

Faculté Polytechnique



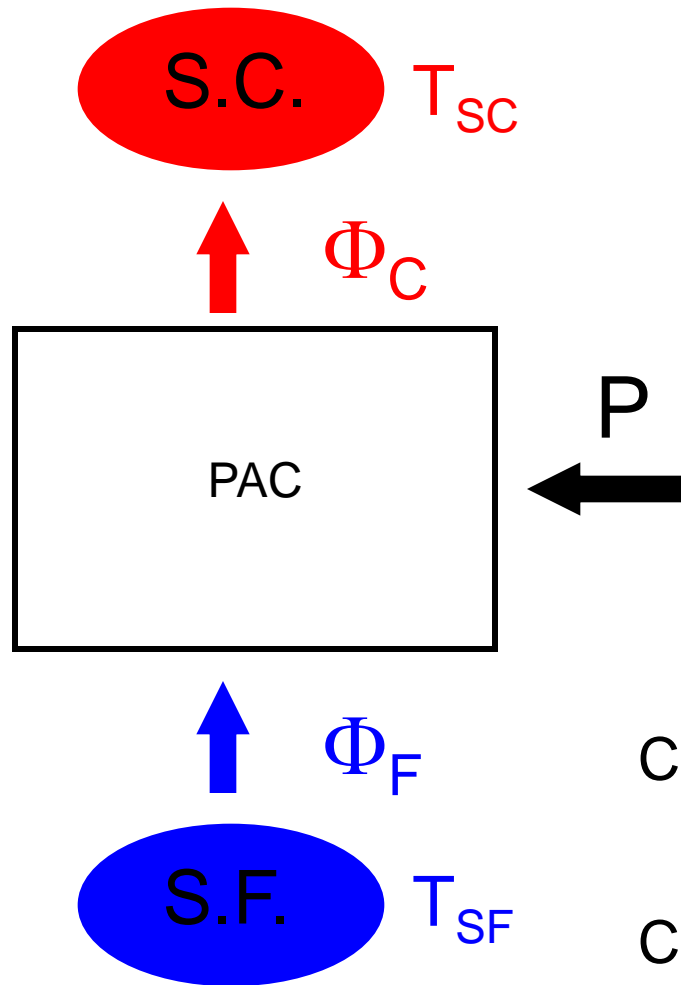
Pompes à chaleur : Etat de l'art et perspectives technologiques

Eric Dumont et Marc Frère

marc.frere@umons.ac.be

eric.dumont@umons.ac.be

Introduction



Utilisation assistée
d'une source
d'énergie gratuite

Coefficient de
performance :

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

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

$$\text{COP saisonnier} = \text{SPF}$$

Introduction

Evolutions technologiques de ces dernières années et à venir

Buts :

- **augmenter le coefficient de performance saisonnier (SPF)**
- **étendre la plage de fonctionnement des PAC**

Le cycle thermodynamique

La qualité des composants

Les températures des sources

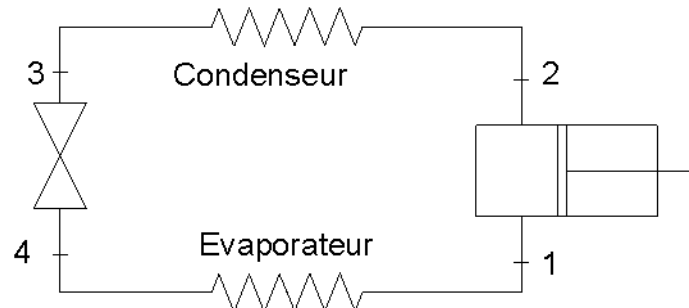
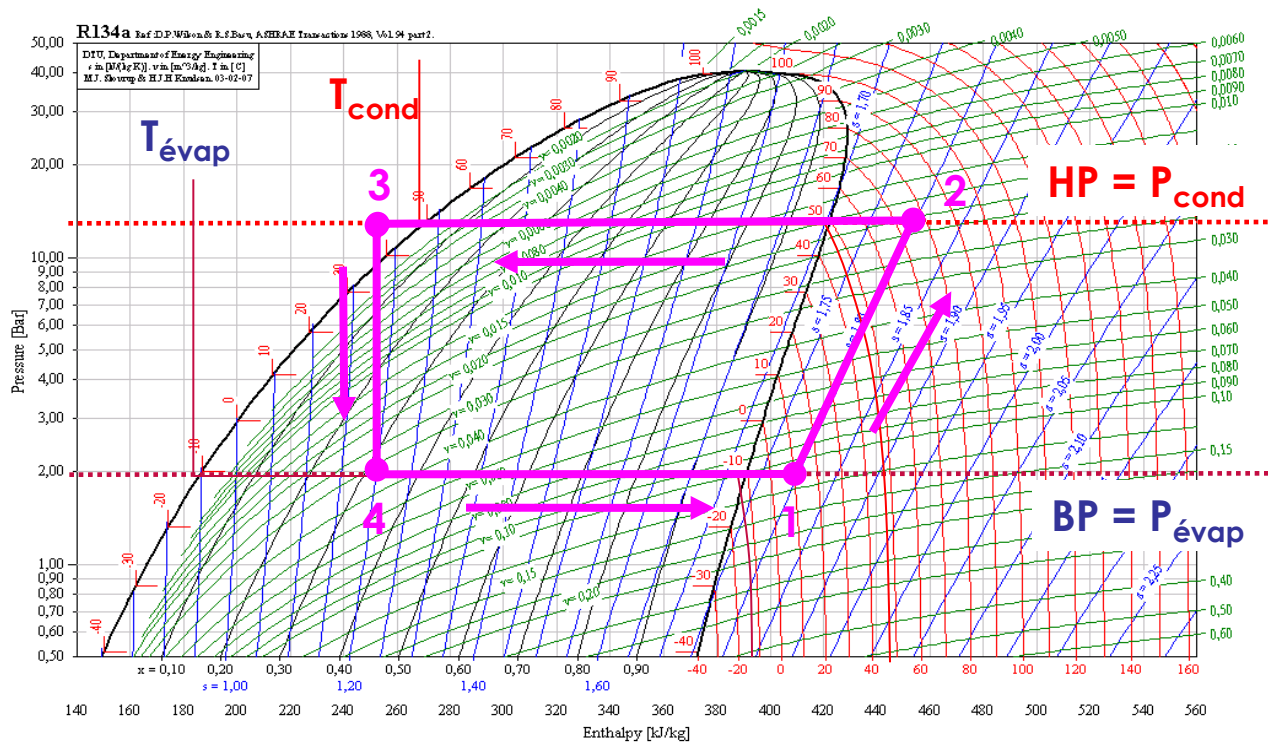
Le fluide utilisé

Le dimensionnement et la régulation

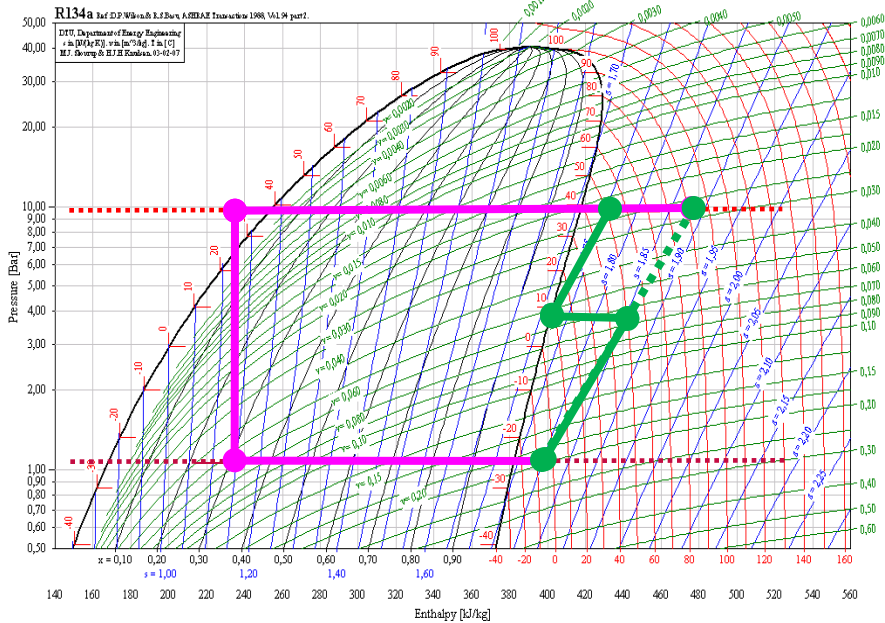
Monitoring : exemple de PAC à haute température à injection

Cycle thermodynamique

Cycle thermodynamique



Cycle thermodynamique



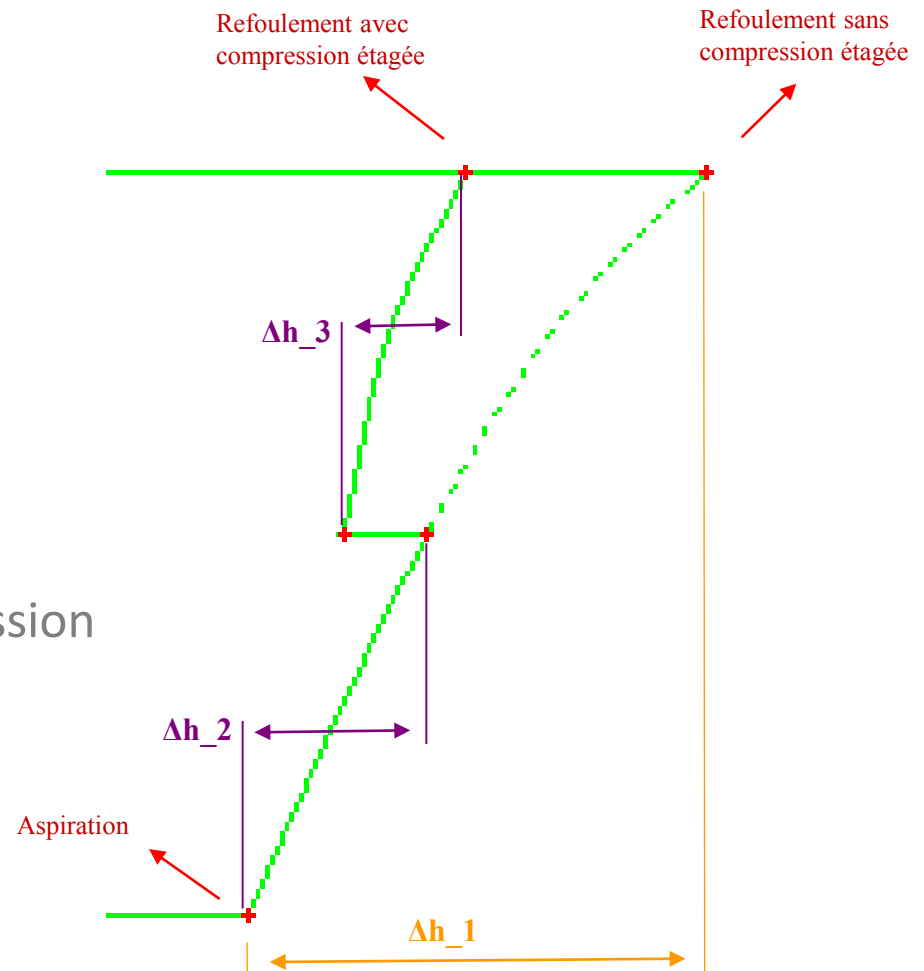
Solution : compression étagée

- diminution de la puissance de compression

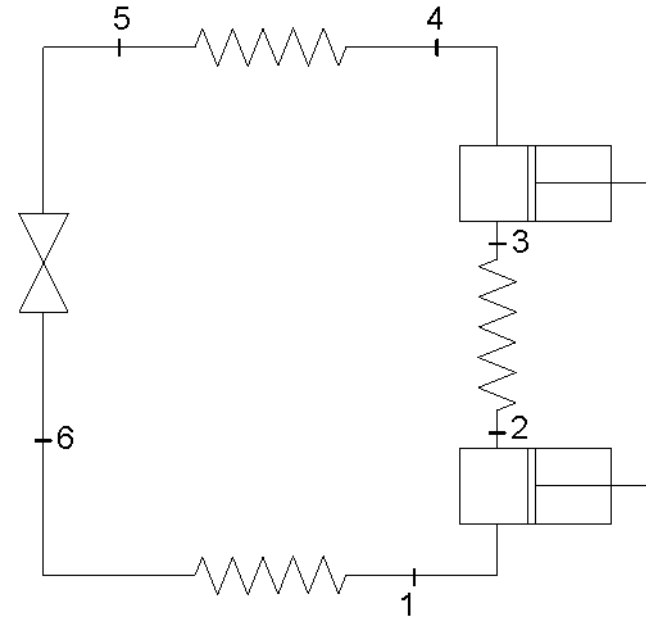
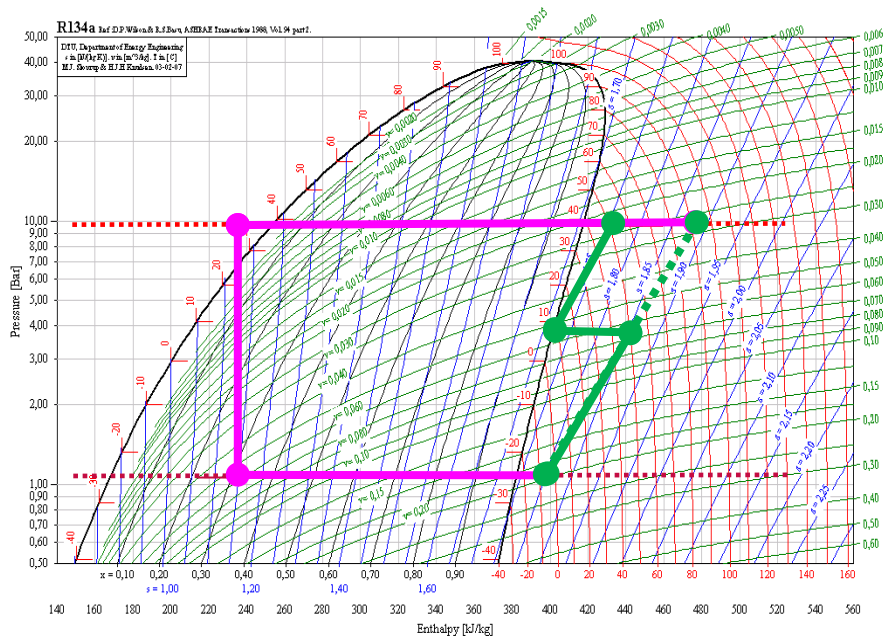
$$\Delta h_1 > \Delta h_2 + \Delta h_3$$

- réduction de la température de sortie du fluide

- augmentation du débit total refoulé



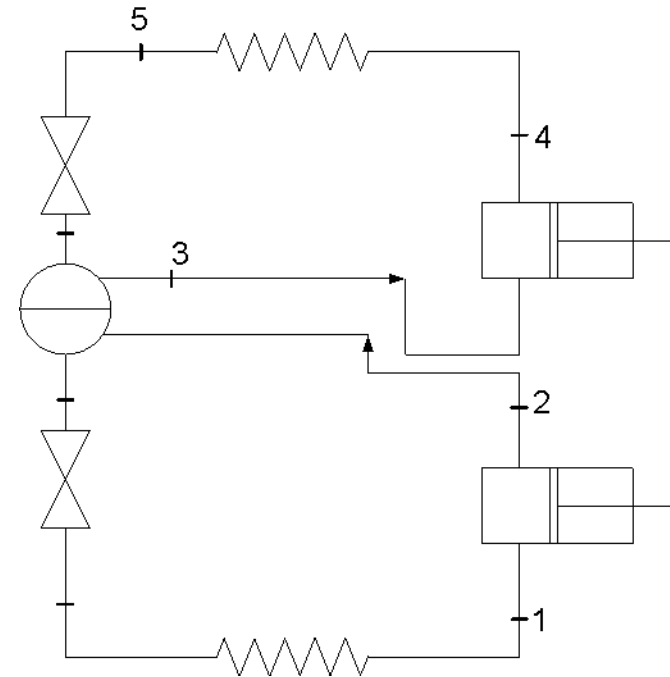
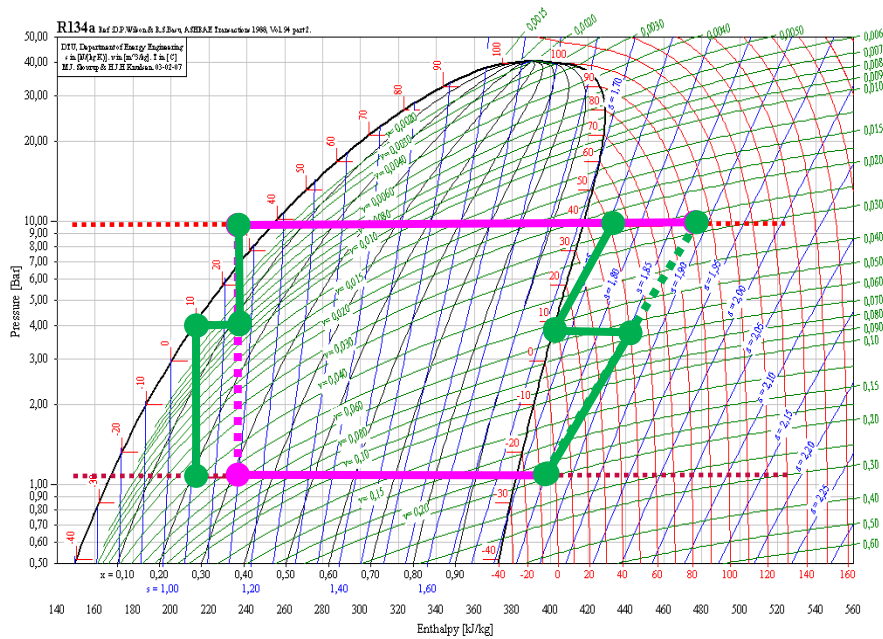
Cycle thermodynamique



Solution 1 : compression étagée avec refroidissement intermédiaire :

- nécessite deux compresseurs (cher !)
- nécessite un échangeur de chaleur avec l'ambiance

Cycle thermodynamique

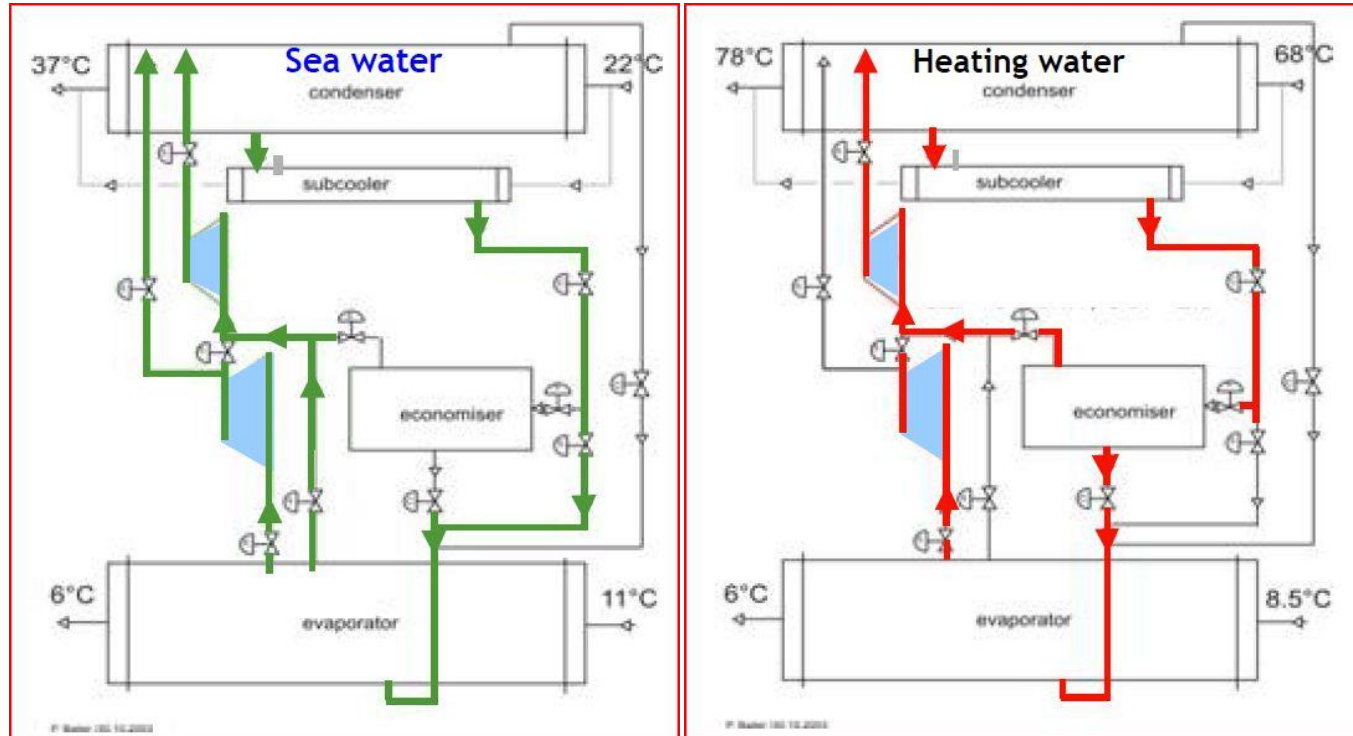


Solution 2 : compression et détente étagée :

- nécessite toujours deux compresseurs
- plus besoin d'échangeur de chaleur intermédiaire
- utilisable si système de grosse puissance (pas habitation individuelle !)

