

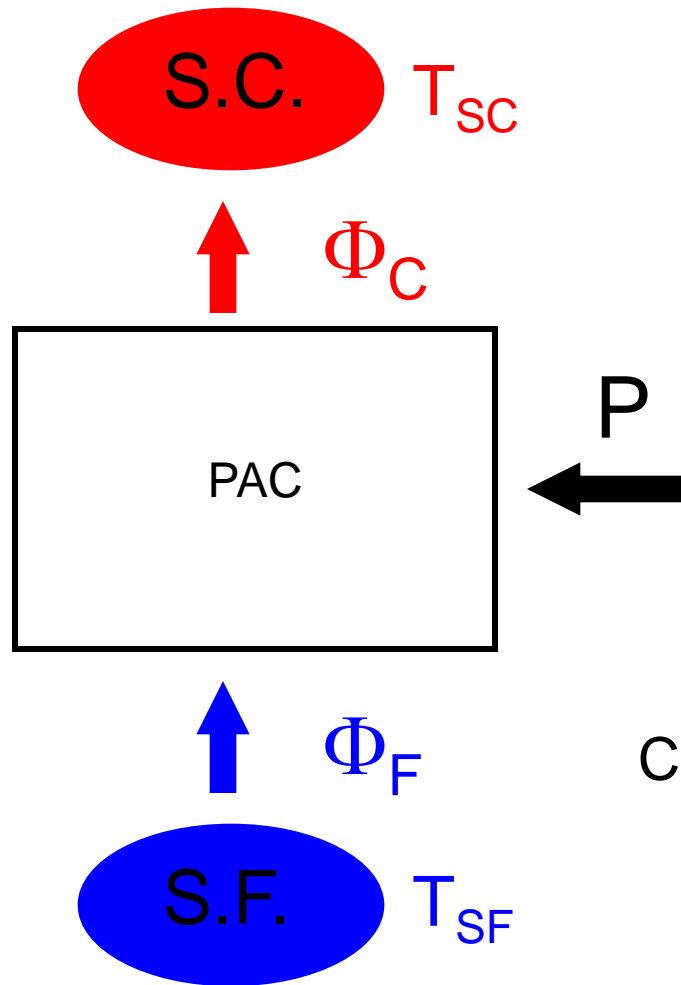
Faculté Polytechnique



La technologie des pompes à chaleur : Etat de l'art et perspectives

Dr Ir Eric Dumont et Prof. Marc Frère
eric.dumont@umons.ac.be

Introduction



Utilisation assistée
d'une source
d'énergie gratuite

Coefficient de
performance :

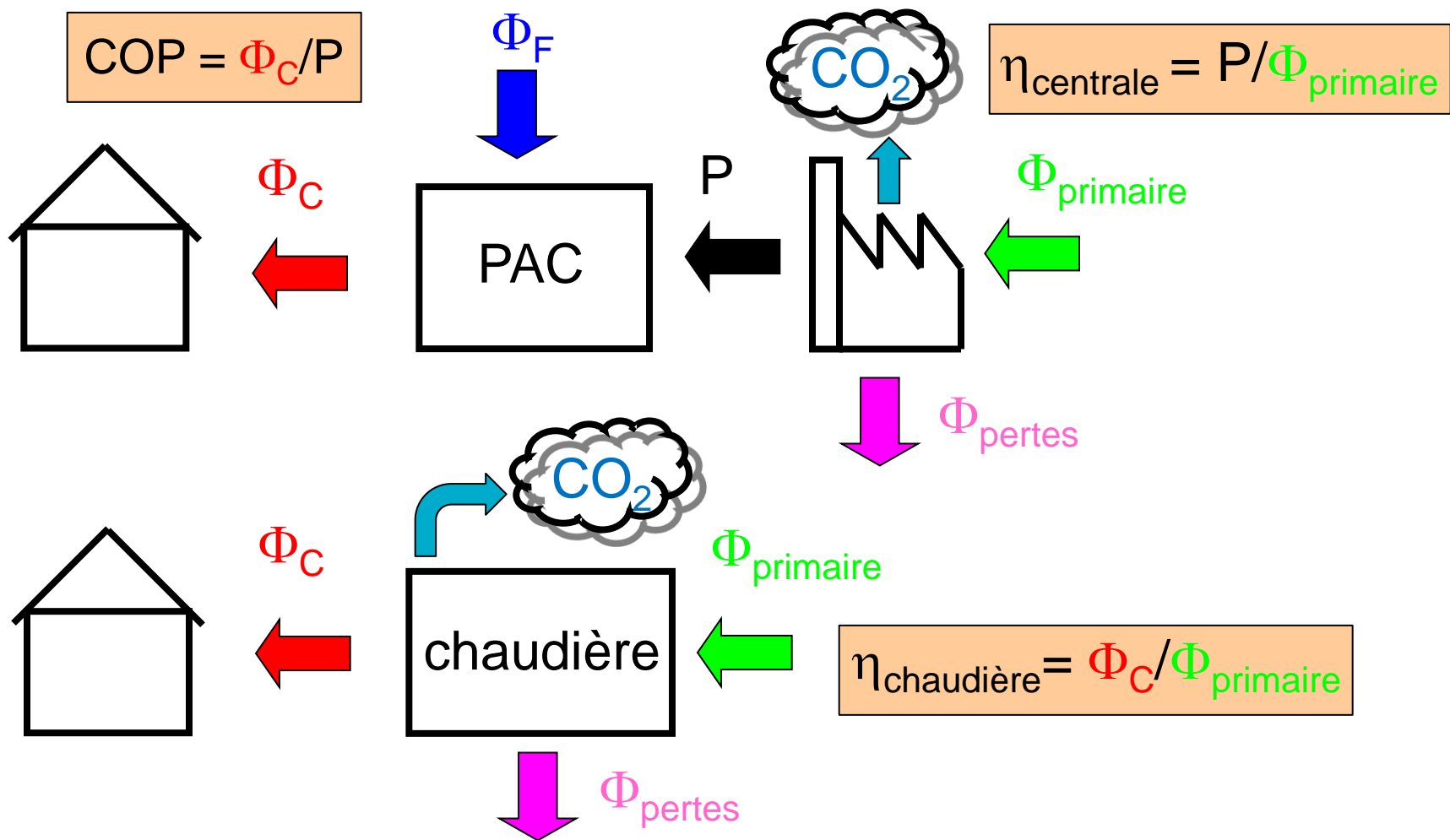
$$\text{COP} = \Phi_c / P$$

$$\text{COP}_{\text{IDEAL}} = T_{sc} / (T_{sc} - T_{sf})$$

Introduction

- Une partie de l'énergie nécessaire au chauffage du bâtiment provient de la source froide (Φ_F) qui est une énergie **gratuite, renouvelable, non polluante**
- Le complément (P) est habituellement de l'énergie électrique, elle-même produite à partir d'**énergie primaire** majoritairement **non renouvelable et polluante**.
- L'intérêt des pompes à chaleur peut-être :
 - énergétique (gain en énergie primaire fossile)
 - environnemental (gain en rejet de gaz à effet de serre, CO₂ principalement)
 - économique (gain en coût d'énergie de chauffage)
- Le calcul des gains doit se faire par comparaison avec une autre technique de chauffage, habituellement **la chaudière au gaz naturel**

Introduction



Introduction

- Intérêt énergétique (gain en énergie primaire) :

$$\Phi_{\text{primaire}} = \Phi_{\text{C}} / (\eta_{\text{centrale}} \text{COP})$$

$$\Phi_{\text{primaire}} = \Phi_{\text{C}} / (\eta_{\text{chaudière}})$$

$$\eta_{\text{centrale}} \text{COP} > \eta_{\text{chaudière}}$$

- Comme le COP varie au cours de l'année en fonction de la température des sources, on utilisera le COP moyen d'une saison de chauffe :

SPF (seasonal performance factor) ou FPS (facteur de performance saisonnier)

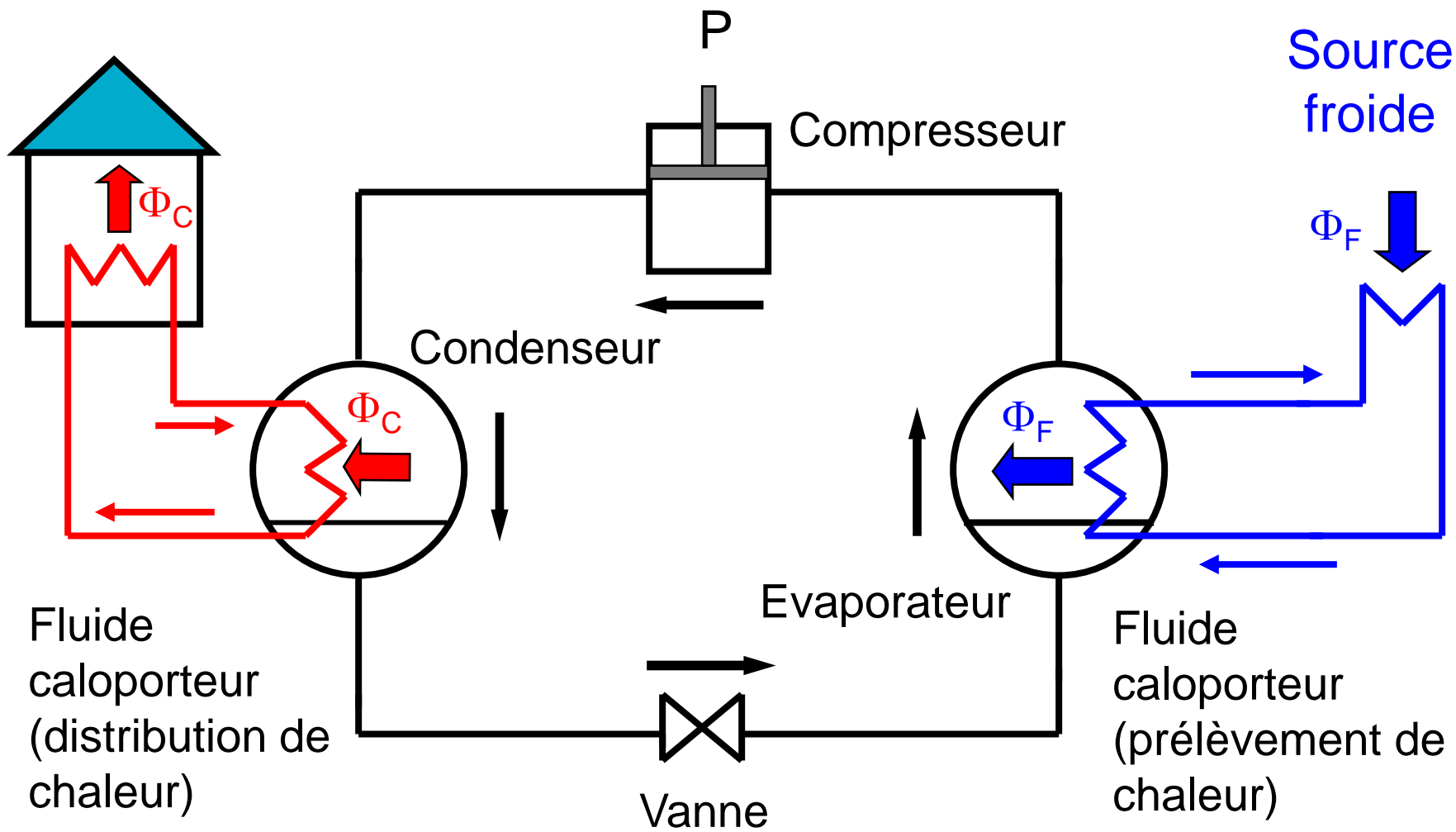
$$\text{SPF} > 2.5 \text{ (Europe : 2.88)}$$

Introduction

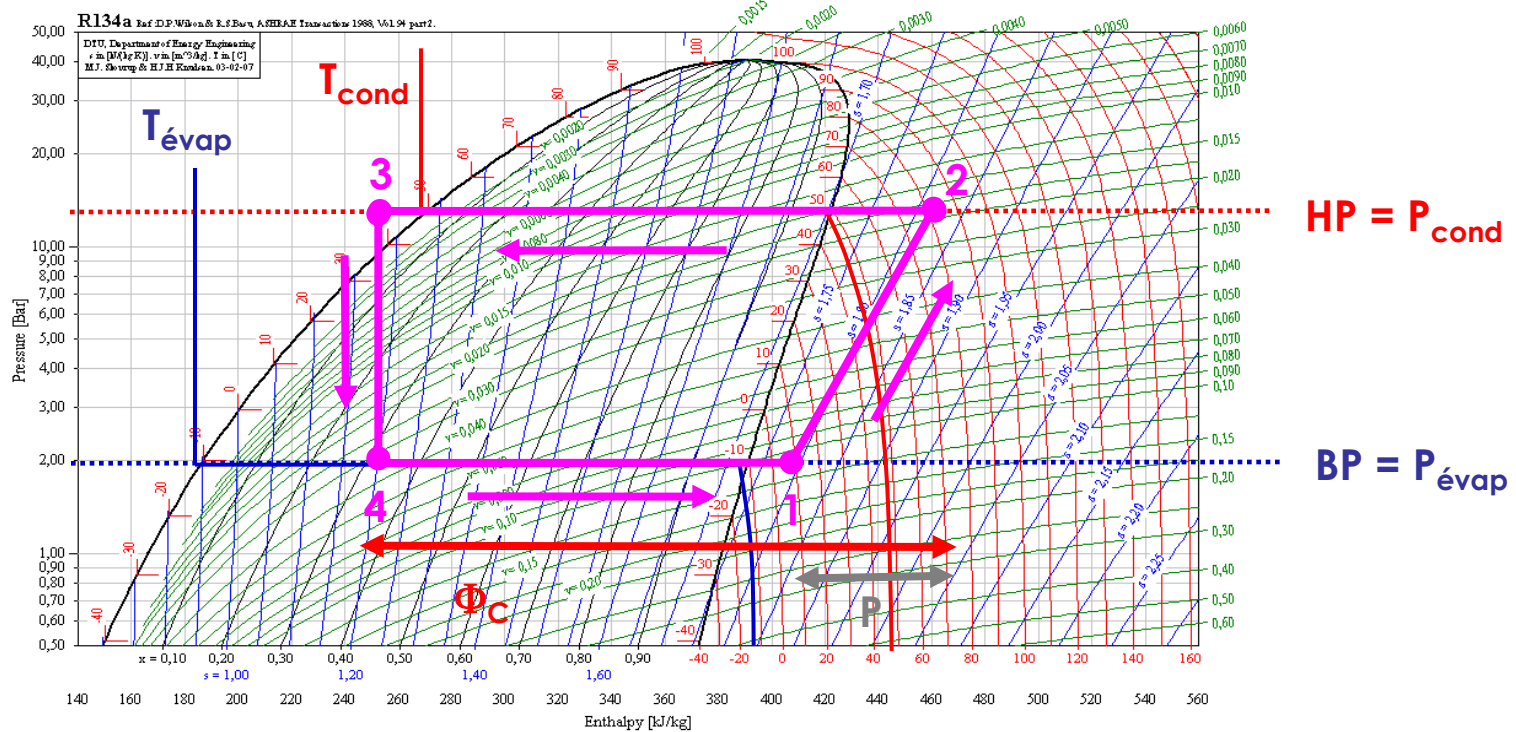
- Intérêt environnemental (gain en rejet de CO₂) :
 - dépend du type d'énergie primaire utilisée dans les centrales électriques
 - en Belgique, gaz naturel et nucléaire majoritairement

SPF > 1.8
- Intérêt économique (coût de l'énergie de chauffage) :
 - dépend du coût de l'électricité
 - dépend du taux d'utilisation de la PAC en tarif de nuit

