à environ 15 °C/20 °C, tandis que les ventilo-convecteurs nécessitent une eau plus froide, généralement entre 7 °C et 12 °C, pour assurer un refroidissement et une déshumidification efficaces.

Ces niveaux de température réduits sont essentiels pour maintenir un rendement élevé de la pompe à chaleur et des performances fiables du système.

Application	TRADITIONNEL Aller/retour (°C)	ADAPTÉ À LA POMPE À CHALEUR Aller/retour (°C)
Eau chaude sanitaire (circuit primaire)	80/60	60/50(*)
Radiateurs	60/40	55/45
Ventilo-convecteurs	50/40	45/40
Planchers radiants (chauffage)	35/30	30/25
Planchers radiants (refroidissement)	14/18	15/20
Réfrigération	7/12	10/15
(*) peut être réduit dans les ménages		

← Idéal à combiner avec une pompe à chaleur (pour le chauffage)



Co-funded by
the European Union



Pour plus de détails : voir la section 15.5

LEÇON 16

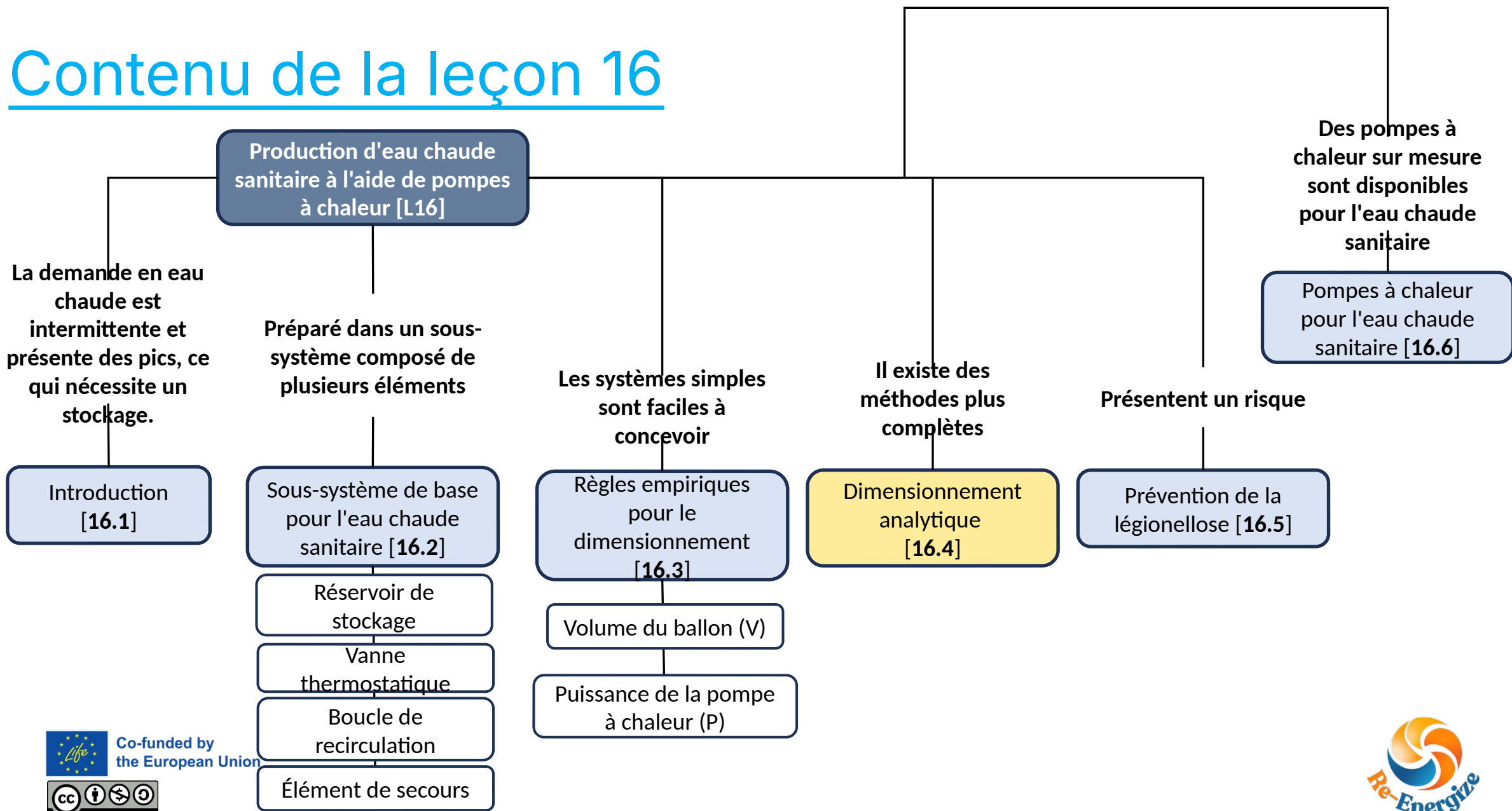
Production d'eau chaude sanitaire à l'aide de pompes à chaleur

Objectifs de la leçon 16

1. Comprendre les défis liés à la production d'eau chaude sanitaire à l'aide de pompes à chaleur, en particulier le décalage entre la demande instantanée en eau chaude et la puissance thermique limitée ainsi que le temps de réponse des pompes à chaleur résidentielles.
2. Identifier et décrire les principaux composants des sous-systèmes d'eau chaude sanitaire dans les installations à pompe à chaleur : réservoirs de stockage, échangeurs de chaleur, vannes de mélange, boucles de recirculation et chauffages d'appoint, en accordant une attention particulière aux niveaux de température et aux exigences en matière d'hygiène.
3. Appliquer les principes pratiques de dimensionnement et les méthodes d'analyse de base pour sélectionner les volumes de stockage d'eau chaude sanitaire et les capacités de pompe à chaleur appropriés, en tenant compte des profils de demande des utilisateurs, du temps de récupération, de l'efficacité énergétique et des contraintes liées à la prévention de la légionellose.



Contenu de la leçon 16



Co-funded by
the European Union



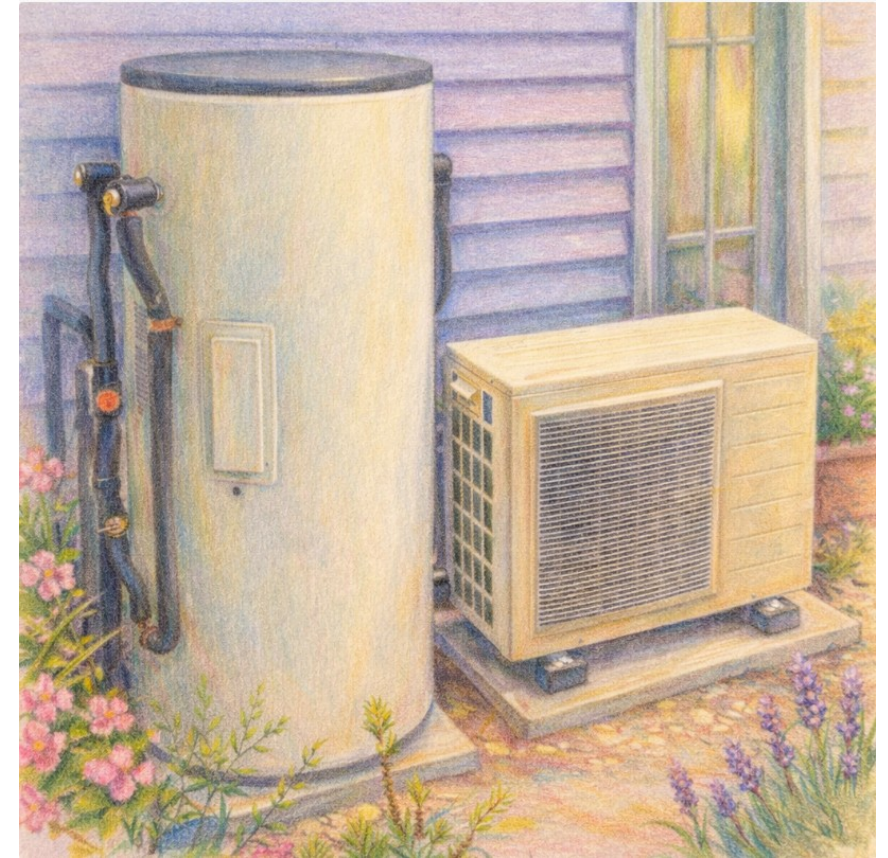
16.1 Introduction

- L'eau chaude sanitaire, abrégée en ECS, désigne l'approvisionnement en eau chaude potable destinée à des usages sanitaires tels que les douches, les lavabos et les appareils ménagers.
- Dans les bâtiments résidentiels, la température de l'eau chaude fournie au point d'utilisation se situe généralement entre 40 °C et 45 °C, tandis que des températures plus élevées sont nécessaires lors de la préparation pour garantir l'hygiène et une capacité de stockage suffisante.
- Dans les systèmes à pompe à chaleur, la production d'eau chaude sanitaire pose des défis spécifiques car la demande en eau chaude est très intermittente et concentrée sur de courtes périodes, alors que les pompes à chaleur fournissent une puissance thermique relativement faible et constante. C'est pourquoi les systèmes d'eau chaude sanitaire utilisant des pompes à chaleur **s'appuient toujours sur des réservoirs de stockage thermique** qui servent de tampons énergétiques entre la production et la consommation.

16.1 Introduction

- Une pompe à chaleur domestique fournit généralement une puissance thermique d'environ 5 à 10 kW
- Une simple douche nécessite une puissance de chauffage instantanée bien supérieure. Par exemple, une douche délivrant 12 L/min à 45 °C à partir d'une température d'entrée d'eau froide de 10 °C nécessite environ 30 kW de puissance thermique. Pour une douche de 5 minutes, la demande énergétique totale est d'environ 2,44 kWh
- Comme une pompe à chaleur ne peut pas fournir cette puissance instantanément, l'énergie doit être stockée à l'avance
- Les réservoirs de stockage dans les maisons individuelles ont généralement une capacité comprise entre 180 et 250 L, ce qui permet de prendre plusieurs douches consécutives pendant que la pompe à chaleur recharge progressivement le réservoir.

Pour plus de détails : voir la section 16.1



Pompe à chaleur air/eau avec réservoir de stockage d'eau chaude

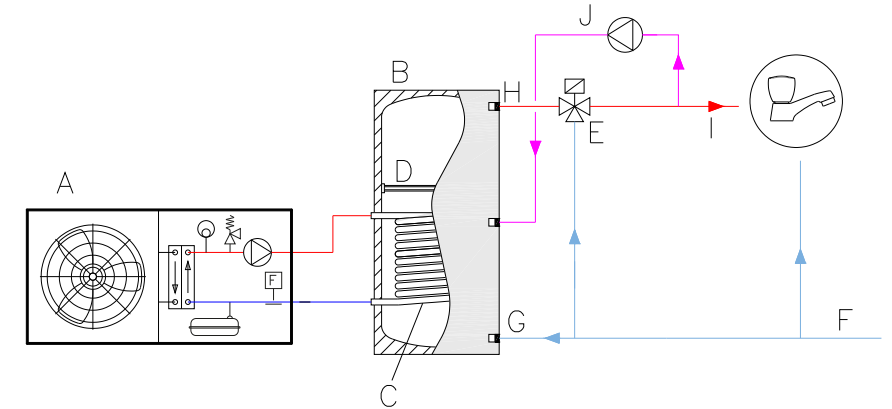


Co-funded by
the European Union



16.2 Sous-système de base pour l'eau chaude sanitaire

- Le sous-système d'eau chaude sanitaire d'une installation à pompe à chaleur se compose de plusieurs éléments clés.
- La pompe à chaleur (**A**) transfère l'énergie thermique vers un ballon de stockage via un échangeur de chaleur interne ou externe (**C**), généralement un serpentin immergé dans le ballon.
- Le ballon de stockage maintient l'eau chaude à une température de consigne typique de 50 à 55 °C et est conçu pour favoriser la stratification thermique, l'eau chaude s'accumulant en haut et l'eau plus froide restant en bas.
- Un chauffage électrique à résistance (**D**) est souvent intégré pour répondre aux pics de demande ou pour élever la température de l'eau au-dessus de 60 °C à des fins de désinfection hygiénique.
- Une vanne mélangeuse thermostatique (**E**) en aval du réservoir mélange l'eau chaude (**H**) et l'eau froide (**F**, réseau) afin de fournir une eau à température sûre aux robinets et aux douches (**I**).
- Le circuit de recirculation (**J**) utilise une petite pompe pour faire circuler l'eau chaude dans le réseau de distribution indépendamment de la demande des utilisateurs, garantissant ainsi que l'eau dans les tuyaux reste chaude et immédiatement disponible à chaque point de prélèvement.



Circuit type d'eau chaude sanitaire avec une pompe à chaleur air/eau

16.3 Règles empiriques pour le dimensionnement

Volume du ballon (V)

- Le ballon d'eau chaude sanitaire sert de réservoir tampon d'énergie, et son volume doit être adapté à la demande du foyer.
- Une règle empirique courante en Europe consiste à prévoir entre 35 et 45 L d'eau chaude stockée par personne à environ 55 °C.
- Pour un **petit foyer d'une à deux personnes**, un réservoir de 100 à 150 L est souvent suffisant.
- **Les ménages de taille moyenne, comptant trois à quatre occupants**, ont généralement besoin de 180 à 200 L, ce qui permet de prendre deux à trois douches consécutives de 5 minutes à un débit de 12 L/min.
- **Les grands ménages de cinq personnes ou plus** utilisent souvent des réservoirs de 250 à 300 L.

Les systèmes à pompe à chaleur nécessitent généralement des réservoirs légèrement plus grands que les systèmes à chaudière en raison de leur puissance de charge inférieure (50 litres supplémentaires pour les pompes à chaleur).



Réservoirs de différentes tailles

Pour plus de détails : voir la section 16.3.1

16.3 Relation entre le volume du réservoir et la puissance de la pompe à chaleur à chaleur

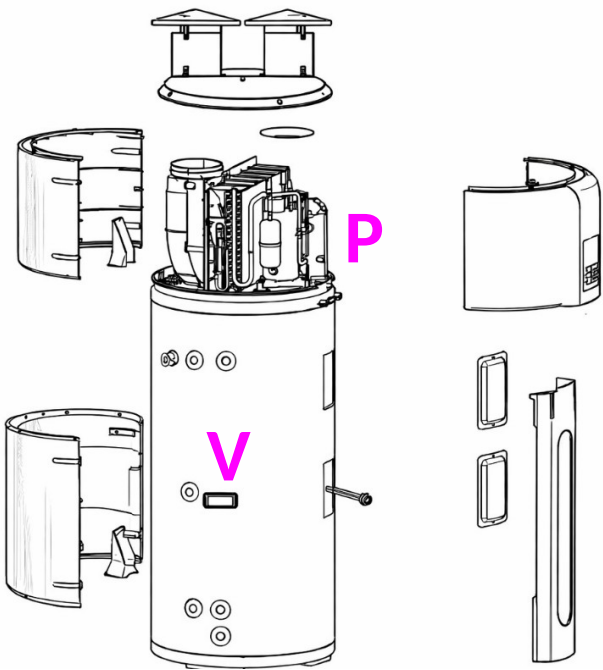
Puissance de la pompe à chaleur (P)

- La relation entre le volume du réservoir et la puissance de la pompe à chaleur dépend du **temps de récupération** souhaité, défini comme le **temps nécessaire pour réchauffer le réservoir après une décharge complète**.
- Pour une élévation de température typique de 40 K, on considère en pratique qu'il faut environ 22 L de volume de stockage par kilowatt de puissance de la pompe à chaleur pour chaque heure de temps de récupération. Par exemple, un système conçu pour une récupération en 2 heures nécessite environ 40 à 45 L par kW, tandis qu'une récupération plus lente de 4 heures peut nécessiter plus de 80 L par kW. Des temps de récupération plus longs permettent d'utiliser des pompes à chaleur plus petites, mais limitent la disponibilité d'eau chaude pendant les périodes de pointe.

Temps de récupération (heures)	Rapport V/P typique (litres d'eau chaude sanitaire/kW)	Remarque
1	20-25 L/kW	Récupération rapide
2	40-45 L/kW	Recommandé pour les installations domestiques
3	60-65 L/kW	
4 +	80 L/kW et plus	Pics de demande importants et récupération plus lente



Pour plus de détails : voir la section 16.3.2



Ballon d'eau chaude à pompe à chaleur



16.4 Dimensionnement analytique et notion de demande de pointe

Une méthode analytique simple permettant d'étudier plus en détail la relation entre le volume et la puissance de chauffage est décrite à la section 16.4 de la documentation. L'étude de cette méthode est facultative.