Cycle thermodynamique

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

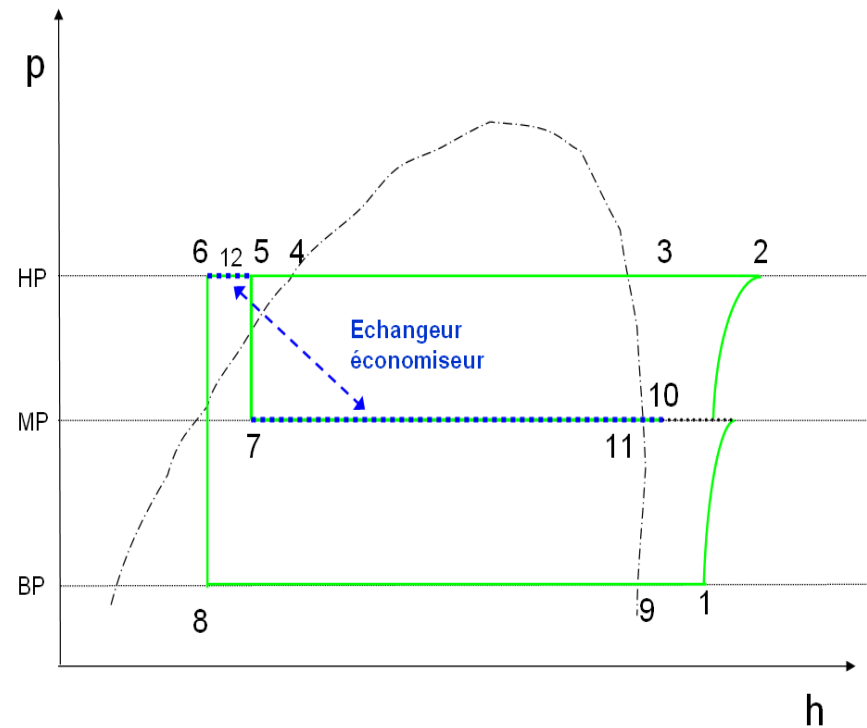
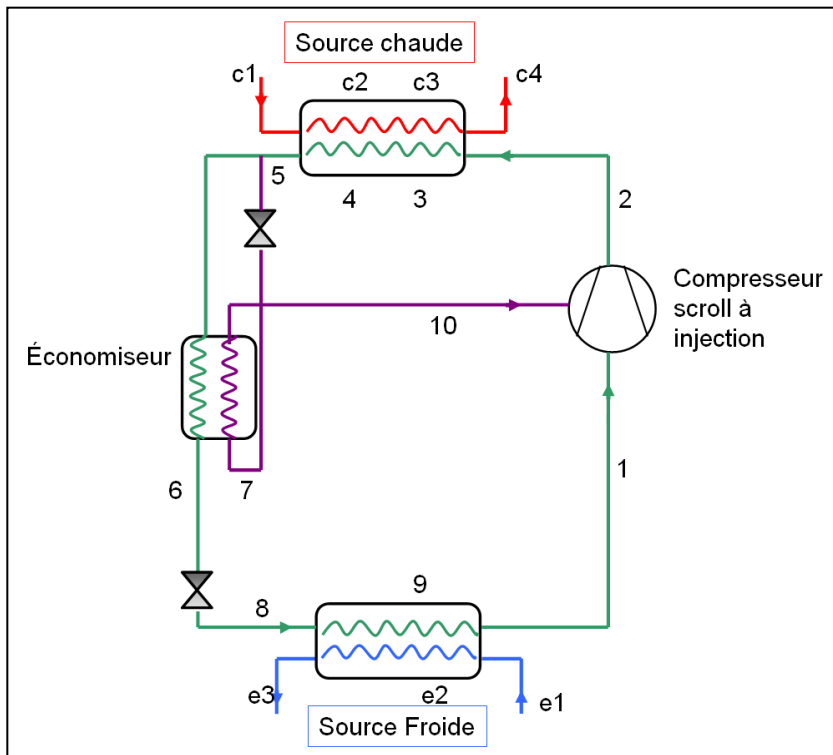


Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008

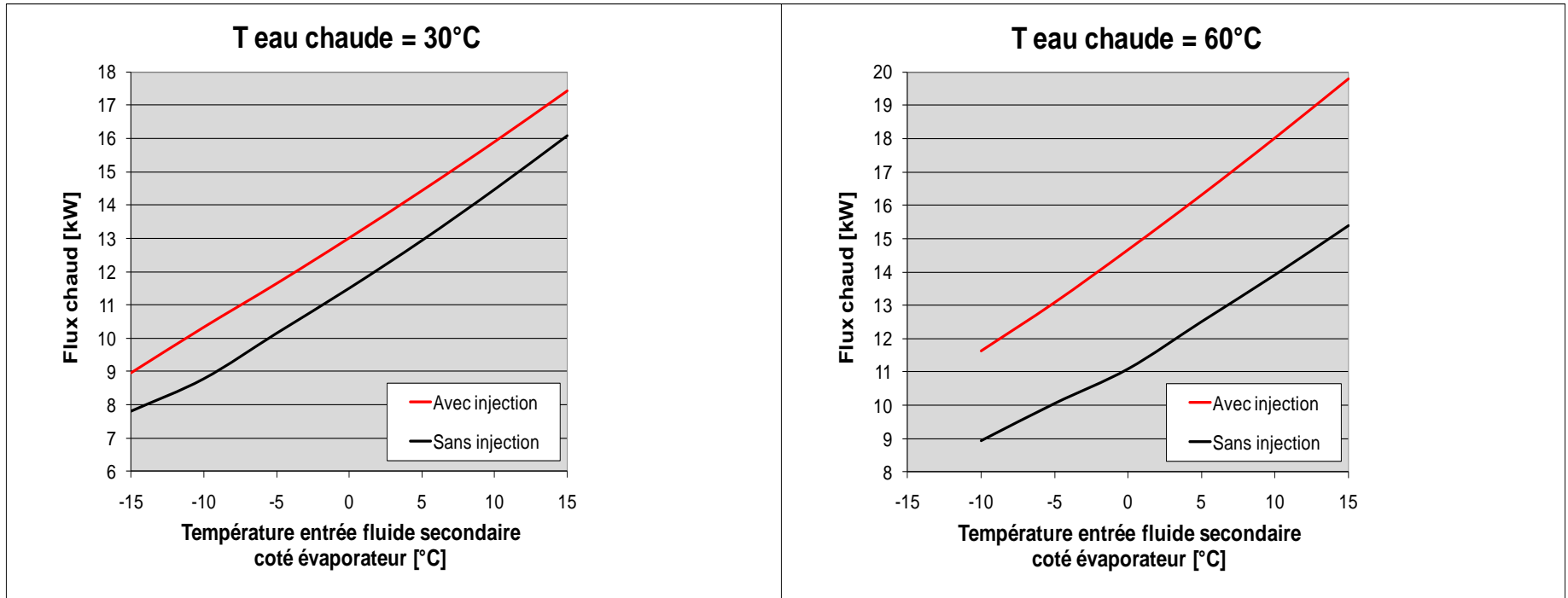
Cycle thermodynamique

Solution 2 : compression et détente étagée avec injection intermédiaire dans le compresseur :

- nécessite un seul compresseur
- utilisé dans les PAC de petite puissance (chauffage domestique)



Cycle thermodynamique

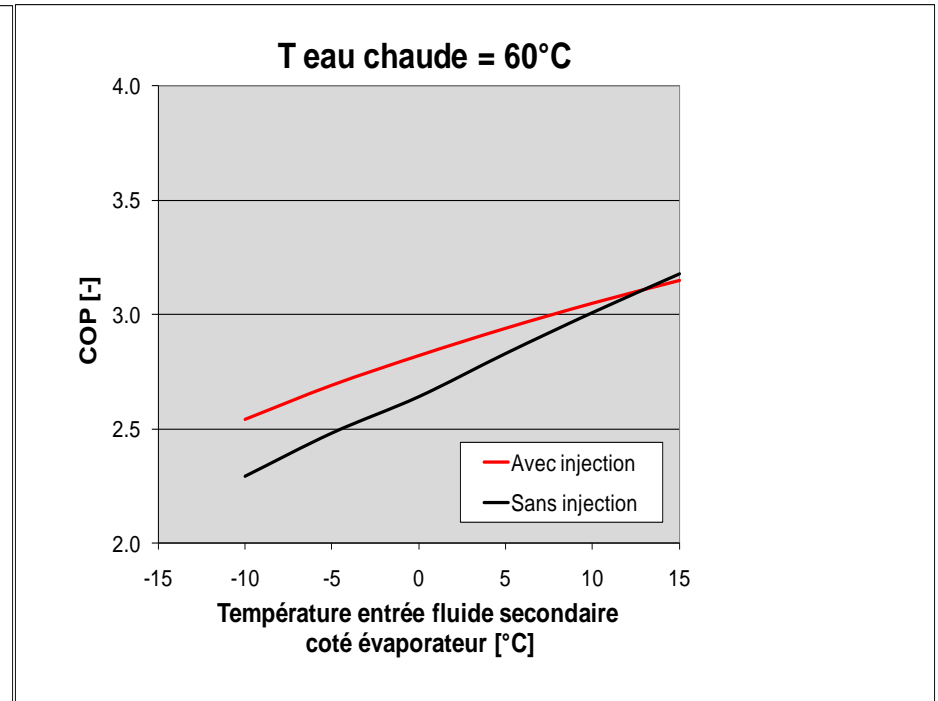
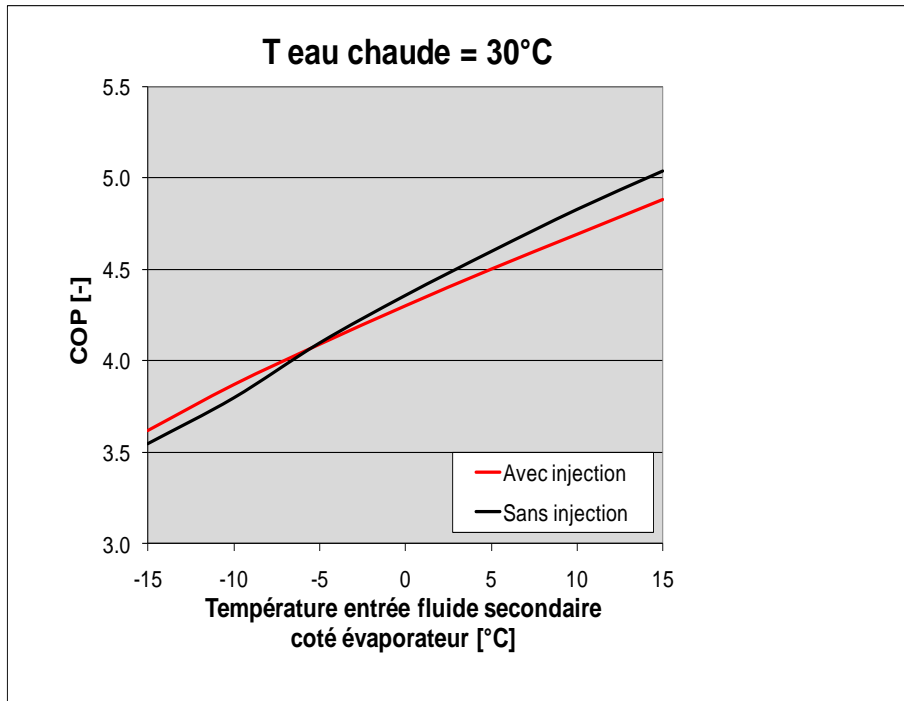


L'injection augmente le flux de chaleur à la source chaude mais également la puissance de compression, les différences sont d'autant plus marquées que la température du fluide secondaire à la source chaude est élevée.

Flux de chaleur supérieure avec injection : appoints moins utilisés

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

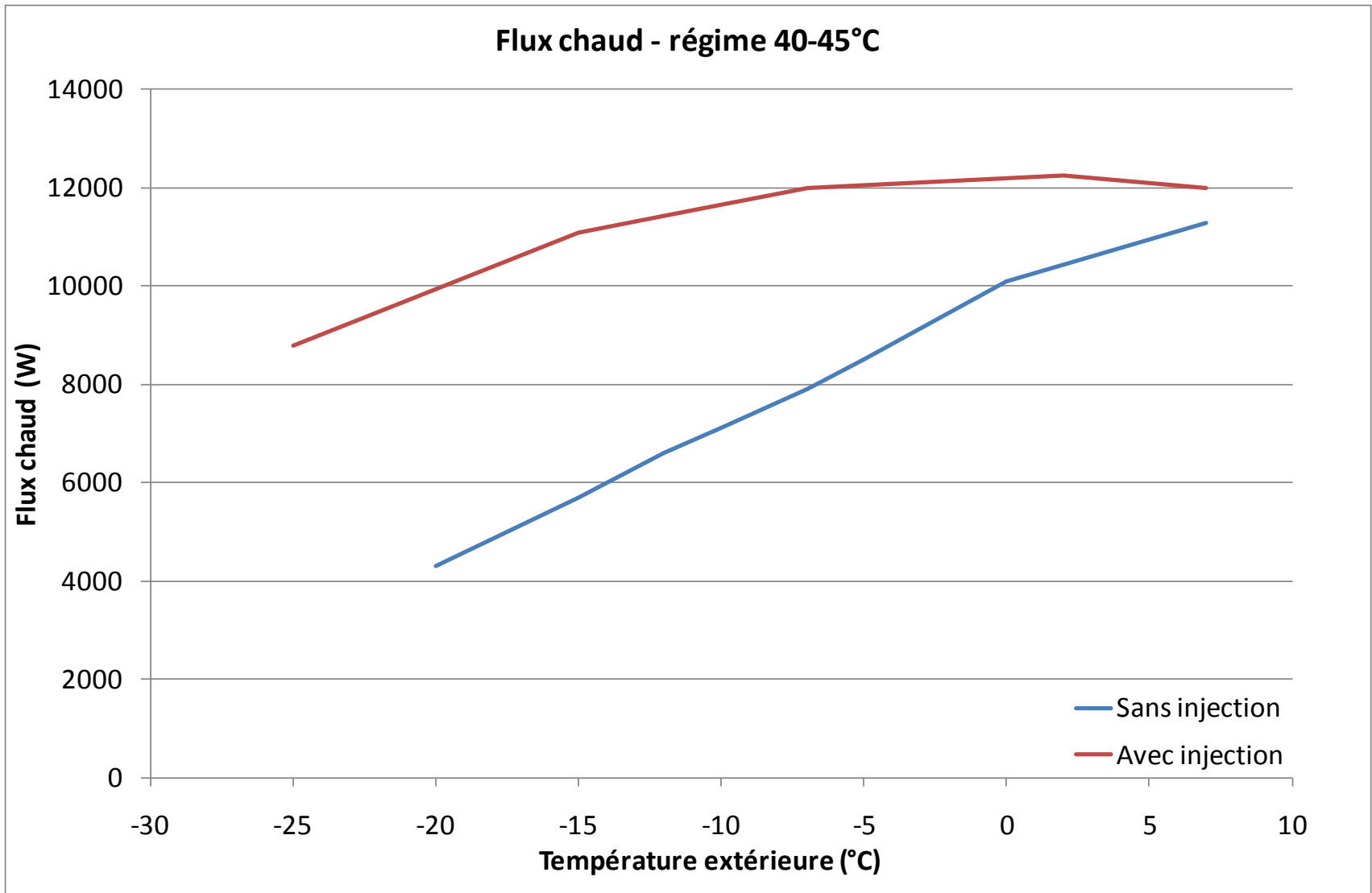
Cycle thermodynamique



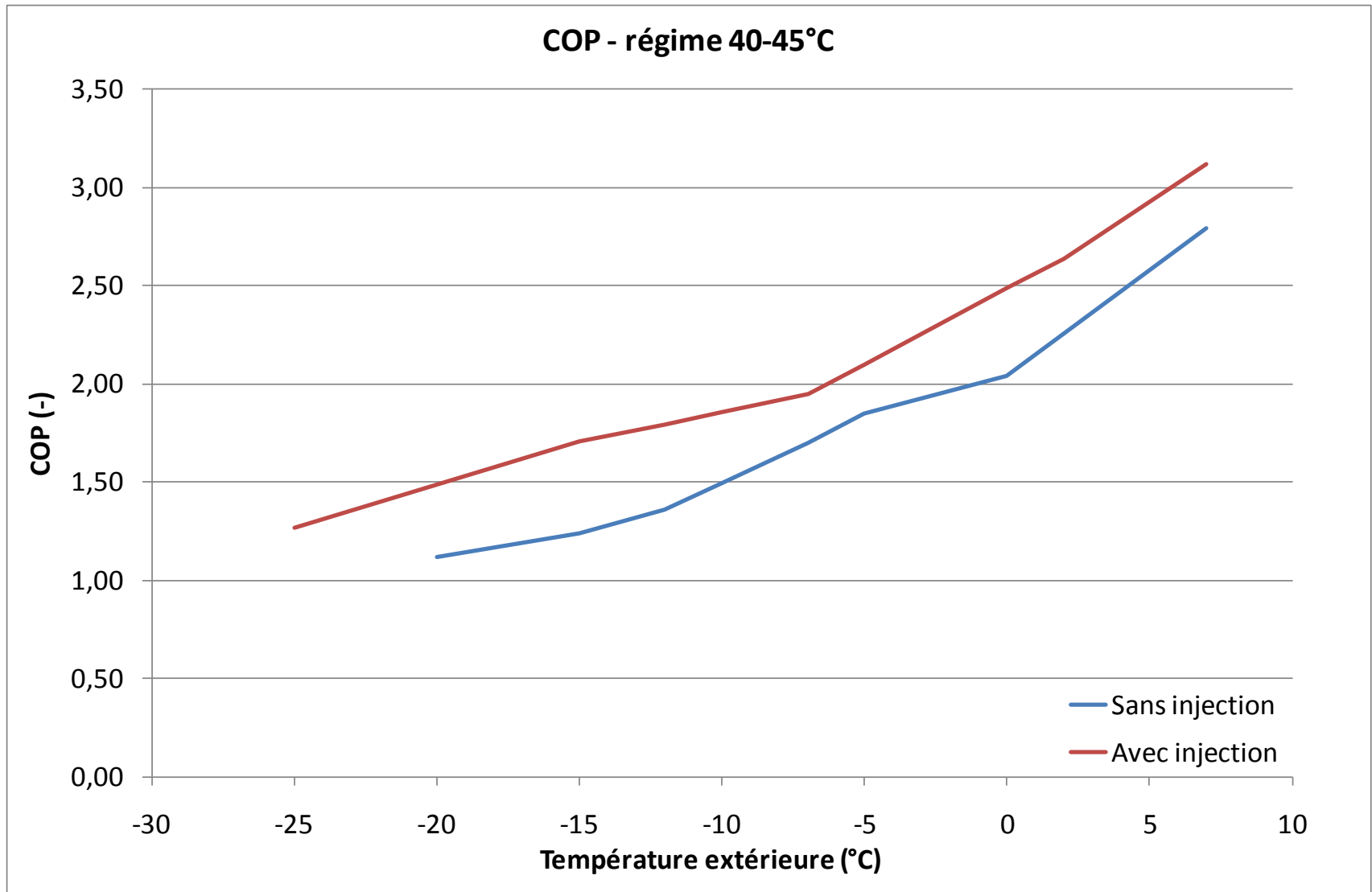
L'injection a un effet bénéfique sur le COP en cas de forte différence entre le température du fluide secondaire à l'évaporateur et celle du fluide secondaire au condenseur