Introduction



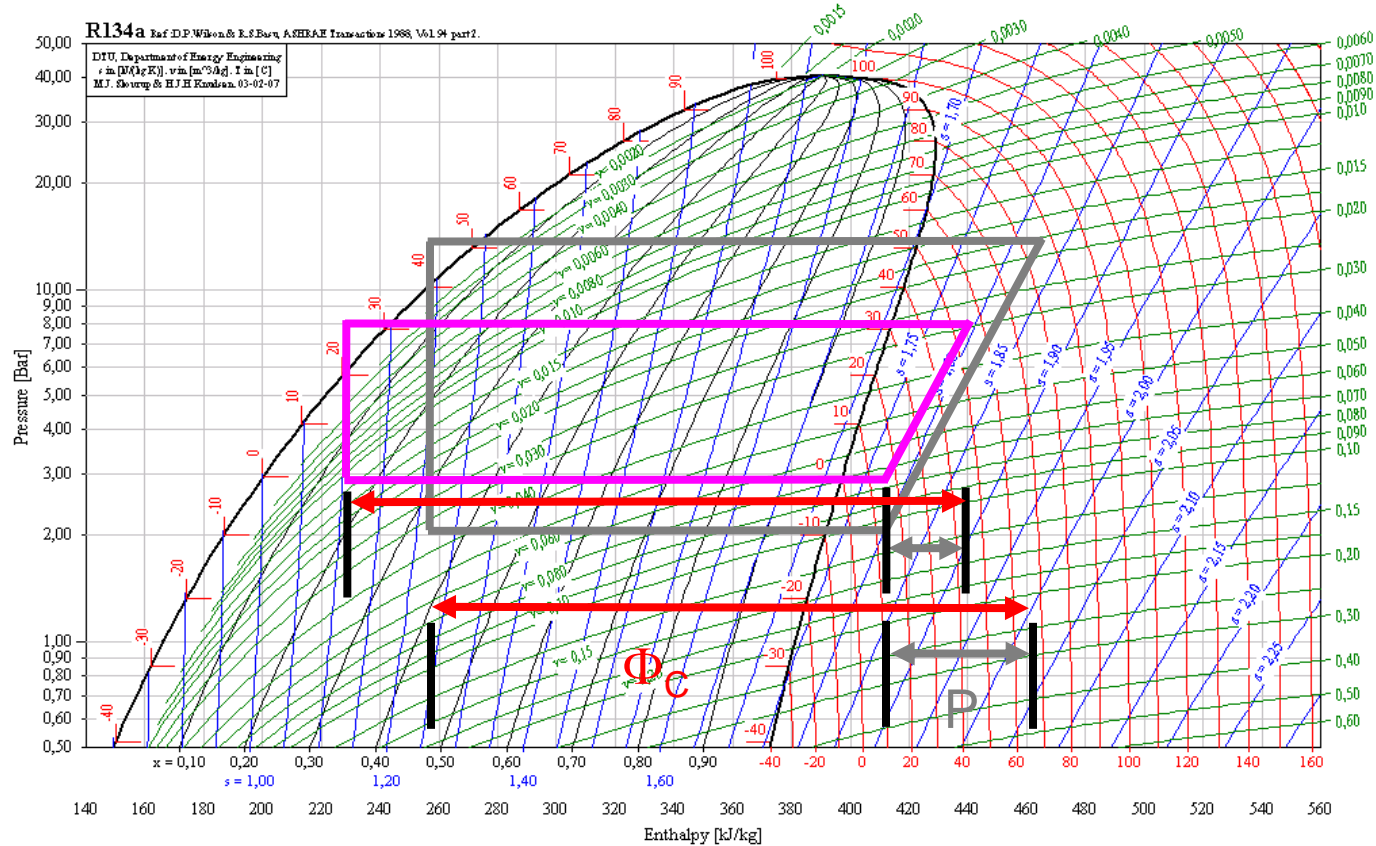
Introduction



$$\Phi_C = q_M (h_3 - h_2) \quad P = q_M (h_2 - h_1)$$

$$COP = -\Phi_C / P = (h_2 - h_3) / (h_2 - h_1)$$

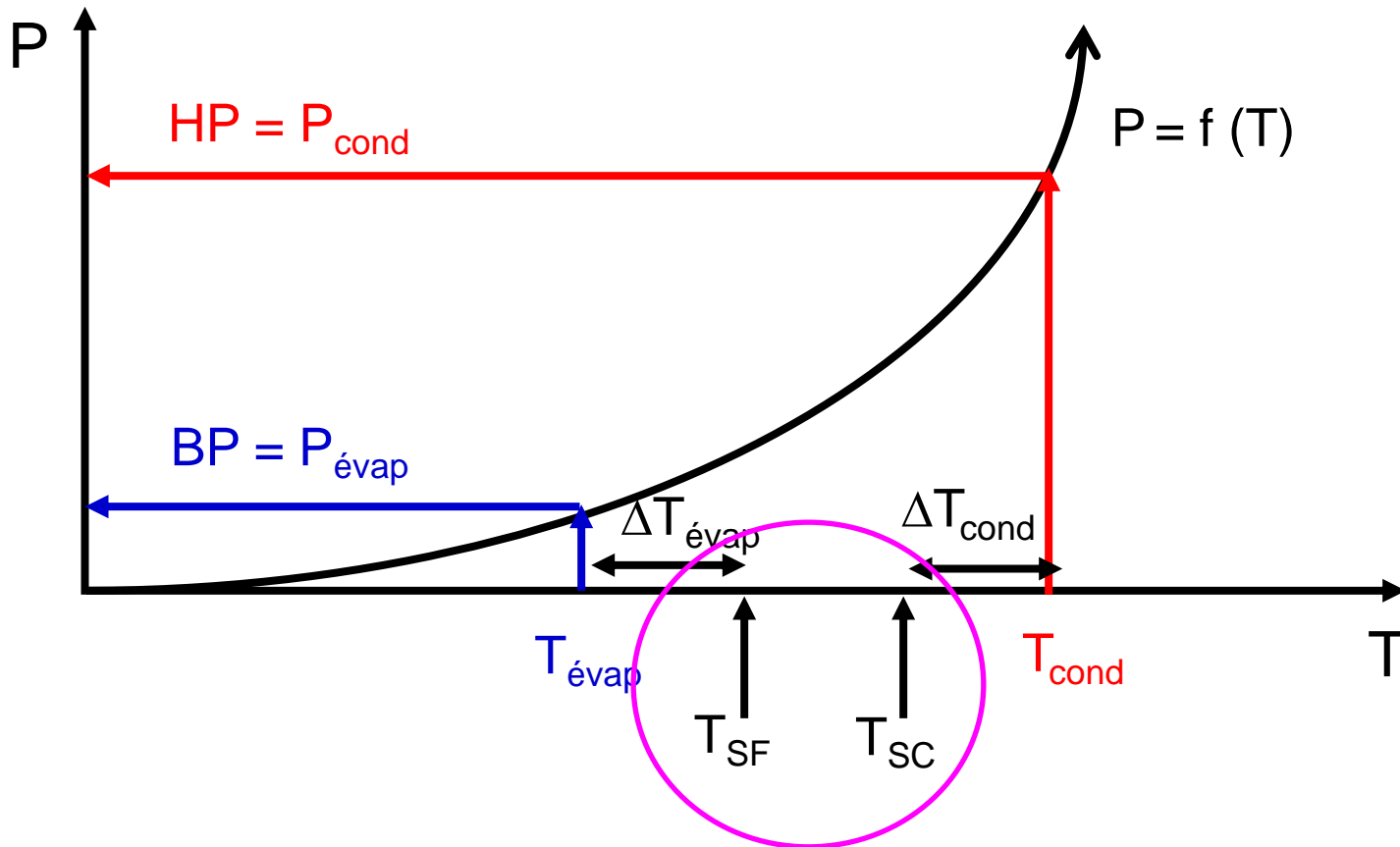
Introduction



Si $HP \downarrow$ et $BP \uparrow$, $\Phi_C \uparrow$, $P \downarrow$ et le $COP = \Phi_C / P \uparrow$

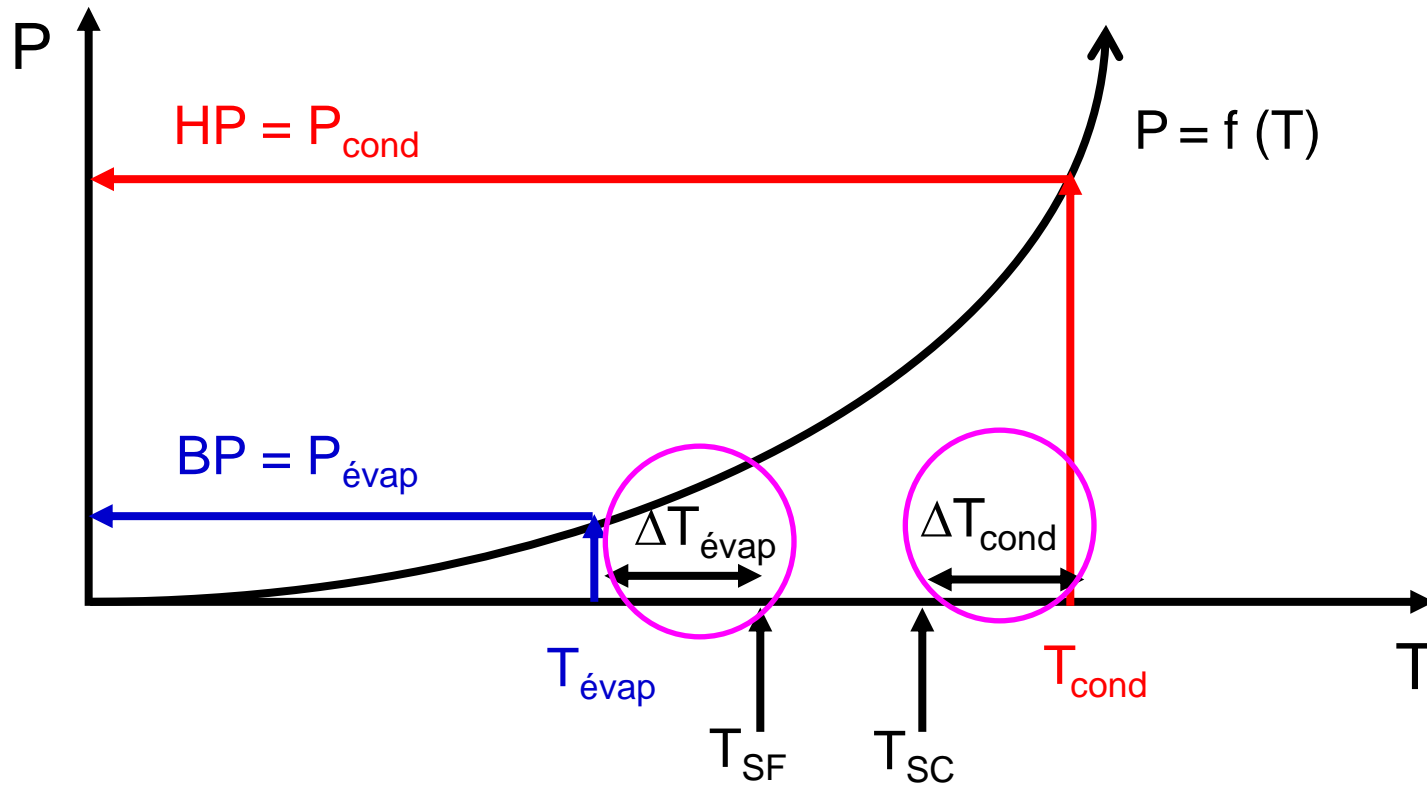
Introduction

- Pour augmenter le COP, il faut diminuer HP (T_{COND}) et/ou augmenter BP (T_{EVAP}) : en augmentant T_{SF} et/ou en diminuant T_{SC}

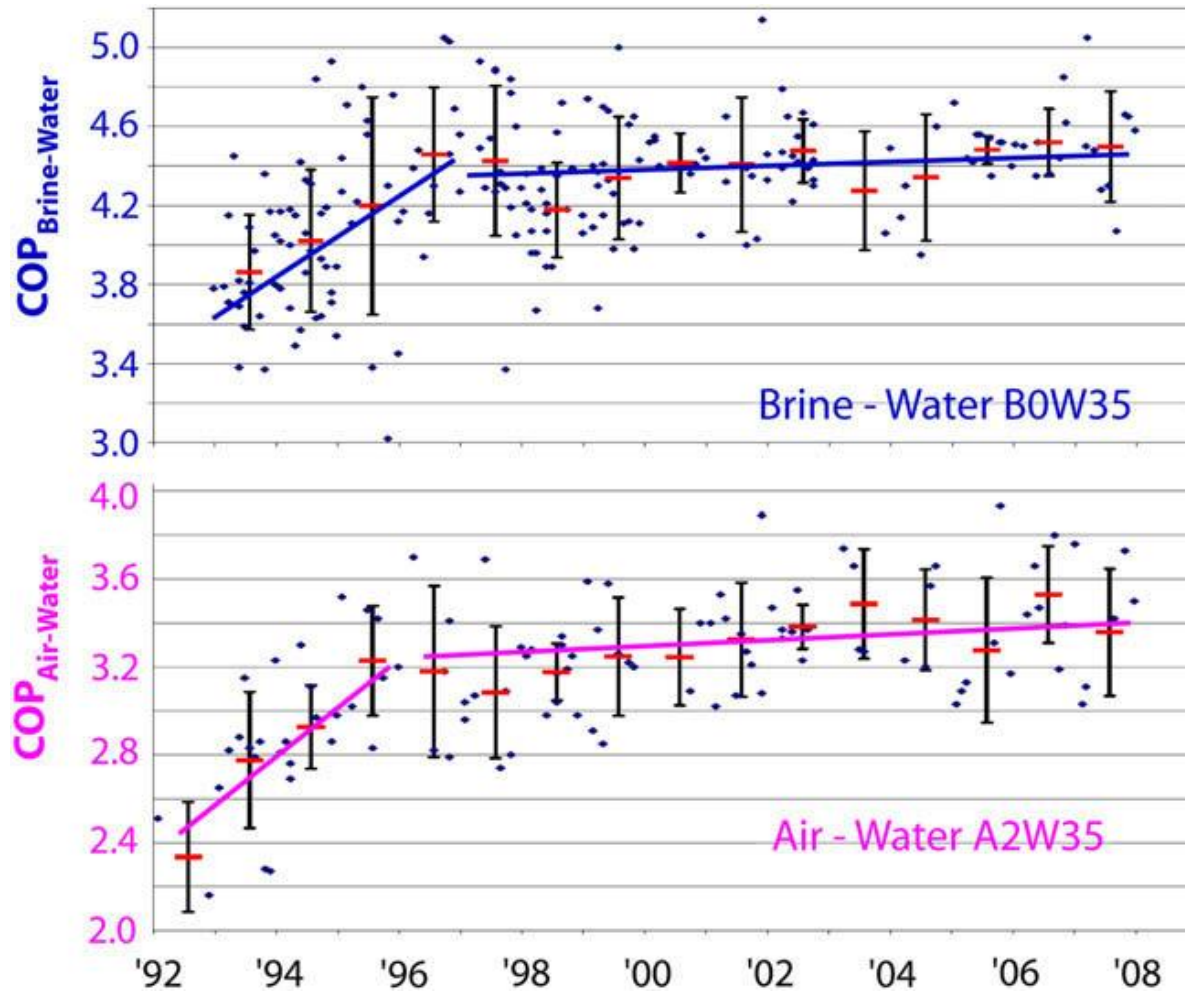


Introduction

- Pour augmenter le COP, il faut diminuer HP (T_{COND}) et/ou augmenter BP (T_{EVAP}) : en diminuant ΔT_{EVAP} et/ou ΔT_{COND} (augmentation de l'efficacité des échangeurs)



Introduction



Source : doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006

Introduction

Evolutions technologiques de ces dernières années et à venir

But : augmenter le coefficient de performance saisonnier !

