



## Les pompes à chaleur

Dr Ir Eric Dumont, Prof. Marc Frère

Louvain-la-Neuve, le 4 mai 2016

Notions de base

Principe et intérêt énergétique

Principe de fonctionnement

Performances d'une PAC

Adaptation d'une PAC à une habitation

Les différents types de PAC et leur dimensionnement

Principes de calcul du SPF

Quelques résultats expérimentaux

PAC en rénovation

# Notions de base

**Energie** : dans des machines thermiques, elle est échangée principalement sous forme de **travail (W)** ou de **quantité de chaleur (Q)**

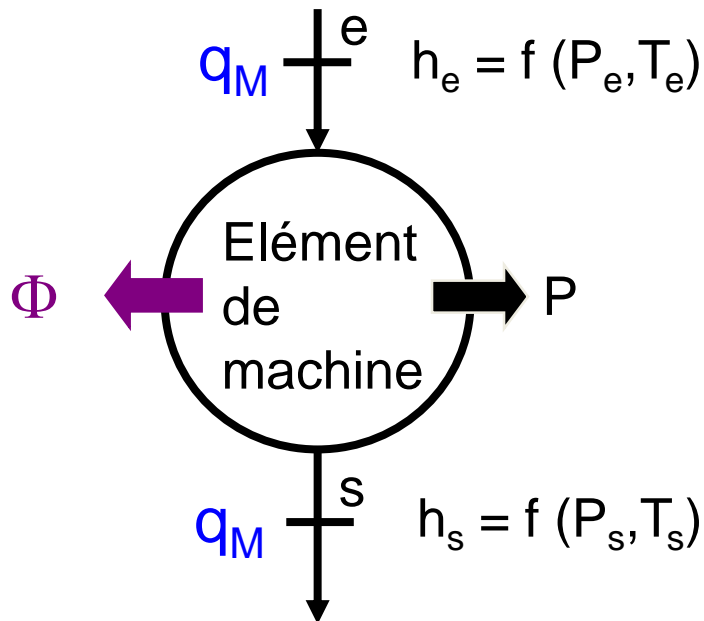
Lorsque de l'énergie est fournie à un système et que celui-ci ne la restitue pas, il y a stockage de cette énergie à l'intérieur du système. Cette énergie peut être récupérée plus tard sous une des deux formes (travail, quantité de chaleur)

**Travail, quantité de chaleur, énergie** : Joule (J) ou kiloWattheure (kWh)

1 kWh = 3600 kJ

**Puissance (P)** : travail par unité de temps : Watt ( $W=J/s$ ) : **vitesse à laquelle le travail est échangé.**

**Flux de chaleur ( $\Phi$ )** : quantité de chaleur par unité de temps : Watt (W) : **vitesse à laquelle la chaleur est échangée.**



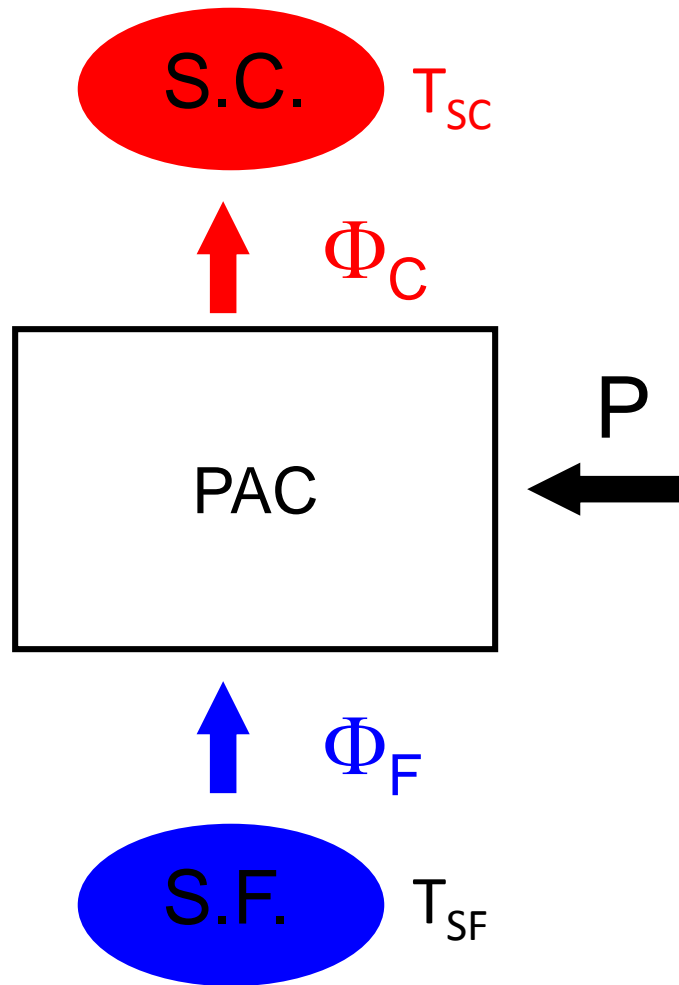
Le principe de conservation de l'énergie permet de calculer les échanges d'énergie  $\Phi$  (flux de chaleur) et  $P$  (puissance mécanique) avec le monde extérieur :

$$\Phi + P = q_M (h_s - h_e)$$

$q_M$  est le débit massique de fluide circulant dans l'élément de machine (kg/s)