Gain réel en COP sur une année ? En test actuellement

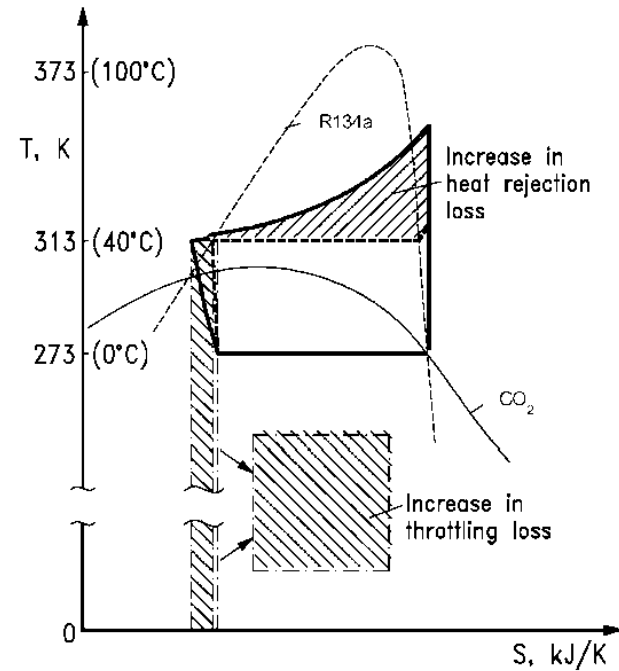
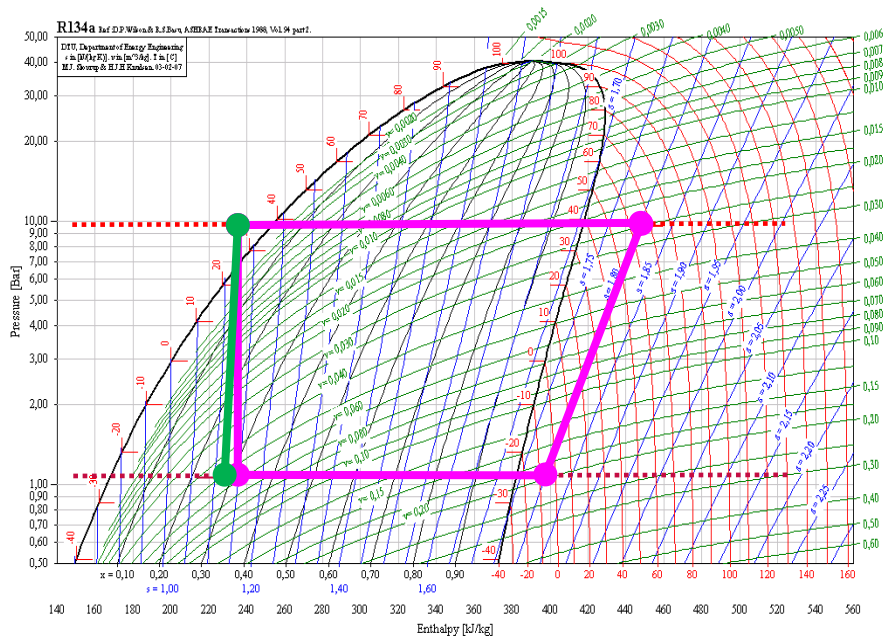
Cycle thermodynamique



Cycle thermodynamique



Cycle thermodynamique



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

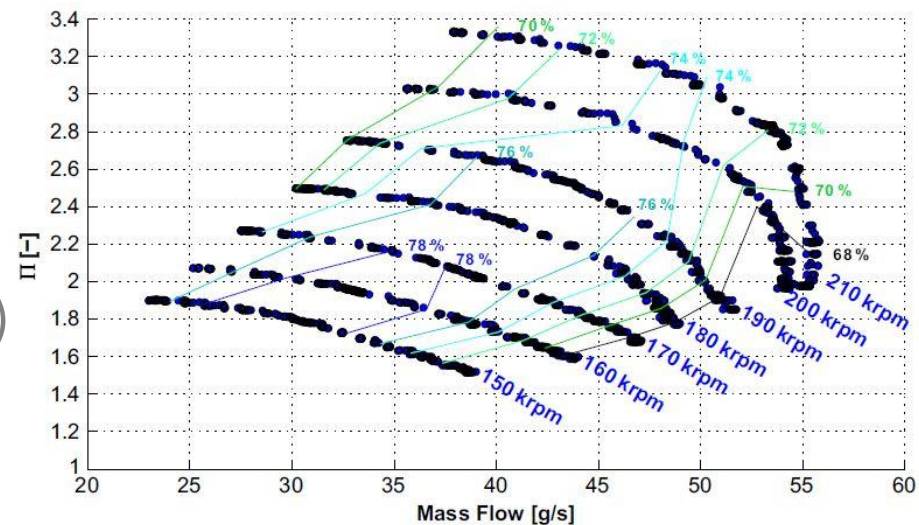
- énergie de détente récupérable faible (plus si CO₂)
- prototypes de « machines tournantes » (piston libre, etc.)

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

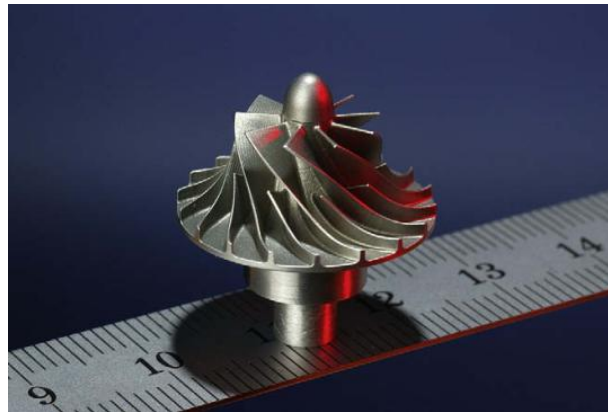


Source : doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006

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

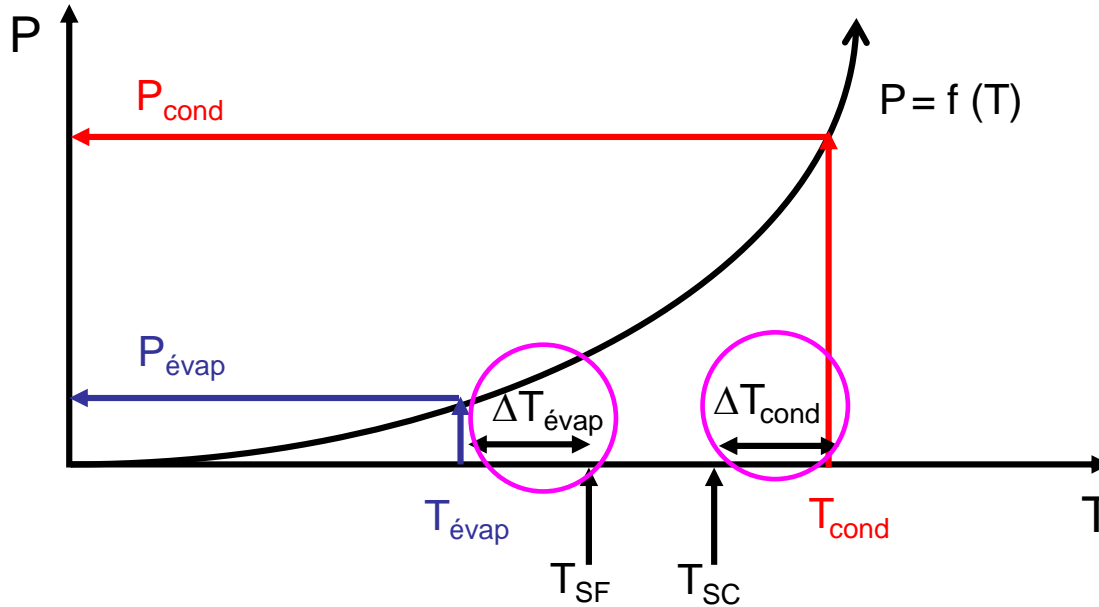


Source : [doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006)

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)

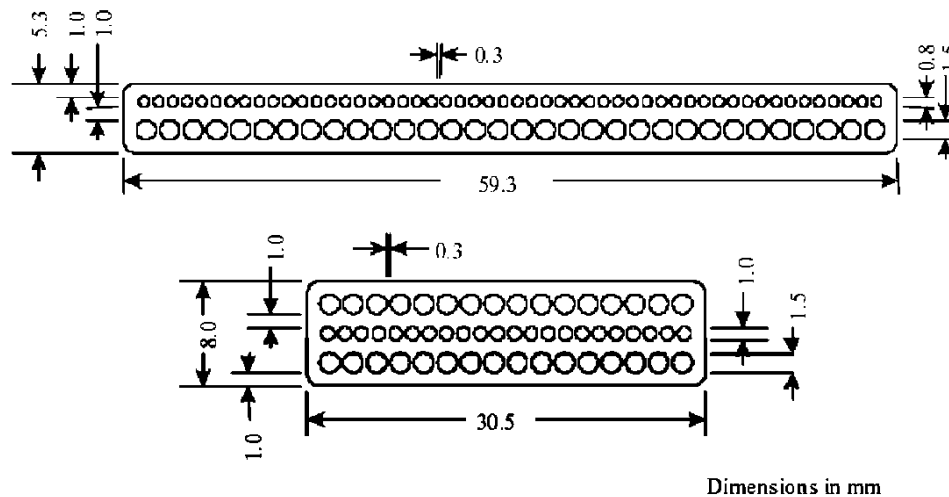


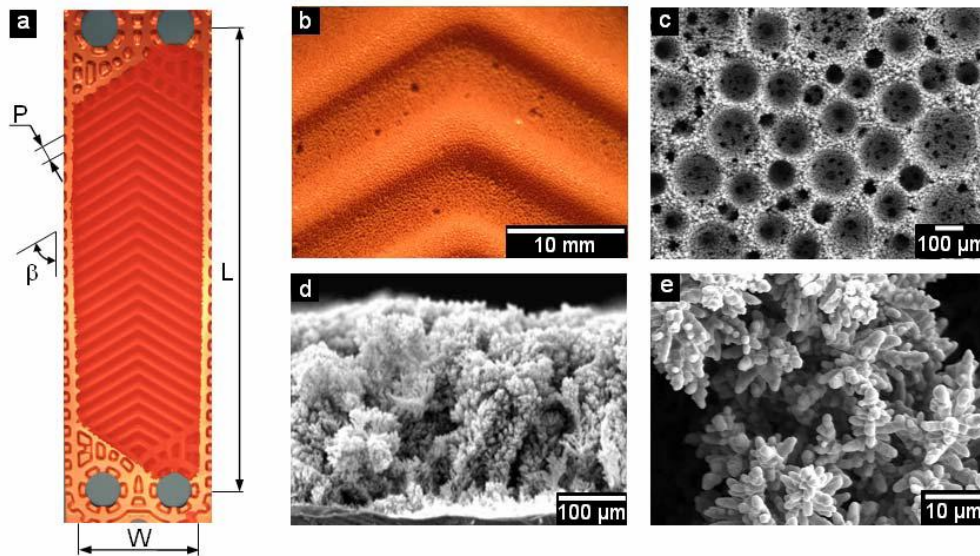
Illustration of new designs of internal heat exchanger

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

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

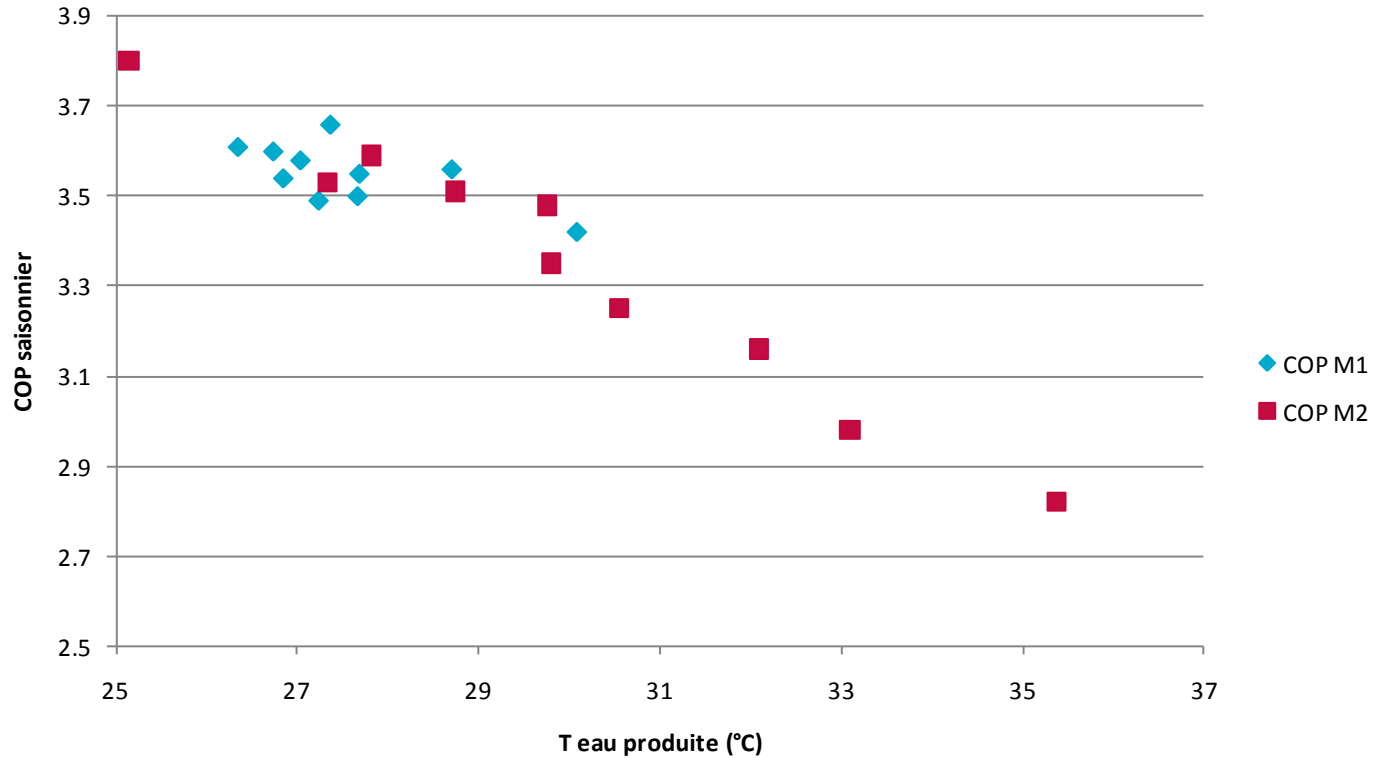
Source froide: préchauffage du milieu froid par énergie solaire thermique