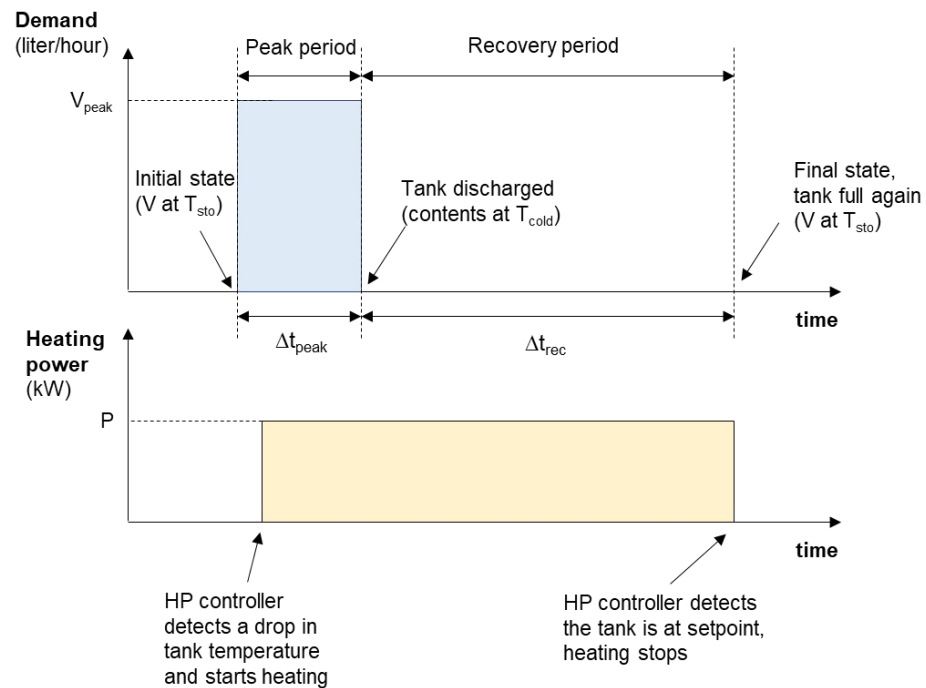


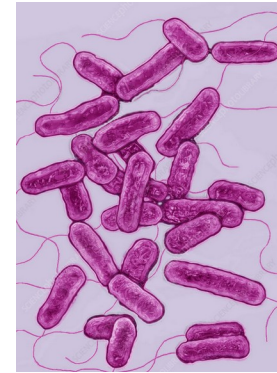
Table 16-4. Example of application of the method. Grey shadow = user input

VARIABLE		VALUE	UNIT	DATA SOURCE/CALCULATION FORMULA
DEMAND AND TEMPERATURES				
A	Reference hot water consumption	4032	liter/day	National regulations
B	Reference temperature	60	°C	National regulations
C	Storage temperature (T_{sto})	55	°C	50°C typical residences, >60°C public buildings
D	Final use temperature (T_{use})	40	°C	Outlet temperature of the tap
E	Cold water temperature	10	°C	Minimum temperature of mains water at the site
F	Daily hot water consumption at T_{sto}	4480.0	liter/day	$=A*(B-E)/(C-E)$
G	Daily hot water consumption at T_{use}	6720.0	liter/day	$=A*(B-E)/(D-E)$
PEAK AND RECOVERY SCENARIOS				
H	% of daily consumption at peak period	60.0%		Calculation hypothesis
I	Peak consumption	2199.3	liter	$=H*F$
J	Duration of peak period	1	hours	Calculation hypothesis
K	Duration of recovery period	3	hours	2 to 4 hours typical
L	Response time of the heat pump	5	min	5 min typical
OTHER DATA				
M	Demand increase due to thermal losses	1.25		>1.25 (sometimes much more if bad insulation)
N	Utilization factor of the storage	0.86		Typical 0.86
STORAGE VOLUME AND HEAT PUMP POWER				
O	Total storage volume	4000	liter	User decision (typical between I and A)
P	HP capacity for peak period	-4.56	kW	$= (M*I-N*O)*4.18*(C-E)/((J-L/60)*3600)$
Q	HP capacity for recovery period	69.67	kW	$= O*4.18*(C-E)/K/3600$
R	HP capacity	69.67	kW	$= \text{Maximum}(P,Q)$
S	HP capacity	57.42	liter/kW	$= O/R$

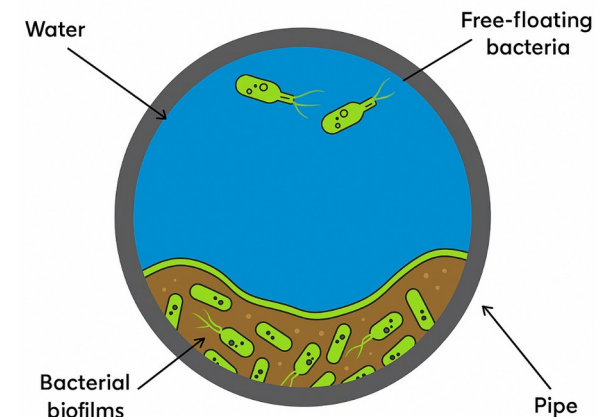
16.5 Prévention de la légionellose

- *Legionella pneumophila* est une bactérie qui peut se multiplier dans les circuits d'eau chaude lorsque les températures se situent entre 20 °C et 45 °C.
- Les systèmes d'eau chaude sanitaire équipés de réservoirs de stockage et de boucles de recirculation sont particulièrement vulnérables en raison des zones de stagnation et des gradients de température.
- Pour réduire ce risque, la plupart des réglementations exigent des températures de stockage d'au moins 60 °C et des températures de recirculation supérieures à 50–55 °C.
- Des cycles de désinfection thermique périodiques portant la température de l'eau au-dessus de 70 °C sont souvent obligatoires.

Ces exigences posent des défis aux pompes à chaleur, qui sont plus efficaces à basse température et peuvent nécessiter des réchauffeurs auxiliaires (résistances électriques) ou des conceptions spéciales pour hautes températures.



Legionella pneumophila

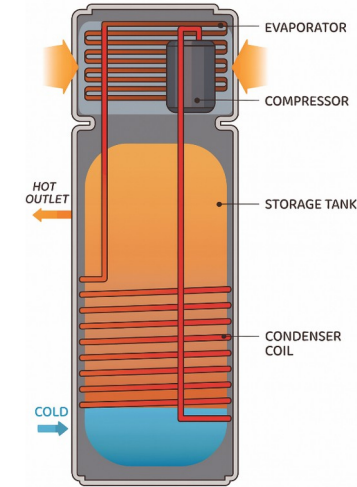


Croissance de la bactérie dans un biofilm

16.6 Pompes à chaleur pour l'eau chaude sanitaire

Les pompes à chaleur dédiées à l'eau chaude sanitaire

intègrent la pompe à chaleur et le ballon de stockage dans une seule unité compacte, généralement d'une capacité comprise entre 150 et 300 litres. Ces systèmes sont généralement à air et extraient la chaleur de l'air extérieur, de l'air intérieur ou de l'air de ventilation. Ils sont largement utilisés dans les maisons individuelles en raison de leur facilité d'installation et de leurs performances prévisibles.



Pour les grands bâtiments ou les bâtiments soumis à une réglementation, tels que les hôtels et les hôpitaux, **les pompes à chaleur à haute température utilisant des fluides frigorigènes comme le CO₂** peuvent produire de l'eau à une température comprise entre 70 et 90 °C, ce qui permet une production efficace d'eau chaude sanitaire tout en respectant pleinement les exigences en matière de prévention de la légionellose.

*Pompe à chaleur pour la production d'eau chaude
Mitsubishi QTON CO₂*



Co-funded by
the European Union



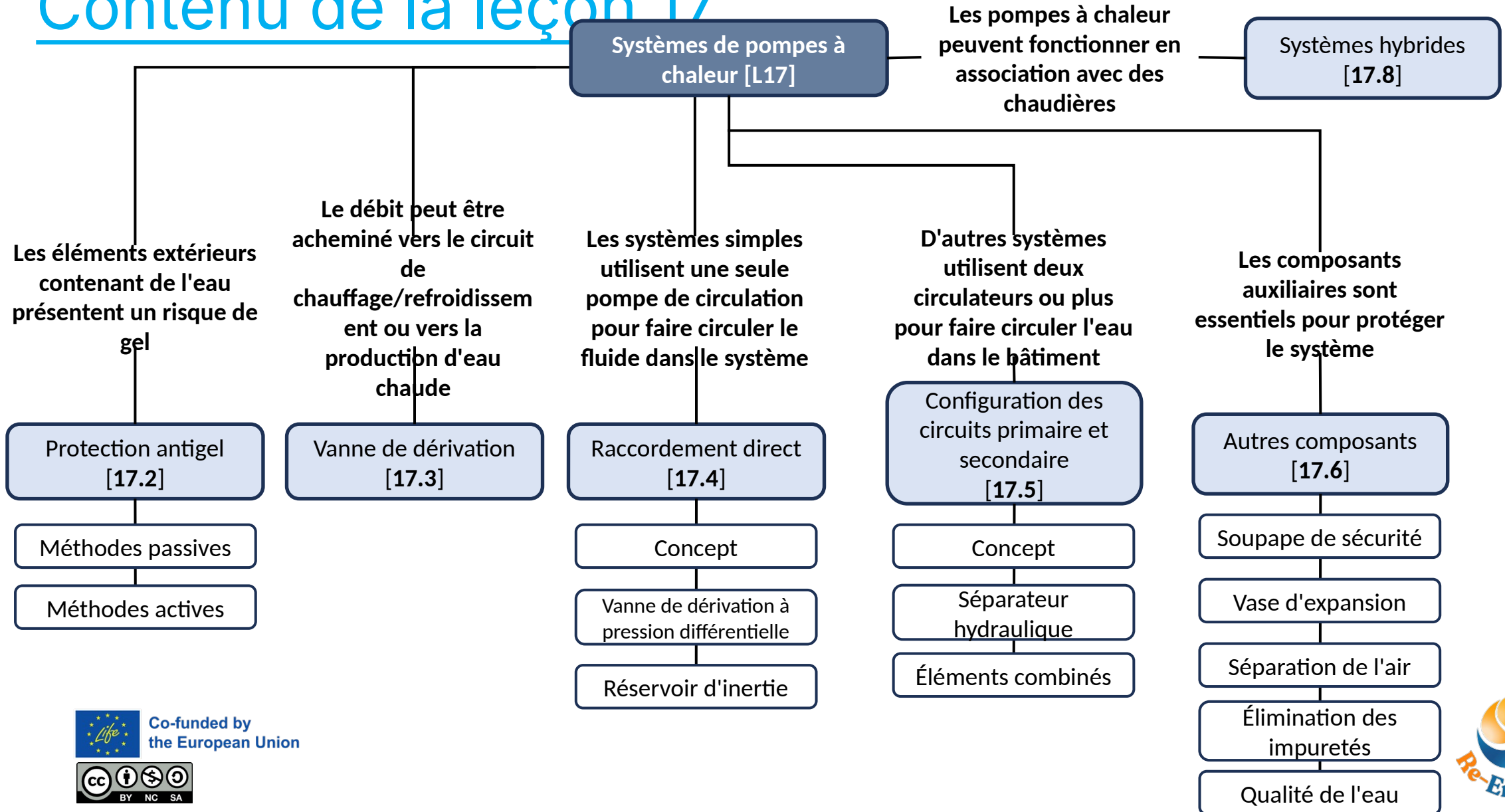
LEÇON 17

Systèmes à pompe à chaleur

Objectifs de la leçon 17

1. Identifier les principaux composants hydrauliques utilisés dans les systèmes de pompes à chaleur et comprendre leurs fonctions pour garantir un fonctionnement sûr, stable et efficace (circulation, protection, séparation et contrôle)
2. Comprendre les différentes configurations hydrauliques (raccordement direct, circuits primaire-secondaire, utilisation de réservoirs tampons et de séparateurs) ainsi que les critères de sélection d'une configuration appropriée
3. Analyser les stratégies de protection et de fiabilité du système, notamment les méthodes antigel, la garantie de débit minimal, le contrôle de la pression, l'élimination de l'air et des impuretés, ainsi que leur impact sur les performances à long terme.

Contenu de la leçon 17



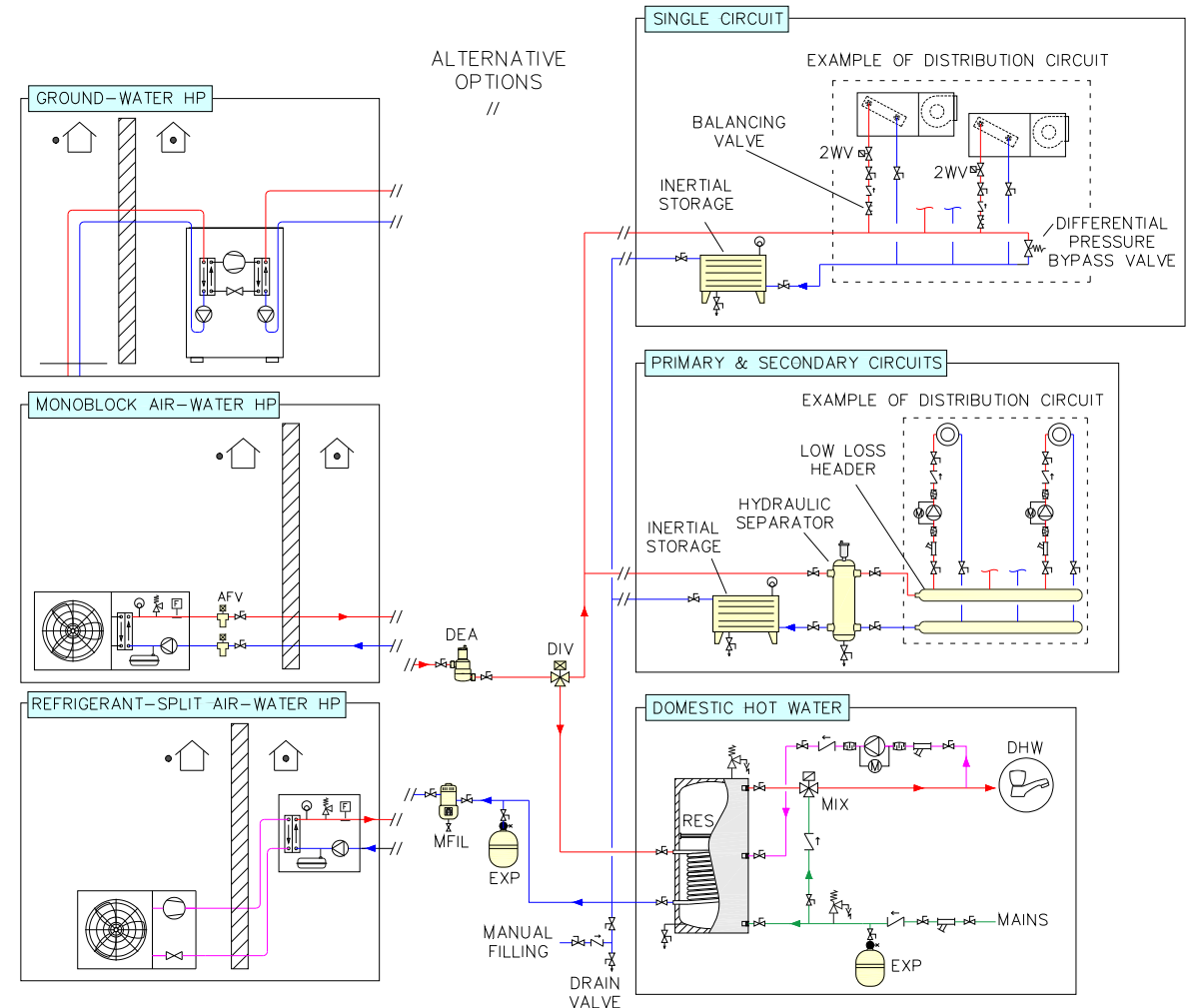
17.1 Aperçu

- Les systèmes de pompes à chaleur nécessitent un ensemble de composants hydroniques qui relient la pompe à chaleur aux charges thermiques du bâtiment, notamment le chauffage, le refroidissement des locaux et la production d'eau chaude sanitaire.
- Ces composants assurent une circulation correcte de l'eau, la distribution de la chaleur, la stabilité hydraulique, le contrôle de la pression, l'élimination de l'air et des impuretés, la gestion de la qualité de l'eau et la protection contre le gel.
- Une intégration adéquate est essentielle pour garantir un fonctionnement stable, prévenir les dommages à la pompe à chaleur et assurer une fiabilité à long terme.

Cette leçon se concentre sur les systèmes hydroniques en boucle fermée généralement utilisés avec les pompes à chaleur air-eau et sol-eau.