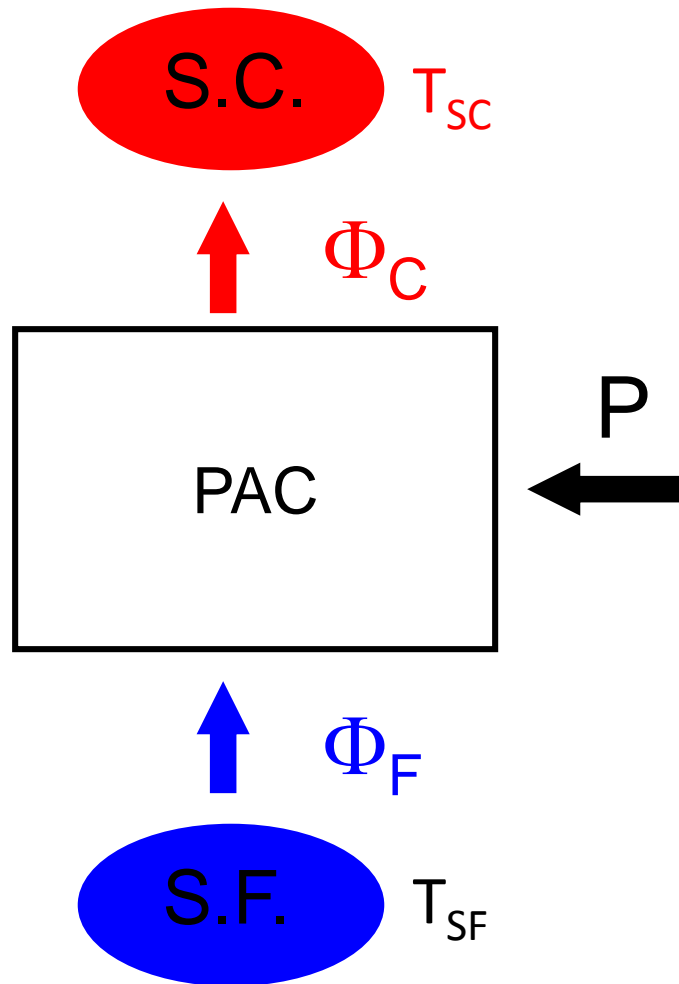
$h$  est l'enthalpie spécifique (J/kg)

# Principe et intérêt énergétique



Source chaude :  
habitation, eau  
chaude sanitaire.

Source froide : air  
extérieur, sol du  
jardin, eau de la  
nappe phréatique.



Utilisation assistée  
d'une source  
d'énergie gratuite

Coefficient de  
performance :

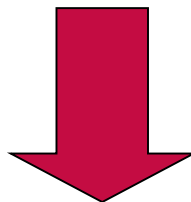
$$\text{COP} = -\Phi_C / P$$

SPF: seasonal  
performance  
factor =  $Q_C / W_{\text{él}}$  sur 1  
an

$$\text{COP}_{\text{IDEAL}} = T_{\text{SC}} / (T_{\text{SC}} - T_{\text{SF}})$$



- Une partie de l'énergie nécessaire au chauffage de l'habitation provient de la source froide (énergie gratuite, renouvelable et non polluante)

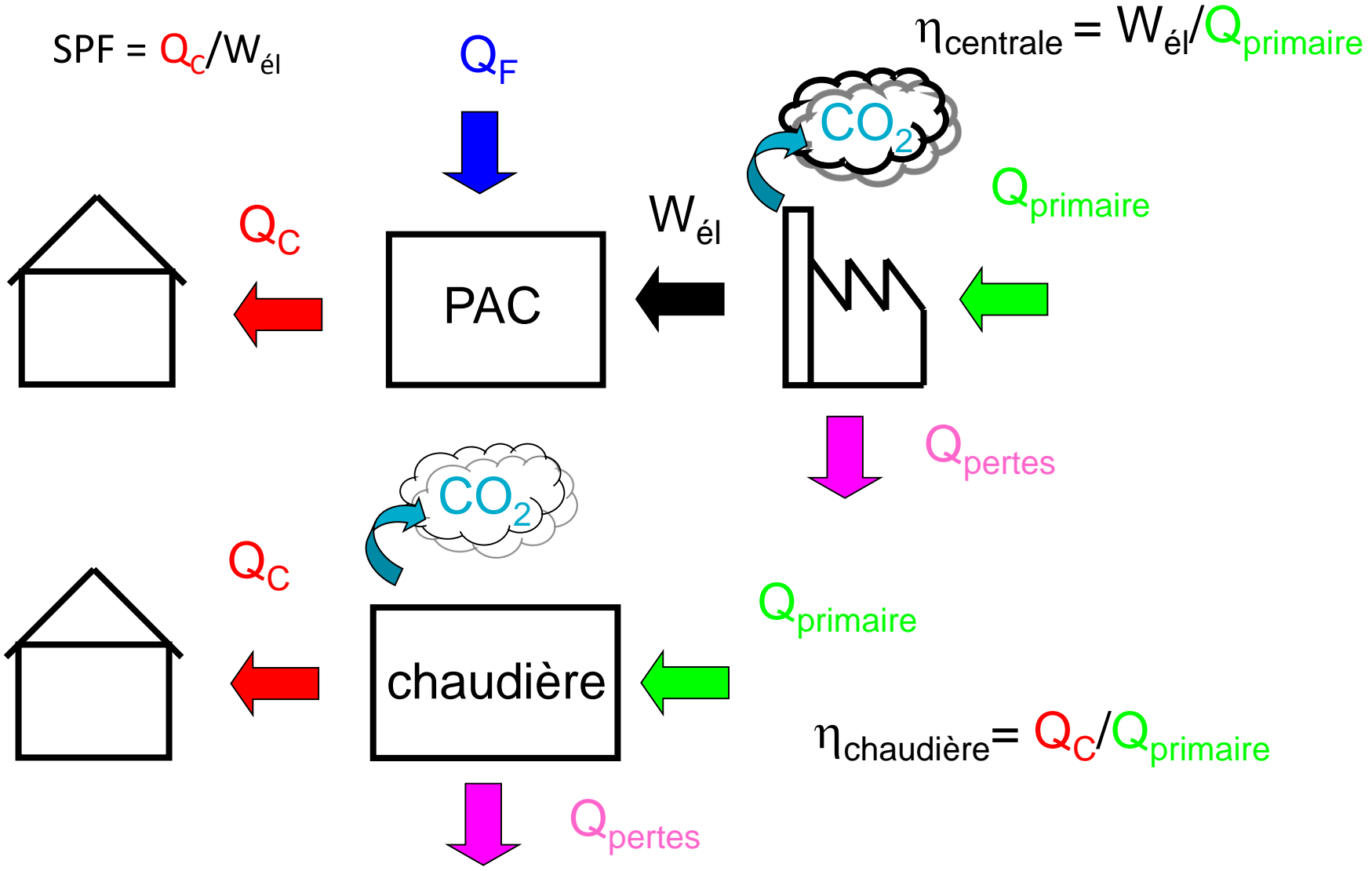


- Gain énergétique (énergie primaire fossile)
- Gain économique (facture)
- Gain environnemental (rejets de CO<sub>2</sub>)

??