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

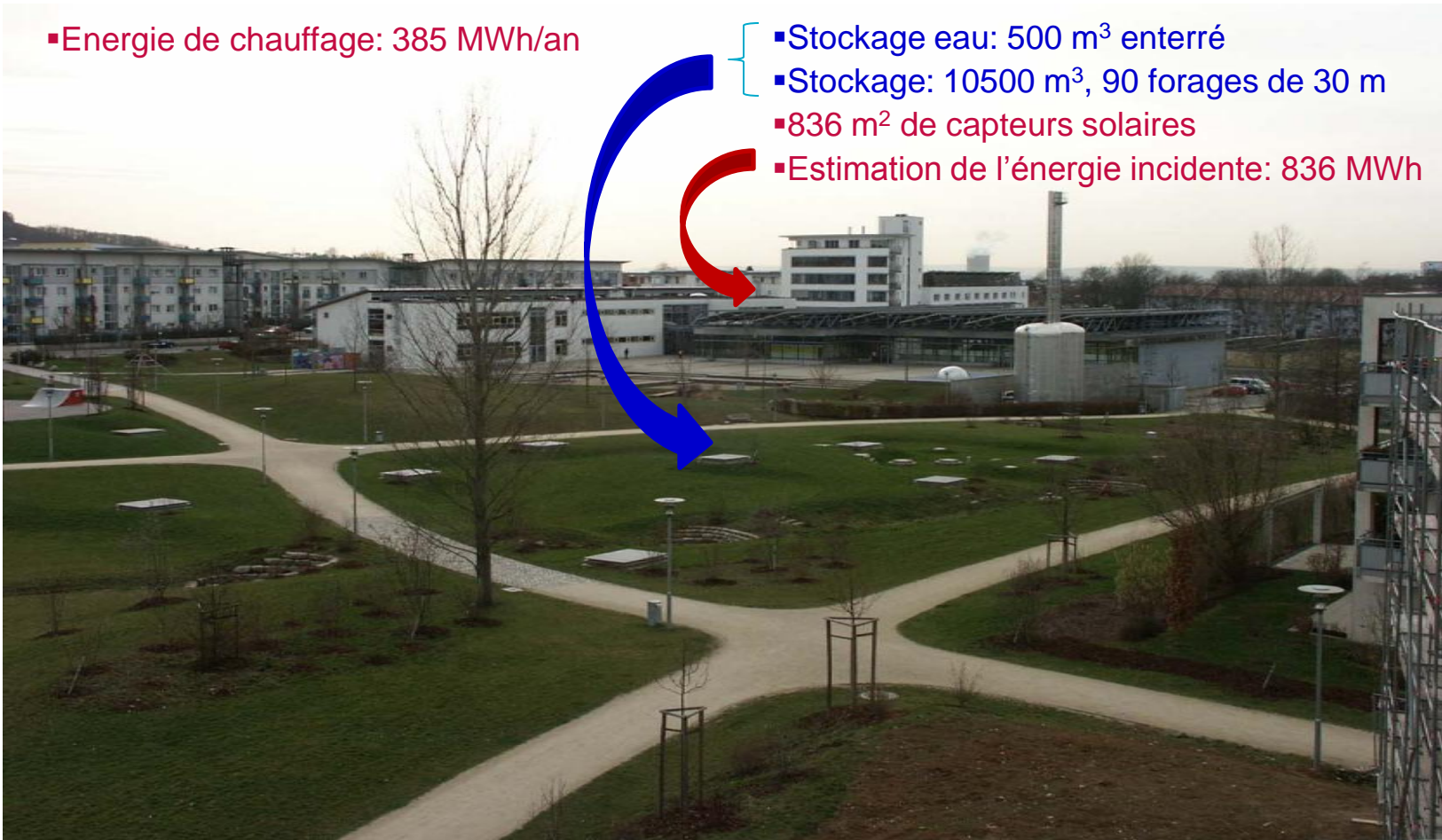
▪Energie de chauffage: 385 MWh/an

▪Stockage eau: 500 m³ enterré

▪Stockage: 10500 m³, 90 forages de 30 m

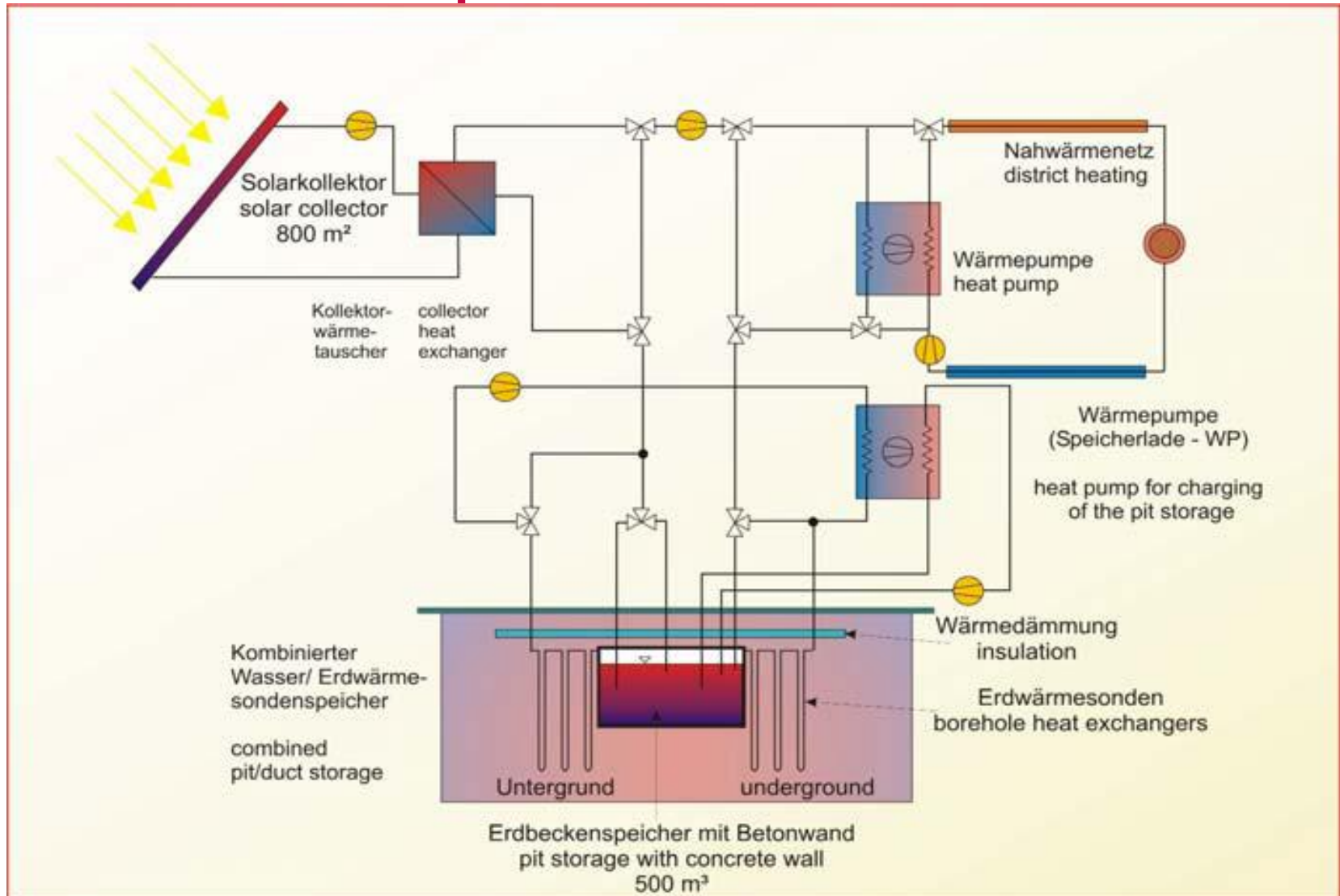
▪836 m² de capteurs solaires

▪Estimation de l'énergie incidente: 836 MWh



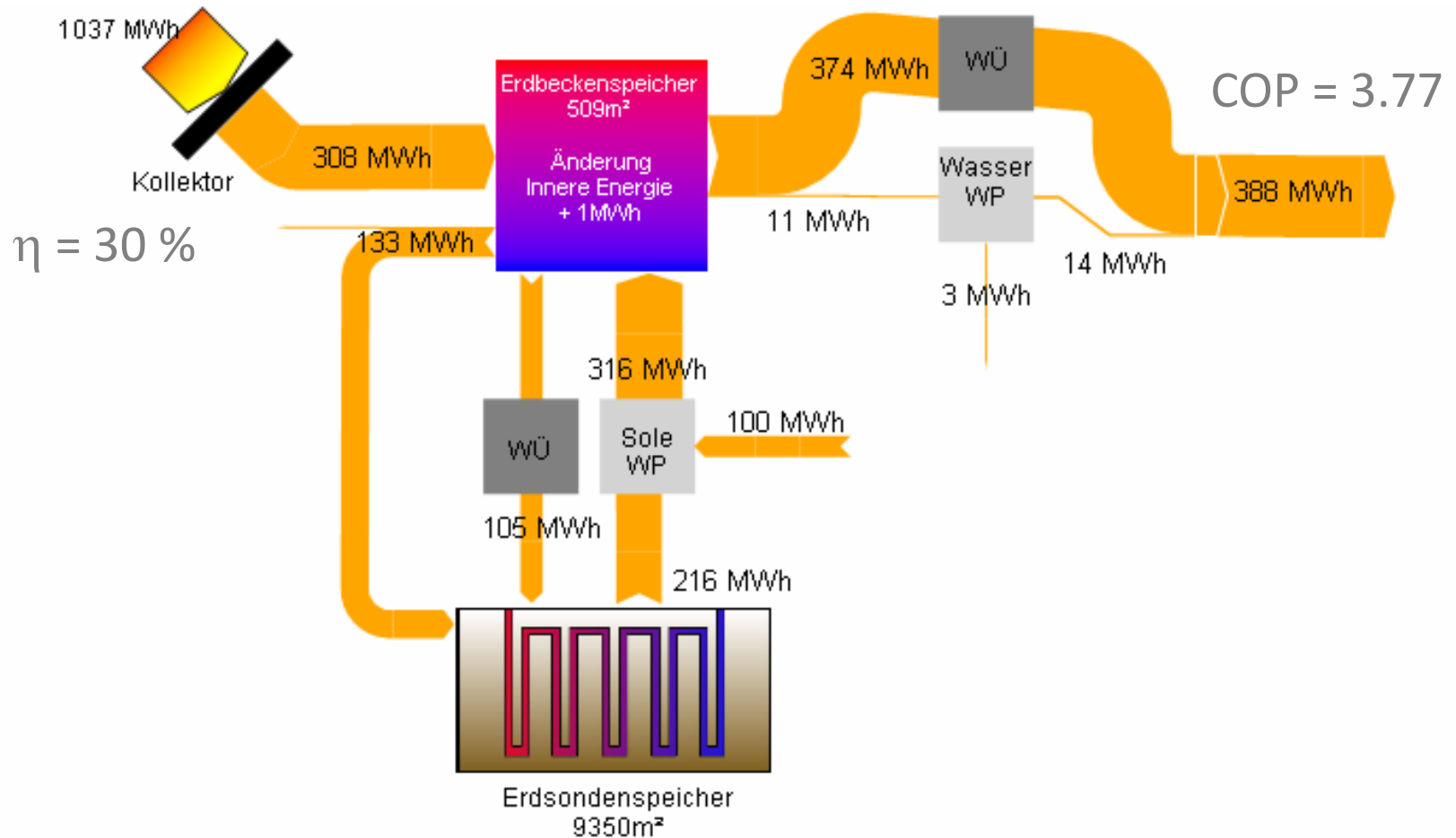
Source : Ecstock Thermal Energy Storage Conference 2006

Températures des sources



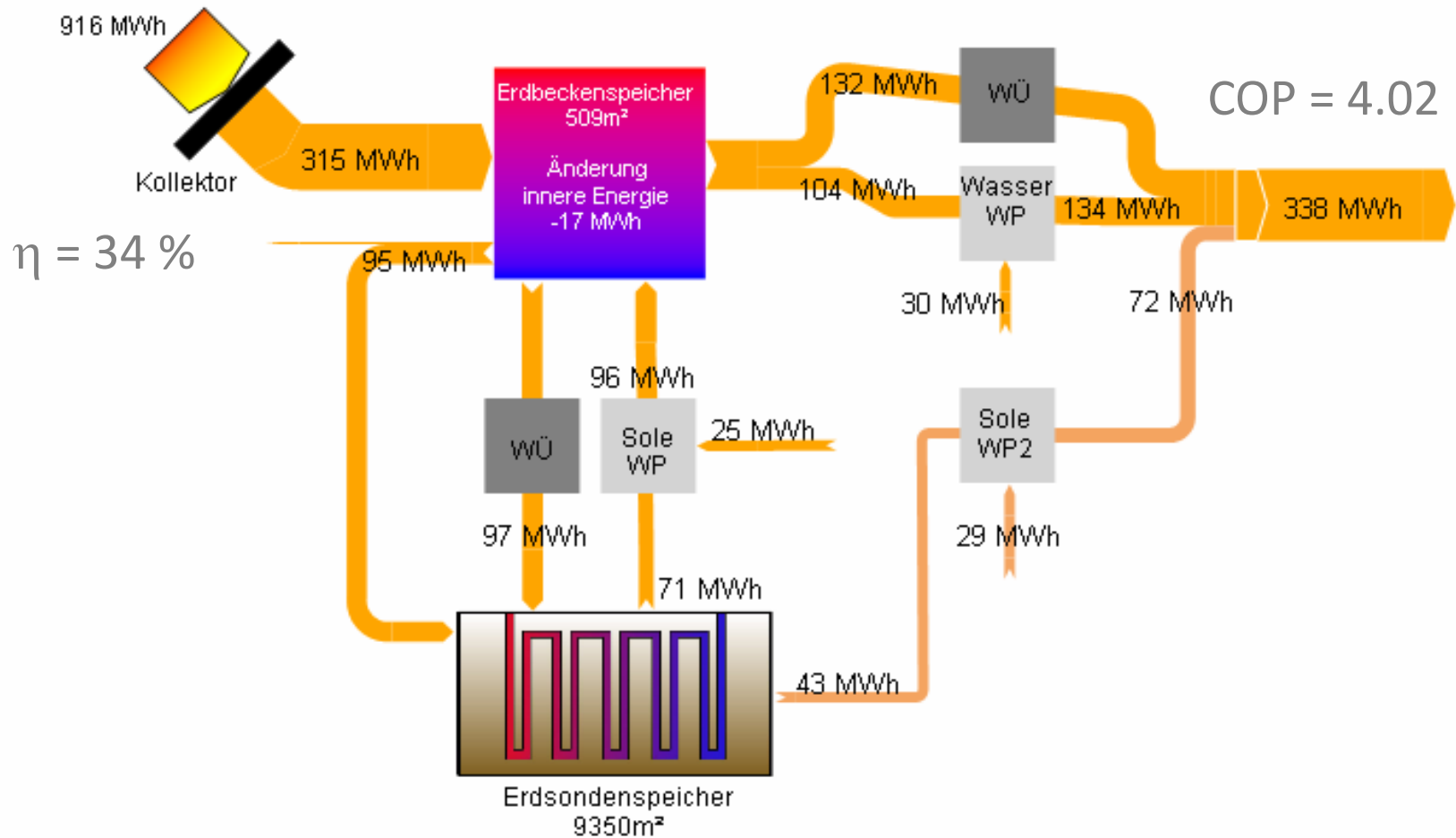
Source : Ecostock Thermal Energy Storage Conference 2006

Températures des sources



Source : Ecostock Thermal Energy Storage Conference 2006

Températures des sources



Source : Ecostock Thermal Energy Storage Conference 2006

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) (GWP=4)

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 (NH₃) :

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

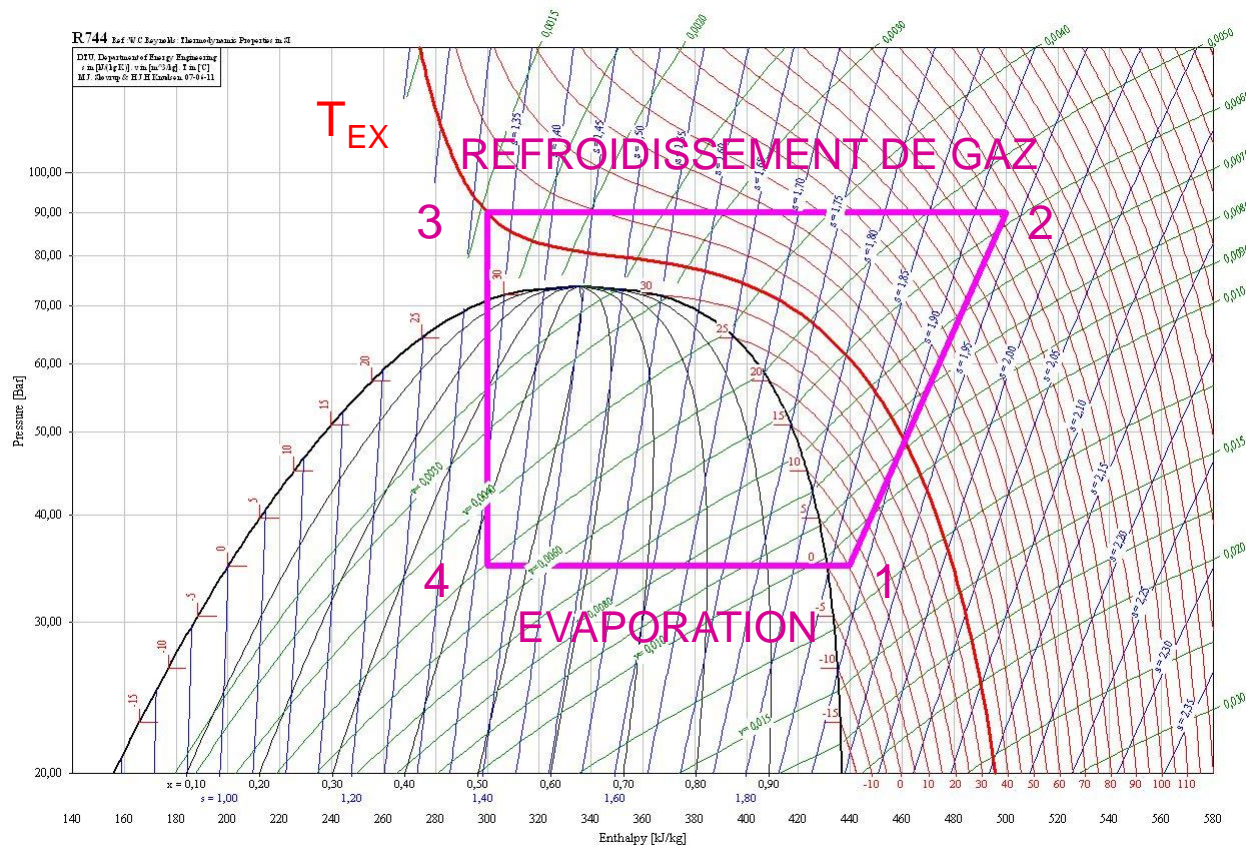
Propane (R290) :

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

Fluides frigorigènes

CO₂ (R744) :

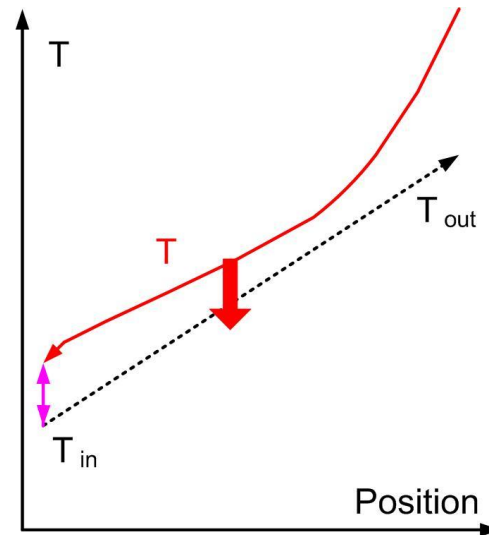
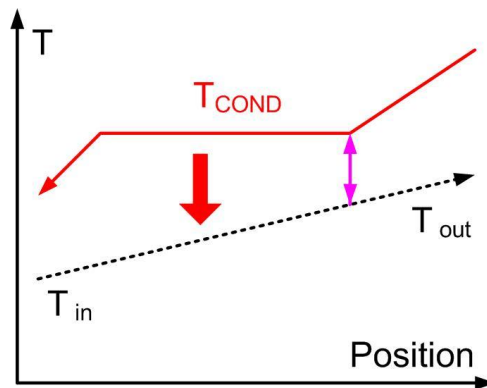
Le CO₂ ne permet plus de produire la chaleur utile par condensation mais par simple refroidissement



Fluides frigorigènes

CO₂ (R744) :