17.1 Aperçu

- Les installations de pompes à chaleur pour les circuits d'eau peuvent être basées sur des unités sol-eau ou air-eau, qui peuvent être de configuration monobloc ou split.
 - Du côté hydraulique, deux configurations principales sont couramment utilisées. Dans les systèmes **à raccordement direct**, la pompe à chaleur est raccordée directement au réseau de distribution du bâtiment, partageant le même débit (il n'y a qu'une seule pompe de circulation)
 - Dans les systèmes plus complexes, on utilise **des circuits primaire et secondaire**, séparés hydrauliquement par un réservoir tampon ou un séparateur hydraulique, ce qui permet à la pompe à chaleur et au réseau de distribution de fonctionner avec des débits indépendants.
 - Un sous-système dédié à l'eau chaude sanitaire, comprenant un ballon de stockage et un échangeur
- La pompe à chaleur est généralement raccordée en parallèle comme cela a été analysé dans la leçon 16.



Co-funded by
the European Union



Pour plus de détails : lire la section 17.1



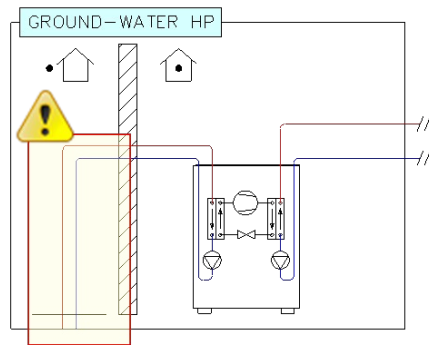
17.2 Protection antigel

Il existe un risque de gel partout où des composants remplis d'eau sont exposés à des températures extérieures inférieures à 0 °C, comme les pompes à chaleur air-eau monoblocs et les boucles d'échangeurs de chaleur géothermiques. Alors que les fluides frigorigènes gèlent à des températures extrêmement basses (par exemple, -136 °C pour le R32 ou -78 °C pour le CO₂), l'eau gèle à 0 °C et peut causer de graves dommages par rupture de tuyaux ou fissuration des échangeurs de chaleur à plaques.

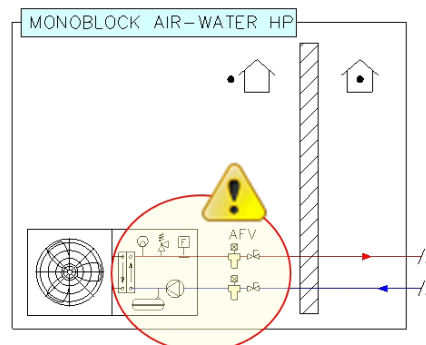
Les stratégies de protection contre le gel peuvent être :

- **Actives**, nécessitant une alimentation électrique, ou
- **Passives**, offrant une protection intrinsèque même en cas de coupure de courant

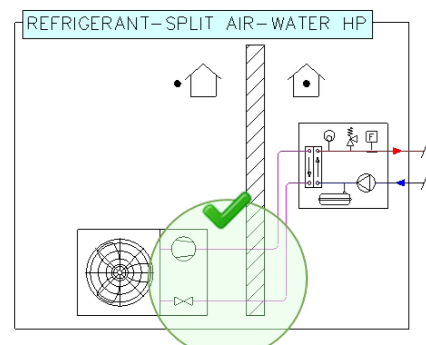
FLUIDE FRIGORIFIQUE	POINT DE CONGÉLATION
Eau	0 °C
R134a	-103,3 °C
R410A	-155 °C
R32	-136 °C
R290	-188 °C
R717	-78 °C
R744	-78,5 °C



Risk of freezing



Risk of freezing



No risk of freezing
(refrigerant lines)



Co-funded by
the European Union



Pour plus de détails : voir la section 17.2



17.2 Protection antigel

La protection active contre le gel comprend :

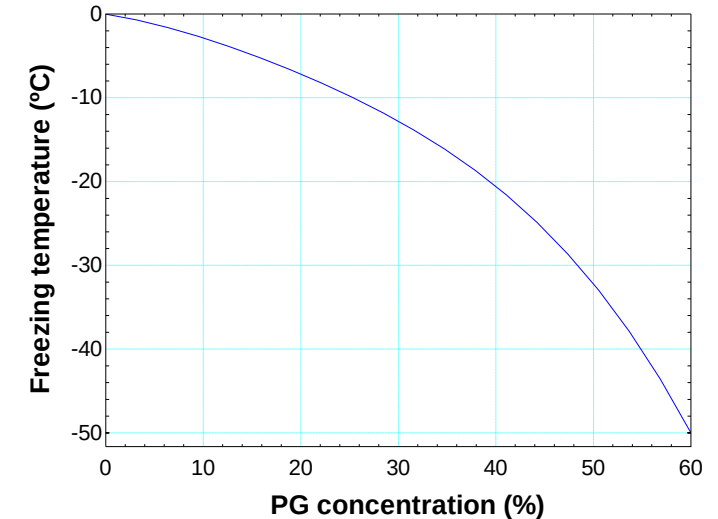
- le fonctionnement intermittent de la pompe de circulation d'eau
- Le fonctionnement du compresseur à basse vitesse afin de maintenir la température de l'eau dans les tuyaux extérieurs au-dessus d'environ 5 °C (condenseur extérieur)
- L'utilisation de câbles chauffants électriques le long des tuyaux et autour de l'échangeur de chaleur réfrigérant-eau

Ces méthodes ne sont efficaces que lorsque l'alimentation électrique est disponible.

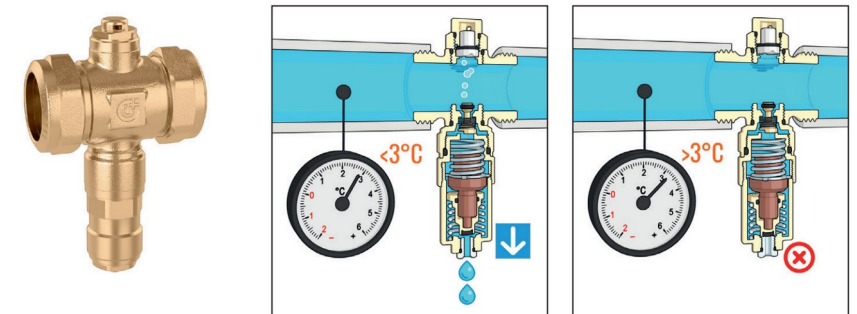
La protection passive utilise :

- Des mélanges de propylène glycol. Par exemple, une solution à 40 % de propylène glycol offre une protection contre le gel jusqu'à environ -20 °C. Le glycol est couramment utilisé dans les boucles géothermiques et, de manière sélective, dans les circuits extérieurs des systèmes air-eau.
- Des vannes antigel qui protègent les circuits extérieurs en vidant l'eau lorsque les températures approchent du point de congélation. Ces vannes s'ouvrent généralement à environ 3 °C et se referment au-dessus de 4 °C. Des vannes de remplissage d'eau automatiques sont nécessaires pour rétablir la pression, et des séparateurs d'air éliminent l'air entraîné.

Méthode passive 1 : utiliser de l'eau + du propylène glycol (PG) dans le circuit d'eau externe

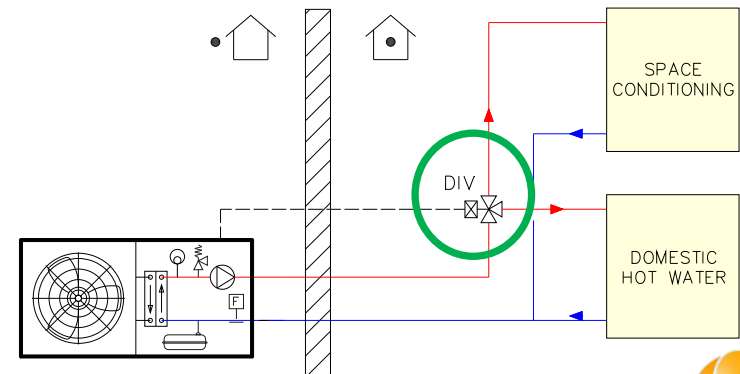
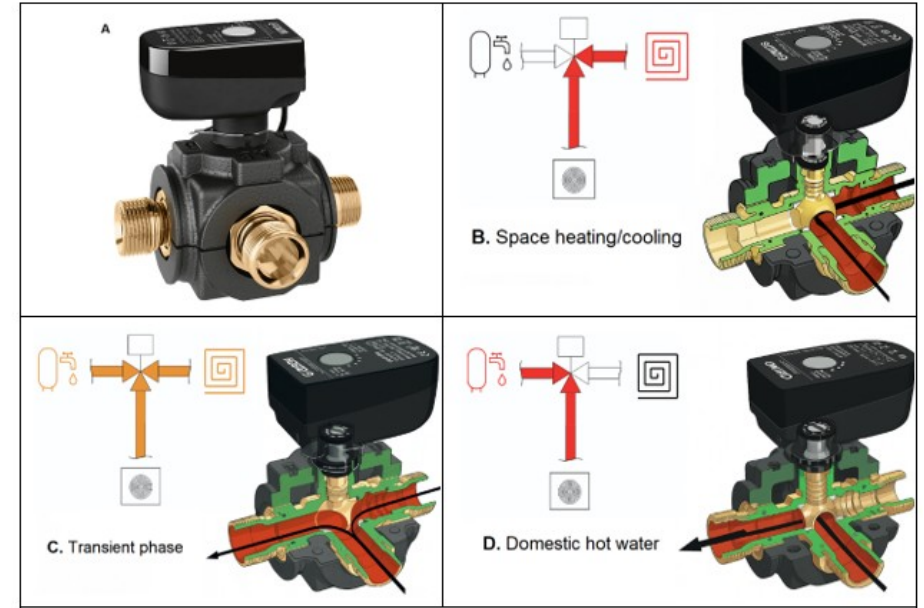


Méthode passive 2 : vannes antigel



17.3 Vanne de dérivation (DIV)

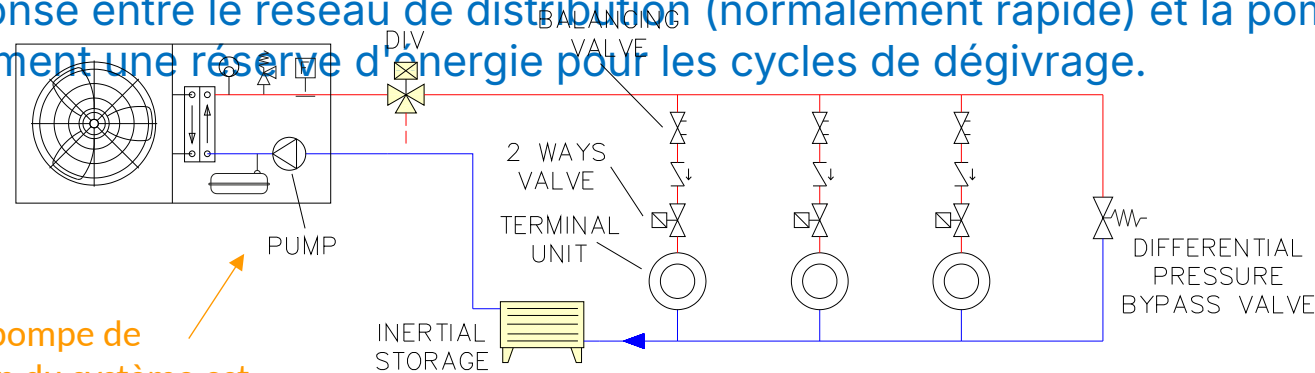
- Les vannes de dérivation sont des vannes à trois voies motorisées qui acheminent la production de la pompe à chaleur soit vers le chauffage et le refroidissement des locaux, soit vers la production d'eau chaude sanitaire.
- L'eau chaude sanitaire est généralement prioritaire, car la demande est immédiate et ne peut être différée. Lorsque la température du ballon descend en dessous de son point de consigne, la vanne de dérivation redirige toute la production de la pompe à chaleur vers le ballon d'eau chaude sanitaire, généralement à une température comprise entre 55 et 60 °C.
- Une fois le ballon réchauffé, la vanne bascule à nouveau vers le confort ambiant, où les températures de départ sont généralement de 35 à 45 °C pour le chauffage et de 7 à 12 °C pour le refroidissement.
- Les systèmes modernes peuvent appliquer une priorité partielle pour éviter une interruption excessive du chauffage des locaux.



17.4 Connection directe

Concept

- La manière la plus simple d'intégrer une pompe à chaleur dans le système de chauffage ou de climatisation d'un bâtiment consiste à la raccorder directement aux tuyaux de distribution. La pompe à chaleur intégrée fait circuler l'eau dans l'ensemble du réseau de distribution.
- Cette solution n'est appropriée que lorsque la pompe fournit une hauteur manométrique suffisante et que le système peut toujours maintenir le débit minimal requis par la pompe à chaleur. Les valeurs de débit minimal types sont spécifiées par les fabricants et doivent être respectées pour éviter les dysfonctionnements ou les dommages (voir leçon 14.5.3)
- Lorsque les vannes de zone se ferment en conditions de charge partielle, le débit du système peut chuter en dessous de ce minimum, ce qui nécessite des mesures hydrauliques supplémentaires.
- Deux nouveaux composants apparaissent dans ce circuit : **(1)** une vanne de dérivation à pression différentielle, qui garantit le débit minimal requis par la pompe à chaleur, et **(2)** un réservoir d'inertie, qui compense la différence de temps de réponse entre le réseau de distribution (normalement rapide) et la pompe à chaleur (plus lente), et fournit également une réserve d'énergie pour les cycles de dégivrage.



La seule pompe de circulation du système est celle intégrée à la pompe à chaleur

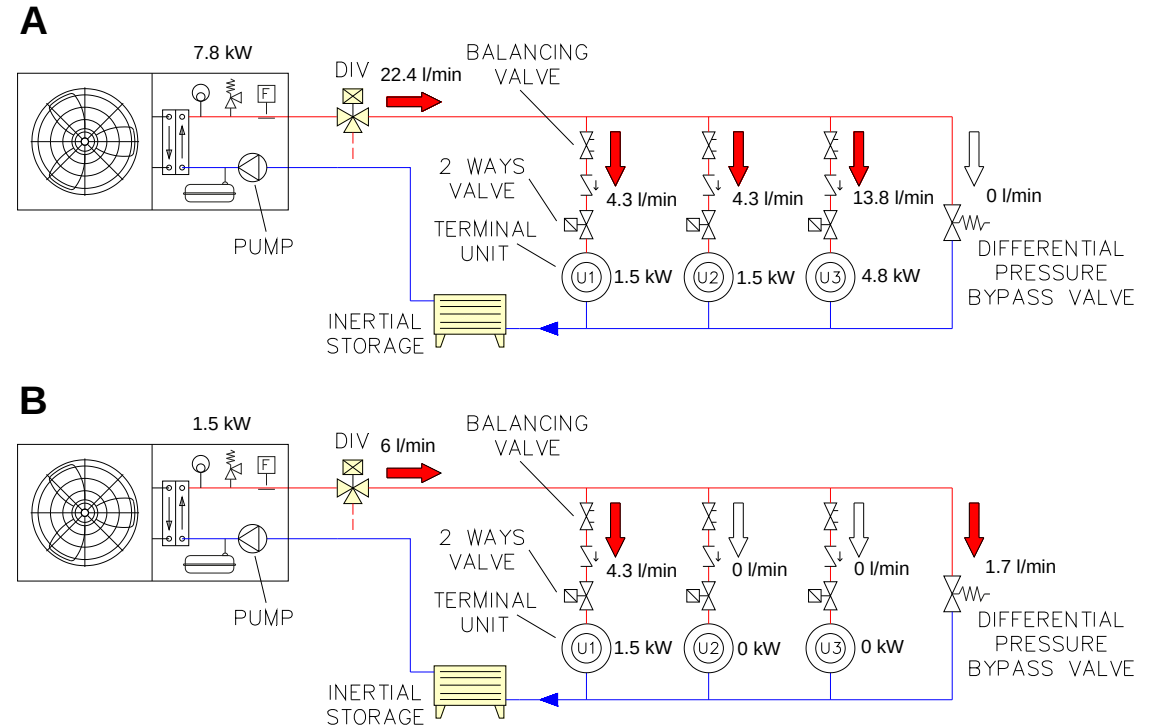
17.4 Raccordement direct

Vanne de dérivation à pression différentielle

- Cette vanne garantit le débit minimal en ouvrant une dérivation lorsque la différence de pression entre l'alimentation et le retour dépasse une valeur prédéfinie, ce qui indique que plusieurs terminaux se sont fermés.
- Par exemple (figure), si une pompe à chaleur nécessite au moins 6 l/min et qu'une seule zone reste ouverte avec une demande de 4,3 l/min, la vanne de dérivation s'ouvre pour faire circuler le débit manquant (1,7 l/min)
- Le réglage de la vanne est ajusté de manière à ce qu'elle reste fermée en fonctionnement normal et ne s'ouvre qu'en cas de faible débit
- La vanne de dérivation est généralement installée sur un té de tuyauterie reliant l'alimentation principale au retour principal, généralement après le dernier collecteur ou la dernière dérivation d'émetteur de chaleur

Pour plus de détails: voir les sections 17.4.1 (nécessité d'une dérivation) et 17.4.2 (détails sur la vanne)

Fonctionnement de la vanne de dérivation



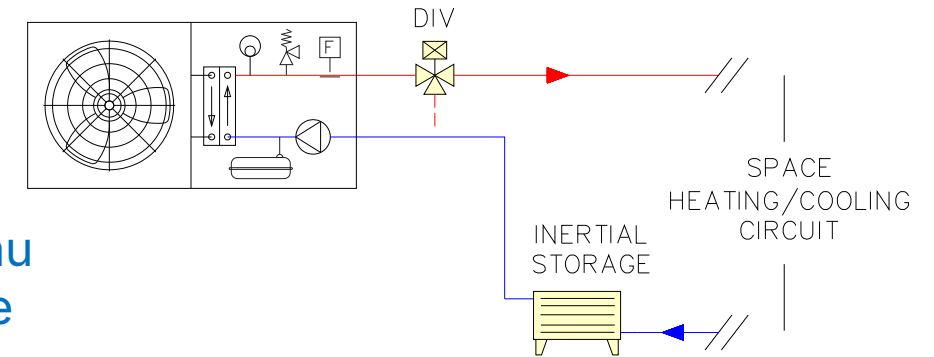
Modèle commercial (source: CALEFFI)



17.4 Raccordement direct

Réservoir d'inertie

- Les pompes à chaleur nécessitent également un volume d'eau minimum pour garantir un fonctionnement stable et fournir de l'énergie pendant les cycles de dégivrage.
- Les fabricants indiquent généralement un minimum absolu de 5 à 7 litres d'eau par kW de puissance de la pompe à chaleur. Dans la pratique, les réservoirs d'inertie sont souvent dimensionnés à 10–20 L/kW afin d'améliorer la stabilité de la température et d'éviter les cycles courts causés par les mouvements rapides des vannes de zone.
- Pour garantir que ce minimum soit toujours disponible, quel que soit le nombre de zones de chauffage ouvertes ou fermées, il est généralement nécessaire d'installer un réservoir d'inertie.