Les températures des sources

Le cycle thermodynamique

Le fluide utilisé

La qualité des composants

Le dimensionnement et la régulation

Températures des sources

Températures des sources

$$COP = x COP_{IDEAL} \qquad COP_{IDEAL} = \frac{T_{SC}}{T_{SC} - T_{SF}}$$

Facteur x : dépend de la qualité technologique de la PAC

Source chaude: distribuer la chaleur à basse température

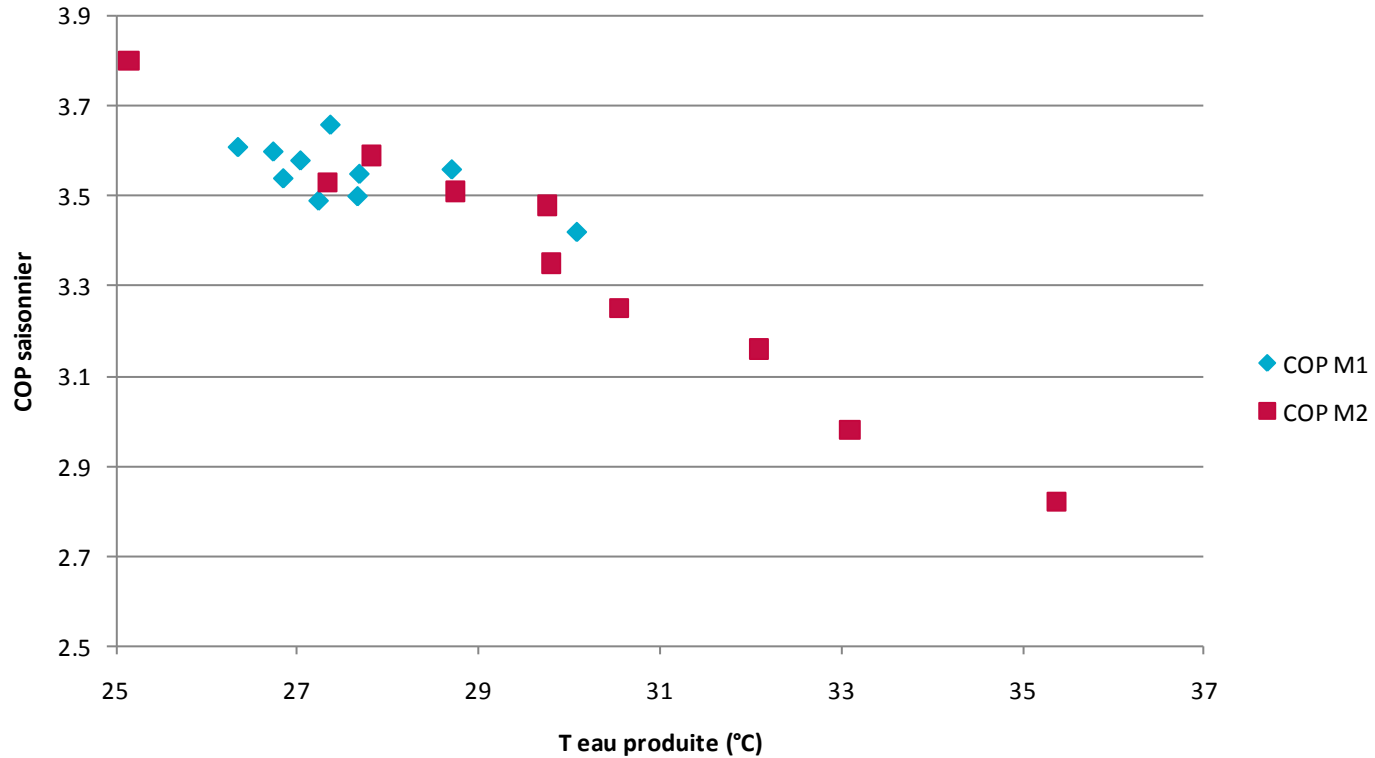
Source froide: préchauffage du milieu froid par énergie solaire thermique

Gains potentiels importants

Températures des sources

Distribution de chaleur à basse température

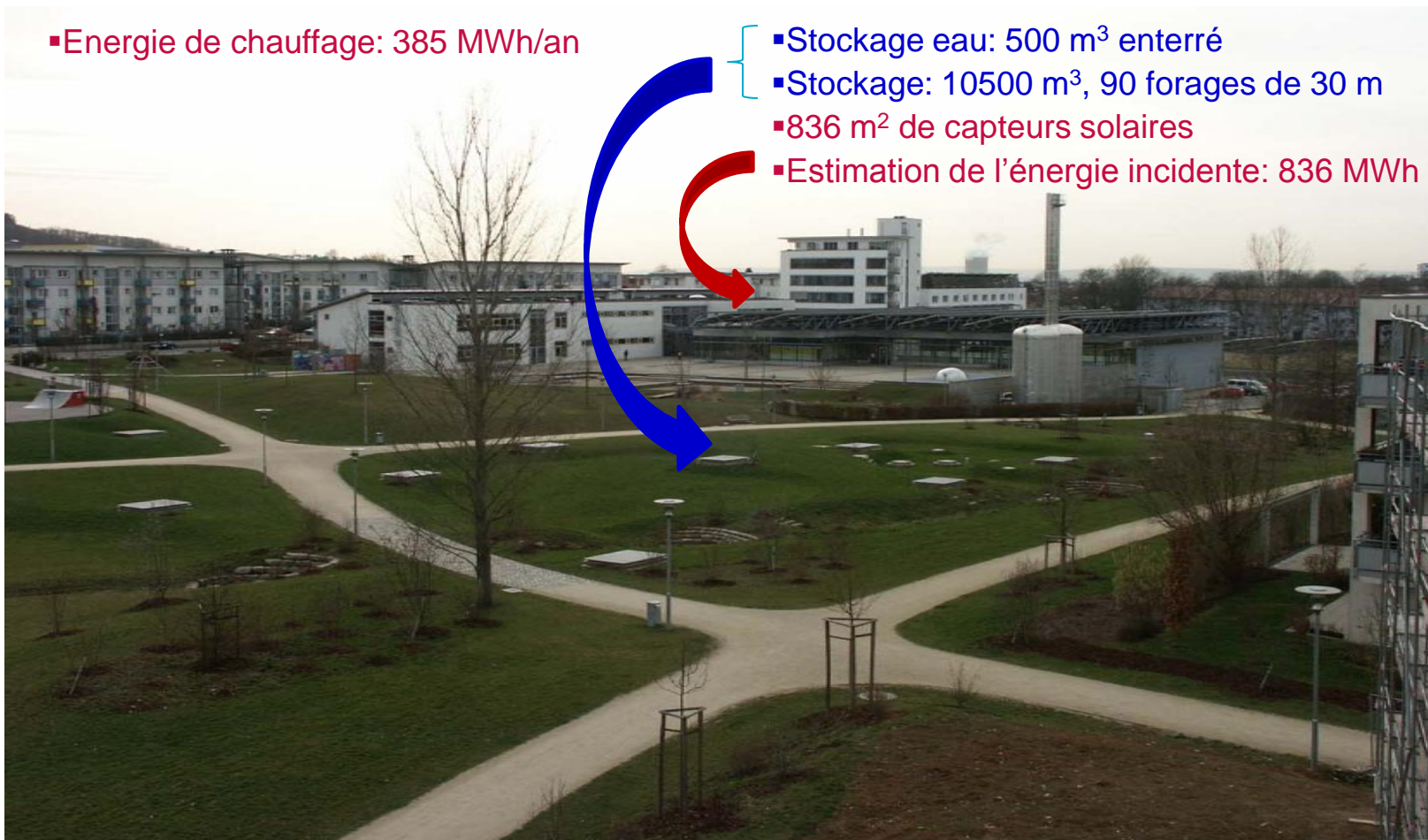
COP en fonction de la température de l'eau produite



Températures des sources

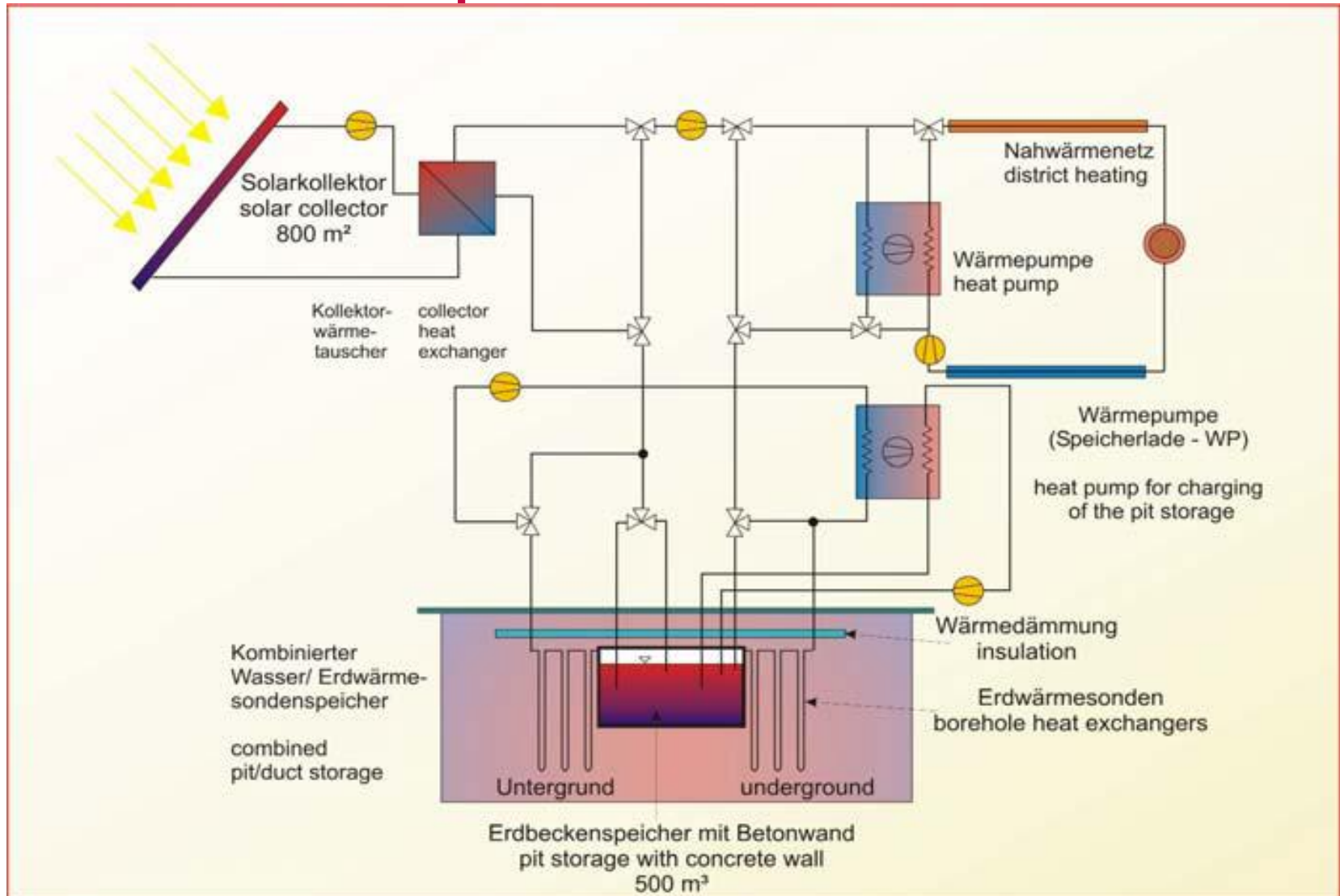
▪Energie de chauffage: 385 MWh/an

- Stockage eau: 500 m³ enterré
- Stockage: 10500 m³, 90 forages de 30 m
- 836 m² de capteurs solaires
- Estimation de l'énergie incidente: 836 MWh



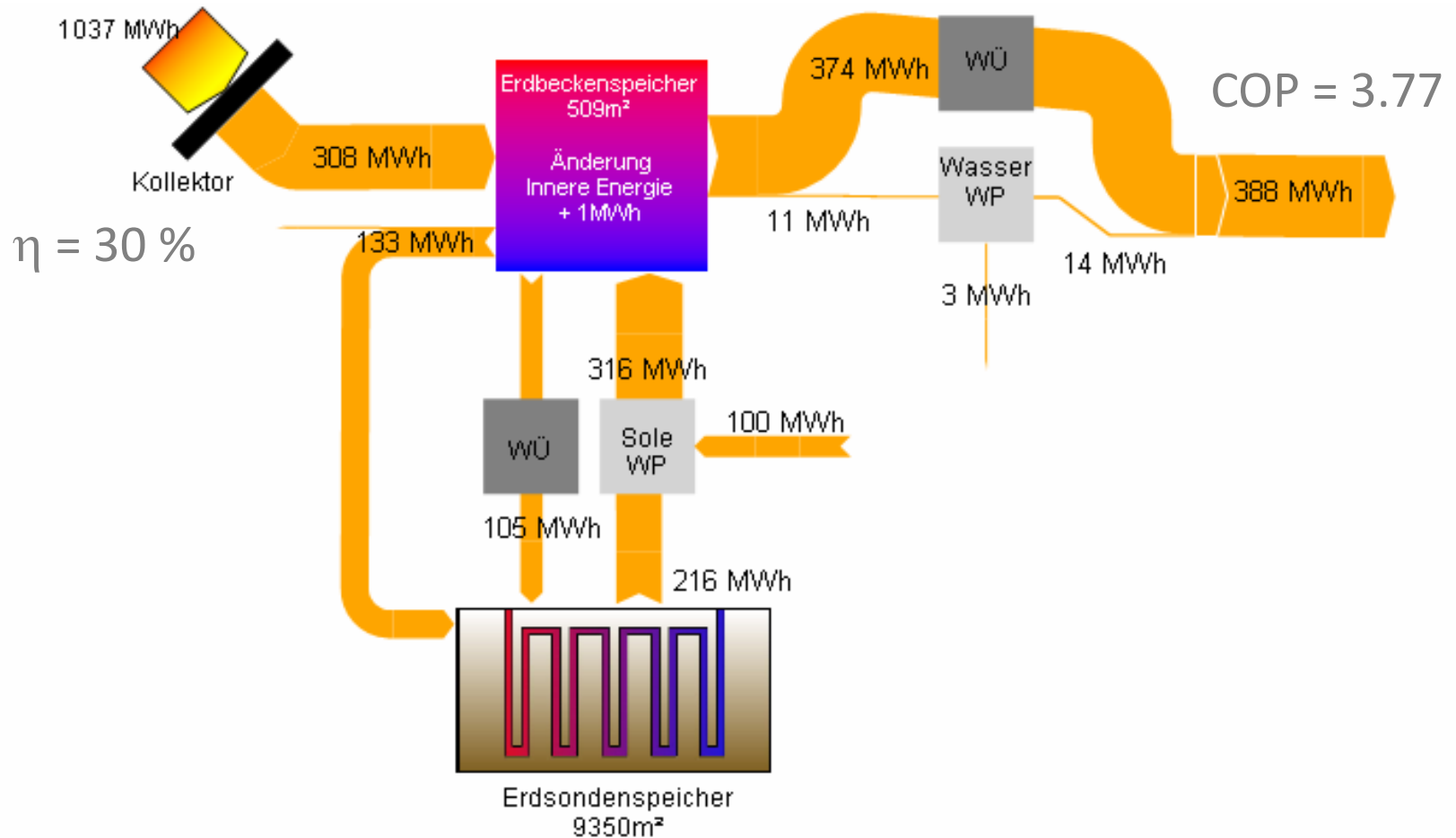
Source : Ecstock Thermal Energy Storage Conference 2006

Températures des sources



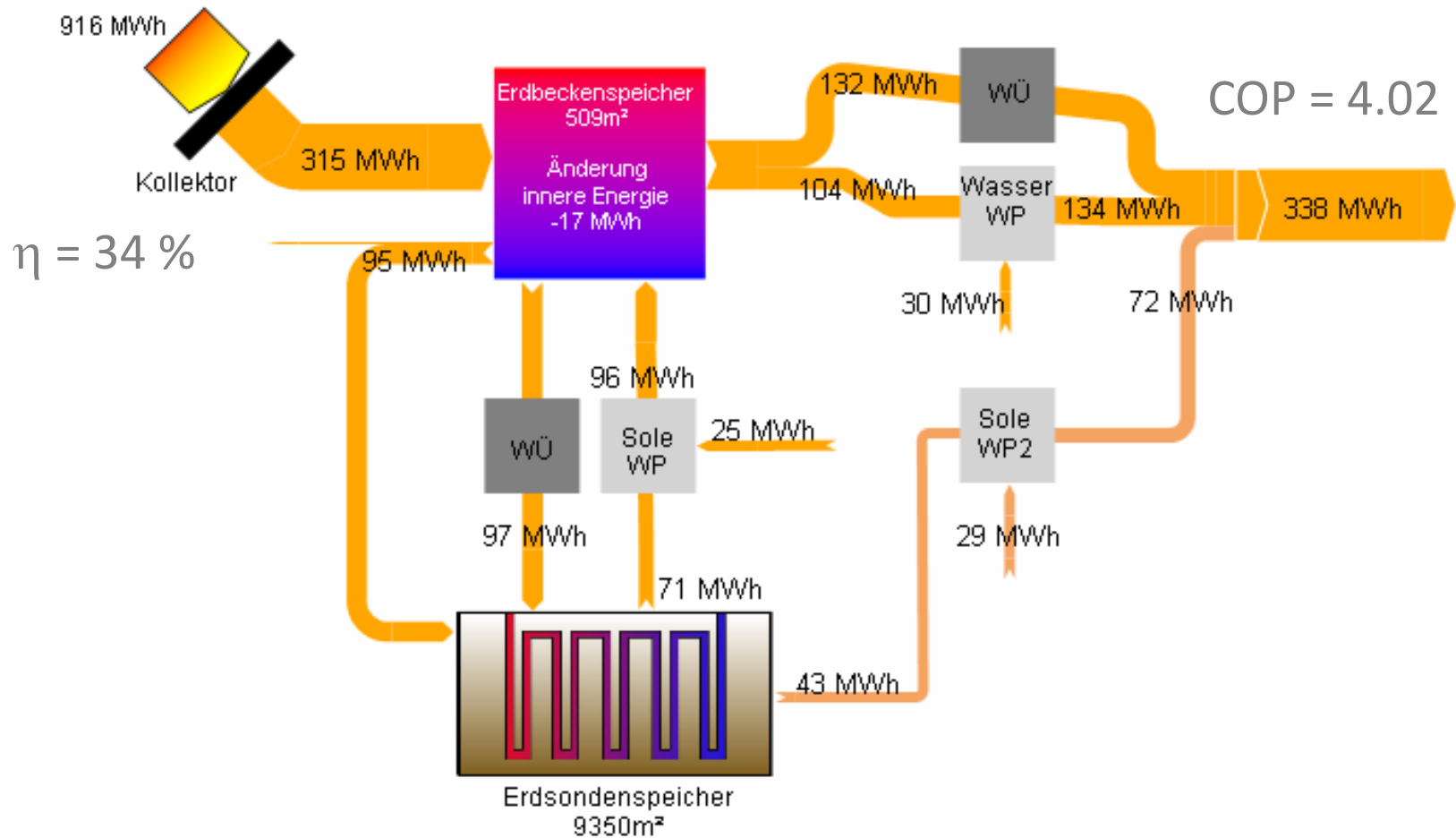
Source : Ecostock Thermal Energy Storage Conference 2006