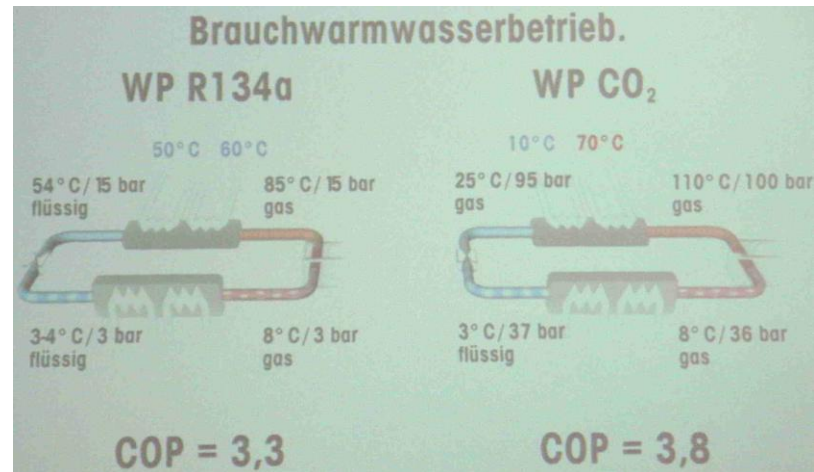
- Le cycle est développé par anticipation d'une législation future possible sur les fluides frigorigènes
- Le cycle au CO₂ est plus irréversible que les cycles à compression de vapeur: le COP est plus mauvais
- La haute pression peut aller jusque 150 bar !
- COP intéressant pour le chauffage de l'eau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

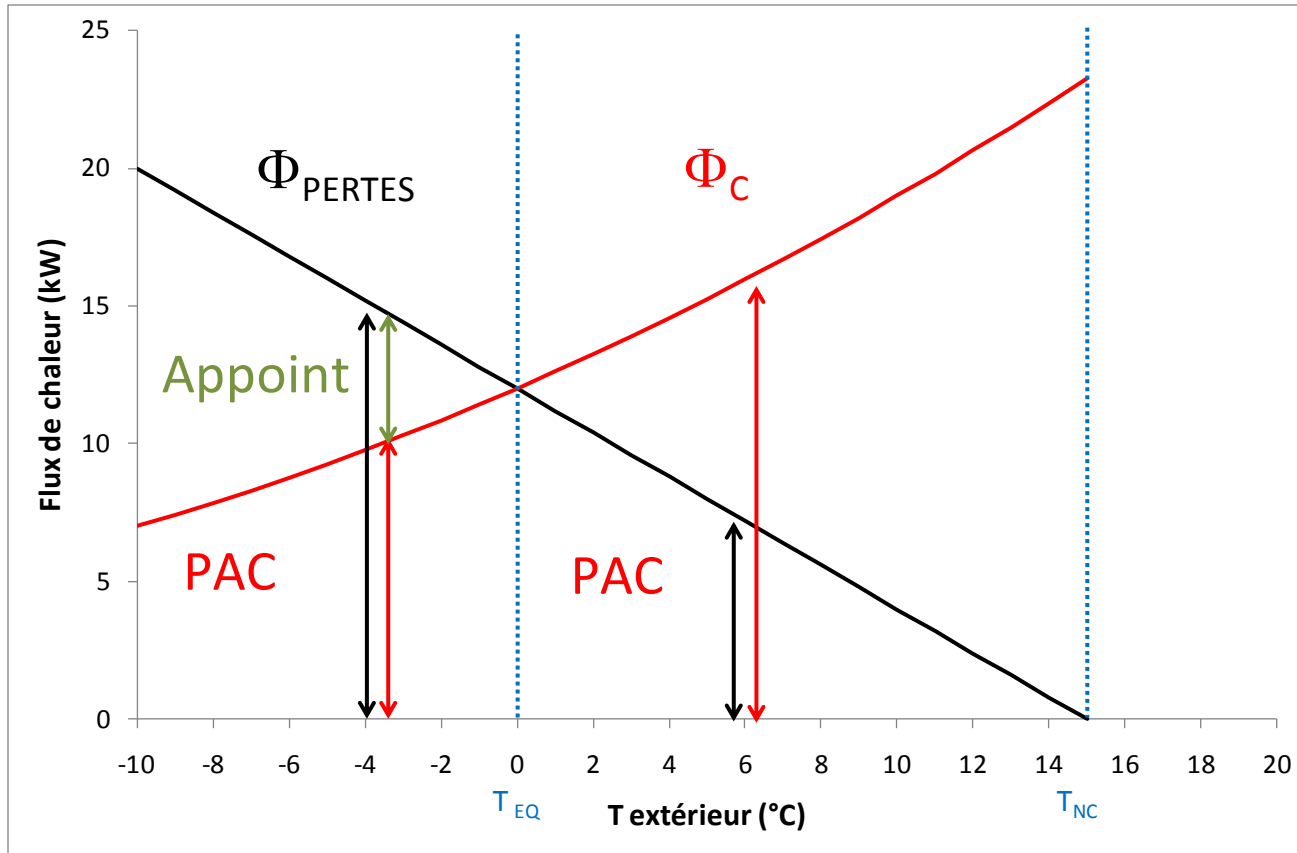


Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008 - EWZ

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



PAC « normalement » dimensionnée

Dimensionnement - Régulation PAC

Règles de dimensionnement d'une PAC air/eau :

$$\Phi_{CPAC} (T_{EXT} = -5 \text{ à } 0^{\circ}\text{C}, T_{EAU} = 35^{\circ}\text{C}) = \Phi_D (T_{EXT} = -5 \text{ à } 0^{\circ}\text{C})$$

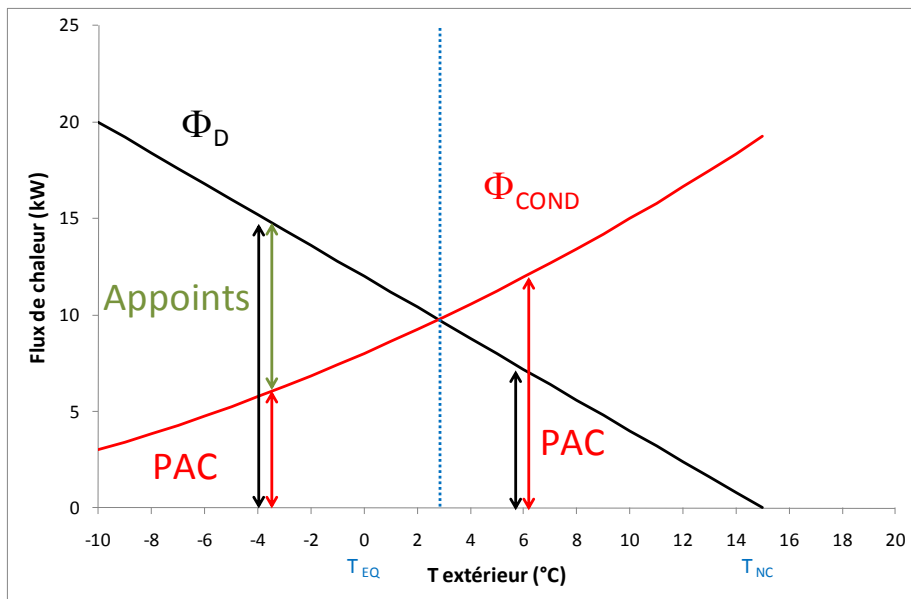
En dessous de T_{EQ} :

besoin d'appoints (souvent électriques)

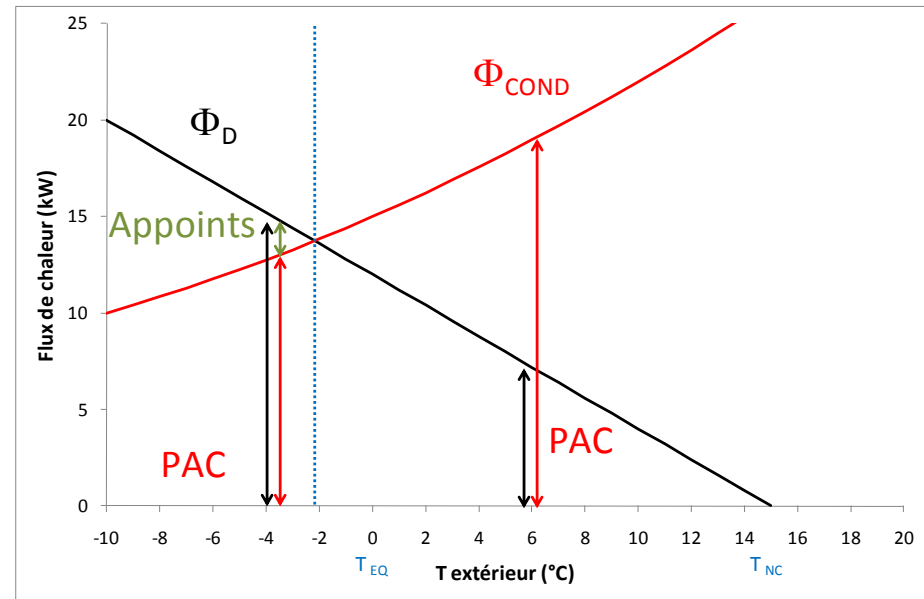
Au dessus de T_{EQ} :

cycles de fonctionnement courts

machine pas en régime -> mauvais COP



PAC moins puissante



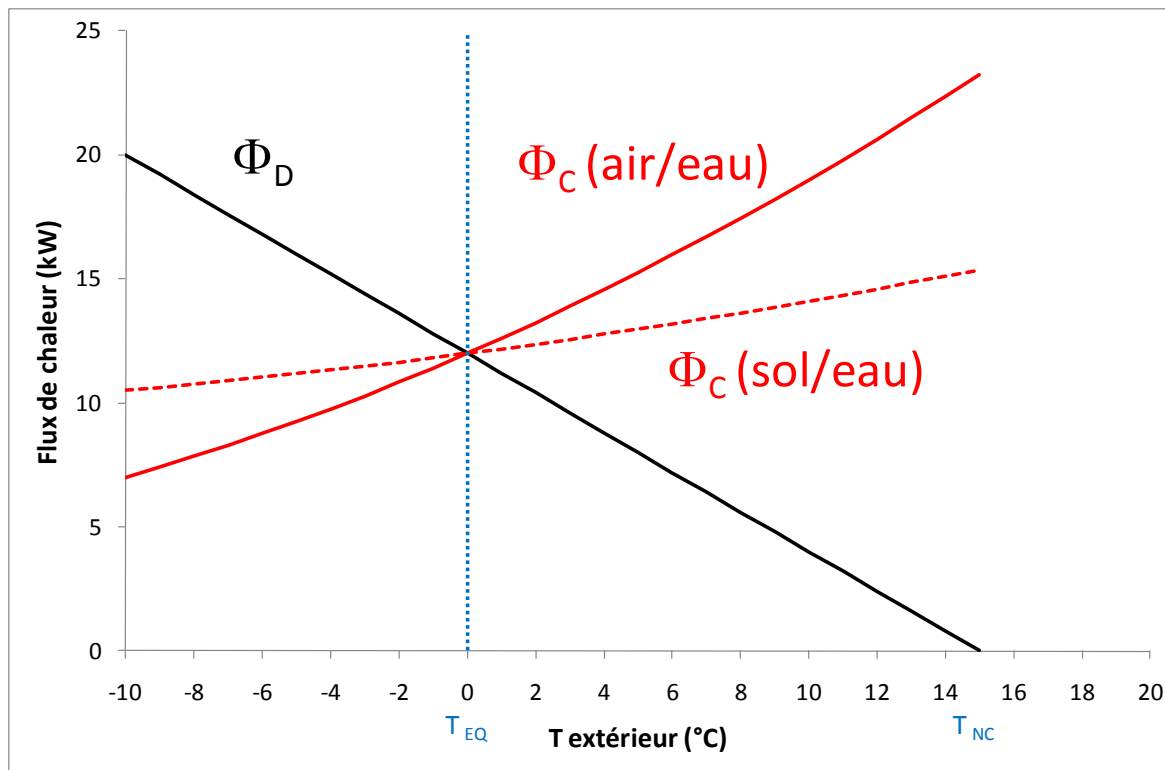
PAC plus puissante

Dimensionnement - Régulation PAC

Intérêt de la vitesse variable :

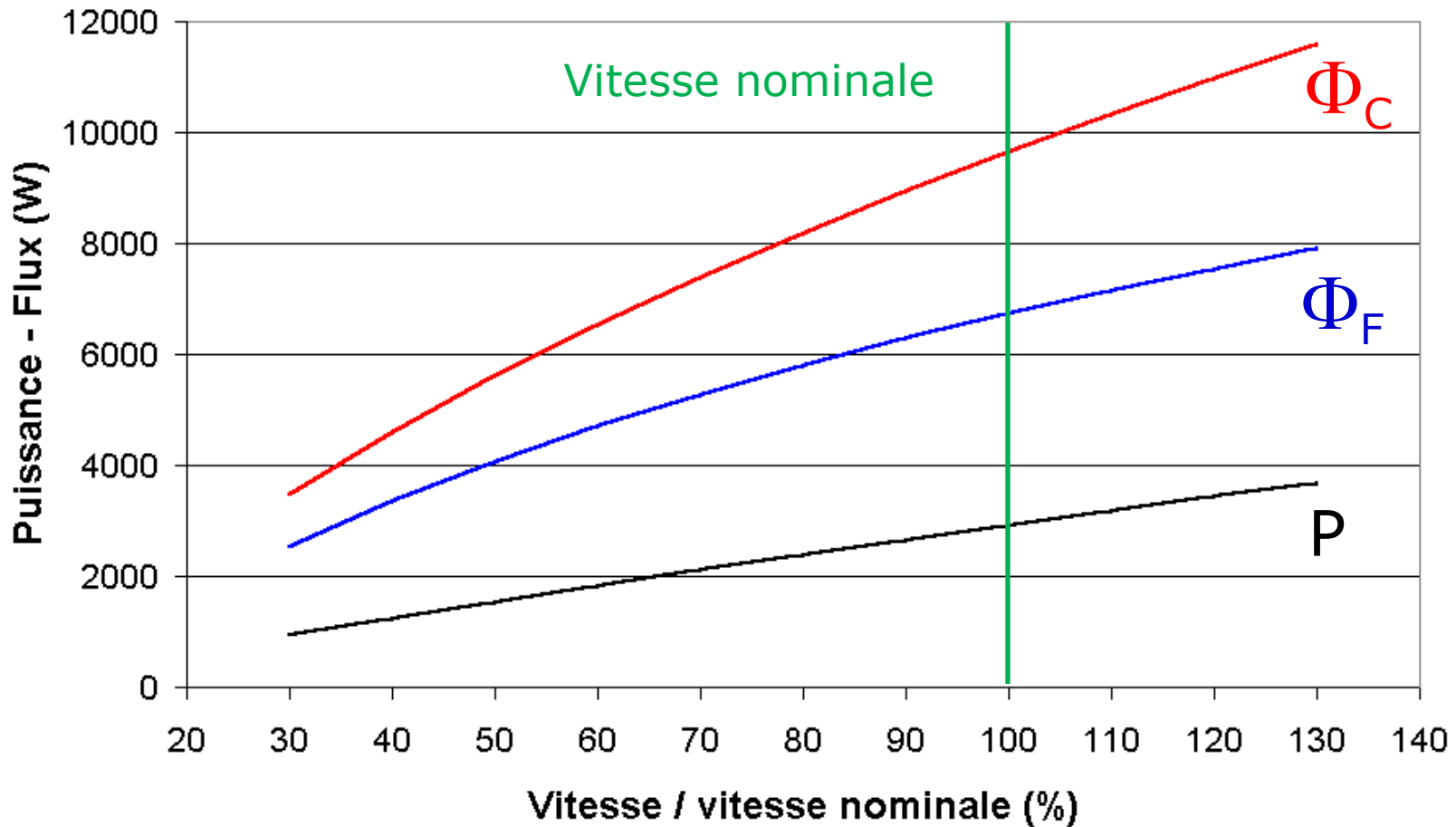
avoir un degré de liberté supplémentaire pour tenter d'adapter Φ_{CPAC} au flux de déperditions Φ_{D} lorsque T_{EXT} varie au cours de la saison de chauffe

Cela est surtout intéressant pour les PAC utilisant l'air comme source froide (air/air, air/eau), moins pour les PAC utilisant l'eau ou le sol



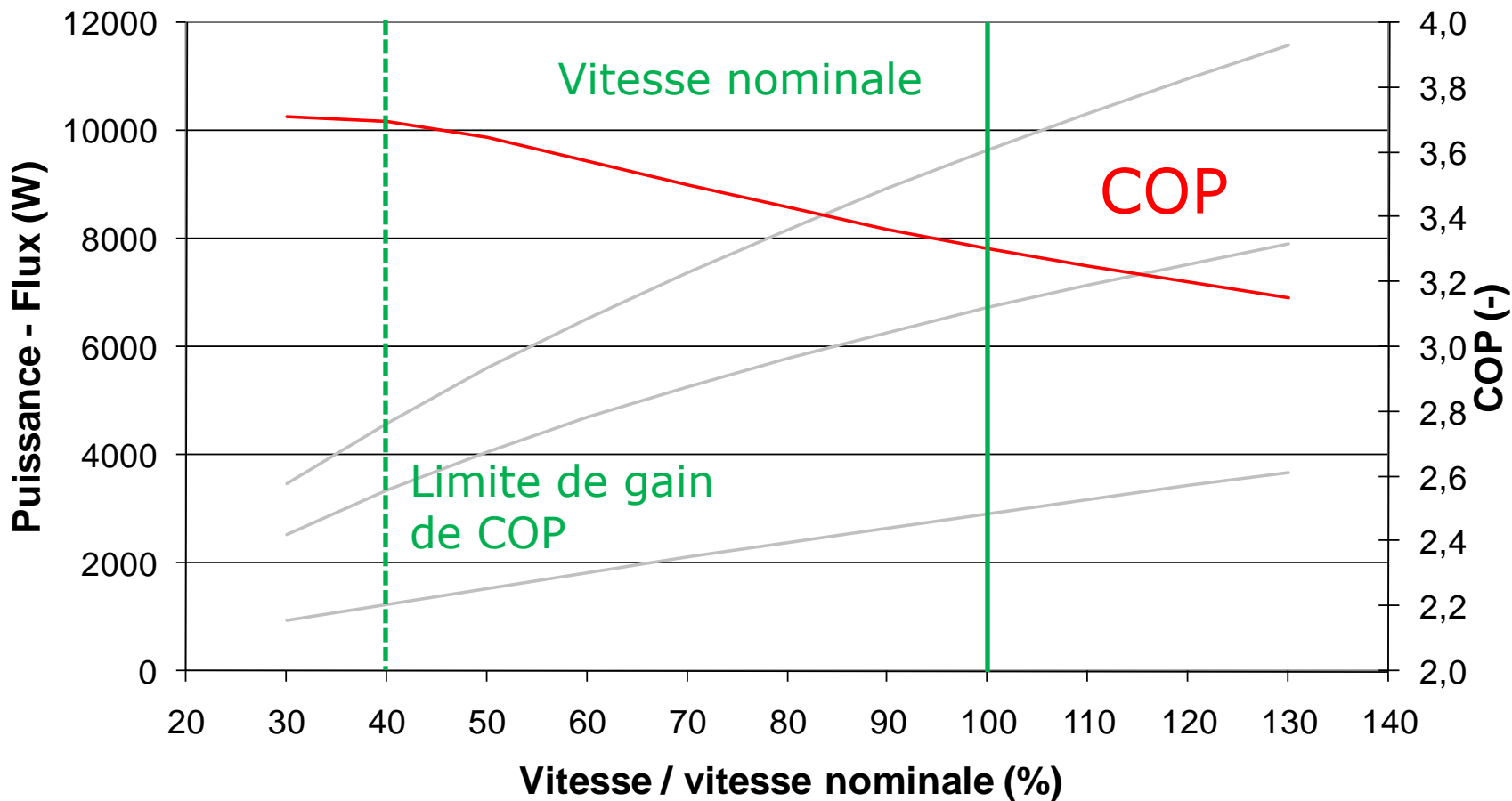
Dimensionnement - Régulation PAC

Influence de la vitesse



Dimensionnement - Régulation PAC

Influence de la vitesse



Dimensionnement - Régulation PAC

Intérêt de la vitesse variable :