L'énergie d'entraînement est de l'énergie électrique: cette énergie doit elle-même être produite à partir d'énergie primaire éventuellement non renouvelable et polluante. Cette transformation a un coût.



$$Q_{\text{primaire}} = Q_{\text{C}} / (\eta_{\text{centrale}} \text{ SPF})$$

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

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

on prend  $\eta_{\text{centrale}} = 0.40$  (Directives Ecodesign et Ecolabel)

Gain énergétique (chaudière  $\eta=100\%$ ) : **SPF > 2.5**

Gain CO<sub>2</sub> (chaudière  $\eta=100\%$ ) : **SPF > 1.3**

$$Q_{\text{primaire}} = Q_C / (\eta_{\text{centrale}} \text{ SPF})$$

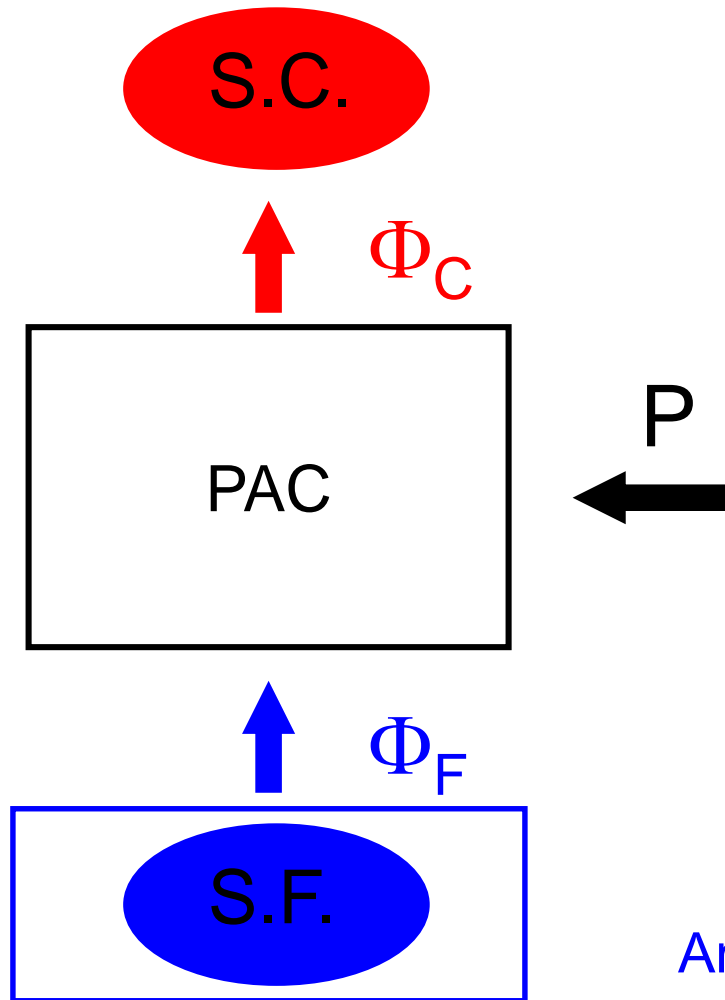
On définit aussi un rendement sur énergie primaire sur un an :

$$\text{SPER} = Q_C / Q_{\text{primaire}}$$

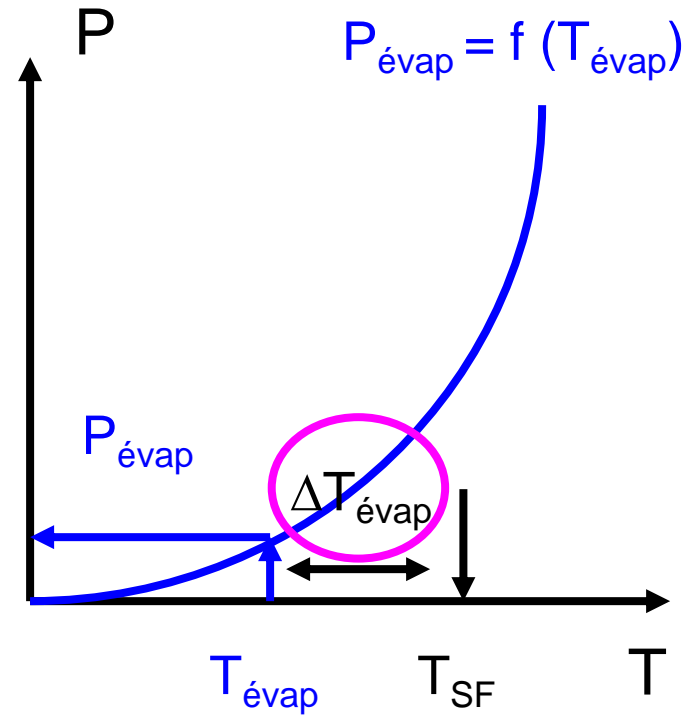
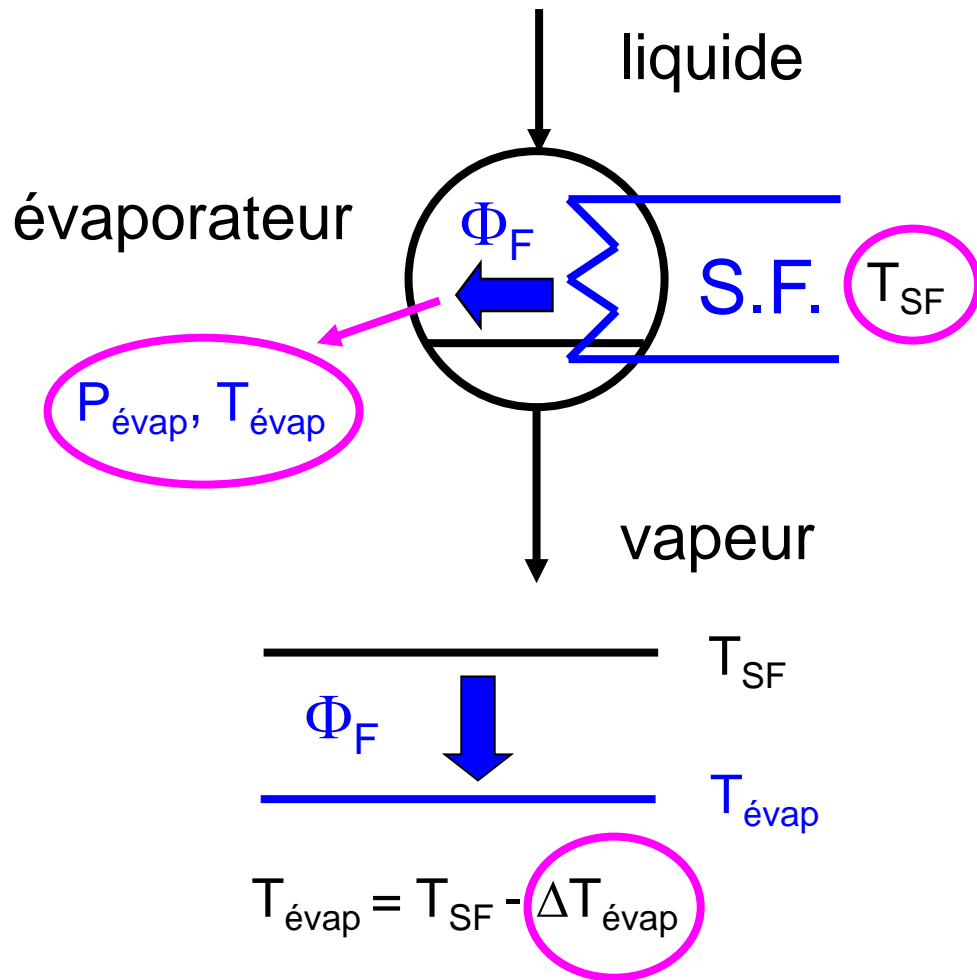