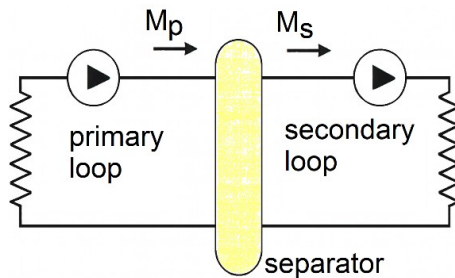


Source :
<https://futureenergia.es>

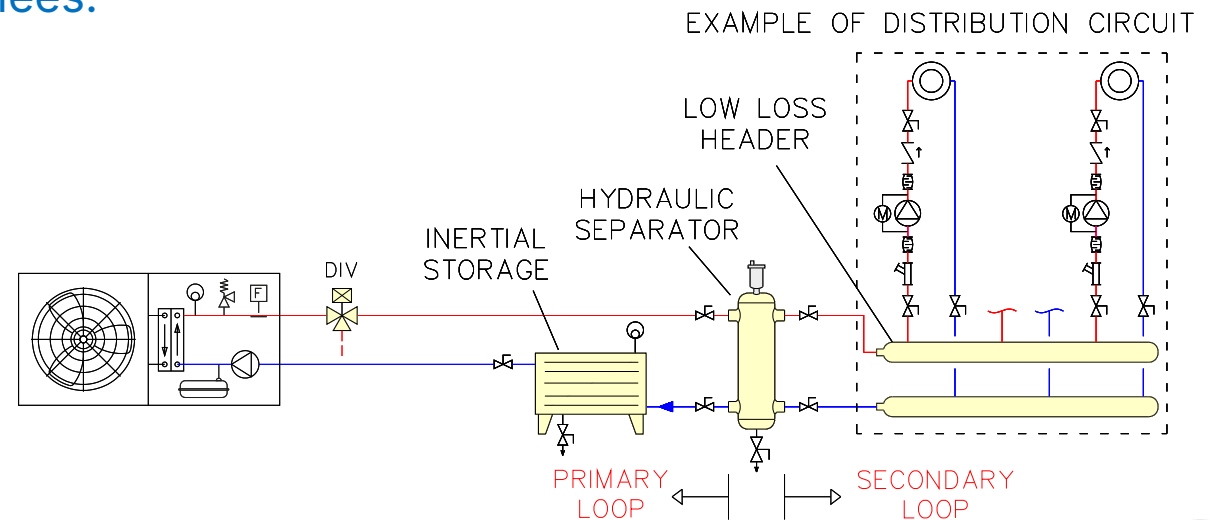
17.5 Configuration des circuits primaire et secondaire

Concept

- Les configurations primaire-secondaire sont utilisées lorsque la pompe de circulation de la pompe à chaleur ne parvient pas à surmonter la résistance hydraulique du réseau de distribution.
- **La boucle primaire** alimente la pompe à chaleur à l'aide de sa propre pompe de circulation, tandis que la **boucle secondaire** alimente les émetteurs à l'aide de pompes indépendantes.
- Un séparateur hydraulique relie les deux boucles, permettant le transfert de chaleur sans obliger les deux circuits à fonctionner au même débit. Cette configuration garantit un fonctionnement stable, quel que soit le nombre de zones ouvertes ou fermées.



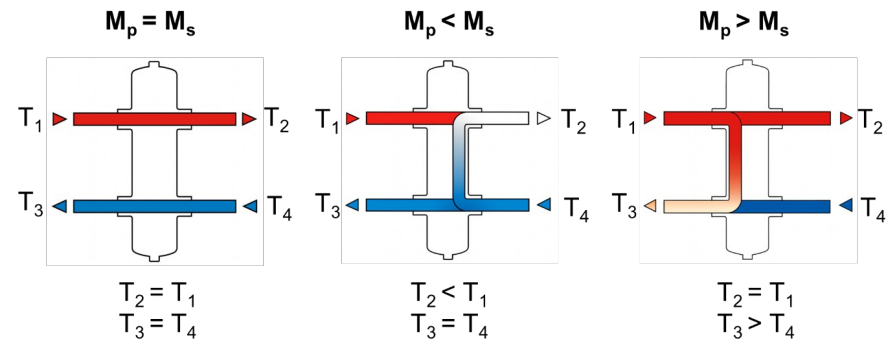
☑ *Considérez les boucles primaire et secondaire comme deux routes reliées par un rond-point. Chaque route a sa propre vitesse et son propre volume de circulation, mais le rond-point permet aux véhicules de passer d'une route à l'autre sans que les deux routes aient les mêmes conditions de circulation.*



17.5 Configuration des circuits primaire et secondaire

Séparateur hydraulique

- Le séparateur hydraulique est un récipient de grand diamètre interne qui réduit la vitesse de l'eau à moins de 0,2 m/s environ, créant ainsi une perte de charge négligeable entre les circuits. Cela permet un fonctionnement indépendant des pompes et facilite également la séparation de l'air et des impuretés.
- Le diamètre du séparateur est choisi en fonction du débit maximal, ou selon la règle empirique selon laquelle son diamètre doit être environ trois fois supérieur à celui du plus grand tuyau raccordé. La hauteur typique d'un séparateur est de quatre à six fois son diamètre.

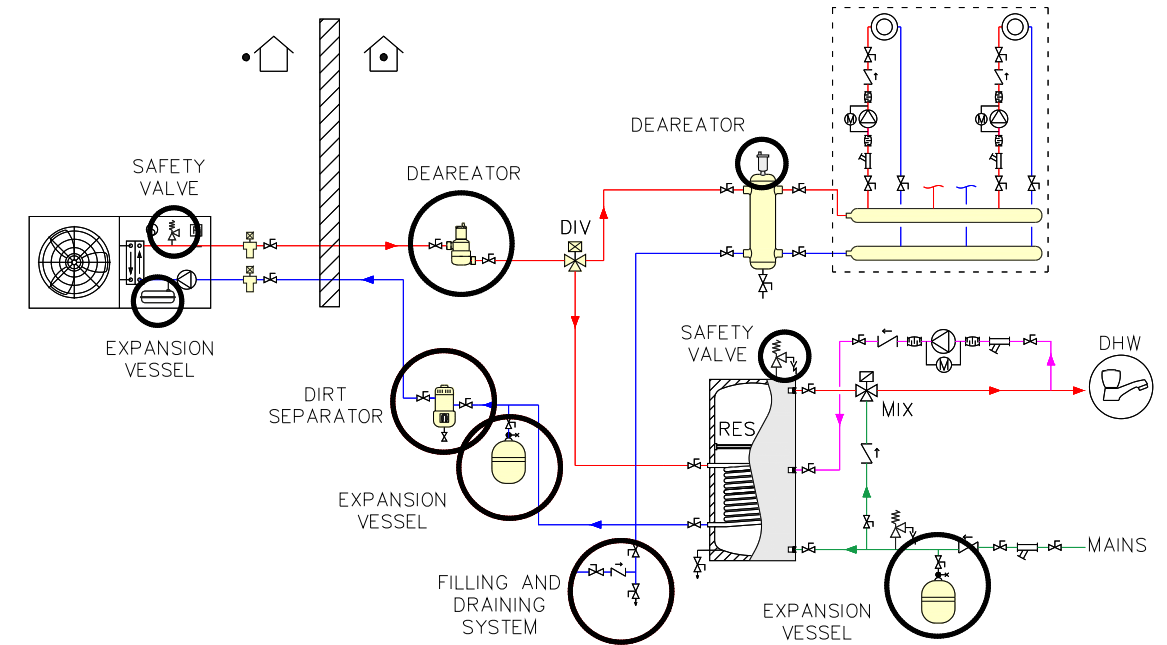


Pour plus de détails : voir les sections 17.5.1, 17.5.2, 17.5.3

17.6 Autres composants

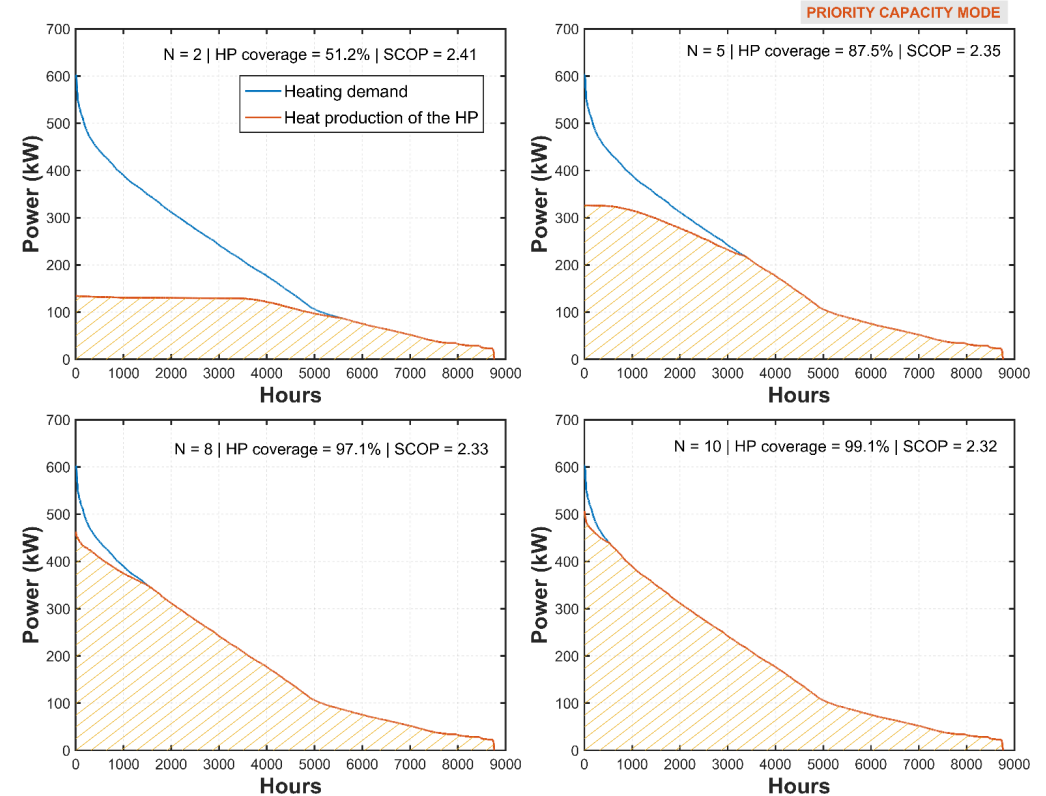
Les composants auxiliaires garantissent un fonctionnement sûr et fiable.

- **Les soupapes de sécurité** protègent contre les surpressions et s'ouvrent généralement entre 3 et 10 bars
- **Les vases d'expansion** absorbent la dilatation thermique de l'eau ; leur volume peut être calculé de manière analytique ou estimé à environ 5 % du volume total du système pour les systèmes à pompe à chaleur
- **Les purgeurs d'air et les désaérateurs** éliminent l'air piégé et dissous afin de prévenir la corrosion et la cavitation des pompes
- **Les séparateurs de saletés et les filtres magnétiques** capturent les débris et la magnétite, protégeant ainsi les échangeurs de chaleur et les vannes et préservant l'efficacité du système.



17.7 Systèmes hybrides

- Les systèmes hybrides associent une pompe à chaleur à une chaudière afin d'équilibrer rendement et puissance de pointe.
- La pompe à chaleur couvre **les charges de base** dans des conditions climatiques douces avec un rendement élevé, tandis que la chaudière répond aux pics de demande ou aux besoins en température élevée.
- Par exemple, la figure montre la demande de chauffage cumulée d'un bâtiment type et les courbes de production correspondantes de la pompe à chaleur pour différents nombres d'unités (N = 2, 5, 8 et 10). L'augmentation de la capacité de la pompe à chaleur de deux à dix unités peut faire passer la couverture de la charge d'environ 51 % à plus de 99 %, tandis que le SCOP reste pratiquement constant autour de 2,3-2,4.
- Cela démontre une diminution des gains d'efficacité au-delà d'un certain niveau de couverture et justifie le recours à l'hybridation.



Co-funded by
the European Union

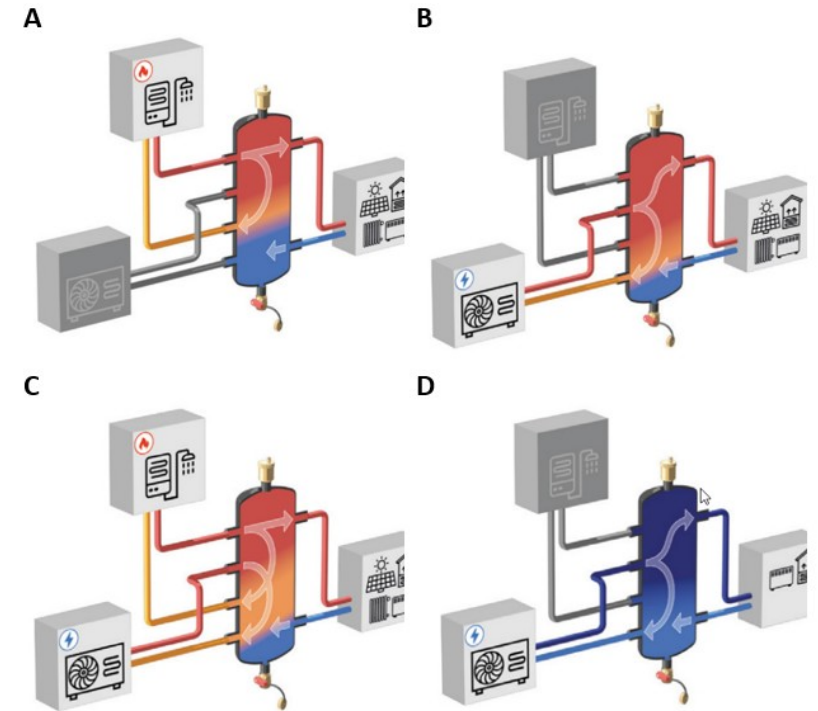


Pour plus de détails : voir la section 17.7.1



17.7 Systèmes hybrides

- Un séparateur hydraulique à inertie permet d'intégrer facilement une pompe à chaleur et une chaudière en découplant hydrauliquement leurs circuits, tout en maintenant des conditions de fonctionnement correctes grâce à une disposition adéquate des raccordements et à une stratification des débits.
- **Le départ de la chaudière se raccorde au port supérieur, le départ de la pompe à chaleur juste en dessous** ; le retour de la chaudière se raccorde au troisième port en partant du haut, et le retour de la pompe à chaleur au port le plus bas, le circuit de refroidissement se trouvant du côté opposé.
- Le séparateur permet un fonctionnement indépendant ou en parallèle de la chaudière et de la pompe à chaleur, avec un contournement interne partiel pour préserver l'équilibre hydraulique ; en mode refroidissement, seule la pompe à chaleur alimente le système.
- Il remplit une double fonction : séparer les circuits des générateurs primaires du circuit de distribution secondaire et fournir le volume d'eau minimum nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur, en utilisant une zone à faible vitesse pour neutraliser les différences de pression et simplifier la conception du système.