1) au dessus du point d'équilibre ($T_{EXT} > T_{EQ}$), on peut diminuer la vitesse pour avoir le flux chaud de la PAC Φ_C mieux adapté au flux de déperditions Φ_D

- la vitesse diminuant, le COP sera meilleur

2) en dessous du point d'équilibre ($T_{EXT} < T_{EQ}$), on peut augmenter la vitesse pour augmenter le flux chaud de la PAC afin de moins utiliser les appoints (ou de ne pas les utiliser du tout)

- la vitesse augmentant, le COP sera moins bon mais meilleur qu'une résistance électrique (COP=1)

Règle de dimensionnement pour une PAC air-eau à vitesse variable :

$$\Phi_{CPAC} (T_{EXT} = -10^{\circ}\text{C}, T_{EAU} = 35^{\circ}\text{C}) = \Phi_D (T_{EXT} = -10^{\circ}\text{C})$$

Dimensionnement - Régulation PAC

Intérêt de la vitesse variable :

3) le démarrage et l'arrêt du compresseur se font en douceur lors des cycles de fonctionnement et permet d'allonger la durée de vie du compresseur

4) le vitesse du ventilateur de l'évaporateur peut aussi être variable pour optimiser le fonctionnement

5) la gamme de vitesse (fréquence) est limitée par des considérations pratiques (25Hz-70Hz, c'est-à-dire de 50% à 140% de la vitesse nominale) :

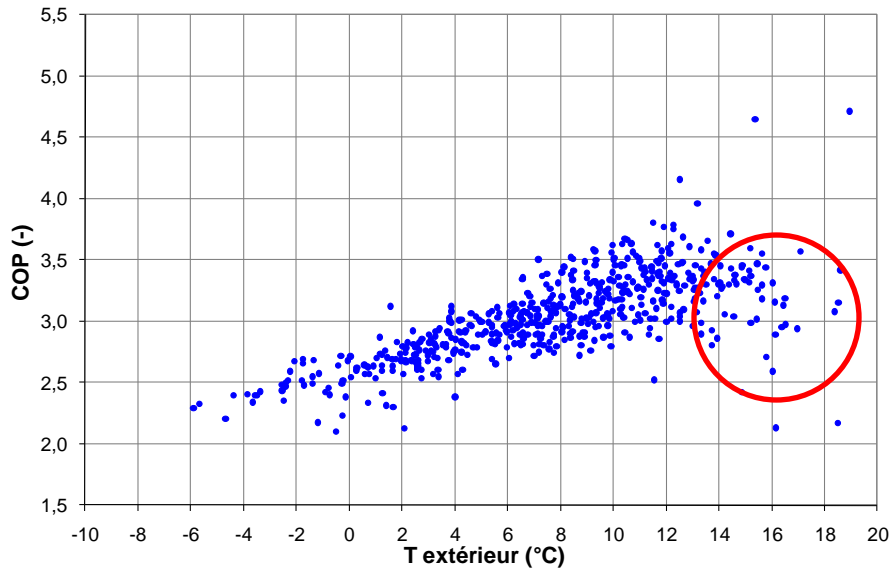
- à basse fréquence le COP n'augmente plus et l'huile ne circule plus bien dans le compresseur
- à haute fréquence, limitations du moteur électrique et usure plus rapide du compresseur
- à fréquence différente de la fréquence nominale, le rendement du moteur électrique diminue

Dimensionnement - Régulation PAC

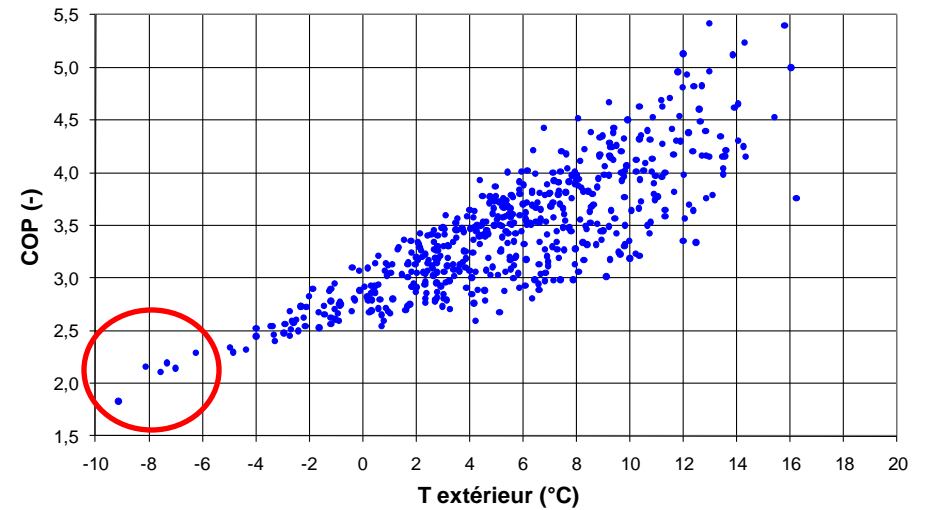
- Compresseur à vitesse variable : permet d'adapter le flux chaud de la PAC aux besoins de chaleur (dans une certaine mesure en pratique)
- Cette adaptation de la vitesse aux besoins augmente en principe le COP saisonnier mais nécessite une régulation intelligente et complexe du compresseur mais aussi 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

COP Air-Eau (vitesse fixe)



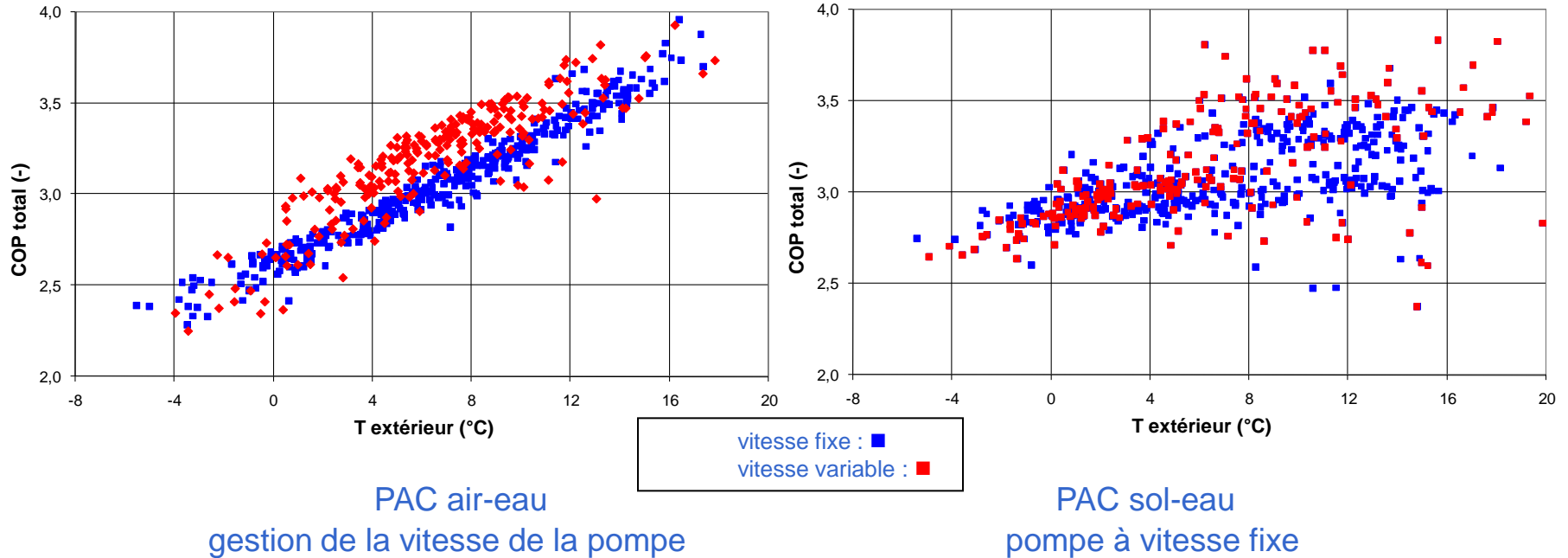
COP Air-Eau (vitesse variable)



Intérêt des compresseurs à vitesse variable :

- pas de dégradation du COP pour T_{EXT} élevé (pas de cycles trop courts)
- fonctionnement très basse température extérieure

Dimensionnement - Régulation PAC



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

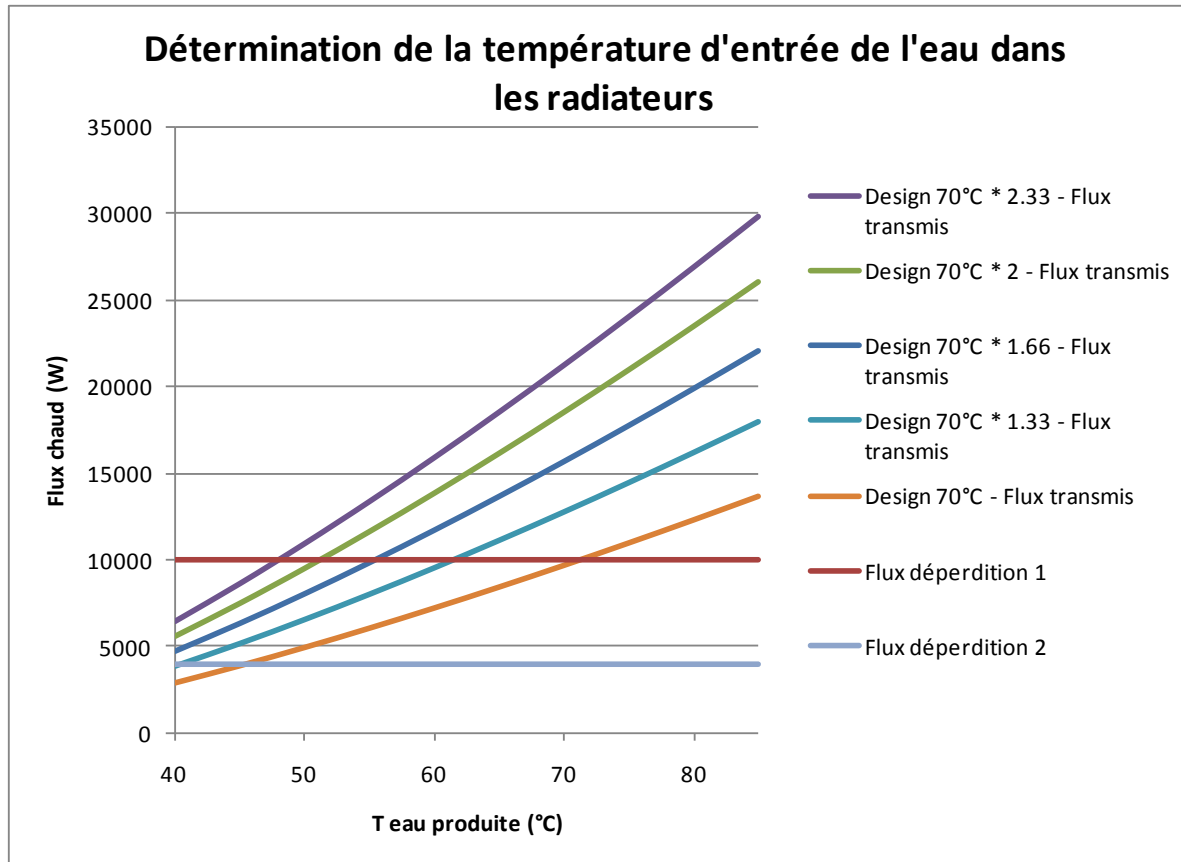
PAC à haute température à injection

PAC haute température à injection

- Monitoring d'une pompe à chaleur haute température à injection biphasique
 - PAC Mitsubishi ZURAN 100 (technologie Zubadan + régulation AJ-Tech) pour chauffage et production d'ECS (ballon de 200 l)
 - Maison située à Châtelet construite en 1995
 - Isolation K100, $\Phi_D (T_{EXT} = -10^{\circ}\text{C}) = 11 \text{ kW}$
 - Surface chauffée (rez + étage) : 160 m²

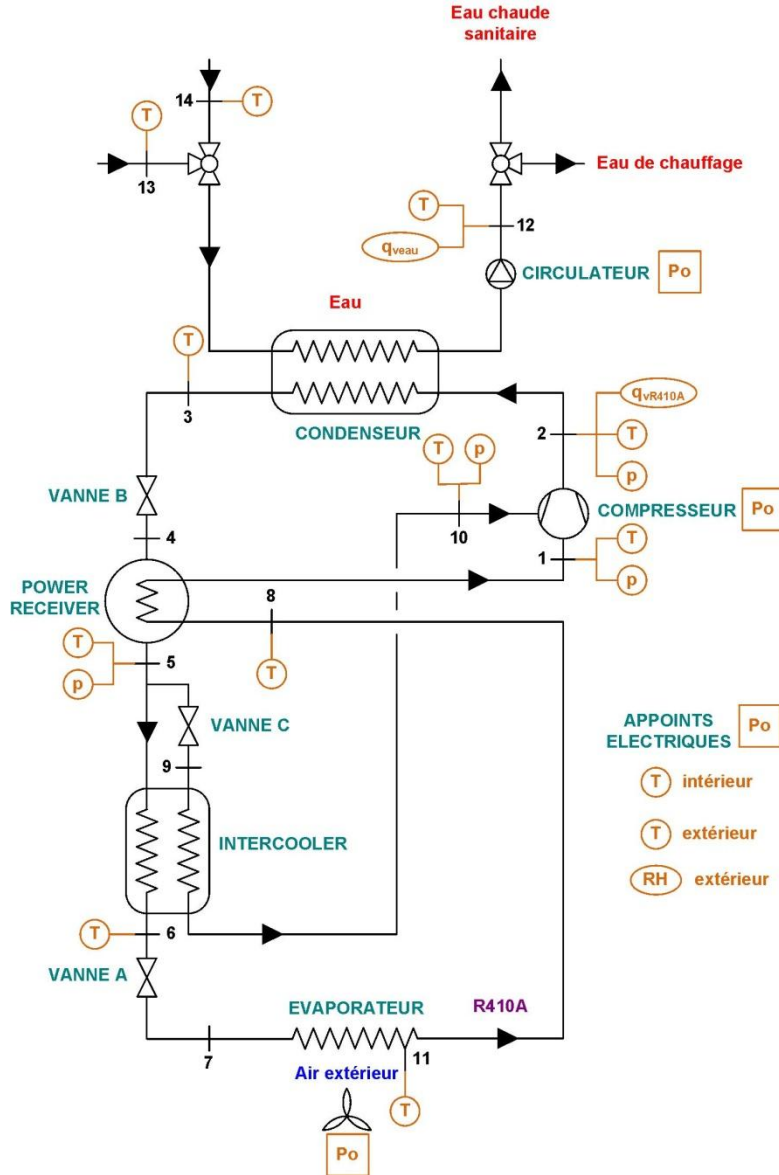


PAC haute température à injection



- radiateurs : design à 70°C
- Pour avoir de l'eau à 45 °C :
- isoler la maison/remplacer les radiateurs par des ventilo-convecteurs

PAC haute température à injection

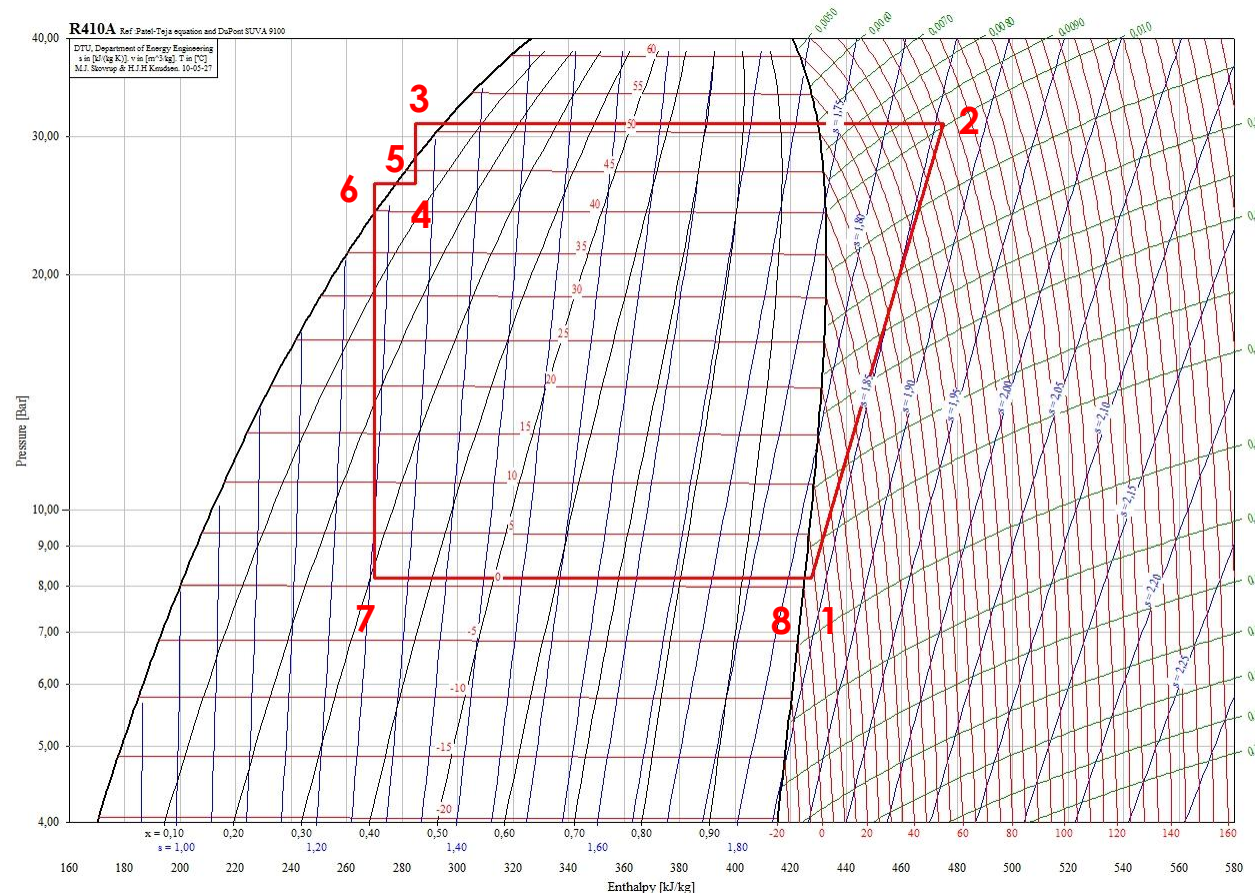
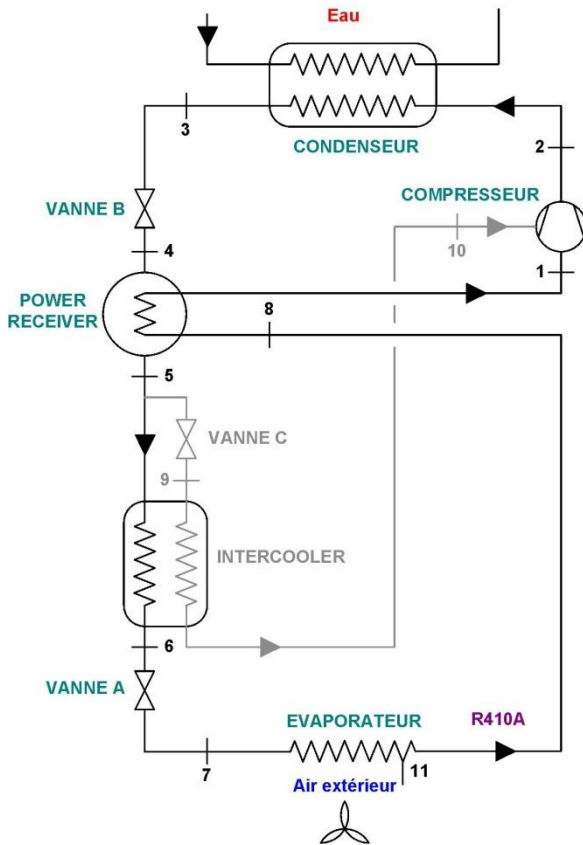