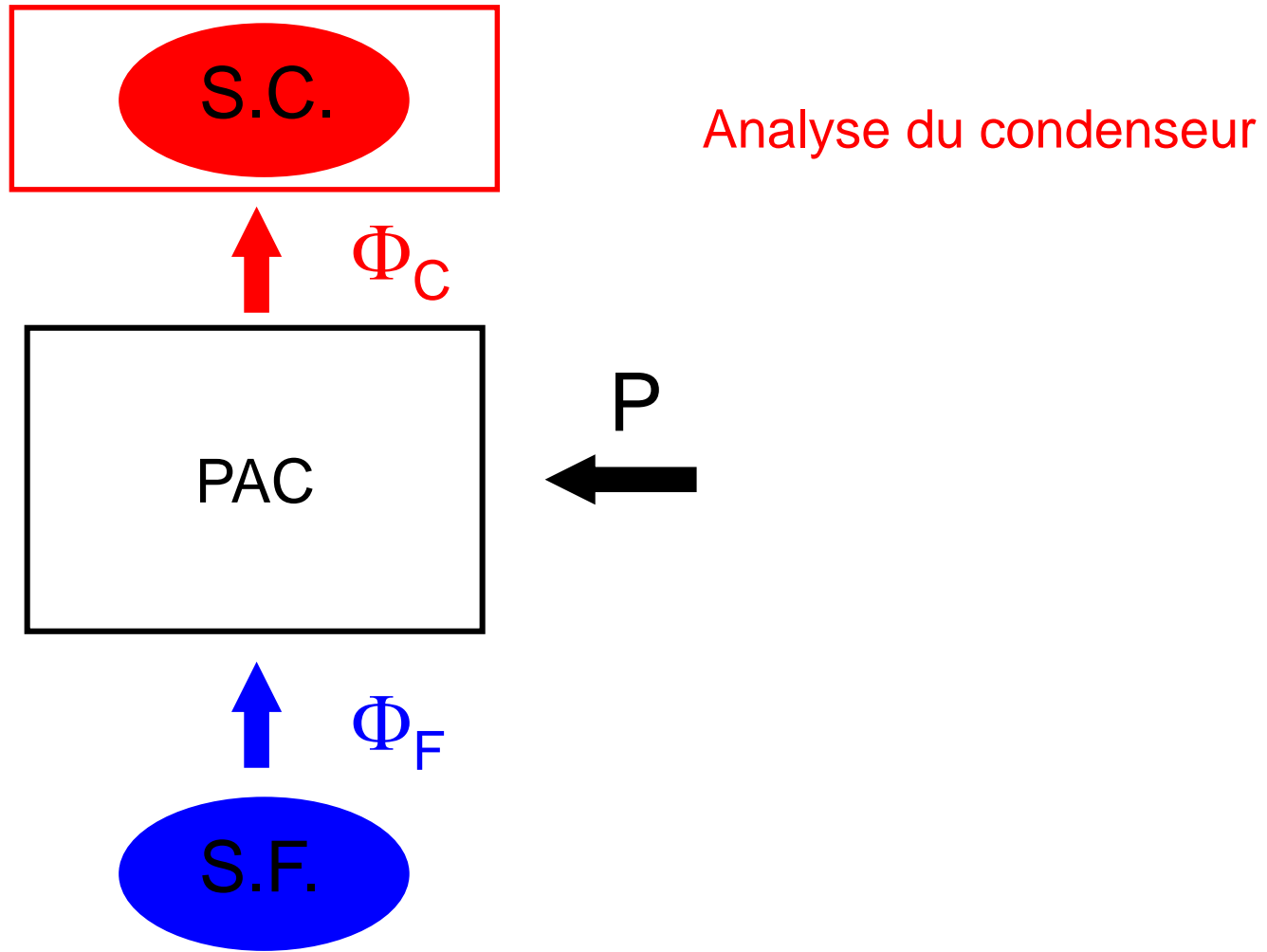
Directive européenne sur l'utilisation des énergies renouvelables :  $\text{SPER} > 1.15$   
soit un  $\text{SPF}_{\text{min}}$  de 2.53 (avec un  $\eta_{\text{centrale}} = 0.455$ ).