Modes de fonctionnement : (A) chaudière seule, (B) pompe à chaleur seule ; (C) les deux sources ; (D) mode refroidissement



Co-funded by
the European Union



Plus de détails voir les sections 17.7.2 + 17.7.3



LEÇON 18

Recueil de schémas de systèmes représentatifs

Objectifs de la leçon 18

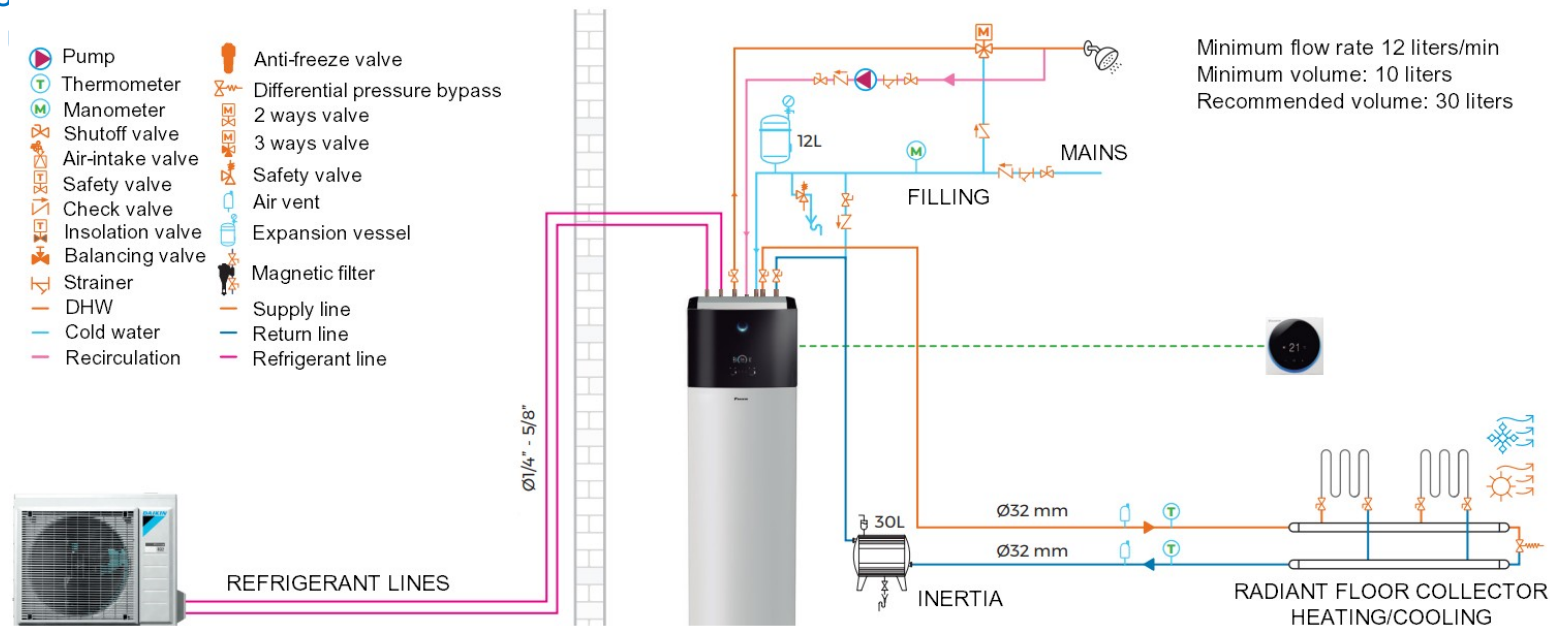
1. Comprendre comment sont configurés les schémas types de systèmes hydrauliques pour les installations de pompes à chaleur résidentielles et à petite échelle, à l'aide de composants courants tels que les pompes à chaleur, les réservoirs de stockage, les séparateurs, les vannes et les circuits de distribution.
2. Comparer différentes configurations de systèmes (connexion directe, primaire/secondaire, multi-émetteurs, multi-unités, géothermiques et hybrides) et identifier les conditions dans lesquelles chaque schéma est approprié.
3. Utiliser les schémas présentés comme modèles de référence pratiques pour adapter, combiner et personnaliser les conceptions de pompes à chaleur et de systèmes hybrides en fonction des exigences du projet, du climat et des installations existantes.

Contenu de la leçon 18

1. Cette leçon présente douze schémas représentatifs de systèmes à pompe à chaleur qui appliquent les concepts introduits dans les leçons 14 à 17
2. Dans cette présentation, trois schémas représentatifs ont été sélectionnés : un système tout électrique simple, un système réversible à émetteurs mixtes et un système hybride pompe à chaleur-chaudière. Ensemble, ces schémas couvrent la plupart des situations de conception résidentielle tout en conservant une clarté conceptuelle.
3. Les autres schémas peuvent être consultés dans la partie écrite de la leçon.

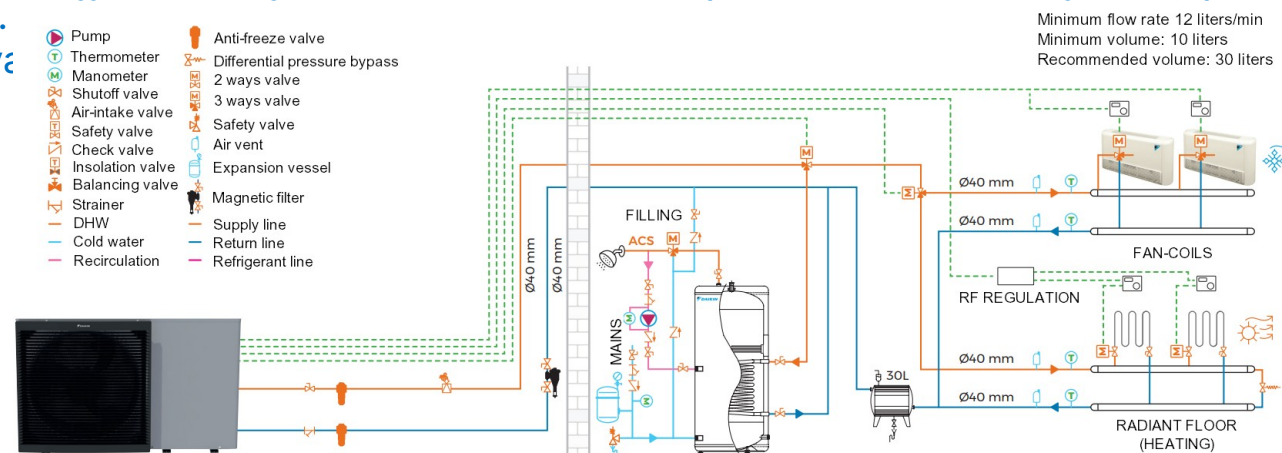
18.1 Schéma 1

- Ce schéma se caractérise par sa simplicité et par le couplage direct entre la pompe à chaleur et un système de plancher radiant. Un réservoir d'inertie garantit le volume d'eau minimum requis par la pompe à chaleur, tandis qu'une vanne de dérivation à pression différentielle assure le débit massique minimum. L'unité intérieure est un ensemble compact qui intègre le ballon d'eau chaude sanitaire et les principaux composants hydroniques dans un seul module, ce qui réduit la tuyauterie externe et simplifie l'installation.
- Le système assure le chauffage, le refroidissement et l'eau chaude sanitaire. Dans ce cas, les performances de refroidissement sont limitées par des contraintes telles que le risque de condensation à la surface du sol et la convection d'air réduite. Dans l'ensemble, il s'agit de l'un des schémas les plus simples de la collection axé sur une émission à basse température avec



18.5 Schéma 5

- Ce schéma illustre une configuration plus polyvalente conçue pour gérer des charges de refroidissement estivales plus élevées. Une pompe à chaleur air-eau monobloc assure à la fois l'eau chaude sanitaire et le confort thermique, mais le bâtiment utilise deux types d'appareils terminaux différents. Les boucles de plancher radiant sont utilisées exclusivement pour le chauffage, tandis que les ventilo-convecteurs sont utilisés pour le refroidissement. Cette séparation permet de contourner les limites intrinsèques des planchers radiants en matière de refroidissement et offre des capacités de refroidissement plus élevées, avec l'avantage supplémentaire de la déshumidification de l'air.
- Deux vannes de dérivation motorisées gèrent le fonctionnement du système. Une vanne commute la sortie de la pompe à chaleur entre la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. Une deuxième vanne achemine l'eau de chauffage ou de refroidissement soit vers le circuit de plancher radiant, soit vers le circuit des ventilo-convecteurs, selon la saison. Dans certaines variantes, les ventilo-convecteurs peuvent également contribuer au chauffage lors des démarrages à froid, compensant ainsi la réponse thermique lente des planchers radiants
- Ce schéma est bien adapté aux climats présentant une forte demande de refroidissement, tels que les régions tempérées chaudes et méditerranéennes. meilleures performances estivales légèrement supérieure.

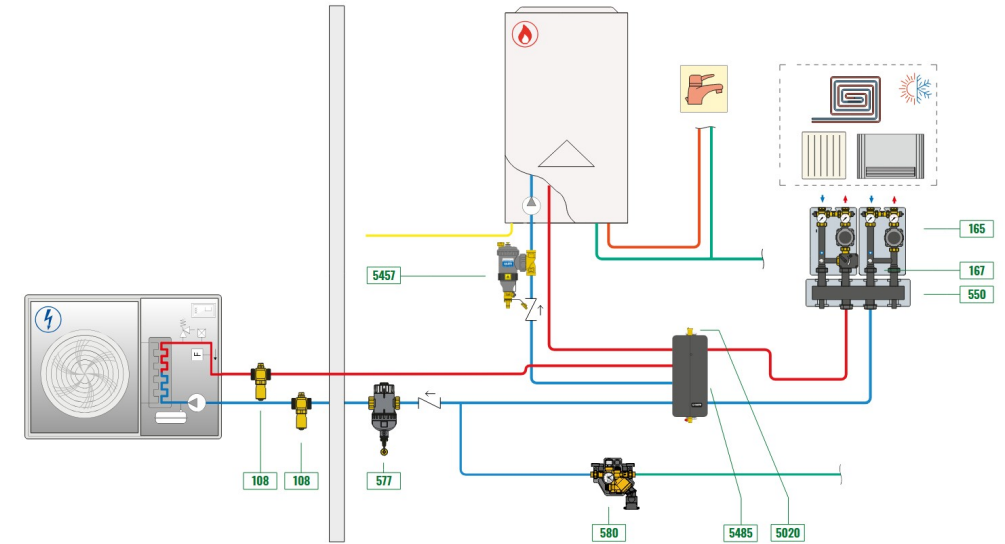


ationnelle et de
aulique et de contrôle

Source de la figure : documentation technique Daikin

18.9 Schéma 9

- Ce schéma présente une configuration hybride type combinant une pompe à chaleur monobloc et une chaudière à gaz raccordées en parallèle à un ballon d'inertie qui fait également office de séparateur hydraulique. Les deux générateurs peuvent fonctionner en alternance ou simultanément, en fonction de l'intensité de la charge et de la stratégie de régulation.
- La séparation hydraulique garantit que les circulateurs de la pompe à chaleur et de la chaudière fonctionnent indépendamment du circuit de distribution, maintenant ainsi des conditions de débit stables quelle que soit la demande du bâtiment.
- Le chauffage et le refroidissement des locaux sont assurés par le circuit secondaire, tandis que l'eau chaude sanitaire est produite instantanément par la chaudière. Cela évite d'avoir recours à un ballon d'eau chaude sanitaire, garantissant des températures d'eau chaude élevées même en période de pointe et éliminant le risque de légionellose associé à l'eau stockée.
- La pompe à chaleur couvre le chauffage de base et toutes les charges de refroidissement, tandis que la chaudière prend en charge les pics de demande de chauffage ou fonctionne lorsque les températures extérieures sont trop basses pour permettre un fonctionnement efficace de la pompe à chaleur.
- Ce schéma est particulièrement adapté aux projets de rénovation, où l'installation existante est conservée et complétée par une pompe à chaleur. Il offre une grande fiabilité, une consommation réduite de combustibles fossiles et une transition en douceur vers l'électrification, tout en évitant de surdimensionner la pompe à chaleur pour répondre à des pics de charge occasionnels.



Source de l'illustration : documentation technique Caleffi

LEÇON 19

Dimensionnement des systèmes de pompes à chaleur



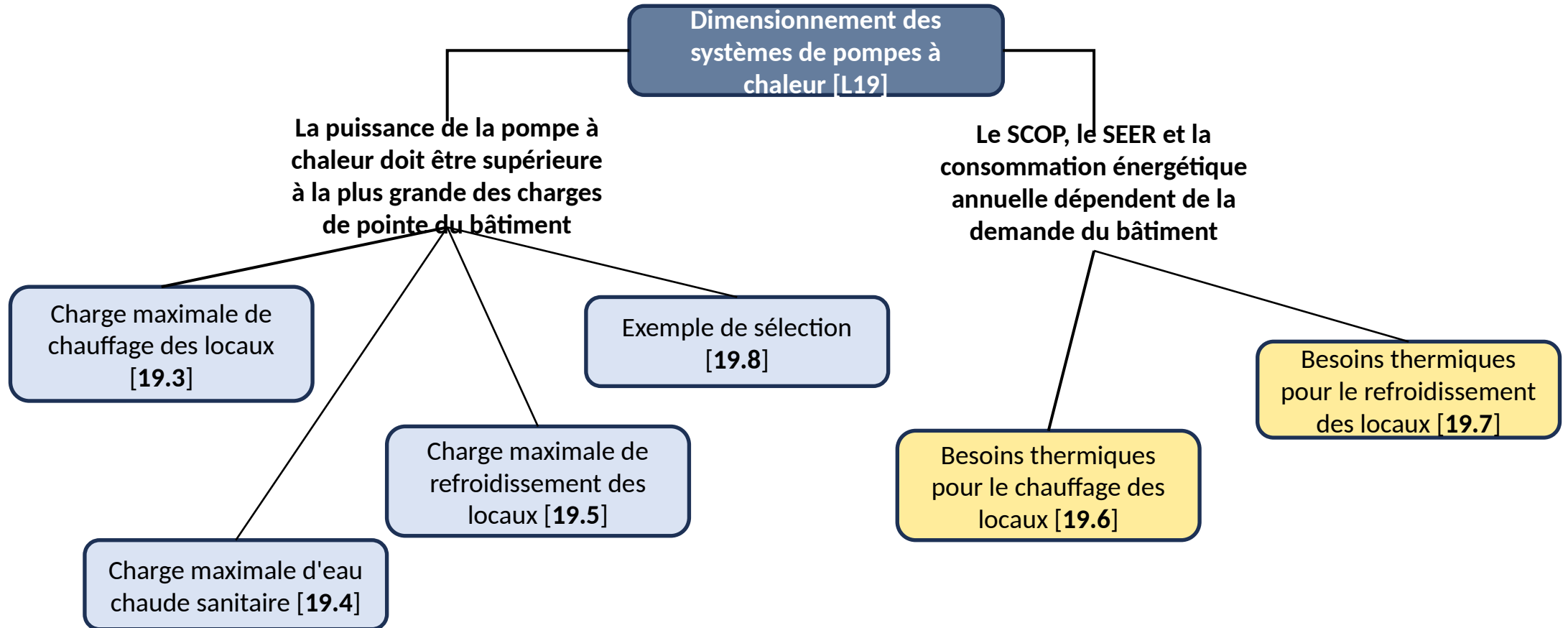
Co-funded by
the European Union



Objectifs de la leçon 19

1. Comprendre les principes de dimensionnement des pompes à chaleur, en distinguant les charges thermiques de pointe (kW) et la demande thermique annuelle (kWh) pour le chauffage, le refroidissement et l'eau chaude sanitaire.
2. Apprendre à estimer les charges de chauffage et de refroidissement de pointe à l'aide de méthodes simplifiées et d'indicateurs dépendants du climat, et reconnaître leurs hypothèses et leurs limites.
3. Utiliser les données de performance fournies par le fabricant pour sélectionner une capacité de pompe à chaleur appropriée qui réponde aux conditions de conception tout en évitant le surdimensionnement ou le sous-dimensionnement.