Monitoring détaillé :

- mesure de T, p, débit de R410A, débit d'eau au condenseur
- mesure de la consommation du compresseur, du ventilateur, des résistances d'appoints, du circulateur
- mesure du climat extérieur (T, RH) et intérieur (T)

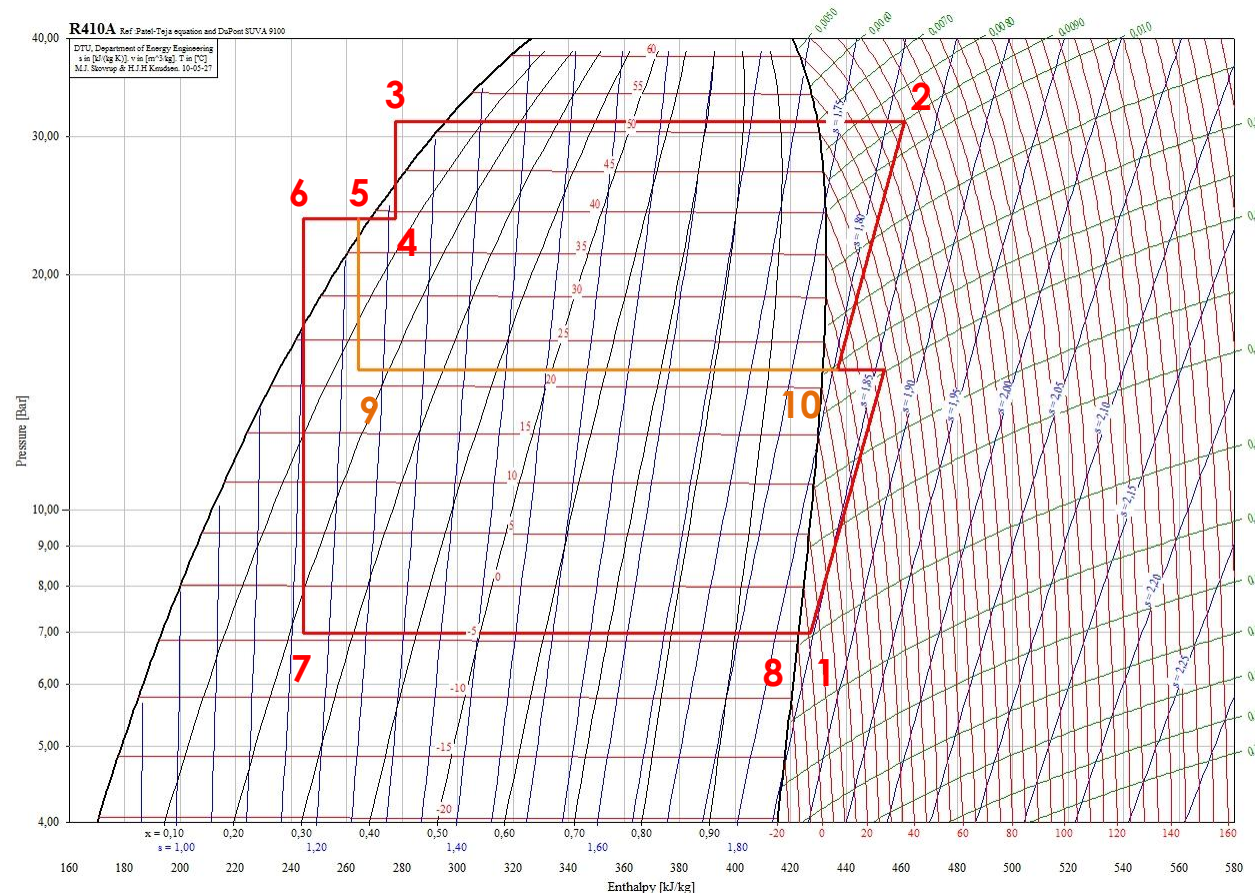
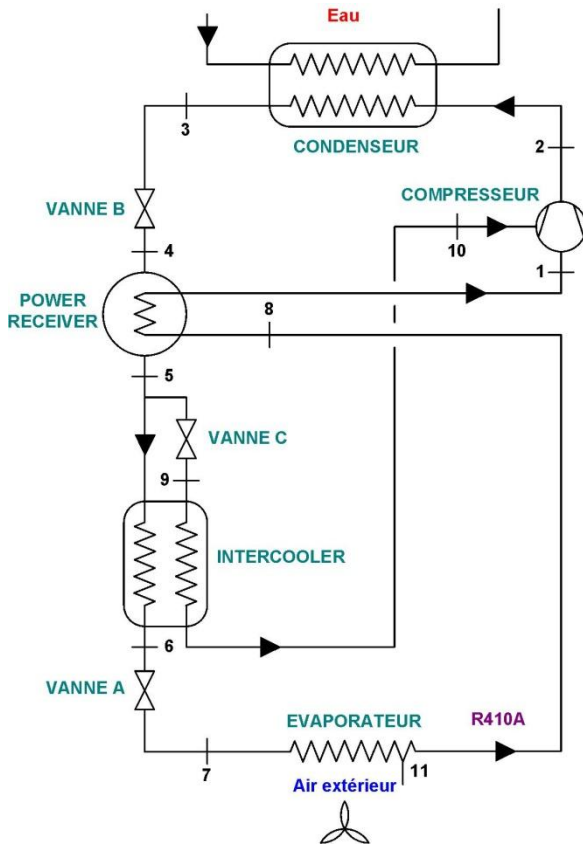
Mesure toutes les secondes, moyenne sur une minute, stockage dans un datalogger

PAC haute température à injection



Fonctionnement instantané (1^{er} avril 2010) sans injection

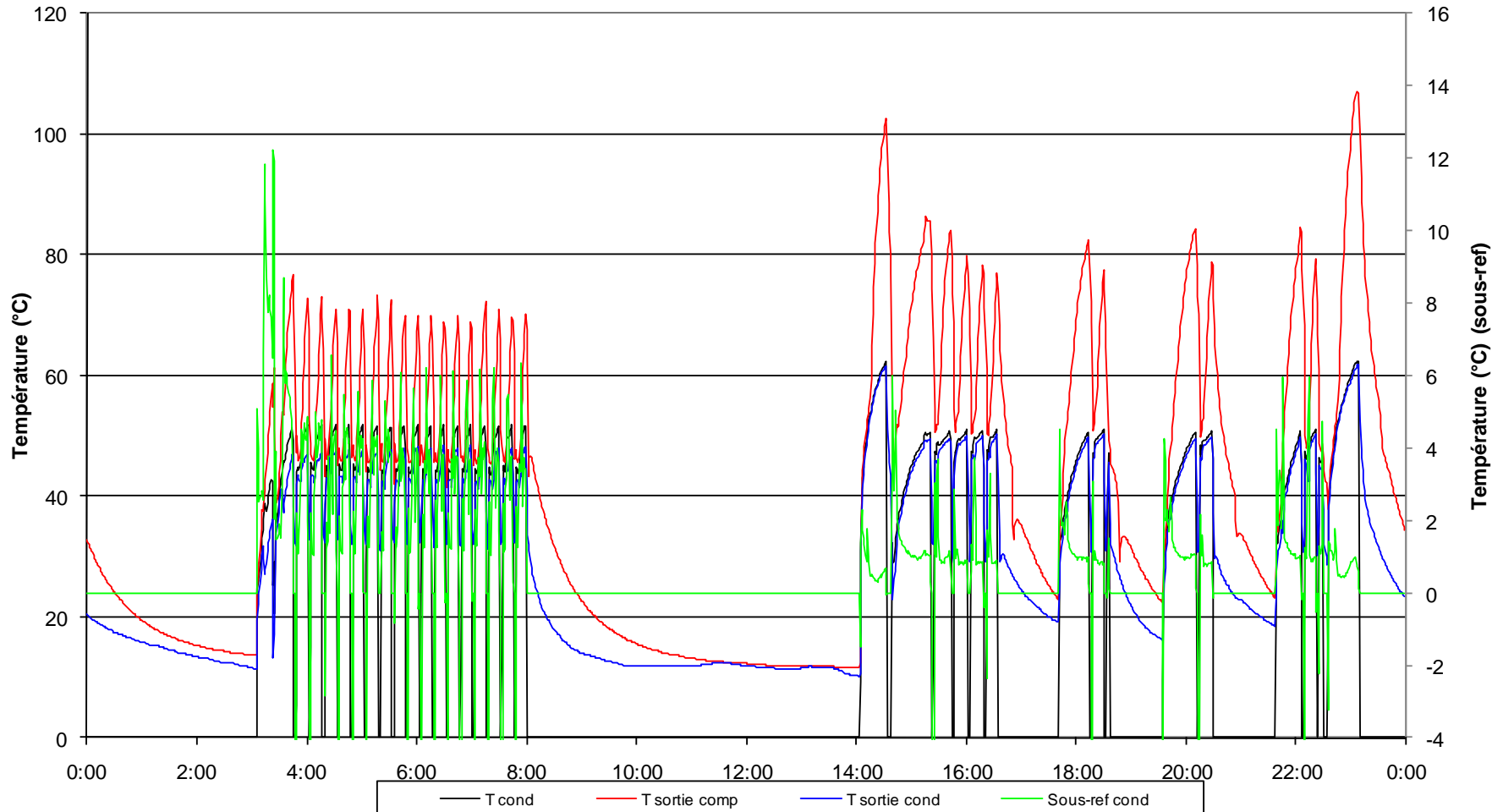
PAC haute température à injection



Fonctionnement instantané (1^{er} avril 2010) avec injection

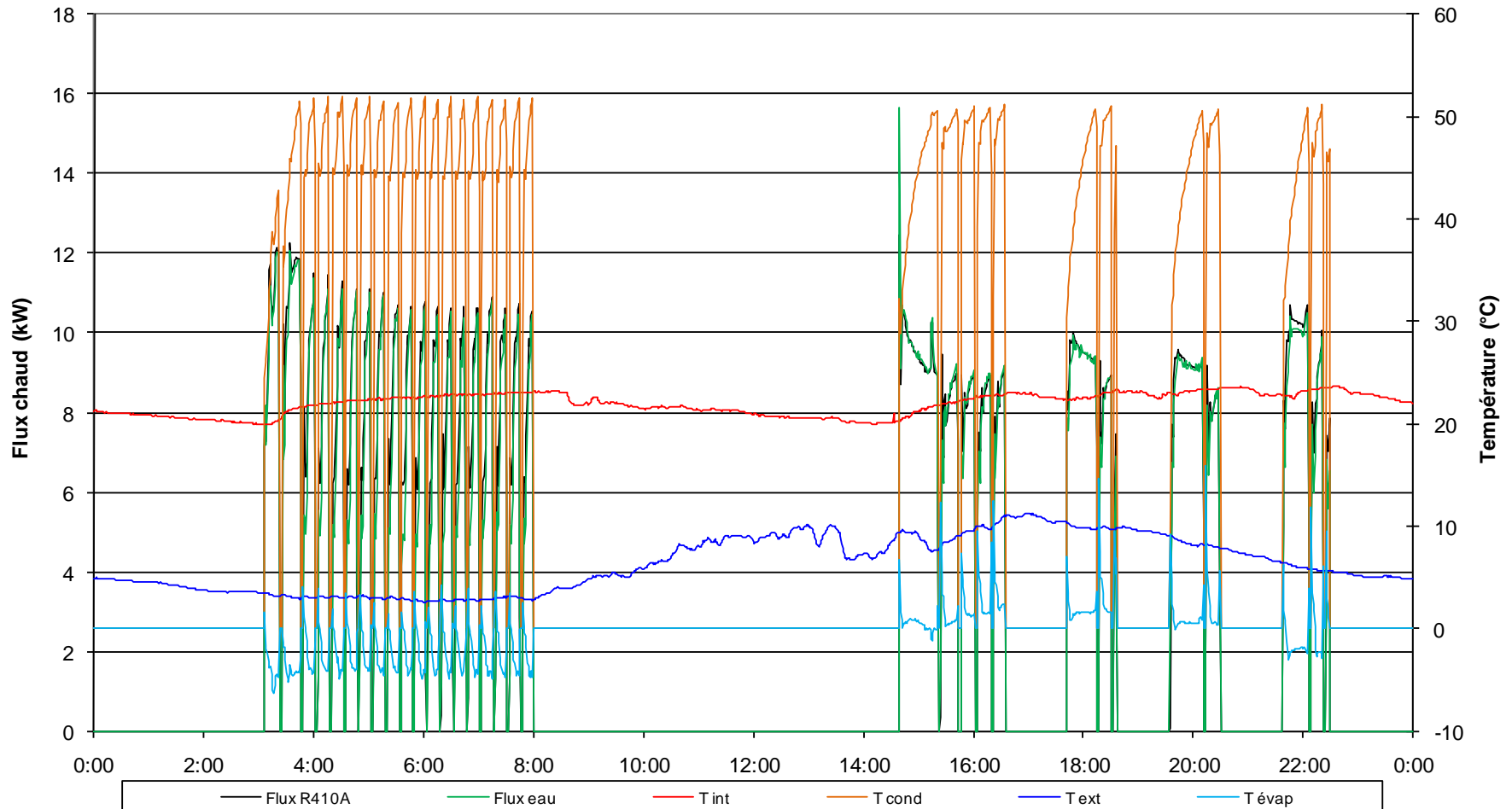
PAC haute température à injection (1^{er} avril 2010)

Températures au condenseur (R410A)



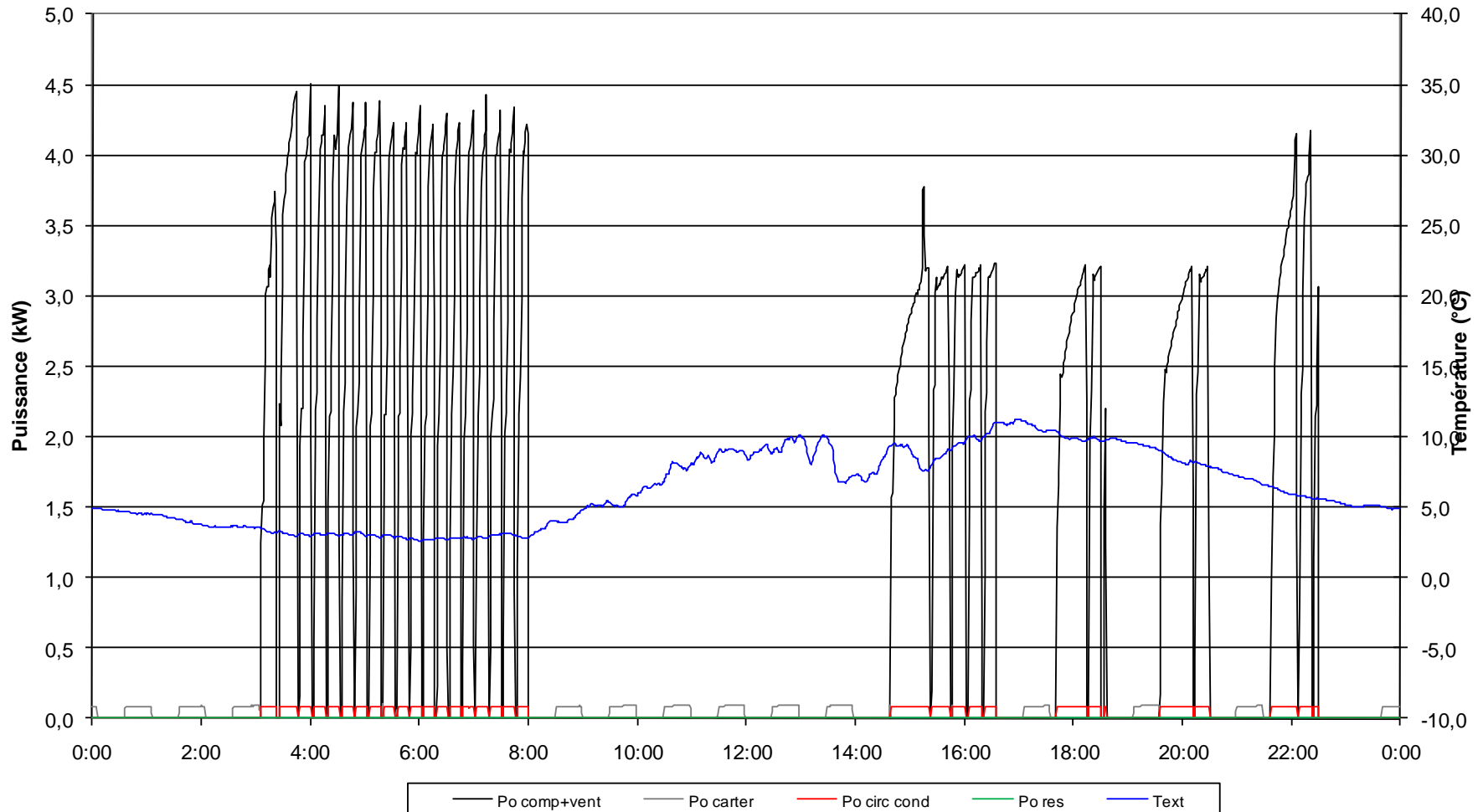
PAC haute température à injection (1^{er} avril 2010)

Flux chaud (chauffage)