# Principe de fonctionnement

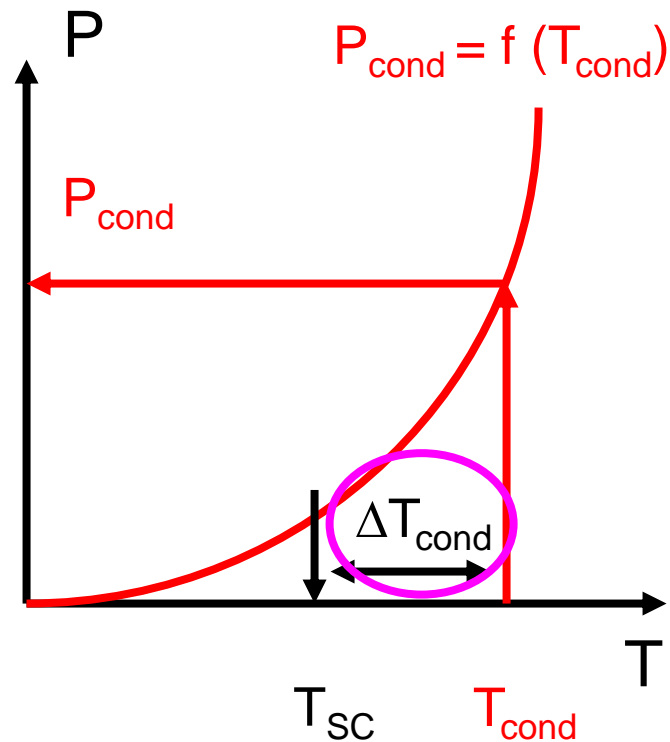
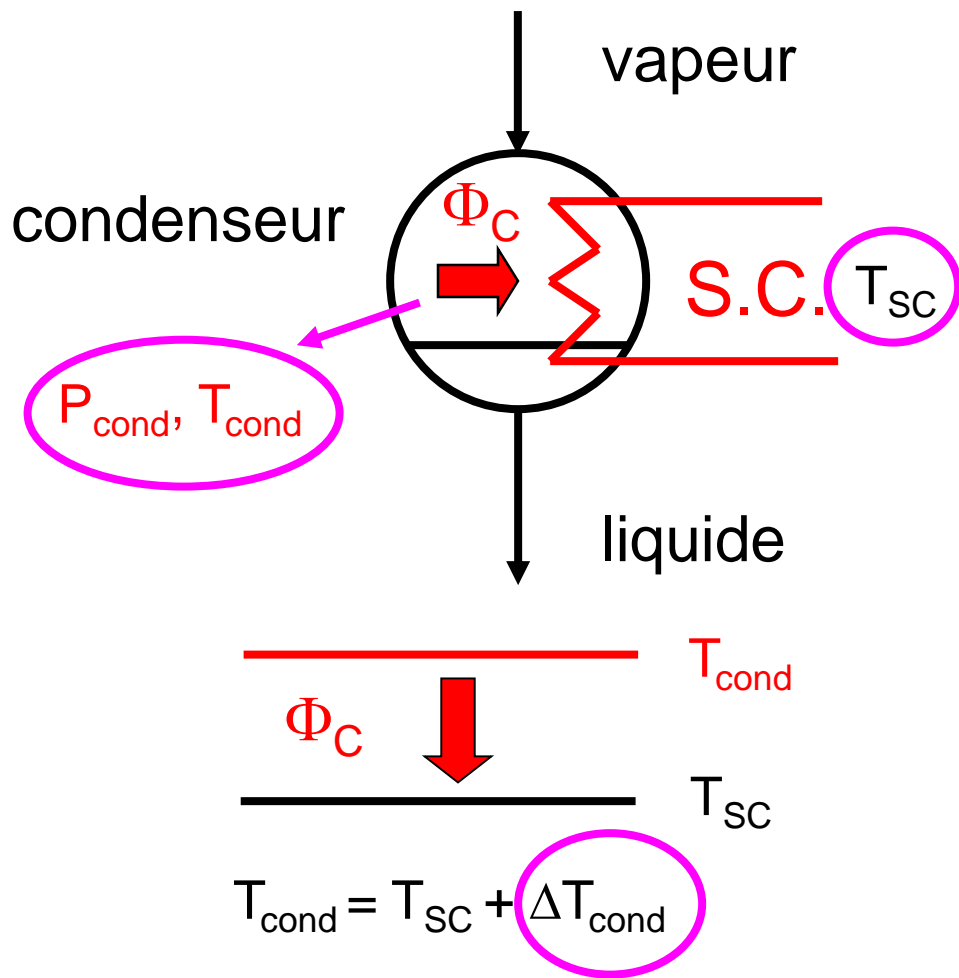