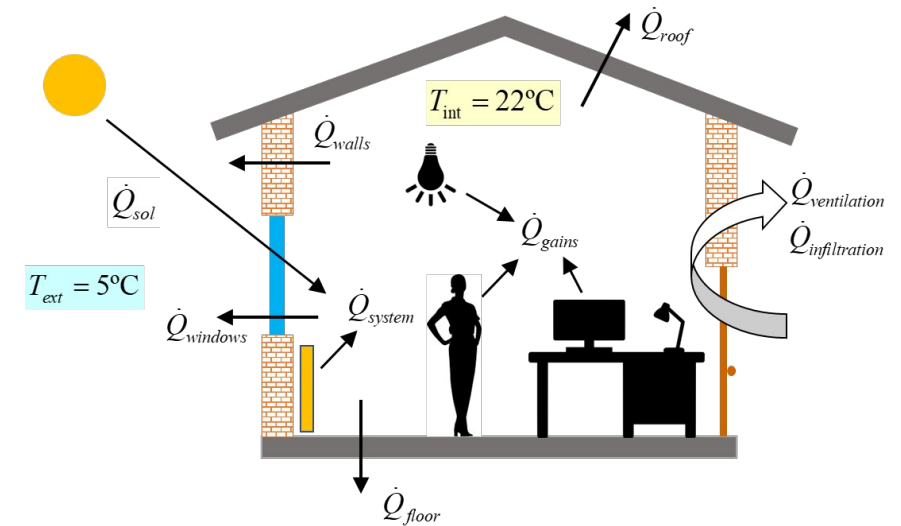
Contenu de la leçon 19



19.1 Introduction

- Le dimensionnement d'une pompe à chaleur consiste à déterminer la puissance maximale ou de pointe nécessaire pour maintenir le confort intérieur dans des conditions de conception (extrêmes) définies.
- Les bâtiments échangent en permanence de la chaleur avec leur environnement par transmission, ventilation, infiltration, rayonnement solaire et apports internes. Certains de ces flux augmentent la température intérieure, tandis que d'autres la réduisent, et leur direction peut varier en fonction des conditions extérieures. Les flux thermiques peuvent être classés en flux sensibles, qui affectent la température de l'air, et en flux latents, qui affectent l'humidité.
- Le dimensionnement a pour but de **garantir que la pompe à chaleur puisse compenser l'effet combiné de toutes les pertes ou gains de chaleur dans les conditions les plus exigeantes**, tout en **évitant un surdimensionnement excessif** qui réduirait son rendement.

Pour plus de détails : voir la section 19.1



19.2 Charges de pointe et demande thermique

Il est important de distinguer :

- **Charge thermique de pointe** : puissance maximale instantanée de chauffage ou de refroidissement requise, en kW
- **La demande thermique** : l'énergie cumulée requise sur une période donnée, en kWh.

Les charges de pointe déterminent la taille (capacité) de l'équipement nécessaire pour maintenir le confort intérieur dans des conditions extrêmes, tandis que la demande thermique est liée à la consommation énergétique annuelle.

Il est courant que la puissance de pointe d'un système de chauffage ne soit utilisée qu'une petite partie du temps : la demande de pointe ne se produit que pendant les quelques heures les plus froides de l'année. Un dimensionnement adéquat garantit que la pompe à chaleur peut répondre à ces pics sans être largement surdimensionnée pour un fonctionnement normal.

19.3 Charge maximale de chauffage

- La charge maximale de chauffage des locaux correspond au taux maximal de déperdition thermique d'un bâtiment lors de la journée de conception la plus froide. Elle dépend du niveau d'isolation, de l'étanchéité à l'air, du taux de ventilation et de la température extérieure de conception, qui est définie statistiquement pour chaque climat.
- La charge de chauffage maximale est généralement exprimée en kilowatts (kW) ou en watts par mètre carré de surface au sol (W/m^2).
- Le tableau suivant donne quelques valeurs indicatives ; les calculs formels doivent respecter des normes telles que la norme EN 12831, car les règles simplifiées en W/m^2 ne fournissent qu'une estimation préliminaire rapide. Il existe sur le marché des logiciels permettant de calculer la charge de chauffage de pointe avec précision.

Type de construction	Charge thermique maximale ()
Maison neuve (isolation élevée, normes post-2000)	30–50 W/m^2
Maison standard des années 1990	40–60 W/m^2
Maison ancienne avec une certaine isolation	60–100 W/m^2
Maison ancienne non isolée	120 W/m^2

- Les valeurs du tableau supposent un climat d'Europe centrale. Les bâtiments situés dans des climats plus doux se situeront dans la partie inférieure des fourchettes, tandis que la partie supérieure s'applique aux climats plus froids ou aux structures mal isolées. Par exemple, une maison ancienne non isolée pourrait nécessiter environ 120 W/m^2 dans un climat froid, mais la même maison dans un climat méditerranéen aurait des besoins moindres, peut-être de l'ordre de 70 à 80 W/m^2 . À l'inverse, une maison moderne bien isolée pourrait avoir des besoins aussi faibles que 30 W/m^2 dans un climat chaud, ou plus proches de 50 W/m^2 dans un climat plus froid. Les conceptions extrêmement efficaces comme les maisons passives limitent les charges thermiques à environ 10–15 W/m^2 .

19.4 Charge maximale d'eau chaude sanitaire

- Outre le chauffage des locaux, les pompes à chaleur résidentielles assurent souvent la production d'eau chaude sanitaire.
- Comme décrit dans la leçon 16, le chauffage de l'eau chaude sanitaire présente ses propres caractéristiques de charge de pointe, comme l'utilisation simultanée de plusieurs douches ou robinets d'eau chaude le matin. Cependant, les charges d'eau chaude sanitaire seront gérées en stockant l'eau chaude dans un ballon, ce qui réduit les besoins de puissance thermique de pointe de la pompe à chaleur. Au lieu de devoir répondre à un débit de pointe instantané avec la puissance brute de la pompe à chaleur, celle-ci peut chauffer un volume d'eau à l'avance. Ainsi, le dimensionnement de l'eau chaude sanitaire repose davantage sur la consommation d'énergie quotidienne (kWh) et la capacité de stockage que sur la puissance instantanée en kW.
- **En termes de dimensionnement de la pompe à chaleur, l'eau chaude sanitaire détermine rarement la capacité de pointe**, car la pompe à chaleur peut fonctionner plus longtemps pour recharger le ballon. **L'accent est mis sur la garantie d'un stockage suffisant (et éventuellement d'une solution de secours électrique) pour couvrir les périodes de consommation de pointe.** La pompe à chaleur répartit essentiellement sa puissance dans le temps : elle produit de l'eau chaude à un débit plus faible de manière continue pour atteindre un objectif énergétique, plutôt que de répondre à toute la demande simultanée en une seule fois.
- Les méthodes de sélection de la paire (P, V) ont été détaillées dans la leçon 16, ainsi que les rapports de conception types. *Pour plus de détails : lire la section 19.4*

19.5 Charge de refroidissement maximale

- La charge de refroidissement maximale correspond au débit maximal de chaleur qui doit être évacué pour maintenir le confort pendant la journée la plus chaude prévue. Les charges de refroidissement sont fortement influencées par le rayonnement solaire, l'orientation, le vitrage, l'ombrage, les apports internes et la masse thermique.
- Le tableau suivant fournit quelques valeurs indicatives** ; contrairement au chauffage, les charges de refroidissement dépendent fortement du temps, et les calculs en régime permanent ont tendance à surestimer les pics. Les simulations dynamiques fournissent des résultats plus précis, bien que des fourchettes indicatives simplifiées soient souvent utilisées pour la conception préliminaire.

Zone européenne	Régions représentatives	Charge de refroidissement maximale typique (W/m ²)	Remarques
Froid / Nord	Scandinavie, pays baltes, nord du Royaume-Uni	0–20 W/m ²	Climatisation souvent inutile ; sauf cas exceptionnels (apports solaires élevés)
Tempéré frais	Allemagne, Pays-Bas, Belgique, nord de la France	20–40 W/m ²	Climatisation souvent inutile ; principalement due aux apports solaires et à des vagues de chaleur occasionnelles
Tempéré / Centre	Centre de la France, Suisse, Autriche	30–50 W/m ²	Charges estivales modérées ; l'ombrage et la masse thermique influencent fortement les pics
Chaud-tempéré	Nord de l'Italie, nord de l'Espagne, sud de la France	40–70 W/m ²	Climatisation généralement nécessaire ; la protection solaire devient importante
Méditerranée	Espagne, Grèce, sud de l'Italie, sud du Portugal	60–90 W/m ²	Le refroidissement domine souvent la conception ; forte dépendance à l'ombrage et au vitrage
Méditerranée chaude	Sud de l'Espagne, Sicile, Chypre	80–110 W/m ²	Gains solaires élevés ; valeurs proches de la limite supérieure en l'absence d'ombrage ou en cas de vitrage important

19.6 Besoins thermiques pour le chauffage des locaux

19.7 Besoins thermiques pour le refroidissement des locaux

Ces deux sections sont **facultatives**, mais très intéressantes pour votre formation :

- La section 19.6 présente le concept des degrés-jours de chauffage et montre comment utiliser cet indice climatique pour estimer la demande de chauffage d'un bâtiment type
- La section 19.7 présente les degrés-jours de refroidissement, un concept analogue pour les besoins en refroidissement, et en examine les limites.

19.8 Choix de la puissance de la pompe à chaleur

- Heat pump sizing is based on the peak heating load (P_h) and, when applicable, the peak cooling load (P_c). The selected capacity must be at least equal to the larger of the two, so that

$$CAP_{HP} \geq \max(P_h, P_c)$$

- The dominant load depends on climate, with heating governing in colder regions and cooling in warmer ones.
- For air-source heat pumps, nominal capacity is not sufficient for selection. The available capacity varies with outdoor air temperature and supply water temperature, and can drop significantly under design winter or summer conditions.
- Final selection must therefore be based on manufacturer performance data at the design outdoor temperature and required supply temperature (for both heating and cooling), to avoid undersizing and loss of comfort during extreme conditions

Example: Select an air/water heat pump for a 150 m² single-family house located in Kaunas (Lithuania). The peak heating load is estimated at 40 W/m² (new house with very low consumption)

Step 1. The peak heating load is estimated at 40 W/m², so the design heating power is

$$P_h = 150m^2 \times 40 \frac{W}{m^2} = 6000W = 6kW$$



Co-funded by
the European Union



Plus de détails : voir la section
19.8.1



19.8 Choix de la puissance de la pompe à chaleur

Étape 2. Déterminez les températures de fonctionnement extrêmes auxquelles la pompe à chaleur sera soumise.

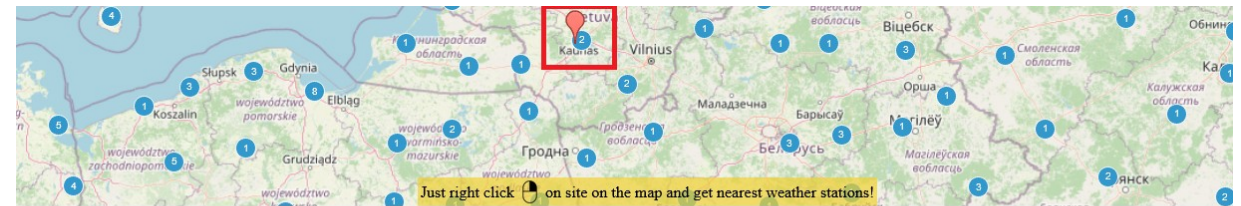
Nous examinons les deux côtés de l'appareil :

- Côté charge (eau) : la température maximale de l'eau en sortie est fixée à 55 °C pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Pour le chauffage des locaux, la température de départ de conception est de 45 °C.

- Côté source (air extérieur) : Les conditions de conception pour le chauffage sont déterminées par la température extérieure la plus basse au point de mesure (température de bulbe sec). Cette température peut être obtenue à partir des guides de conception nationaux ou de bases de données reconnues au niveau international, telles que la base de données d'informations climatiques de l'ASHRAE (<https://ashrae-meteo.info/v3.0/>)

Pour Kaunas, le graphique (ASHRAE) montre deux percentiles de basse température couramment utilisés pour la conception du chauffage :

- T_{out,design} -17,9 °C (99,6 % ; plus prudent)
- Tout,design = -14,4 °C (99e centile)



2025 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI)

KAUNAS, LITHUANIA (WMO: 266290)

Lat: 54.8834N Lon: 23.8349E Elev: 77 StdP: 100.40 Time zone: 2.00 (EUE) Period: 1999-2023 Grade: A WBAN: 99999

Annual Heating, Humidification, and Ventilation Design Conditions															
Coldest Month	Heating DB		Humidification DP/MCDB and HR						Coldest month WS/MCDB				MCWS/PCWD to 99.6% DB		WSF
			99.6%			99%			0.4%		1%				
	99.6%	99%	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	WS	MCDB	WS	MCDB	MCWS	PCWD	
1	-17.9	-14.4	-20.1	0.6	-17.1	-17.1	0.8	-13.7	10.9	0.4	10.0	-1.0	1.9	10	0.560

Annual Cooling, Dehumidification, and Enthalpy Design Conditions															
Hottest Month	Hottest Month DB Range	Cooling DB/MCWB						Evaporation WB/MCDB						MCWS/PCWD to 0.4% DB	
		0.4%		1%		2%		0.4%		1%		2%			
		DB	MCWB	DB	MCWB	DB	MCWB	WB	MCDB	WB	MCDB	WB	MCDB	MCWS	PCWD
7	9.4	28.9	20.2	27.1	19.2	25.4	18.2	21.3	26.8	20.2	25.2	19.2	23.7	3.5	150
Dehumidification DP/MCDB and HR								Enthalpy/MCDB						Extreme Max WB	
0.4%		1%			2%			0.4%		1%		2%			
DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	Enth		MCDB
19.5	14.4	23.9	18.5	13.4	22.6	17.5	12.6	21.7	62.3	26.8	58.4	25.3	55.2	23.7	25.6

19.8 Choix de la puissance de la pompe à chaleur

Étape 3. Définir les exigences relatives à la pompe à chaleur

Étant donné qu'une pompe à chaleur aérothermique perd en puissance lorsque la température extérieure baisse et que l'eau chaude sanitaire nécessite une température d'eau plus élevée, le choix doit être effectué en consultant les données du fabricant aux points A-15/W45 (chauffage des locaux) et A-15/W55 (eau chaude sanitaire), ou aux points publiés les plus proches.

En pratique, un critère raisonnable pourrait être :

S'assurer

Ajoutez une marge modeste pour tenir compte des incertitudes et des effets du dégivrage (par exemple, 10 à 20 %), en visant une puissance disponible d'environ 7 kW au point de conception.

Étape 4. Choisir une pompe à chaleur disponible dans le commerce

La pompe à chaleur air-eau Mitsubishi Electric PUD-SWM80VAA est un exemple de pompe à chaleur adaptée à cette application. Dans les conditions de conception A-15/W45, la puissance de chauffage disponible est de 6,6 kW, ce qui est suffisant pour couvrir entièrement la charge de chauffage de conception sans chauffage d'appoint dans des conditions hivernales standard. L'unité est également capable de produire de l'eau à 55 °C pour l'eau chaude sanitaire. La puissance de chauffage est résumée à l'annexe 19.8.1.

■ PUD-SWM80VAA(-BS) PUD-SWM80YAA(-BS)

Water outlet temperature [°C]		25		35		40		45		50		55		60	
Ambient temperature [°C]		Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP
Max	-25	-	-	5.0	1.70	4.9	1.55	4.7	1.44	-	-	-	-	-	-
	-20	-	-	6.7	2.20	6.6	1.95	6.4	1.70	6.2	1.45	-	-	-	-
	-15	-	-	7.3	2.50	7.0	2.25	6.6	2.00	6.7	1.75	6.8	1.55	-	-
	-10	8.5	3.50	7.6	2.99	7.5	2.65	7.3	2.35	7.3	2.00	7.2	1.91	-	-
	-7	9.4	3.60	8.8	3.00	8.6	2.75	8.4	2.45	8.3	2.10	8.0	1.95	7.2	1.55
	2	9.9	3.90	9.3	3.30	9.1	3.00	8.8	2.65	8.8	2.30	8.2	1.80	8.0	1.70
	7	9.6	5.40	8.9	4.60	8.6	4.05	8.2	3.45	7.9	3.10	7.5	2.55	6.8	2.30
	12	10.4	6.35	9.9	5.45	9.7	4.80	9.5	4.10	9.1	3.60	8.6	3.10	7.7	2.70
	15	10.7	6.95	10.4	5.85	10.2	5.20	10.0	4.50	9.5	3.85	9.0	3.45	8.0	2.95
	20	10.9	7.90	10.8	6.70	10.6	5.95	10.4	5.15	10.2	4.45	9.7	3.70	9.1	3.45
Nominal	-25	-	-	5.0	1.70	4.9	1.55	4.7	1.44	-	-	-	-	-	-
	-20	-	-	6.7	2.20	6.6	1.95	6.4	1.70	6.2	1.45	-	-	-	-
	-15	-	-	7.3	2.50	7.0	2.25	6.6	2.00	6.7	1.75	6.8	1.55	-	-
	-10	8.0	3.55	7.6	2.99	7.5	2.65	7.3	2.35	7.3	2.00	7.2	1.91	-	-
	-7	8.0	3.70	8.0	3.10	8.0	2.80	8.0	2.45	8.0	2.10	8.0	1.95	7.2	1.55
	2	8.0	4.35	8.0	3.55	8.0	3.15	8.0	2.75	8.0	2.40	8.0	1.82	8.0	1.70
	7	6.0	5.65	6.0	4.76	6.0	4.20	6.0	3.65	6.0	3.20	6.0	2.65	6.0	2.40
	12	6.0	6.45	6.0	5.35	6.0	4.80	6.0	4.25	6.0	3.65	6.0	3.10	6.0	2.75
	15	6.0	7.05	6.0	5.95	6.0	5.25	6.0	4.55	6.0	3.95	6.0	3.45	6.0	2.95
	20	6.0	8.05	6.0	6.90	6.0	6.05	6.0	5.15	6.0	4.55	6.0	3.75	6.0	3.40