Températures des sources



Source : Ecostock Thermal Energy Storage Conference 2006

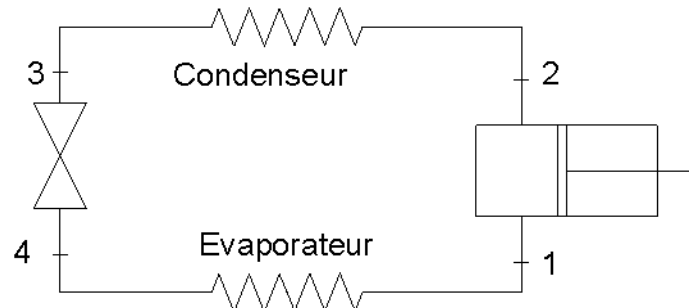
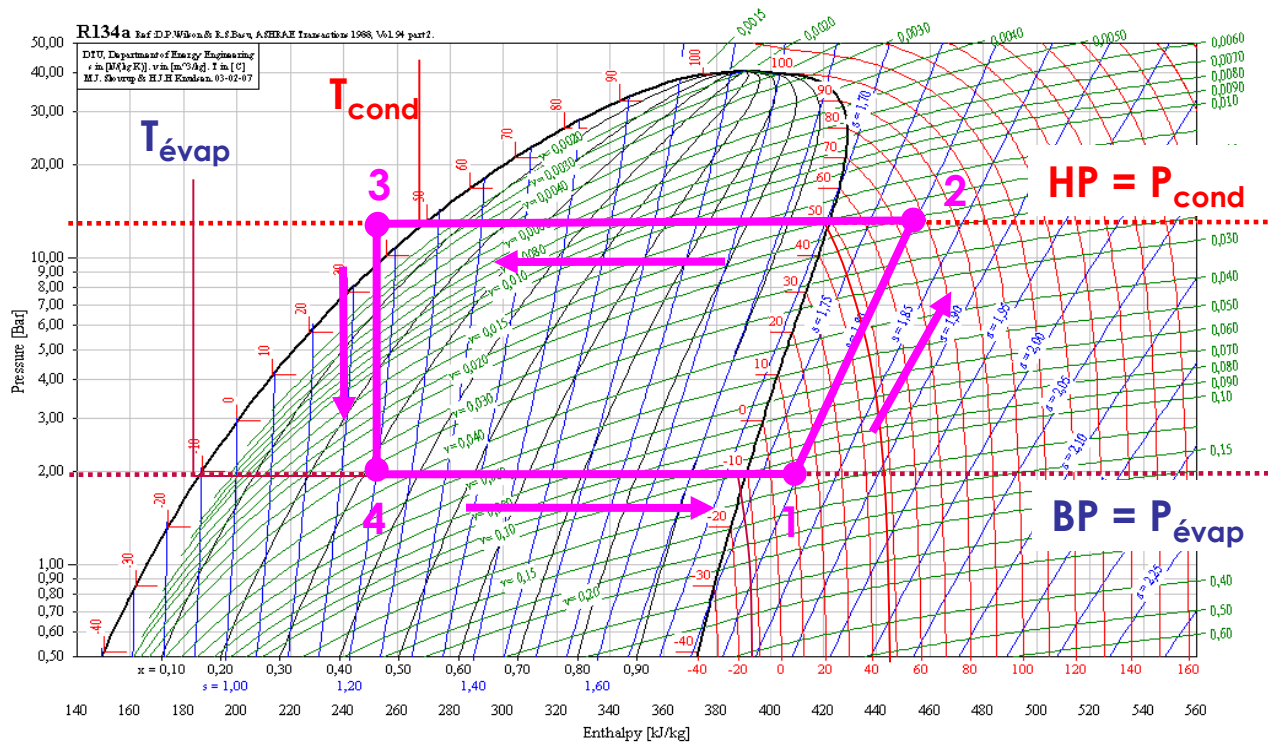
Températures des sources



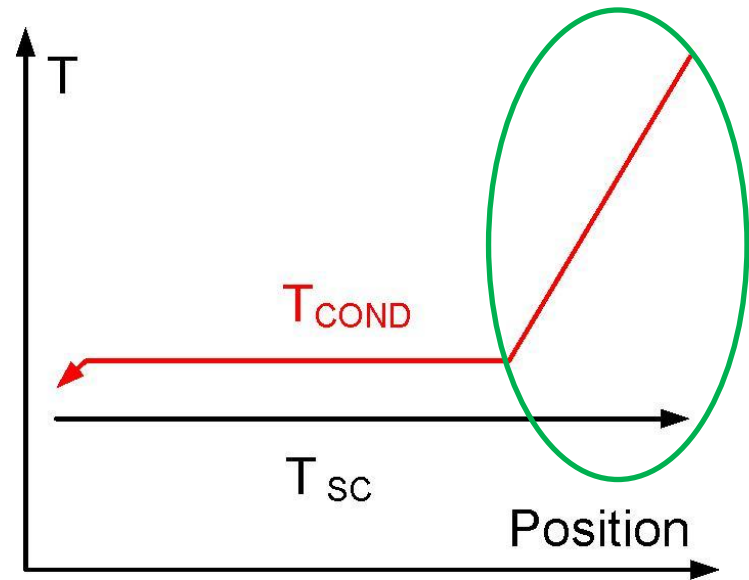
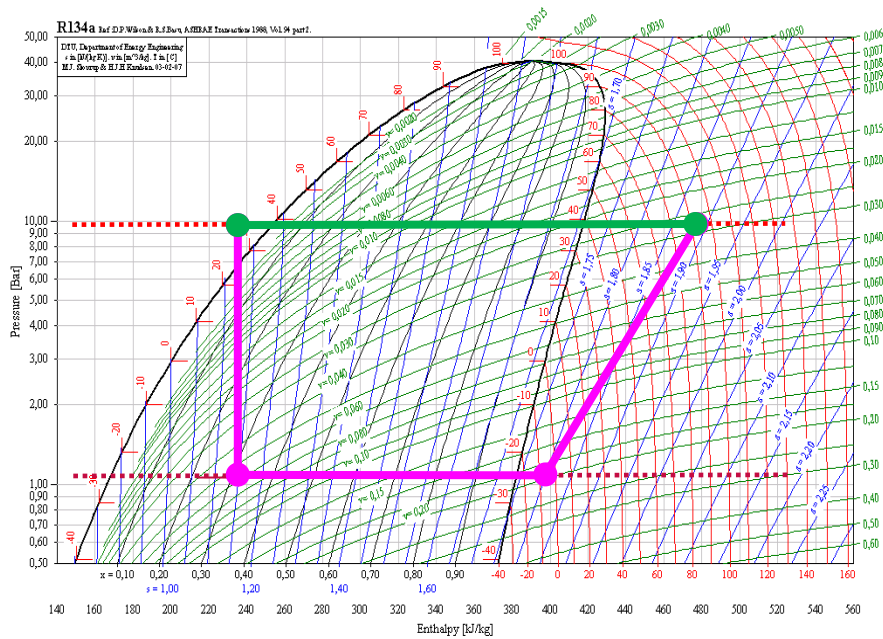
Source : Ecostock Thermal Energy Storage Conference 2006

Cycle thermodynamique

Cycle thermodynamique



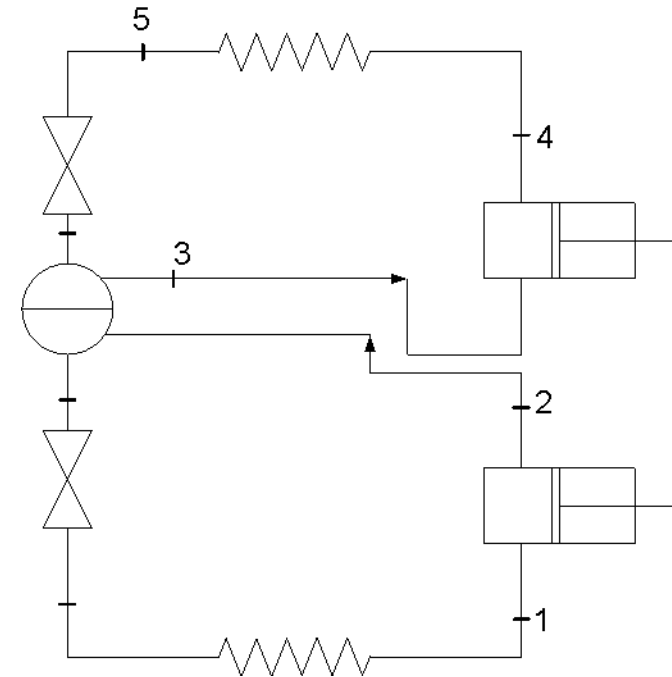
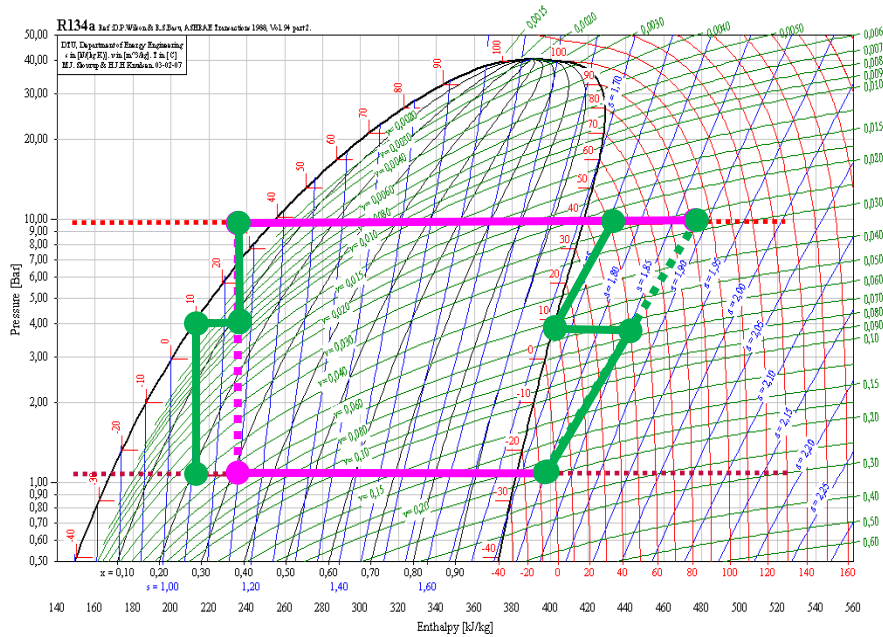
Cycle thermodynamique



Irréversibilités intrinsèques du cycle de Rankine inverse :

- échange de chaleur avec la source chaude (température de sortie des gaz au compresseur)

Cycle thermodynamique

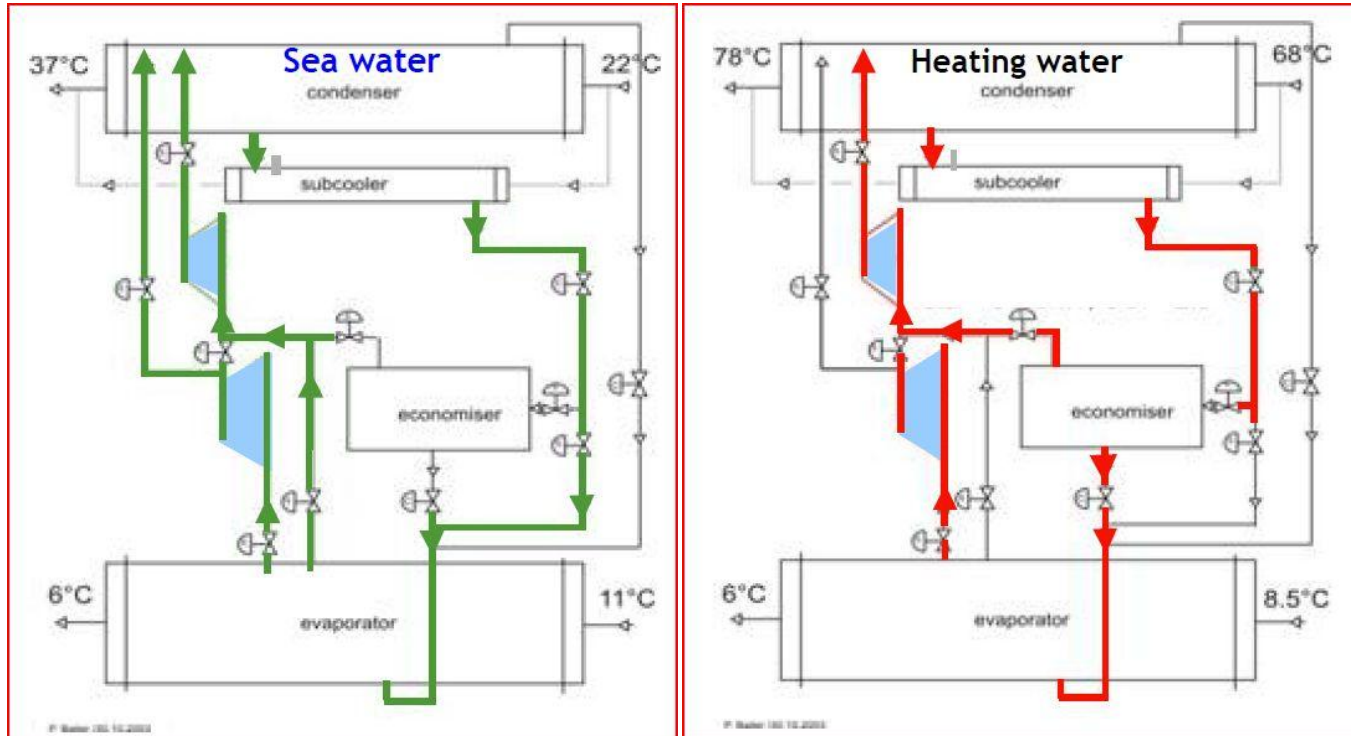


Utilisation d'un cycle avec compression et détente étagée :

- gain en COP

Cycle thermodynamique

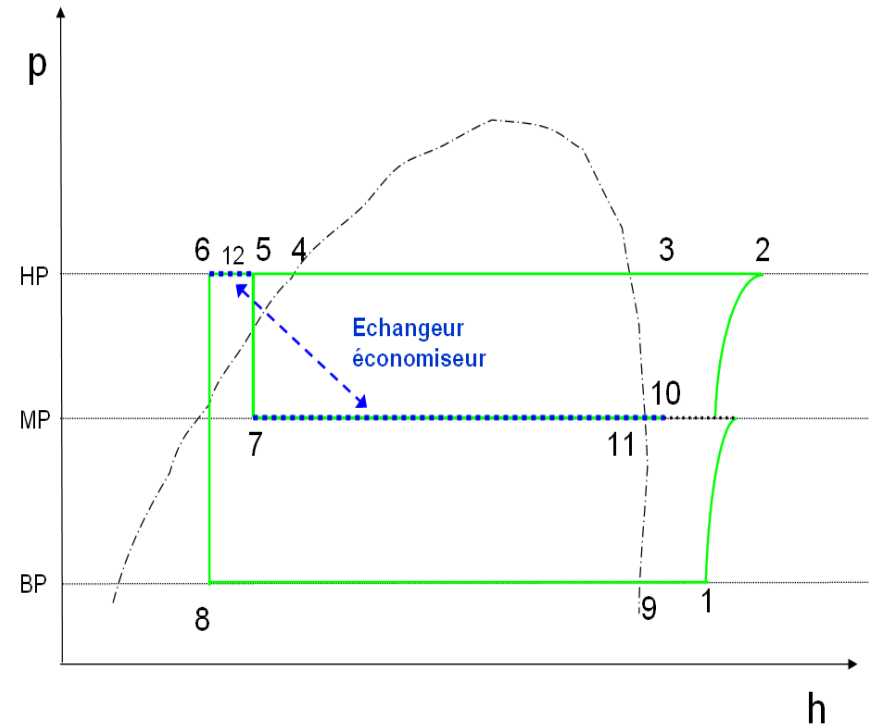
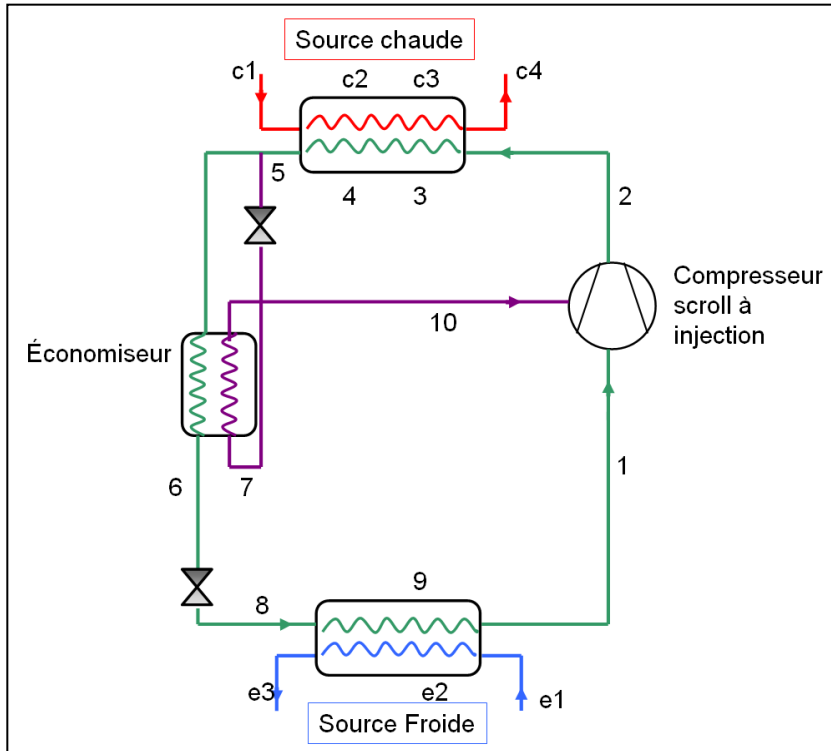
Cycle à compression et détente étagée existant pour les grandes puissances.
Exemple : district heating and cooling à Stockholm (Suède)



Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008

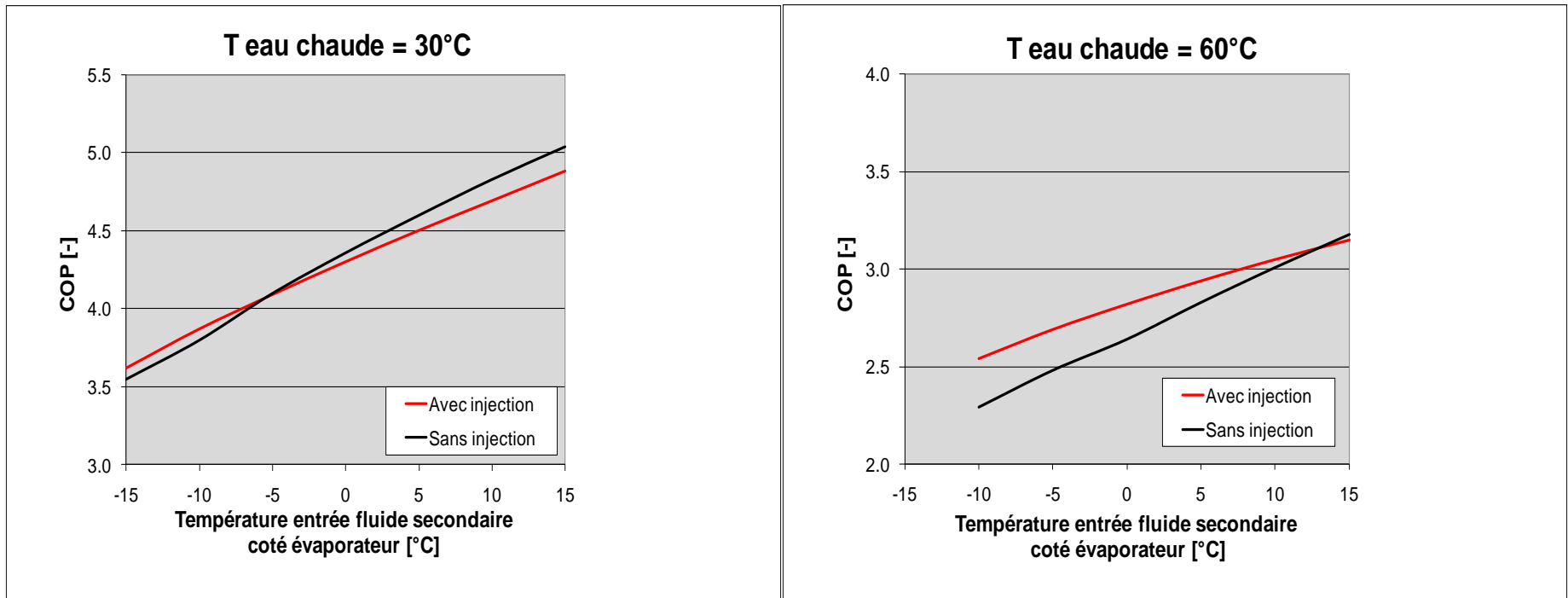
Cycle thermodynamique

Petites puissances : cycle à injection



Cycle thermodynamique

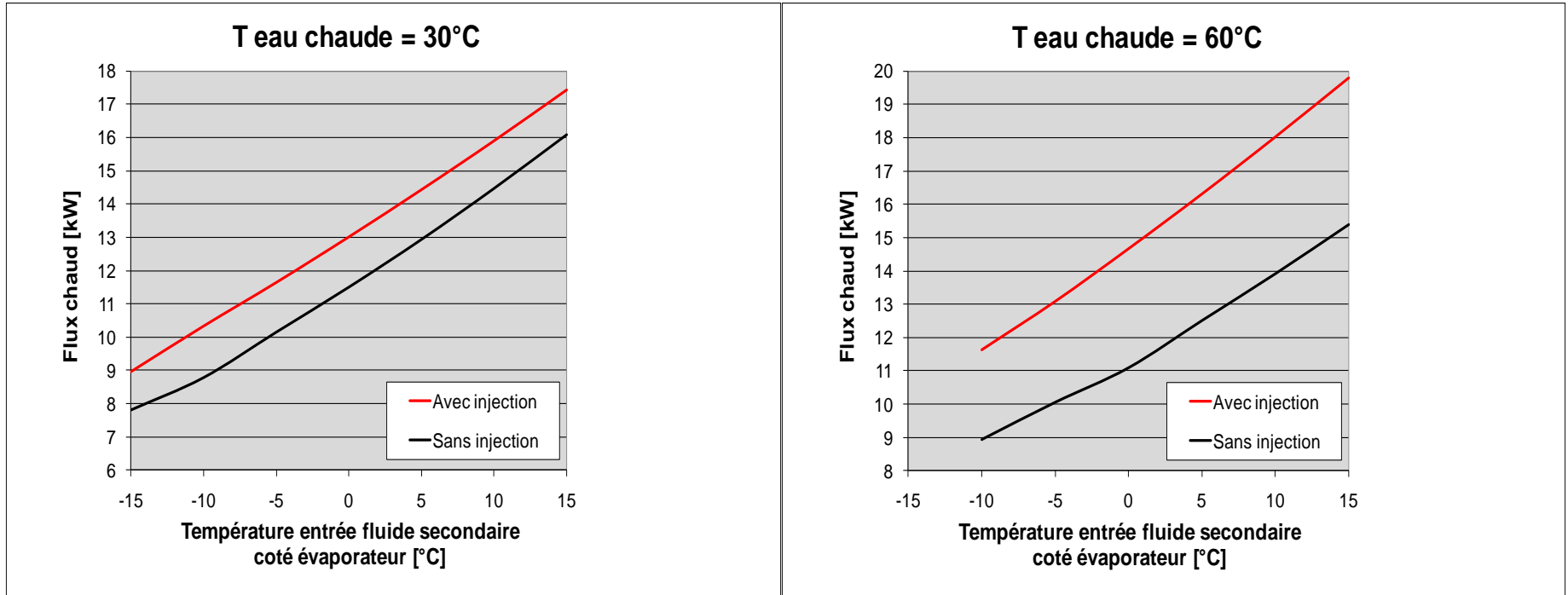
Cycle à injection utile pour les climats froids et/ou pour la production d'eau chaude à haute température (rénovation).



Gain réel en COP sur une année ? En test actuellement ($\cong 2.8$ en rénovation)

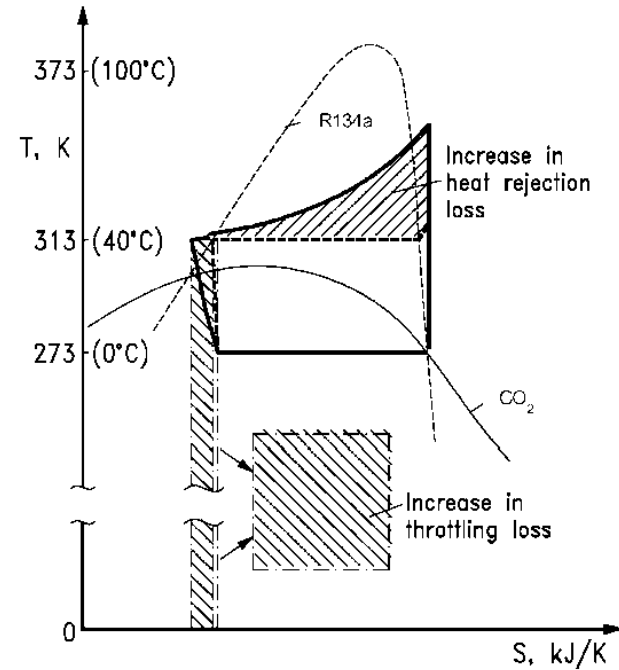
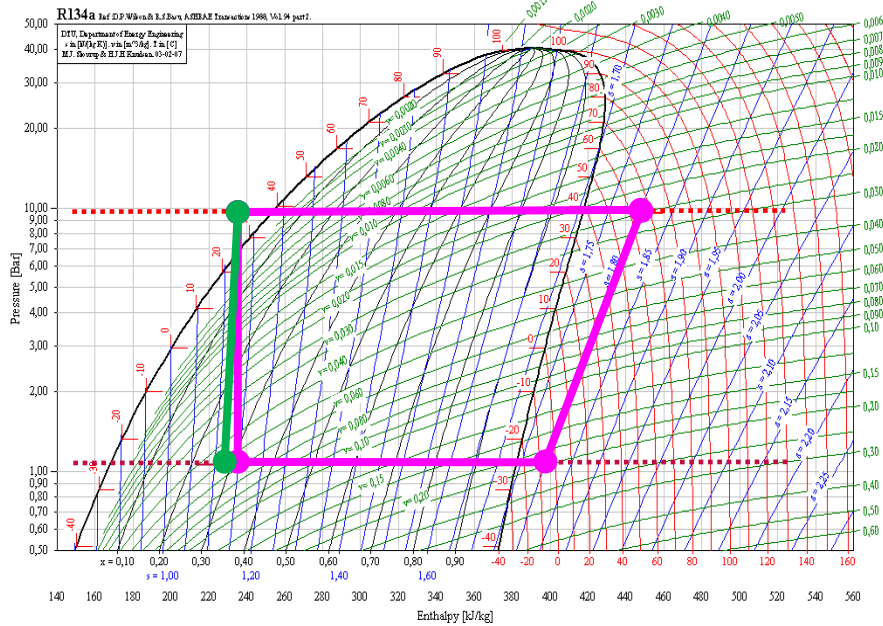
Cycle thermodynamique

Cycle à injection permet aussi la modulation de la puissance thermique.



Puissance thermique supérieure avec injection : appoints moins utilisés

Cycle thermodynamique



Irréversibilités intrinsèques du cycle de Rankine inverse : détente dans une vanne

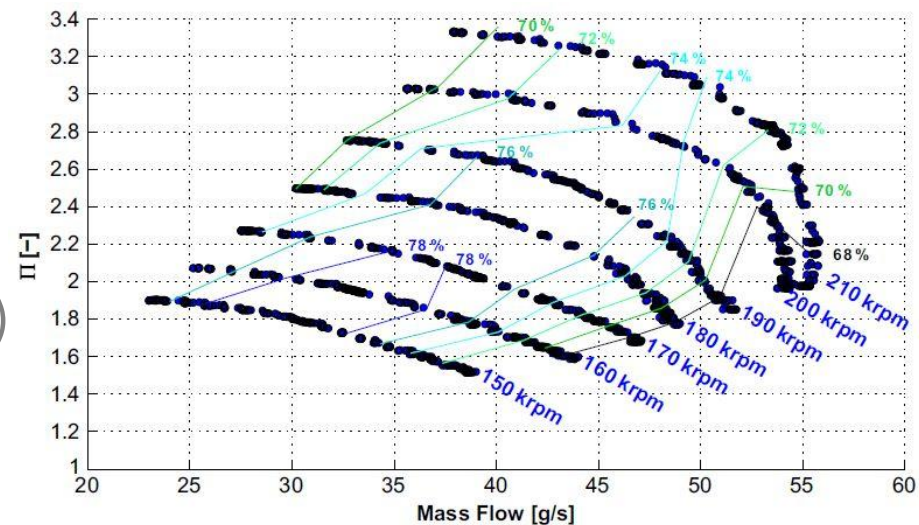
- énergie de détente récupérable faible (plus si CO₂)
- prototypes de « machines tournantes » (piston libre, etc.)

Composants des PAC

Composants des PAC

Compresseurs

- Compression non idéale :
 - 50% des pertes dans le cycle due au compresseur
 - rendement iso-s du compresseur (0.6-0.7) assez stable pour compresseurs à pistons ou compresseurs scroll
- développement de compresseurs dynamiques radiaux (prototypes) :
 - pas de lubrifiant : meilleur transfert de chaleur (évaporateur)
 - rendement iso-s plus élevé (jusque 0.8)
 - faibles taux de compression possibles

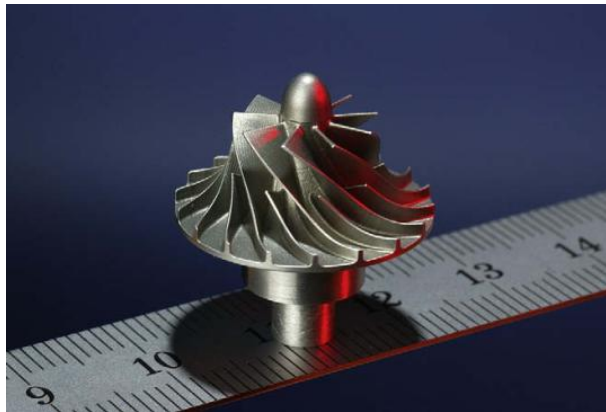


Source : doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006

Composants des PAC

Compresseurs

- Compresseurs à injection : scroll sur le marché
- Compression en deux étages pour les petites puissances :
 - 1) compresseurs volumétriques (pistons) : problèmes de circulation de lubrifiant si deux étages
 - 2) compresseur dynamiques :
 - pas de lubrifiant
 - prototypes

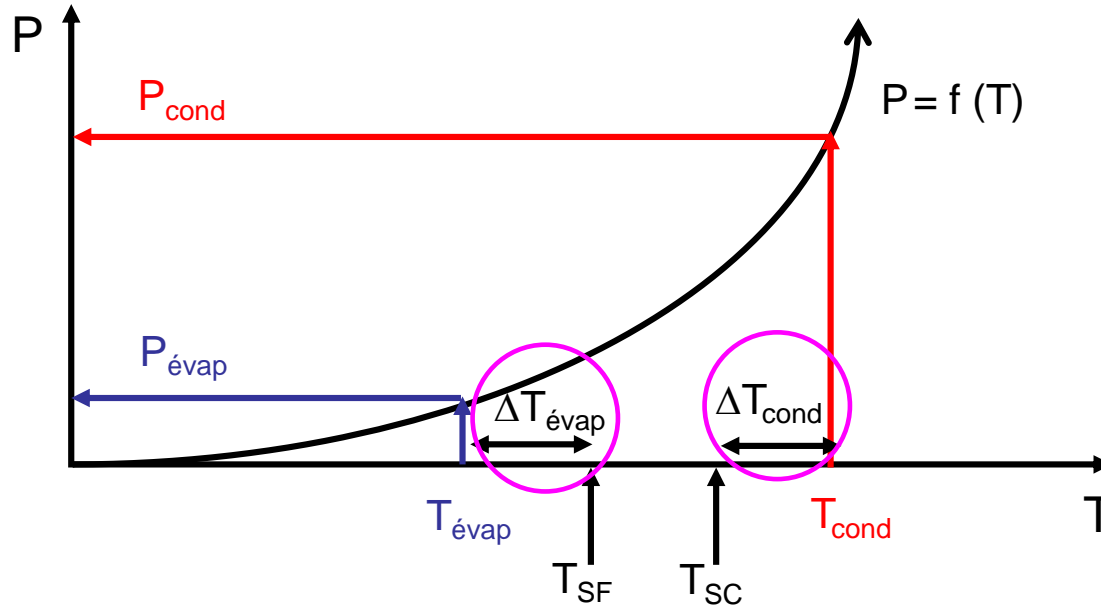


Source : [doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006)

Composants des PAC

Echangeurs de chaleur

- Réduire la différence de température entre la source et le fluide



- Echangeurs utilisés :
 - tubes et virole (grandes puissances) : $\Delta T = 5-10^{\circ}\text{C}$
 - échangeurs à plaques : $\Delta T = 2-5^{\circ}\text{C}$
- Nouveaux types d'échangeurs en développement