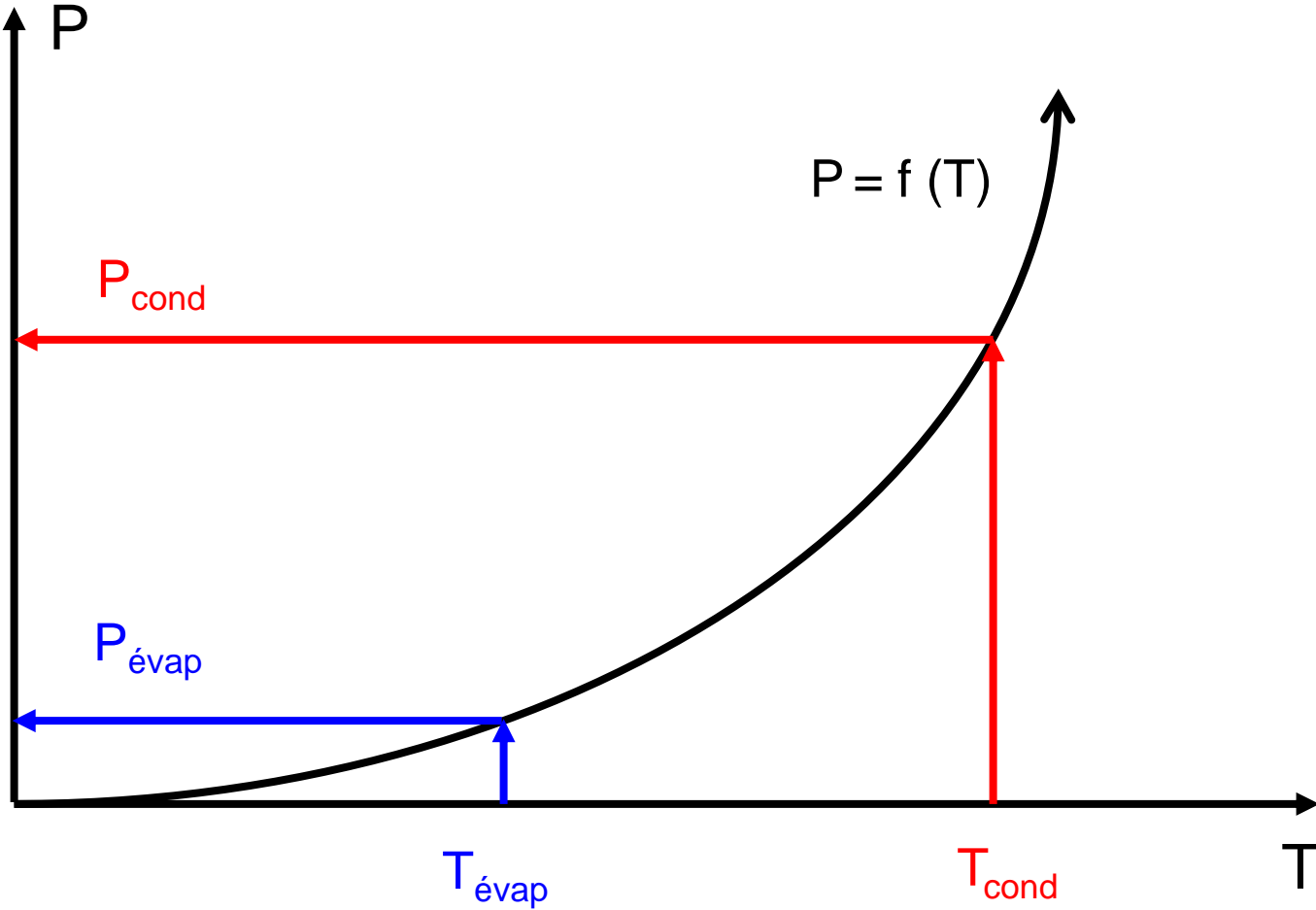
Analyse de l'évaporateur

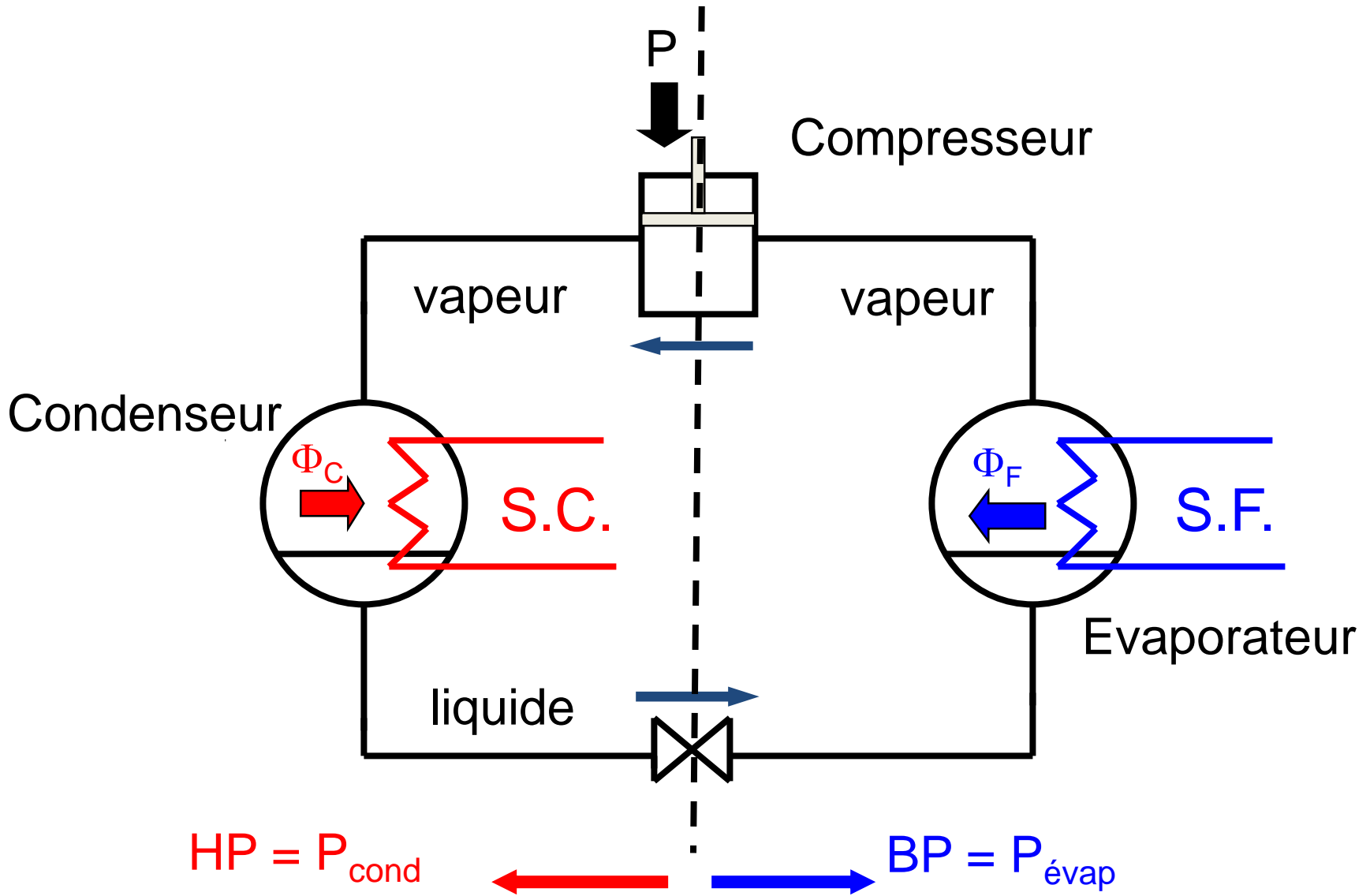












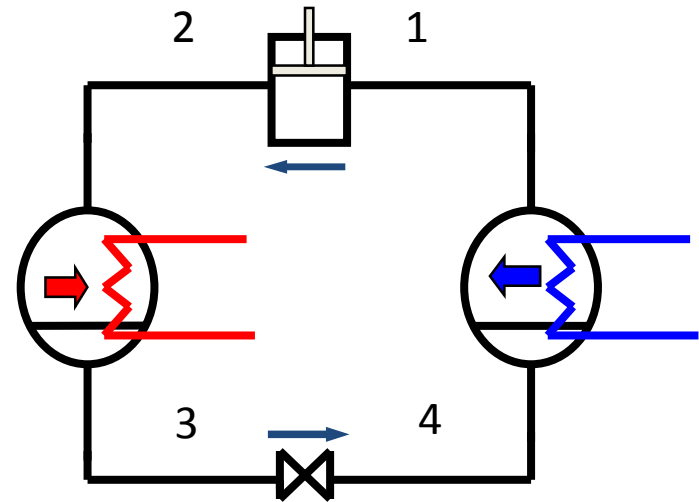
# Performances d'une PAC

- 1: entrée compresseur
- 2: sortie compresseur
- 3: sortie condenseur
- 4: sortie détendeur.