Co-funded by
the European Union



Pour plus de détails : lire la section 19.8.1



LEÇON 20

Intégration des systèmes et stratégies de contrôle



Co-funded by
the European Union



Objectifs de la leçon 20

1. Comprendre le rôle de la régulation de supervision dans les installations de pompes à chaleur
2. Expliquer comment la compensation climatique modifie la température de départ en fonction des conditions extérieures
3. Analyser les stratégies de transfert de charge, d'écrêtement des pics et de régulation en fonction des prix
4. Décrire le rôle des thermostats intelligents dans l'optimisation du système
5. Identifier l'importance de l'emplacement des capteurs pour la surveillance des performances



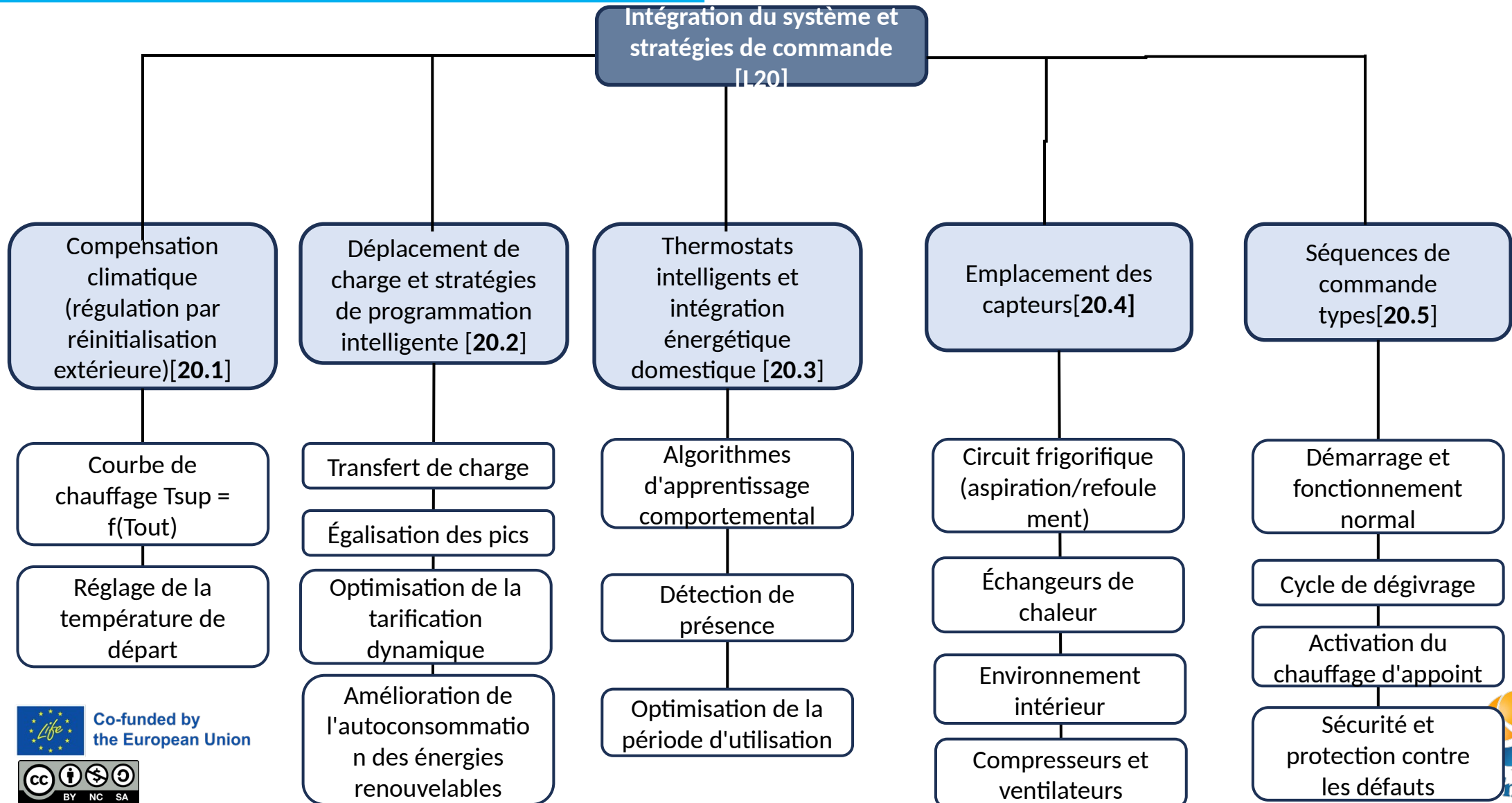
Co-funded by
the European Union



6. Reconnaître les séquences de commande opérationnelles typiques des pompes à chaleur



Contenu de la leçon 20



20.1 Compensation climatique (régulation par réinitialisation en fonction des conditions extérieures)

Principe de base

La température de départ n'est pas constante.

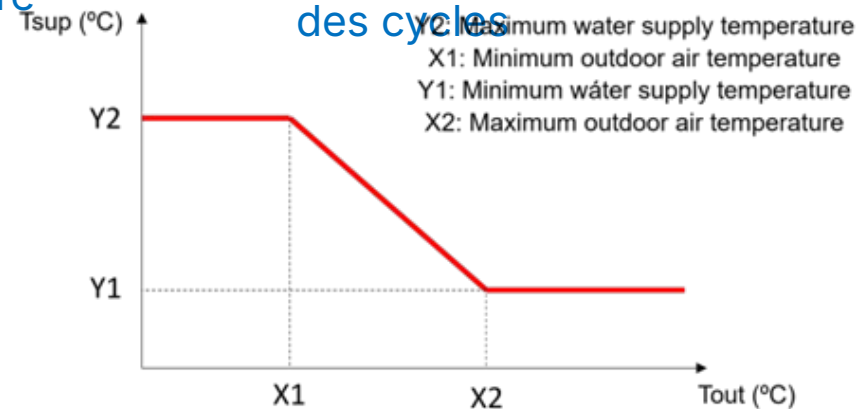
$$T_{sup} = f(T_{out})$$

Mécanisme de régulation

- Sonde extérieure installée sur la façade ou sur l'unité extérieure
- La courbe de chauffage définit la température de départ requise
- Consigne appliquée à :
 - Réservoir tampon
 - Circuit de chauffage direct

Impact technique

- Température de condensation plus basse lorsque les conditions extérieures le permettent
- Réduction de l'écart de température
- Amélioration du COP saisonnier
- Confort intérieur stable avec une réduction des cycles



Implication pour la conception → les émetteurs doivent fonctionner efficacement à des températures de départ variables.

20.2 Stratégies de transfert de charge et de gestion intelligente de la synchronisation

Les pompes à chaleur peuvent offrir une flexibilité énergétique.

La chaleur devient un vecteur de stockage contrôlable.

1. Déplacement de la charge

- Fonctionnement pendant les périodes de tarifs réduits
- Précharger le système de stockage d'énergie thermique (TES)
- Réduire le fonctionnement pendant les heures de pointe

2. Écrêtement des pics

- Surveiller les importations/exportations du réseau
- Limiter l'échange d'énergie maximal

3. Optimisation basée sur les coûts

- Exploitation liée à la tarification dynamique de l'électricité

4. Intégration des énergies renouvelables

- Surveiller la production photovoltaïque
- Surveiller la charge résiduelle du réseau
- Augmenter l'autoconsommation d'énergie renouvelable



20.3 Thermostats intelligents et gestion énergétique domestique

Caractéristiques fonctionnelles

- Connectivité Internet
- Algorithmes d'apprentissage comportemental
- Détection de présence
- Optimisation de la tarification horaire

Intégration du système

- Communication avec le régulateur de pompe à chaleur
- Intégration avec les plateformes domotiques
- Réponse aux tarifs en temps réel

Les thermostats intelligents introduisent un contrôle adaptatif.

Le contrôle passe d'un mode réactif à un mode prédictif.

Avantage opérationnel

- Réglage anticipatif de la température
- Réduction des opérations inutiles
- Meilleur équilibre entre confort et consommation d'énergie

20.4 Emplacement des capteurs

La qualité du contrôle dépend de la qualité des mesures

1. Circuit frigorifique

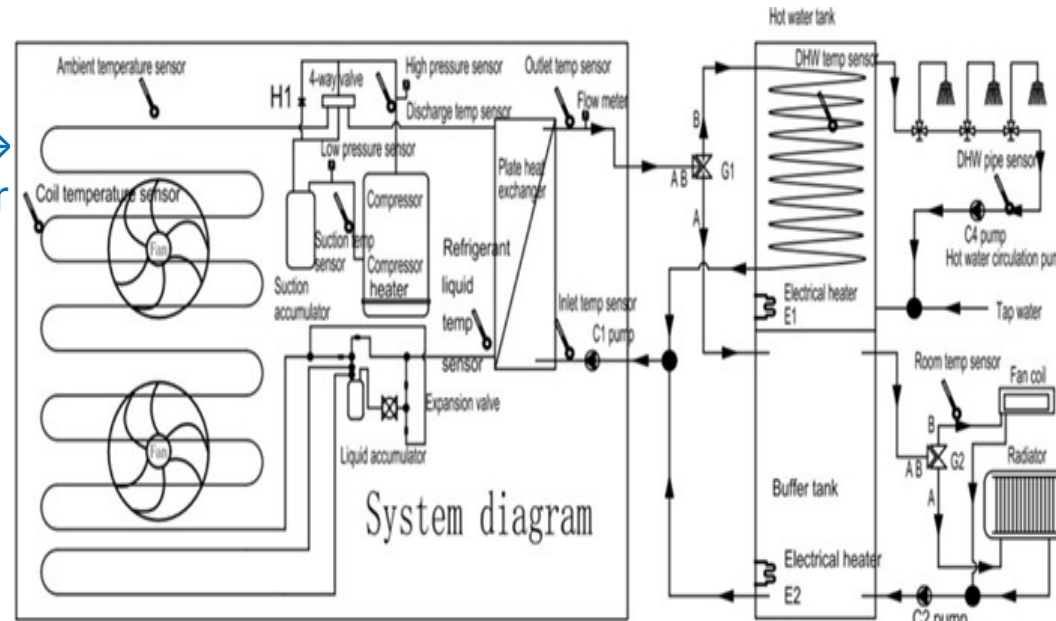
- Conduite d'aspiration → contrôle de la surchauffe
- Conduite de refoulement → protection du compresseur

2. Échangeurs de chaleur

- Température du serpentin extérieur → contrôle du dégivrage
- Température d'entrée/sortie d'eau → surveillance des performances



Co-funded by
the European Union



3. Environnement intérieur

- Température de l'air de retour
- Humidité (le cas échéant)

4. Composants mécaniques

- Capteurs de vibrations
- Capteurs de courant

5. Un placement correct des capteurs permet:

- L'optimization de l'efficacité
- Une maintenance prédictive
- Détection précoce des défauts



20.5 Séquences de commande et fonctionnement types

1. Séquence de démarrage

- Vérification de la demande du thermostat
- Activation du compresseur et de la pompe
- Modulation du détendeur

2. Cycle de dégivrage (systèmes à air)

- Déclenchée par les conditions de température et de pression du serpentin
- Activation de la vanne d'inversion
- Interruption temporaire du chauffage

3. Chauffage d'appoint

- Activée en dessous de la température d'équilibre
- Résistance électrique ou support hybride

4. Protection de sécurité

- Coupure haute/basse pression
- Protection contre les surintensités

- Rendement
- Protection des équipements
- Confort thermique

5. La commande doit garantir :

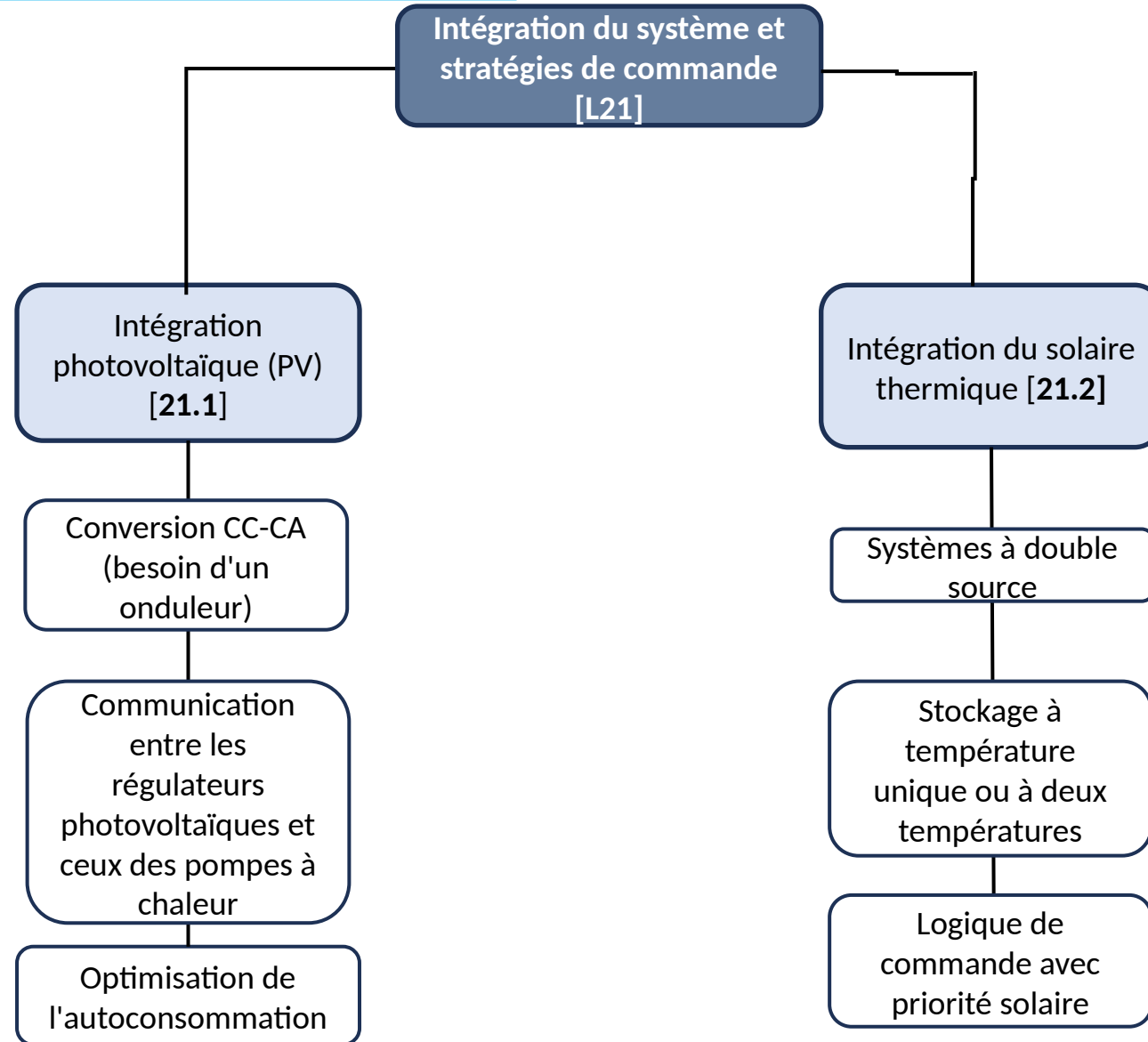
LEÇON 21

Intégration avec d'autres technologies d'énergie renouvelable

Objectifs de la leçon 21

1. Comprendre les principes de l'hybridation photovoltaïque-pompe à chaleur
2. Analyser l'interaction saisonnière entre la production photovoltaïque et la demande thermique
3. Évaluer le rôle du stockage électrique et thermique
4. Décrire l'intégration du solaire thermique avec les pompes à chaleur
5. Identifier les principaux critères de contrôle et de dimensionnement pour les systèmes hybrides

Contenu de la leçon 21



21.1 Intégration photovoltaïque

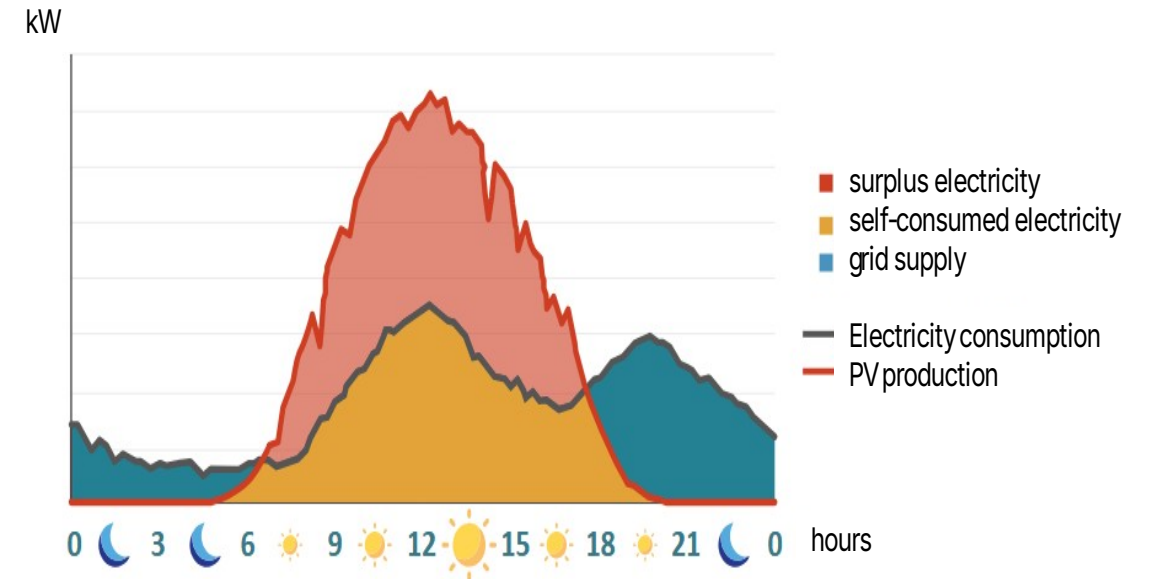
1. Interface électrique

- Les pompes à chaleur fonctionnent à l'électricité CA
- Les panneaux photovoltaïques produisent du courant continu
- Un onduleur est nécessaire pour la conversion courant continu-courant alternatif
- Les systèmes photovoltaïques domestiques comprennent déjà un onduleur et un régulateur

2. Communication et contrôle

- Interfaces avec le réseau intelligent
- Signal physique (contact sans tension)
- Protocoles de communication par bus

L'hybridation n'est pas seulement électrique, mais aussi algorithmique.