Composants des PAC

Echangeurs de chaleur

- $\Phi_C = UA \Delta T$: comment réduire ΔT ?
 - augmenter la surface d'échange A : problèmes de coût !
 - augmenter le coefficient d'échange U
- Augmentation de U : utilisation de nanofluides
 - expérimental
 - légère augmentation de U
 - forte augmentation des pertes de charges (et donc de la puissance des pompes)
 - recherches à poursuivre

Composants des PAC

Echangeurs de chaleur

- Augmentation de U : utilisation d'échangeurs à surface modifiée
- échangeurs microcanaux (Annexe IEA HPP)

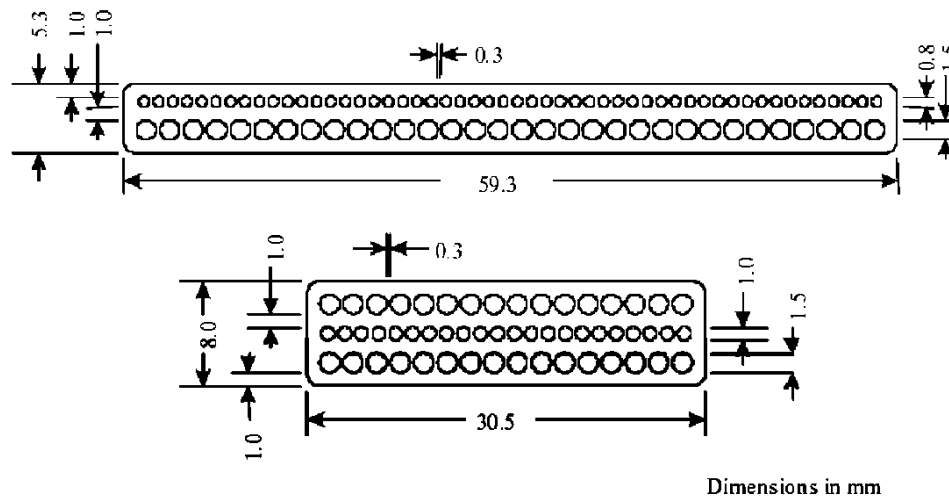


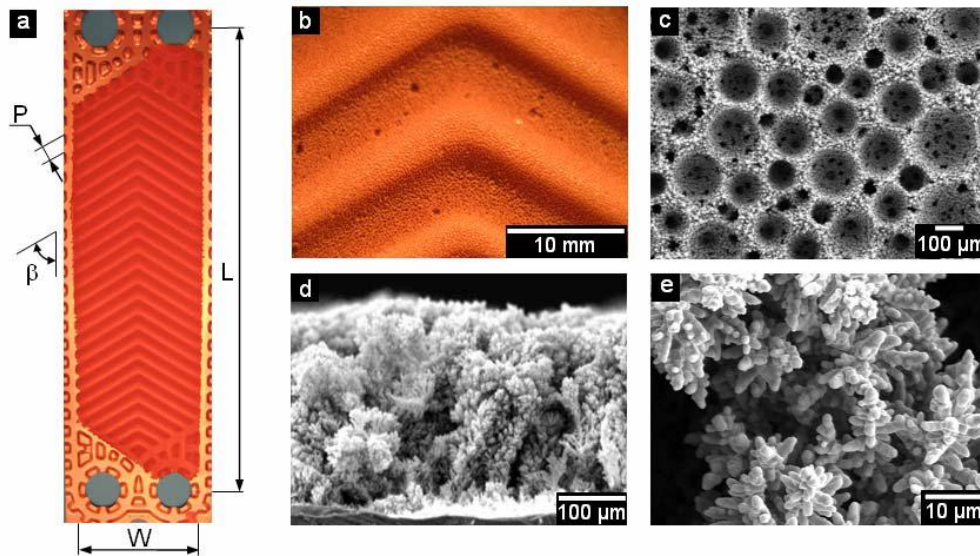
Illustration of new designs of internal heat exchanger

Source : Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 119-174

Composants des PAC

Echangeurs de chaleur

- Augmentation de U : utilisation d'échangeurs à surface modifiée
- échangeurs à plaques avec coating



Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008

Composants des PAC

Echangeurs de chaleur

- Augmentation de U : utilisation de caloducs dans le sol



Evaporateur

- Test pour PAC domestiques
- T_{EVAP} augmente de 5 °C par rapport à une sonde avec brine
- le COP passe de 3.65 à 4.23
- Permet de se passer de pompe auxiliaire sur le brine !

Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008

Fluides frigorigènes

Fluides frigorigènes

Fluides actuels :

- R134a, R404A, R407C, R410A
- NH₃ (grandes puissances)

Fluides nouvellement utilisés :

1) fluides naturels :

- NH₃
- CO₂
- Hydrocarbures (propane)

2) fluides synthétiques :

- R1234yf (CF₃CF=CH₂)

Fluides frigorigènes

Fluides naturels :

- NH₃
- CO₂
- Hydrocarbures (propane)

	R-12	R-22	R-134a	R-407C	R-410A	NH3	Propane	CO2
ODP	1	0,05	0	0	0	0	0	0
GWP	8500	1700	1300	1600	1900	0	3	1
Flammability	N	N	N	N	N	Y	Y	N
Toxicity	N	N	N	N	N	Y	N	N

Ces fluides sont toxiques (NH₃), inflammables (NH₃, propane) ou posent des problèmes de cycle thermodynamique (CO₂)

Fluides frigorigènes

Ammoniac (NH_3) :

- excellent fluide, utilisé pour les grandes puissances
- nécessite des précautions particulières
- nouveaux échangeurs de chaleur
- développement de prototypes (Suède)

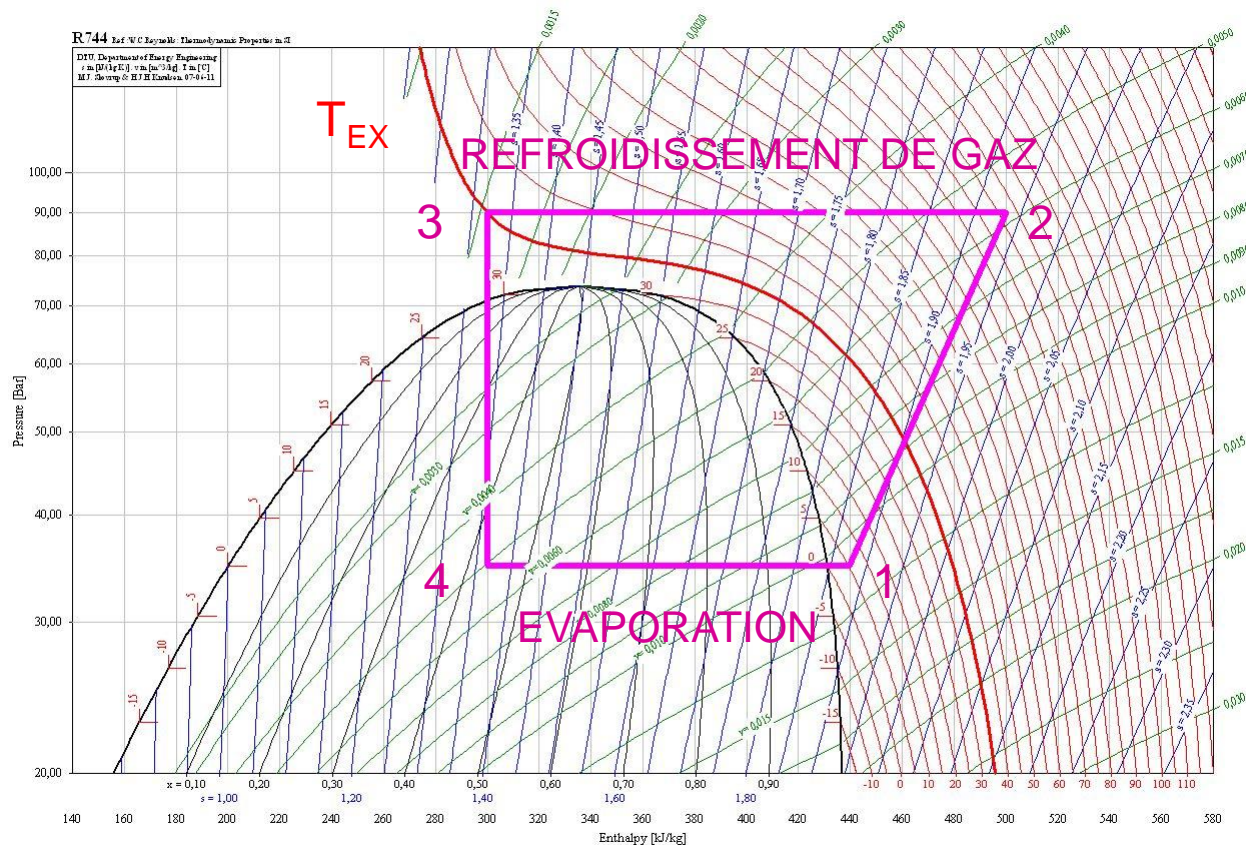
Propane (R290) :

- bon candidat au remplacement du R22
- nécessite des précautions particulières
- nouveaux compresseurs
- développement de prototypes (Espagne, Belgique)

Fluides frigorigènes

CO₂ (R744) :

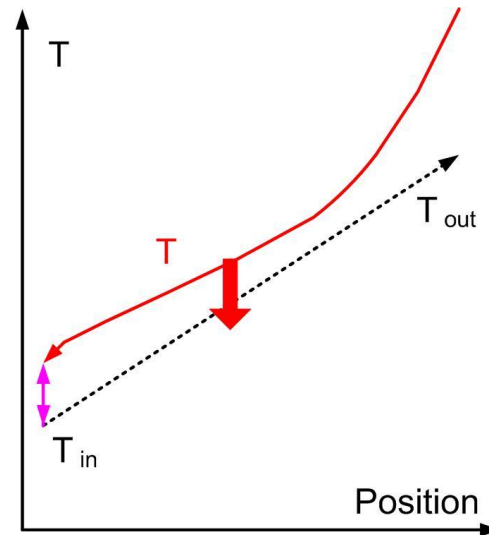
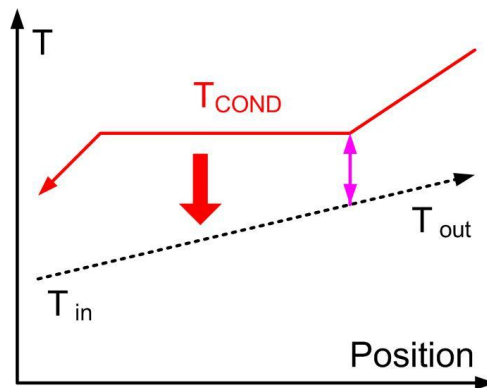
Le CO₂ ne permet plus de produire la chaleur utile par condensation mais par simple refroidissement



Fluides frigorigènes

CO₂ (R744) :

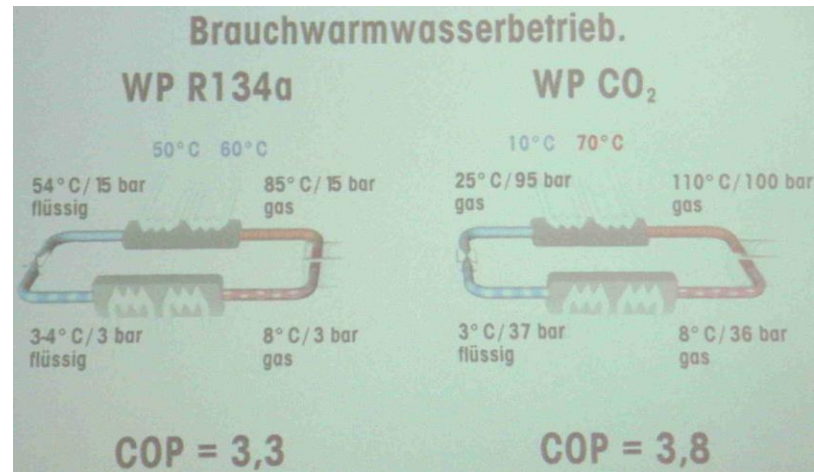
- Le cycle est développé par anticipation d'une législation future possible sur les fluides frigorigènes
- Le cycle au CO₂ est plus irréversible que les cycles à compression de vapeur: le COP est plus mauvais
- La haute pression peut aller jusque 150 bar !
- COP intéressant pour le chauffage de l'eau de 10 à 60 °C



Fluides frigorigènes

CO₂ (R744) :

- Uniquement production d'eau chaude sanitaire sur le marché (Japon, Suisse)
- Projets pour chauffage de bâtiments
- Centrale de production d'eau chaude sanitaire à 70 °C installée dans un centre sportif à Zürich (Suisse) (2005) :

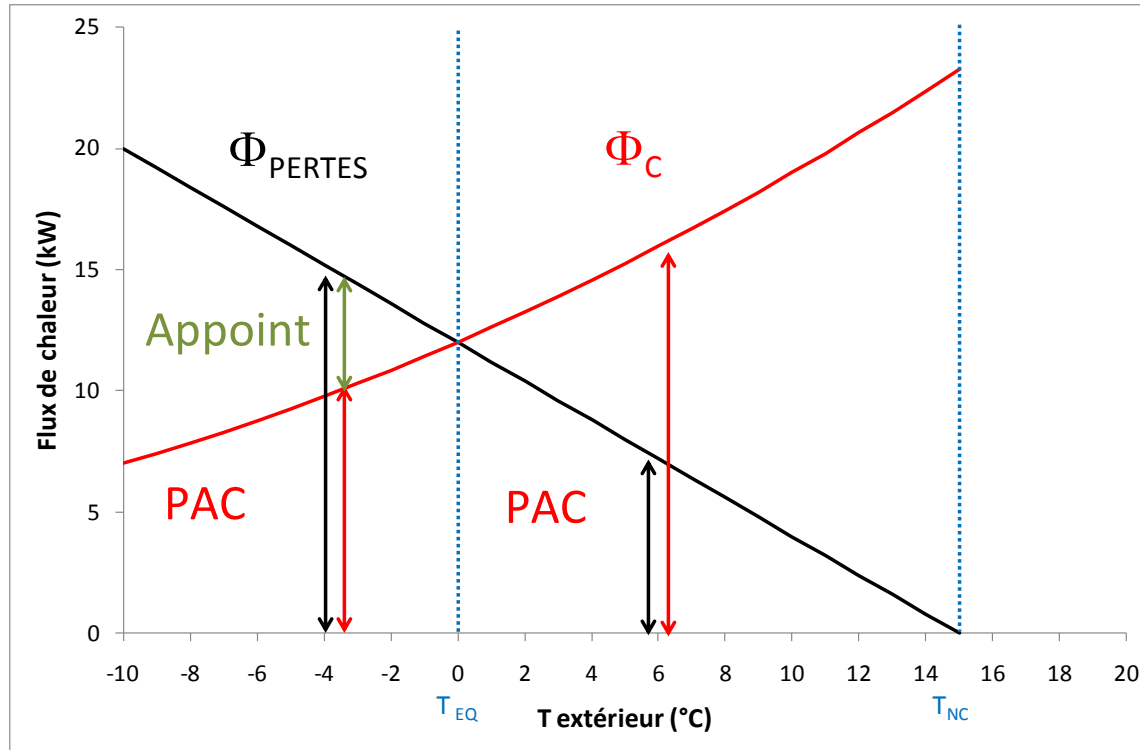


Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008 - EWZ

Dimensionnement – Régulation des PAC

Dimensionnement - Régulation PAC

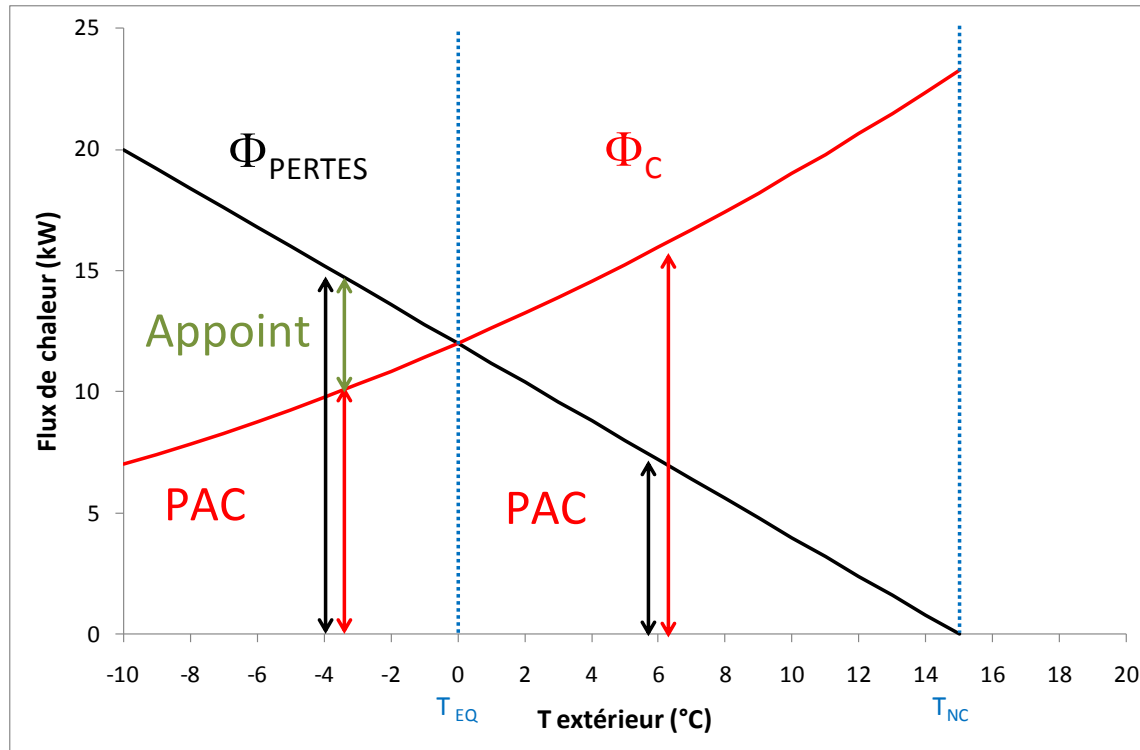
Le dimensionnement se fait en choisissant une température d'équilibre T_{EQ} qui varie de -10°C à 0°C en Belgique selon le type de source et de PAC