$$\Phi_C = q_M (h_3 - h_2)$$

$$P = q_M (h_2 - h_1)$$

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



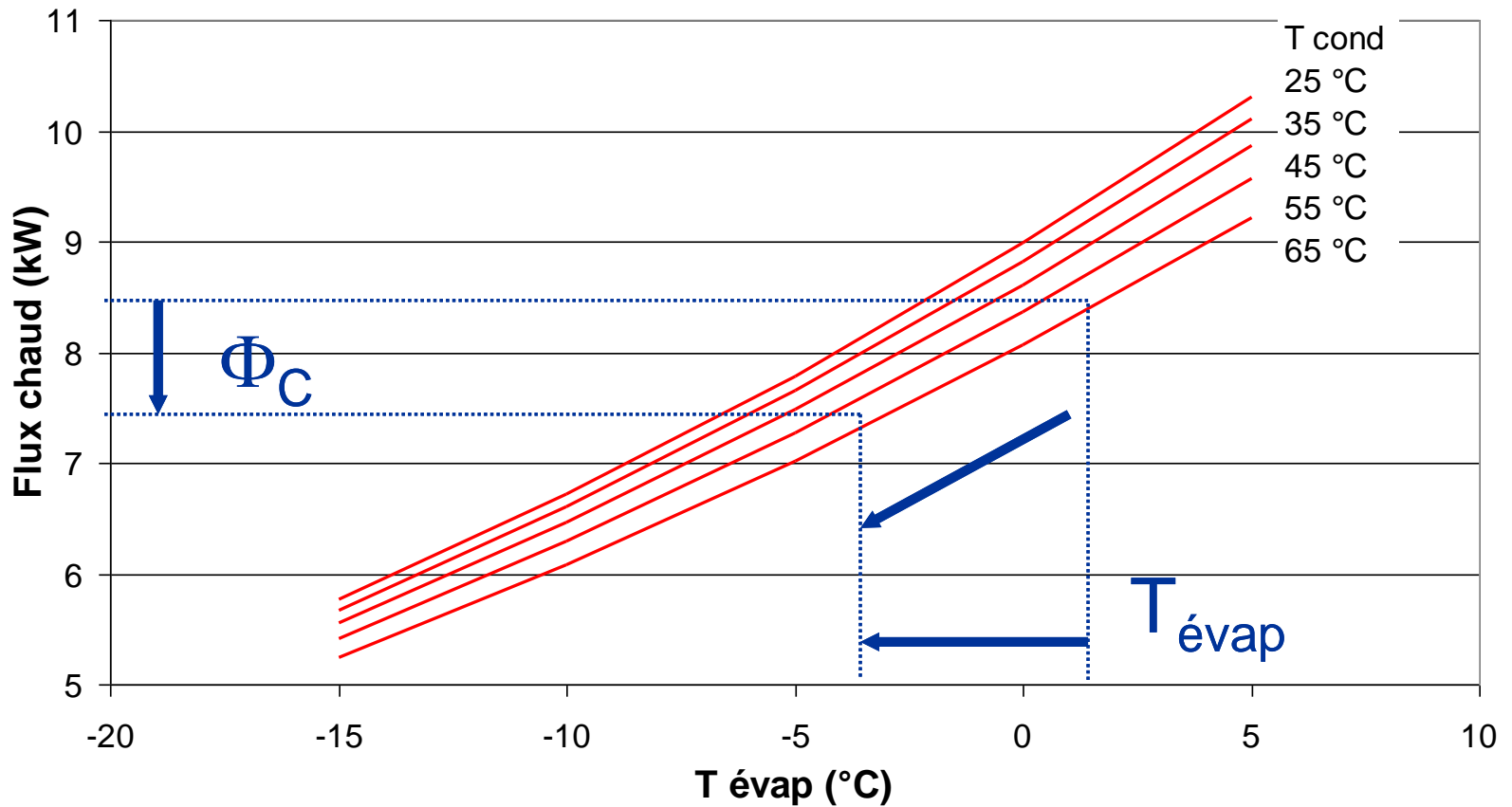
$$\text{HP} = \leftarrow \text{BP} =$$

$$P_{\text{cond}} \quad P_{\text{évap}}$$

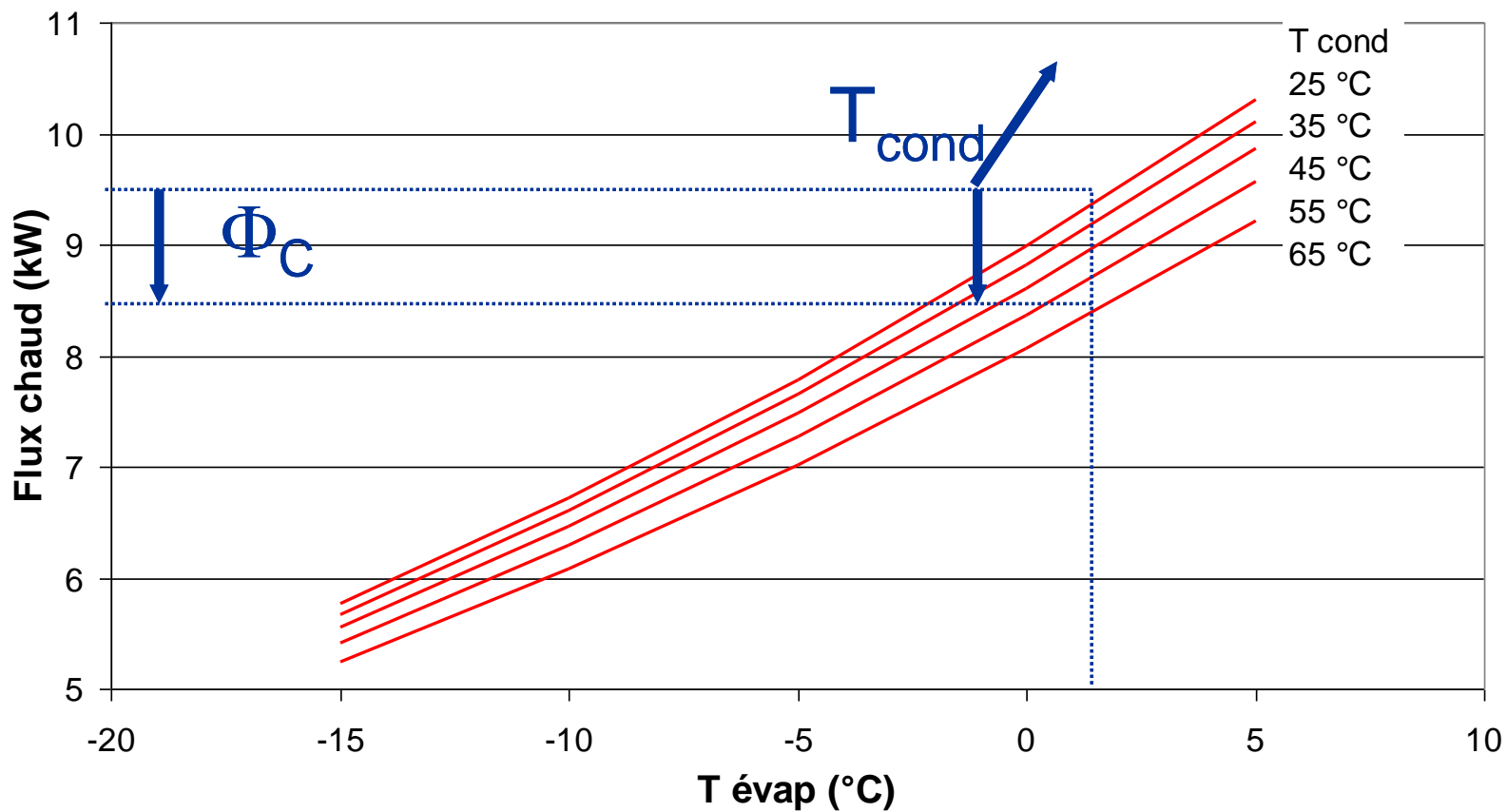
Le COP est d'autant plus bas que la température d'évaporation (BP) est basse et que la température