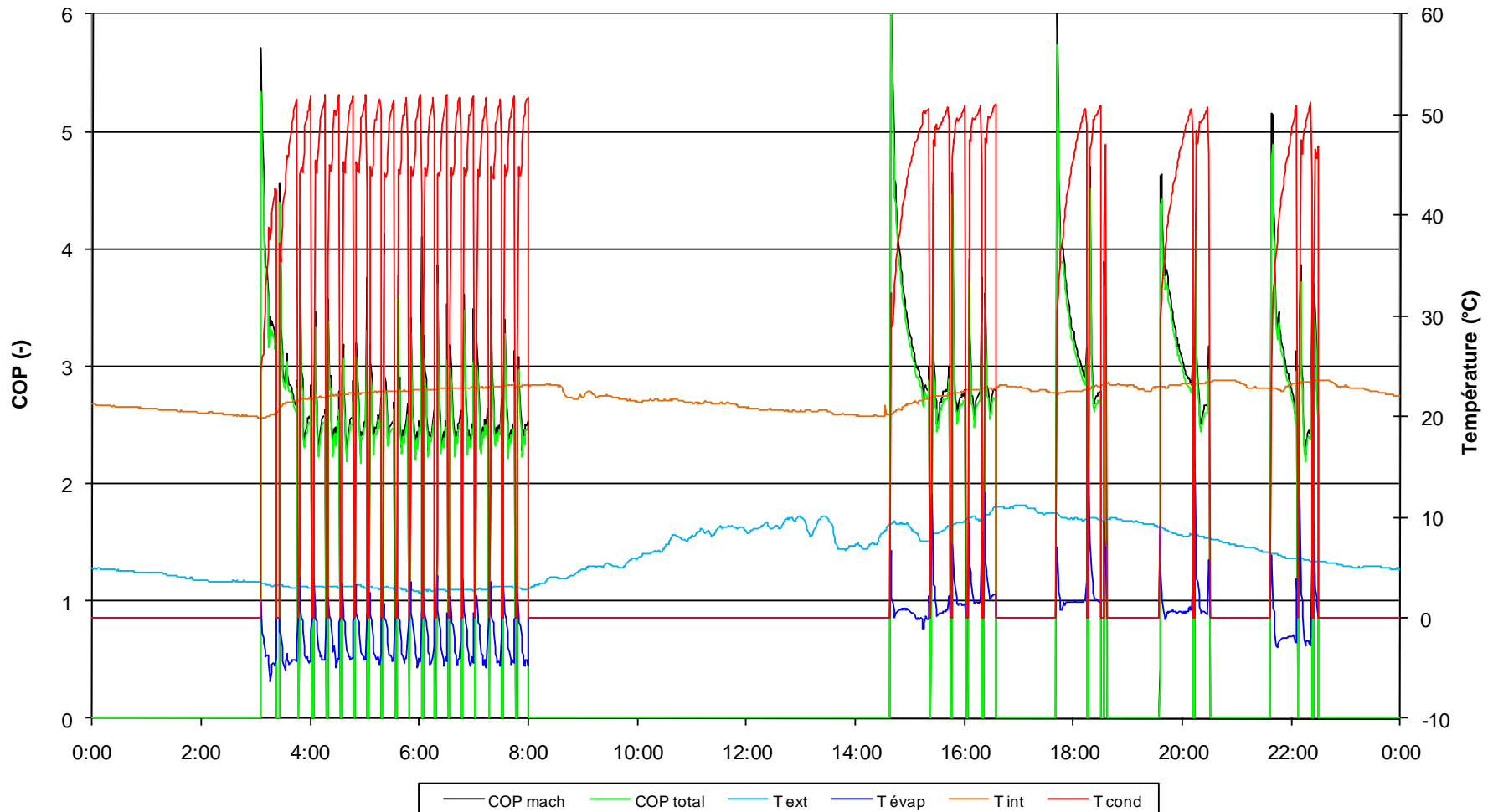
PAC haute température à injection (1^{er} avril 2010)

Puissances (chauffage)



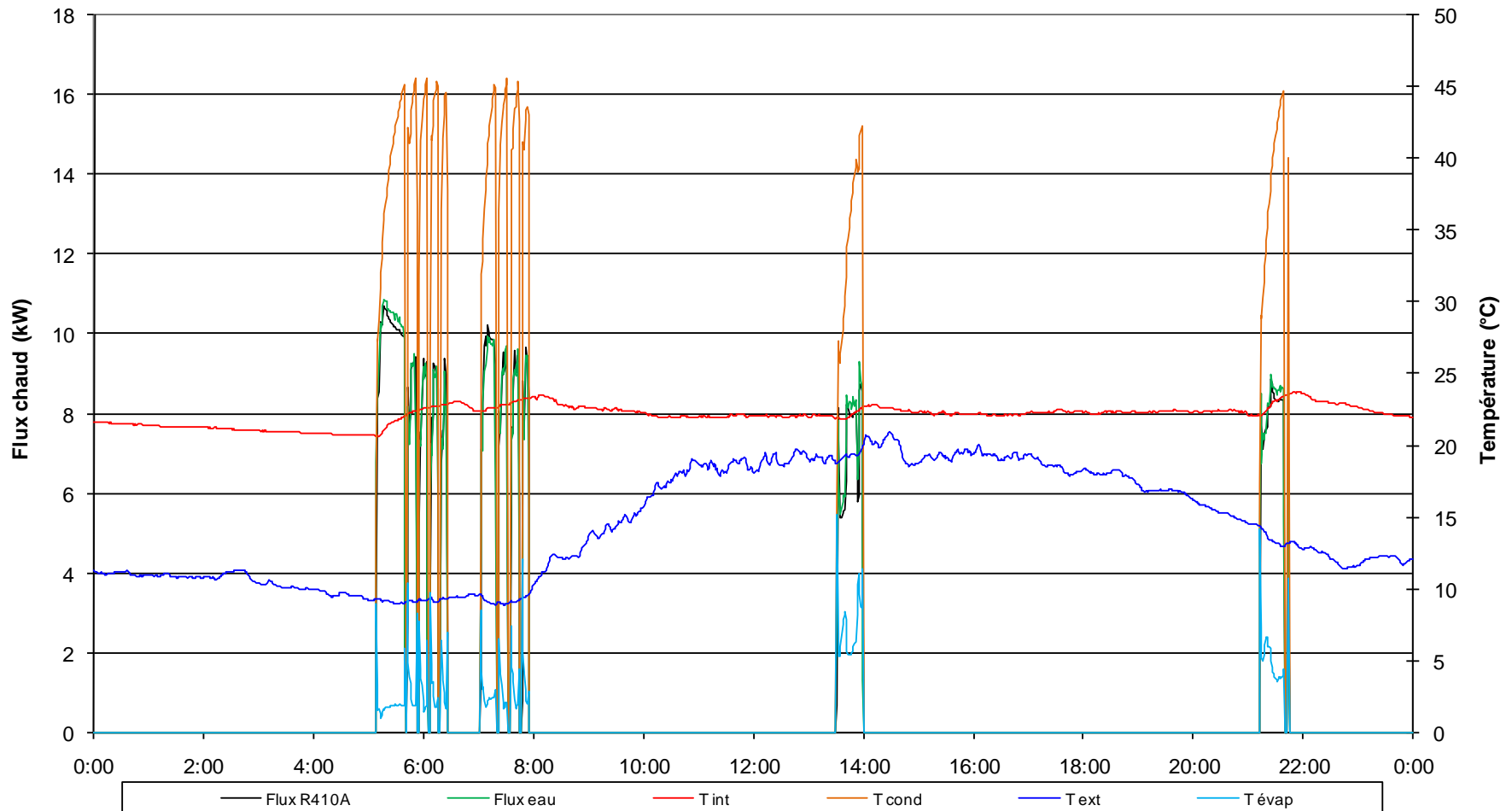
PAC haute température à injection (1^{er} avril 2010)

COP (chauffage)



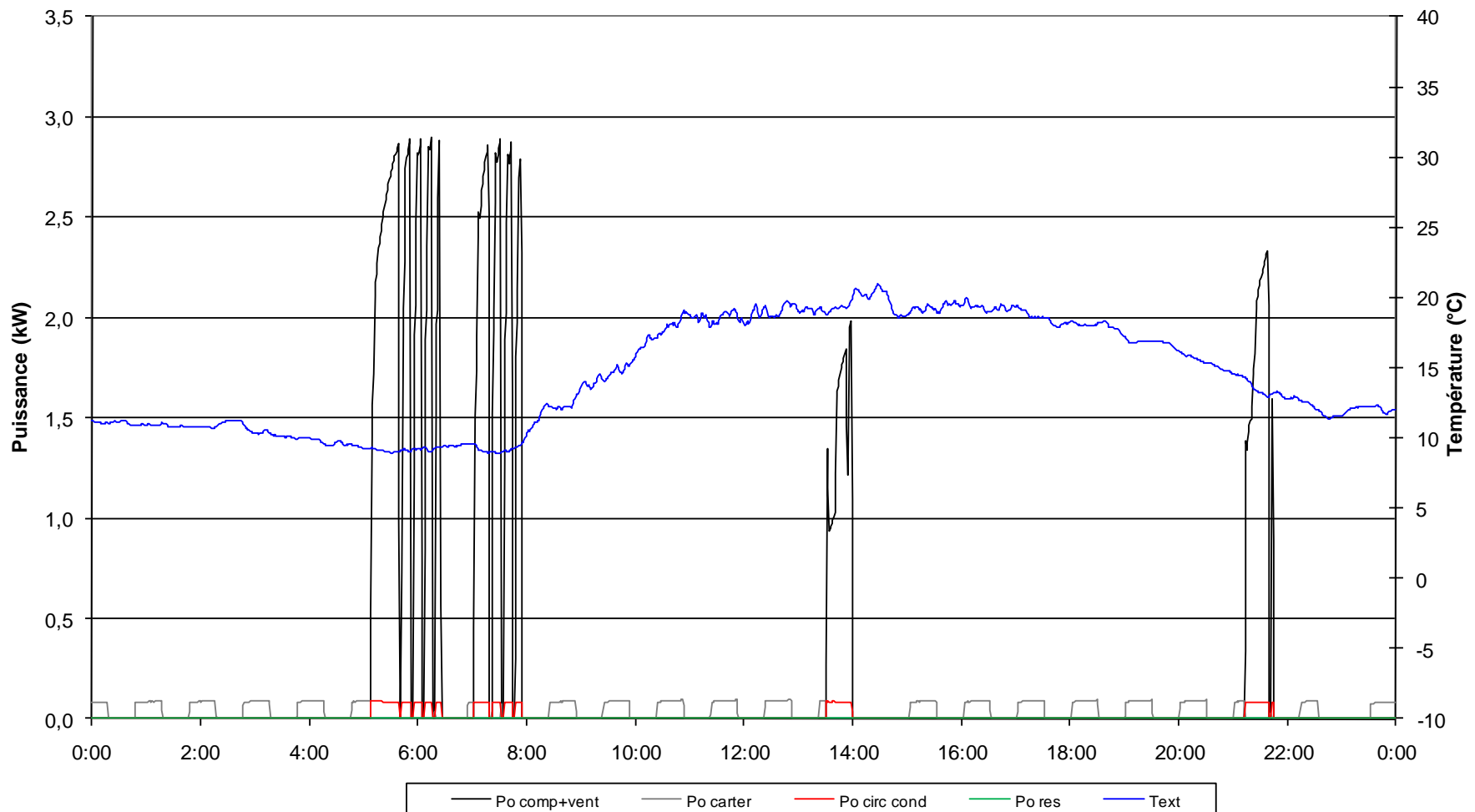
PAC haute température à injection (16 mai 2010)

Flux chaud (chauffage)



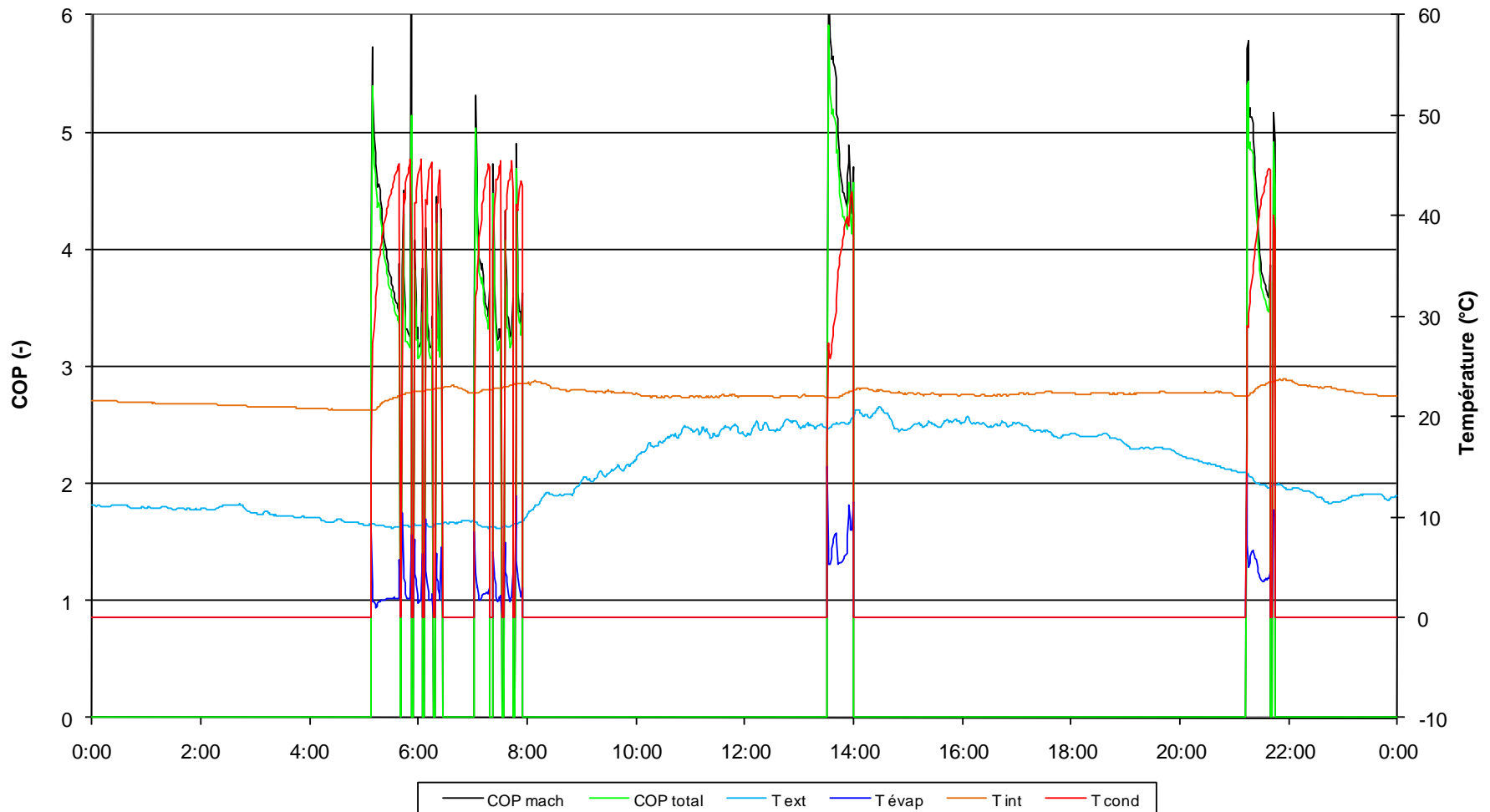
PAC haute température à injection (16 mai 2010)

Puissances (chauffage)



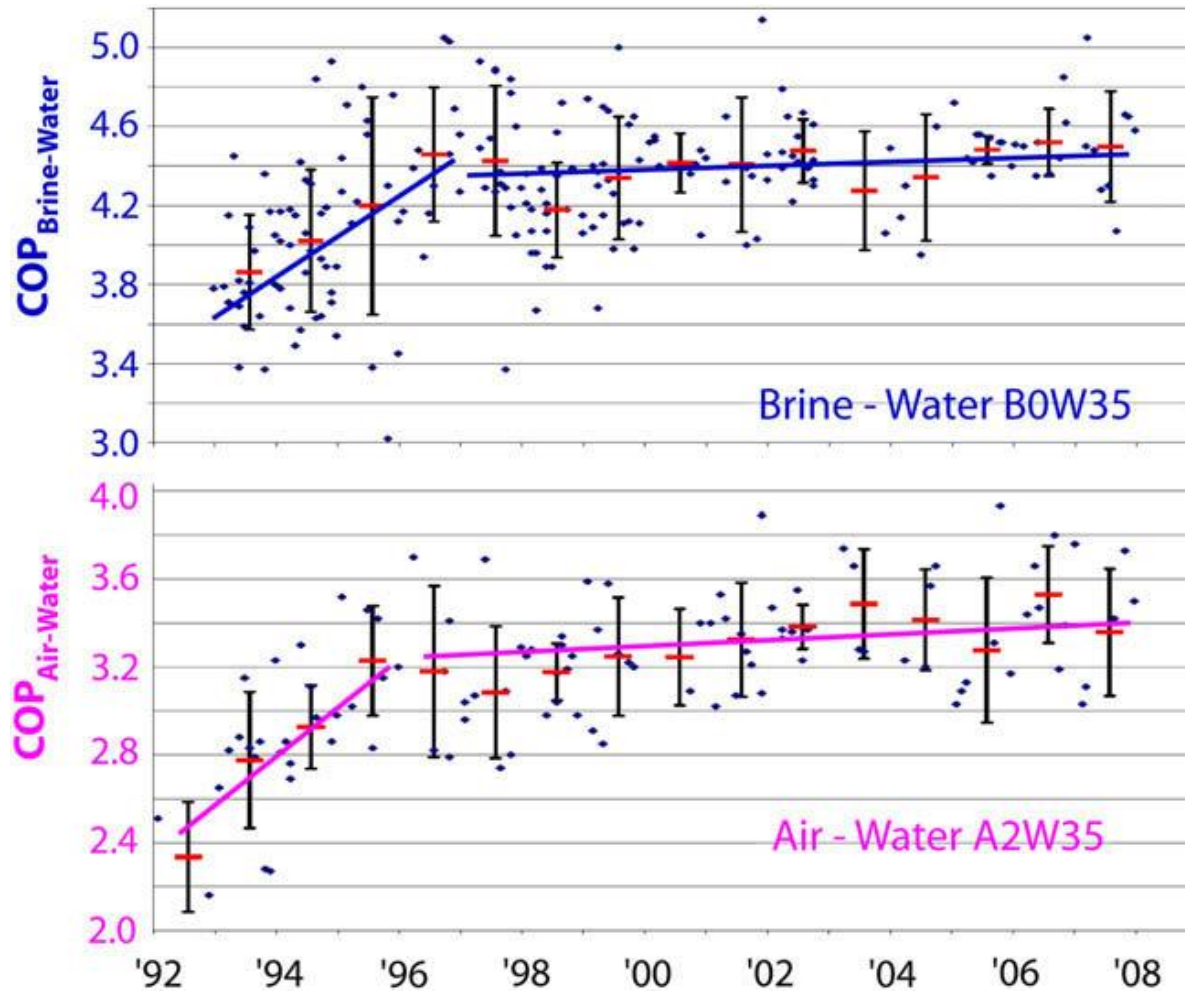
PAC haute température à injection (16 mai 2010)

COP (chauffage)



Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives



Source : doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.07.006

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