En dessous de T_{EQ} : besoin d'un chauffage d'appoint (souvent électrique)

Au dessus de T_{EQ} : la PAC fonctionne à "charge partielle" (cycles)

Dimensionnement - Régulation PAC



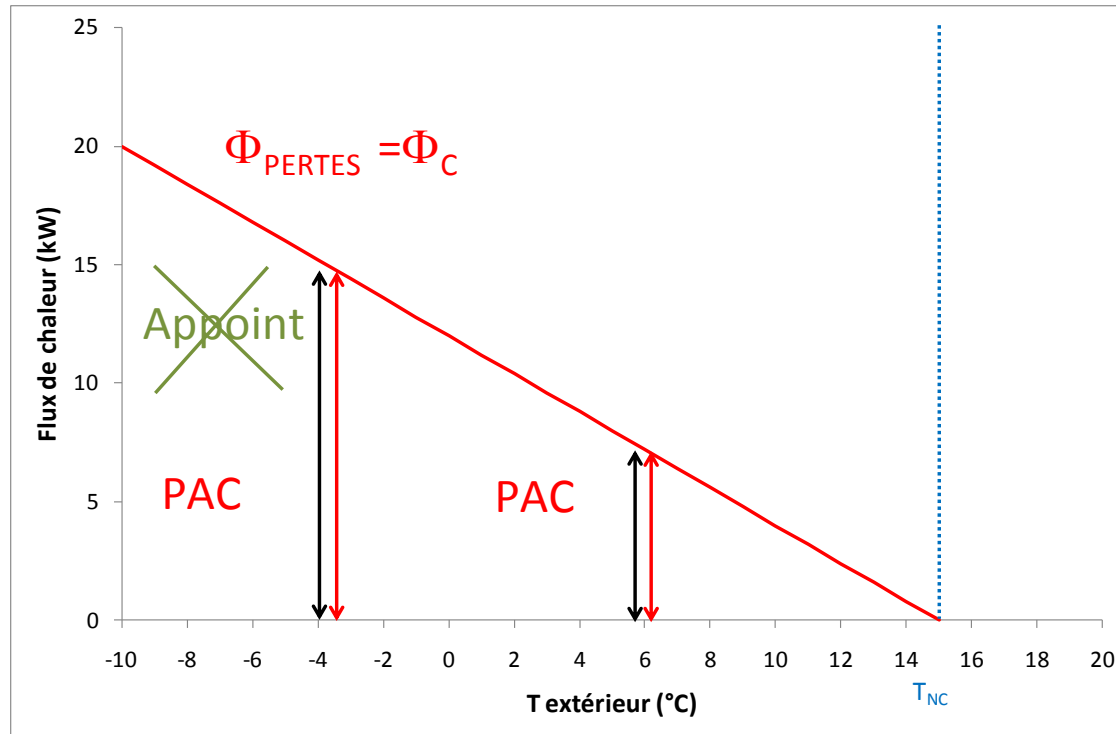
Si T_{EQ} est trop bas, lorsque T_{EXT} est élevé :

- cycles très courts, PAC pas en régime, performances mauvaises
- T_{COND} élevé car le plancher ne peut dissiper toute la chaleur

Si T_{EQ} est trop haut, lorsque T_{EXT} est bas :

- fonctionnement des appoints très important

Dimensionnement - Régulation PAC



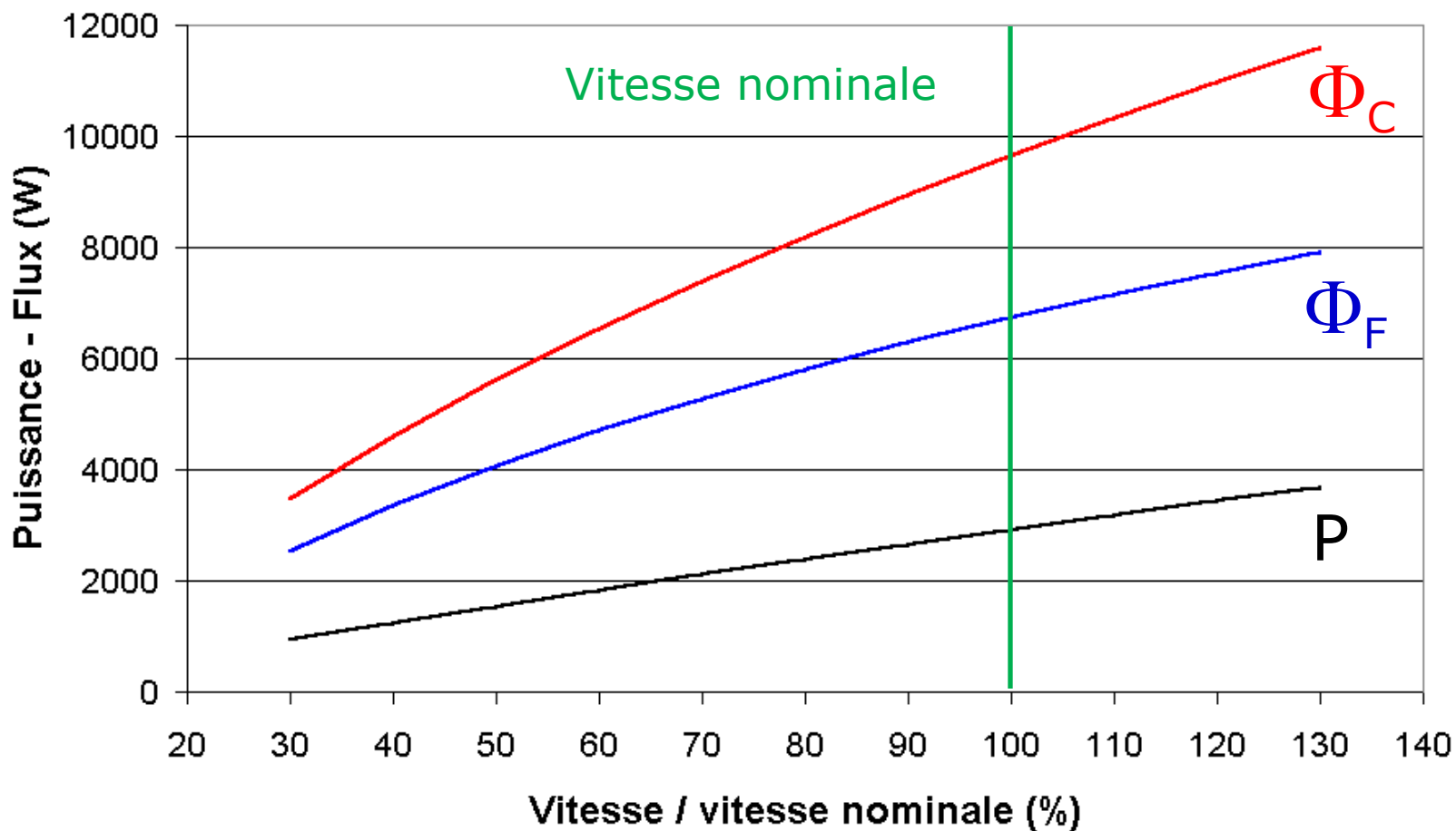
Si le flux chaud fourni par la PAC = pertes de l'habitation :

- la PAC fonctionne 100% du temps : en régime, plus de cycles courts
- T_{COND} bas si flux chaud faible
- Appoints inutiles