Co-funded by
the European Union



Objectif :

- Absorber l'électricité produite localement
- Modifier les consignes de fonctionnement
- Réduire l'exportation d'électricité vers le réseau



21.1 Intégration photovoltaïque

1. Décalage quotidien

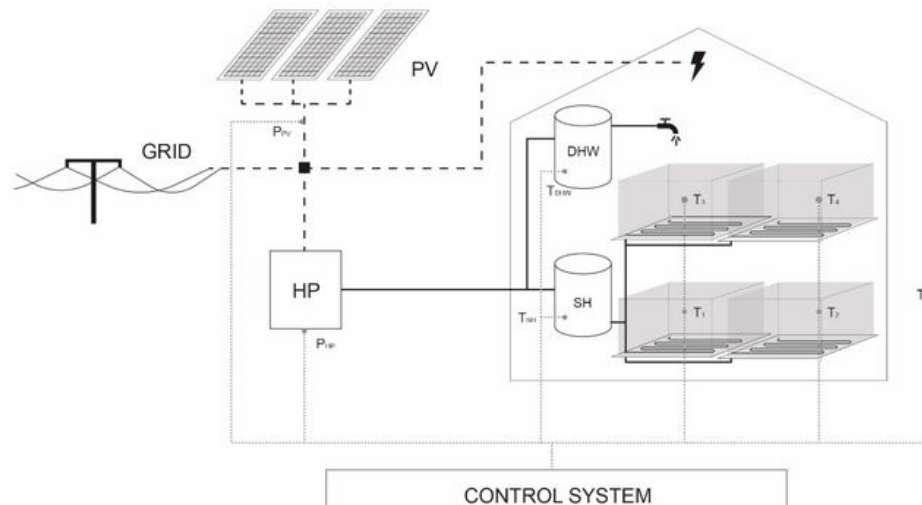
- La production photovoltaïque atteint son pic à midi
- La demande résidentielle atteint son pic le matin et le soir

2. Comportement saisonnier

- Été : la demande de climatisation s'aligne sur la production photovoltaïque
- Hiver : la demande de chauffage est mal alignée sur le pic photovoltaïque

3. Rôle du stockage

- Sans stockage :
 - Excédent d'électricité injecté dans le réseau
 - Autoconsommation limitée
- Avec stockage :
 - Batteries → stockage électrique
 - Stockage thermique → réservoirs d'eau chaude sanitaire / réservoirs tampons
 - Inertie thermique du bâtiment → flexibilité côté demande



Le stockage thermique est souvent l'option de flexibilité la plus rentable

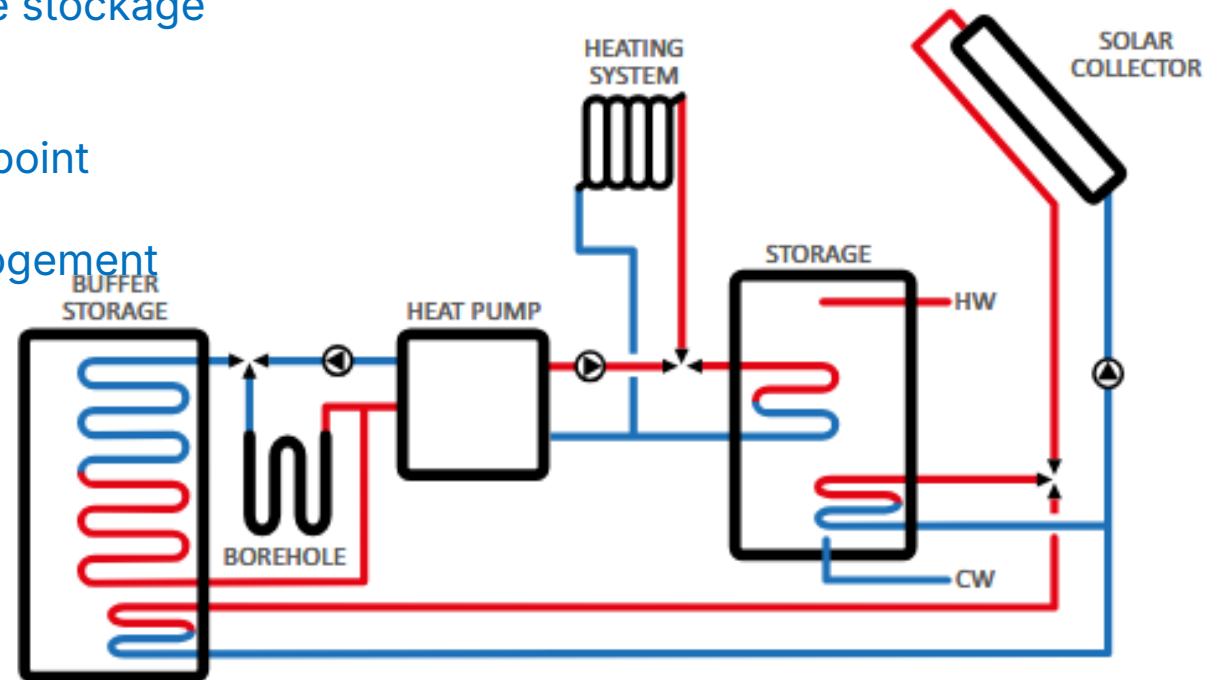
21.2 Intégration de l'énergie solaire thermique

1. Architecture du système

- Les capteurs solaires alimentent le système de stockage thermique
- La pompe à chaleur fournit un chauffage d'appoint
- Capacité de stockage type : 100 à 300 L par logement

2. Configurations de stockage

- Réservoir à température unique
- Stockage à deux niveaux :
 - Haute température (eau chaude sanitaire)
 - Basse température (chauffage des locaux)



L'énergie solaire réduit le temps de fonctionnement du compresseur

21.2 Intégration du solaire thermique

1. Hiérarchie de contrôle

- 1. Comparer la température du capteur et celle du ballon
- 2. Si $\Delta T \geq 7 \text{ °C}$ → transfert de la chaleur solaire
- 3. Si la température du ballon est inférieure au point de consigne → la pompe à chaleur est activée

2. Priorisation de la demande

- L'eau chaude sanitaire a généralement la priorité
- Le chauffage est pris en charge lorsque l'énergie solaire est insuffisante

3. Recommandations de conception

- Éviter le surdimensionnement des panneaux photovoltaïques
- Adapter la puissance de la pompe à chaleur à la demande thermique
- Trouver un équilibre entre le coût d'installation et le taux d'autoconsommation

Les systèmes hybrides nécessitent une commande coordonnée, et non des sous-systèmes indépendants.

LEÇON 22

Systèmes géothermiques



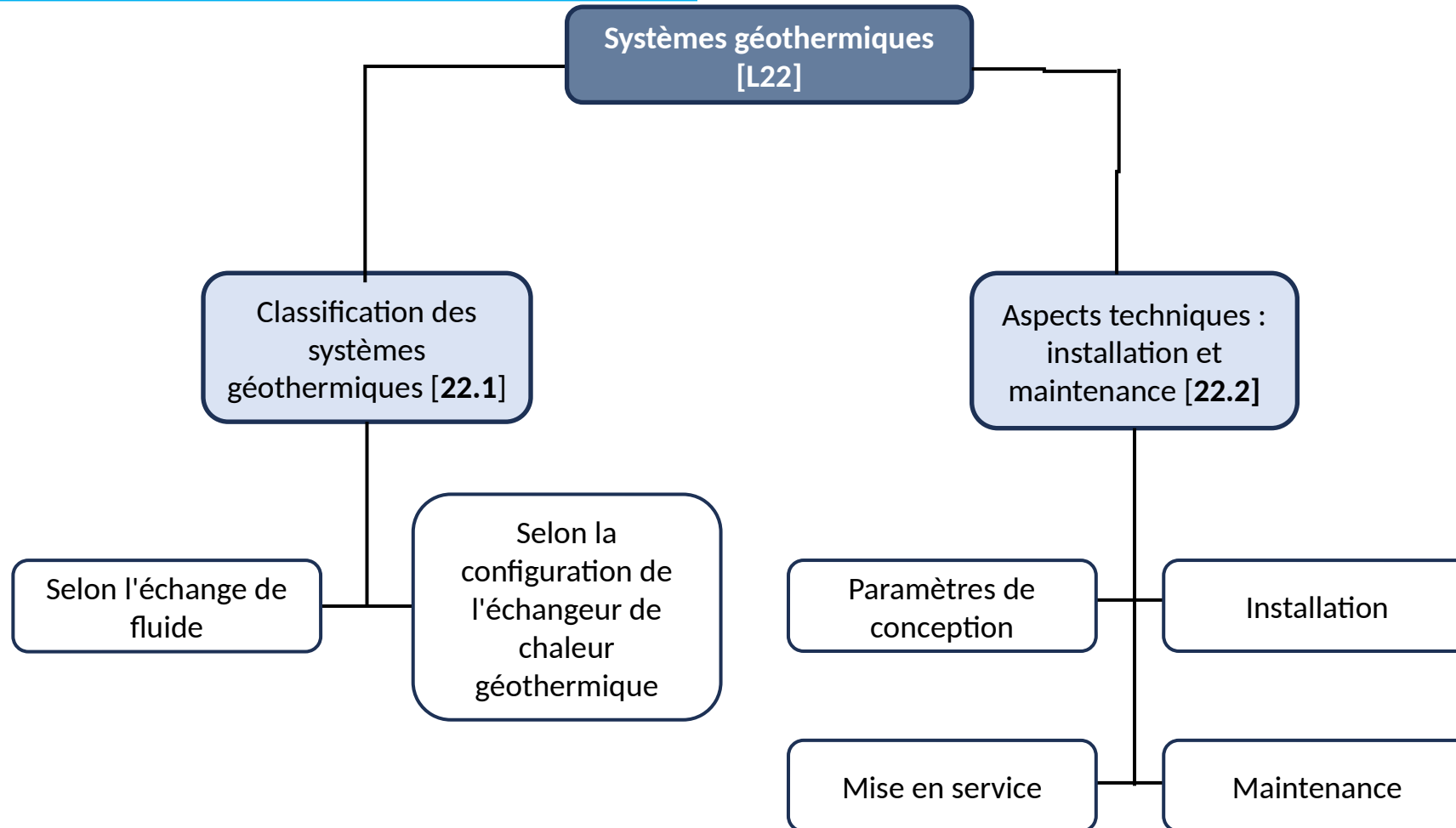
Co-funded by
the European Union



Objectifs de la leçon 22

1. Comprendre le principe de fonctionnement des pompes à chaleur géothermiques
2. Expliquer pourquoi la stabilité de la température du sol améliore le rendement
3. Classifier les systèmes géothermiques (en circuit fermé et en circuit ouvert)
4. Distinguer les échangeurs de chaleur verticaux des échangeurs de chaleur horizontaux
5. Identifier les exigences en matière d'installation et d'entretien

Contenu de la leçon 22



22.1 Classification des systèmes géothermiques

1. Principe de fonctionnement

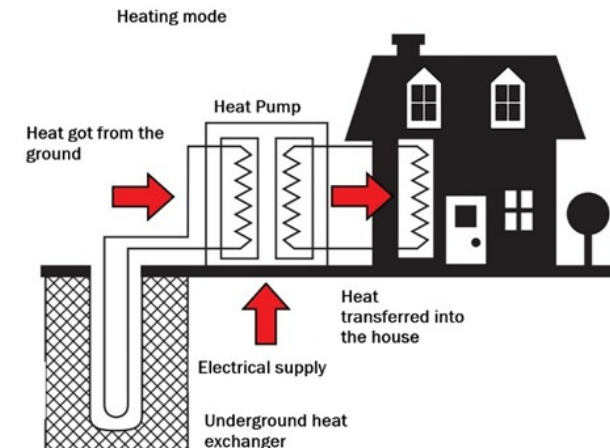
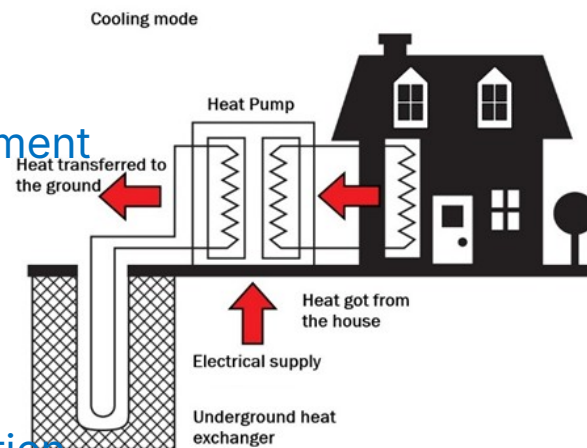
- La température du sol reste stable ($\approx 3\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Hiver → le sol sert de source de chaleur
- Été → le sol agit comme un puits de chaleur
- Écart de température réduit par rapport aux systèmes à air

2. Systèmes en boucle fermée

- Aucun échange de fluide avec l'environnement
- Tuyauterie en polyéthylène haute densité
- Mélanges antigel (propylène glycol)
- Système étanche, nécessitant peu d'entretien

3. Systèmes en boucle ouverte

- Extraction d'eau souterraine
- Réinjection ou rejet d'eau
- Sensibles à la qualité de l'eau (minéraux, acidité)



Co-funded by
the European Union



22.1 Classification des systèmes géothermiques

1. Forages verticaux

- Encombrement réduit
- Tube en U en plastique inséré dans le forage
- Le coulis à propriétés thermiques améliorées optimise le transfert de chaleur

2. Forages en spirale

- Surface d'échange accrue
- Installation verticale

3. Systèmes horizontaux

- Tranchées à faible profondeur
- Besoin en terrain plus important
- Influencé par les variations de température de surface

4. Configurations en spirale

- Tubes spiralés aplatis
- Installation dans des tranchées ou des fosses
- Optimisé pour les surfaces limitées

22.2 Aspects techniques relatifs à l'installation et à la maintenance des systèmes géothermiques

1. **Systèmes verticaux**

- Diamètre du forage : 110–165 mm
- Insertion immédiate de la sonde après le forage
- Remblayage avec du coulis (sable, bentonite, ciment)
- Contact thermique avec le sol environnant essentiel



2. **Systèmes horizontaux**

- Préparation et nivellement de la tranchée
- Lit de sable pour la protection des tuyaux
- Remblai à grains fins
- Éviter les surfaces pavées au-dessus de l'échangeur



Le contact thermique détermine les performances à long terme.

22.2 Aspects techniques relatifs à l'installation et à la maintenance des systèmes géothermiques

1. Étapes de mise en service

- Rinçage à l'eau sous pression
- Purge à l'air
- Essai de pression ($\sim 3\times$ pression de service)
- Essais par sections dans les grandes installations

2. Paramètres de conception

- Charge thermique (chauffage/refroidissement) du bâtiment
- Conductivité thermique du sol
- Dimensionnement du champ de forage

3. Caractéristiques d'entretien

- Boucle souterraine → sans entretien
- Unités eau-eau → entretien moindre que les systèmes à air
- La durée de vie des boucles souterraines peut dépasser 50 ans



Les systèmes géothermiques déplacent la complexité de l'exploitation vers la conception