Réalisable ? Oui avec les compresseurs à vitesse variable

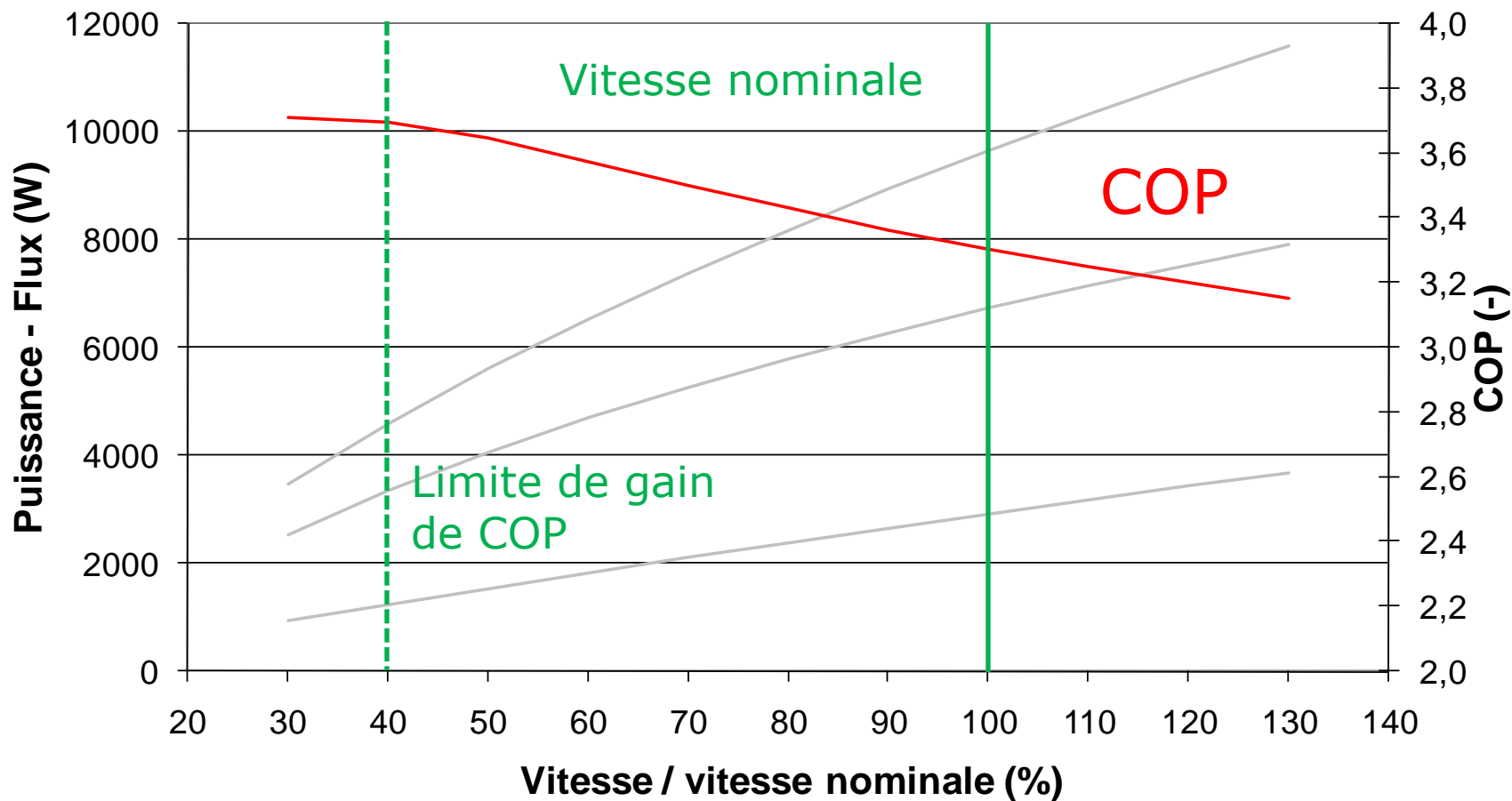
Dimensionnement - Régulation PAC

Influence de la vitesse



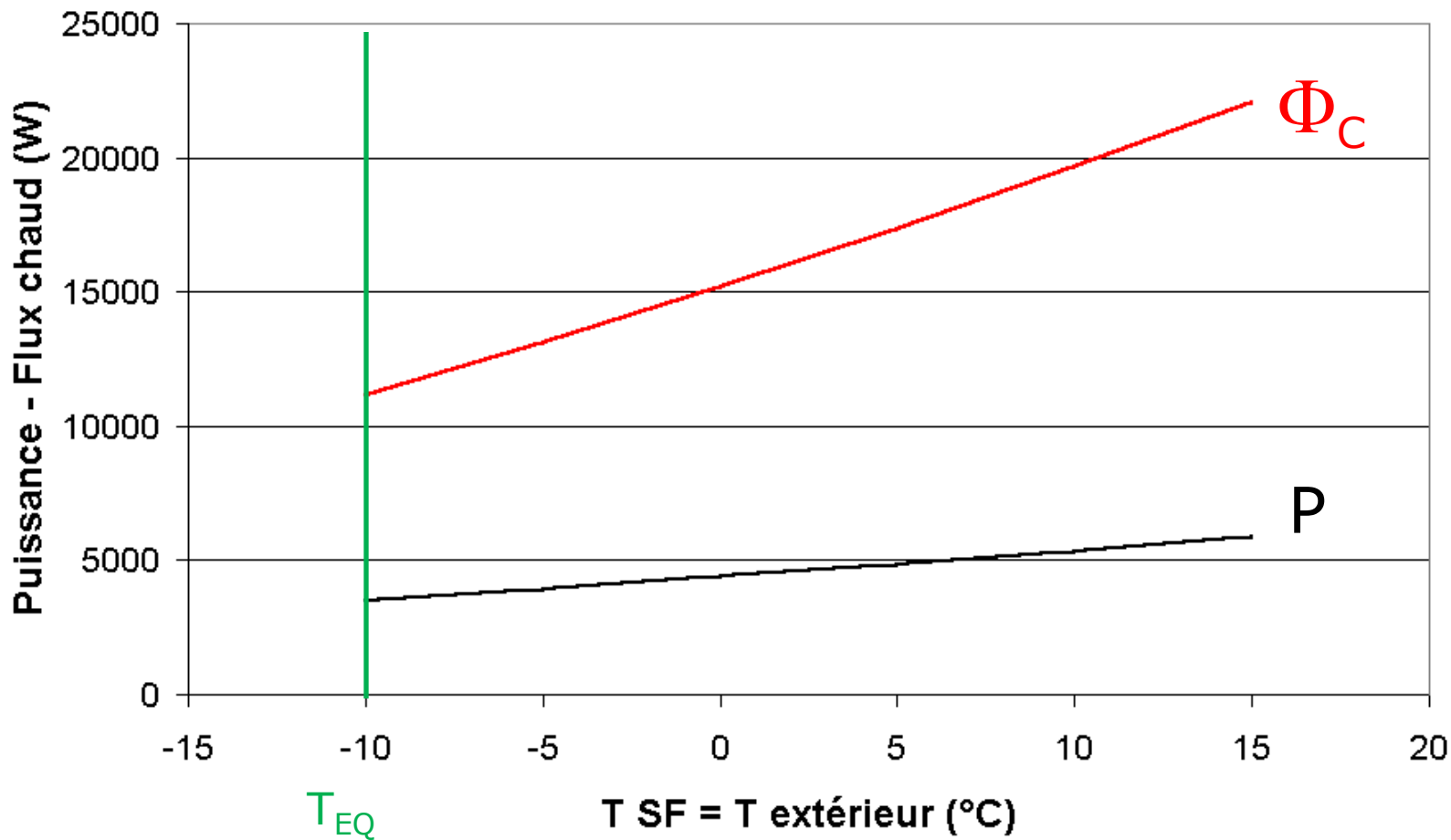
Dimensionnement - Régulation PAC

Influence de la vitesse



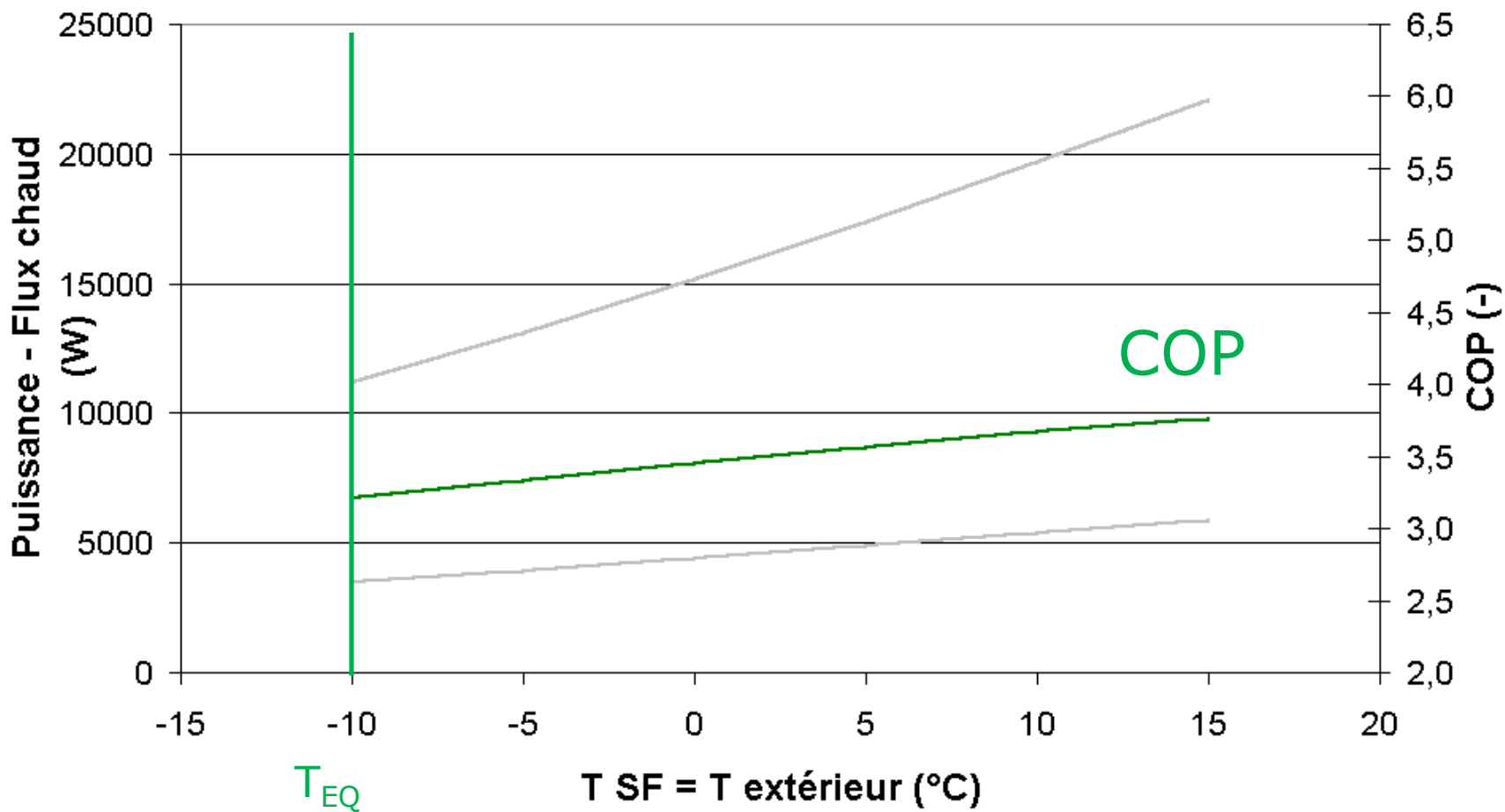
Dimensionnement - Régulation PAC

PAC à vitesse fixe



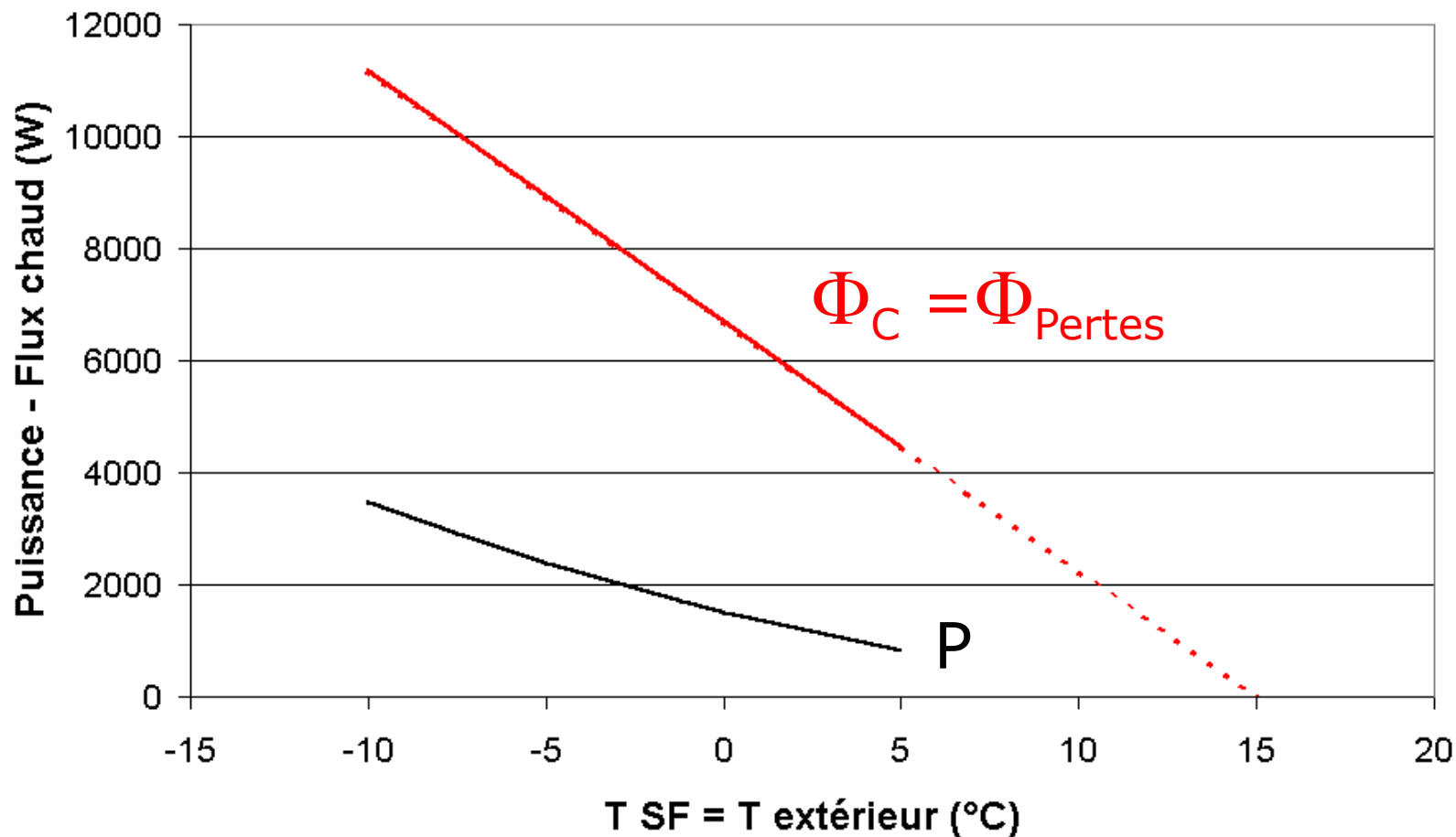
Dimensionnement - Régulation PAC

PAC à vitesse fixe



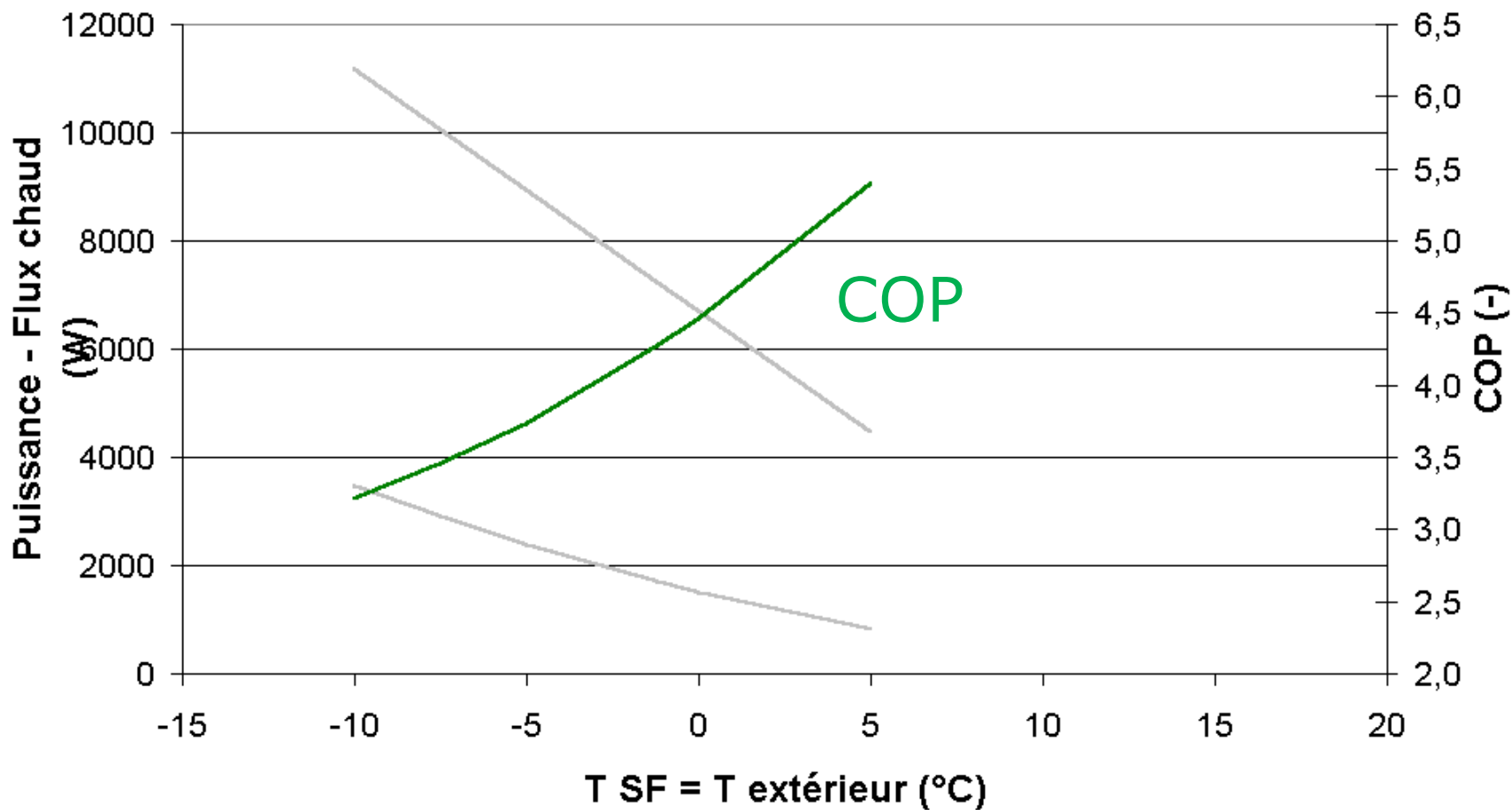
Dimensionnement - Régulation PAC

PAC à vitesse variable adaptée aux besoins



Dimensionnement - Régulation PAC

PAC à vitesse variable adaptée aux besoins

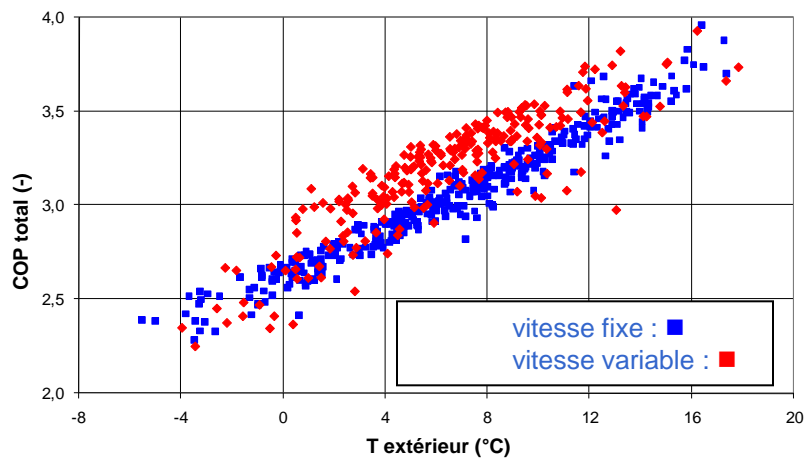


Dimensionnement - Régulation PAC

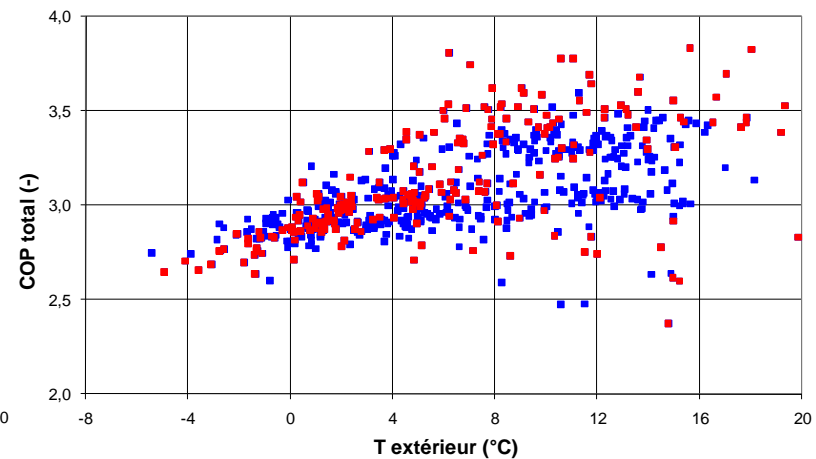
- Compresseur à vitesse variable : permet d'adapter le flux chaud de la PAC aux besoins de chaleur (dans une certaine mesure en pratique)
- Cette adaptation de la vitesse aux besoins augmente en principe le COP saisonnier mais nécessite une régulation intelligente et complexe du compresseur mais aussi des auxiliaires (pompes, ventilateurs)
- Le dimensionnement optimal est difficile à effectuer vu le degré de liberté supplémentaire (la vitesse du compresseur). Il n'existe pas de consensus sur des règles de bonne pratique.
- Le rendement de conversion électrique du moteur n'est pas constant avec la fréquence mais globalement, les tendances décrites ci-dessus restent vraies.
- La vitesse variable a d'autres avantages : le démarrage et l'arrêt du compresseur en douceur lors des cycles de fonctionnement permet d'allonger leur durée de vie.

Dimensionnement - Régulation PAC

- Compresseurs à vitesse variable (inverter) :
 - permet d'augmenter le SPF de 0.2 à 0.3 si gestion intelligente des auxiliaires (vitesse variable des pompes et ventilateurs)



PAC air-eau
gestion de la vitesse de la pompe



PAC sol-eau
pompe à vitesse fixe

- utilisé sur le marché domestique
- dans un proche avenir sur les gros compresseurs (compresseurs à vis)

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Optimiser les performances d'une pompe à chaleur = thématique à aborder globalement

- Avant 2000 machines simples (cycle standard); COP saisonniers légèrement inférieurs à 3.0 si installations bien conçues (à l'exclusion des machines sur sondes verticales)
- Entre 1995 et le début des années 2000, fiabilisation (vanne d'inversion, gestion des dégivrages), professionnalisation du secteur
- Première moitié des années 2000 : percée de la vitesse variable; gain potentiel important mais maîtrise de son utilisation en cours, la monovalence devient généralité
- Seconde moitié des années 2000 : « percée » des PAC « haute température » (injection notamment) : retour d'expérience en cours (notamment dans la rénovation)
- COP saisonnier de l'ordre de 3.5 à 4.0 : devrait devenir la norme dans les prochaines années
- Evolution « naturelle » à la hausse du COP dû à l'augmentation des performances énergétiques de l'enveloppe des bâtiments.

Conclusions et perspectives

Optimiser les performances d'une pompe à chaleur = thématique à aborder globalement

- Intégration de la pompe à chaleur dans des combi-systèmes : gestion du dimensionnement, des problèmes techniques et de la conduite : projets de démonstration
- Intégration de la pompe à chaleur dans des combi-systèmes : gains en énergie primaire potentiellement importants, impact positif sur la R&D dans le domaine du stockage de l'énergie solaire thermique et des pompes à chaleur (PAC fonctionnant avec de très faibles différences de température entre les sources)
- Nombreuses recherches en cours dont il est difficile de connaître l'impact futur (fluide, composants, cycles)
- Monitoring énergétique et régulation intelligente : point important ces prochaines années surtout pour les grands bâtiments dans le but de mieux exploiter les performances des technologies actuellement disponibles
- Importance du sérieux de tous les acteurs (concepteurs, fabricants, installateurs, architectes, utilisateurs, etc.) : formation et système qualité

Merci de votre attention