de condensation (HP) est élevée : le compresseur utilise plus d'énergie pour comprimer un kg de gaz.

Il en est de même pour le flux de chaleur produit : le compresseur circule un plus petit débit.

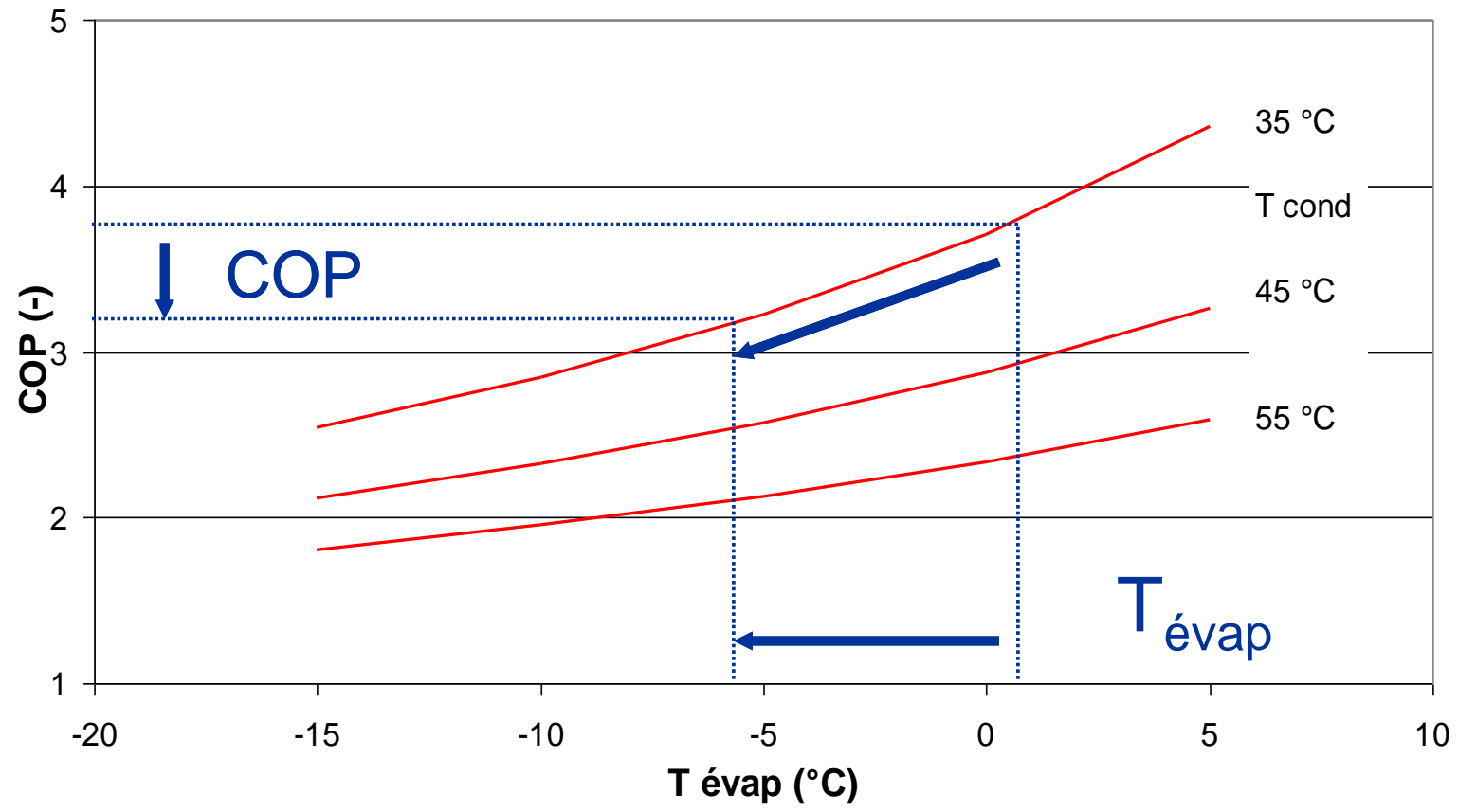
### Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une PAC



### Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une PAC

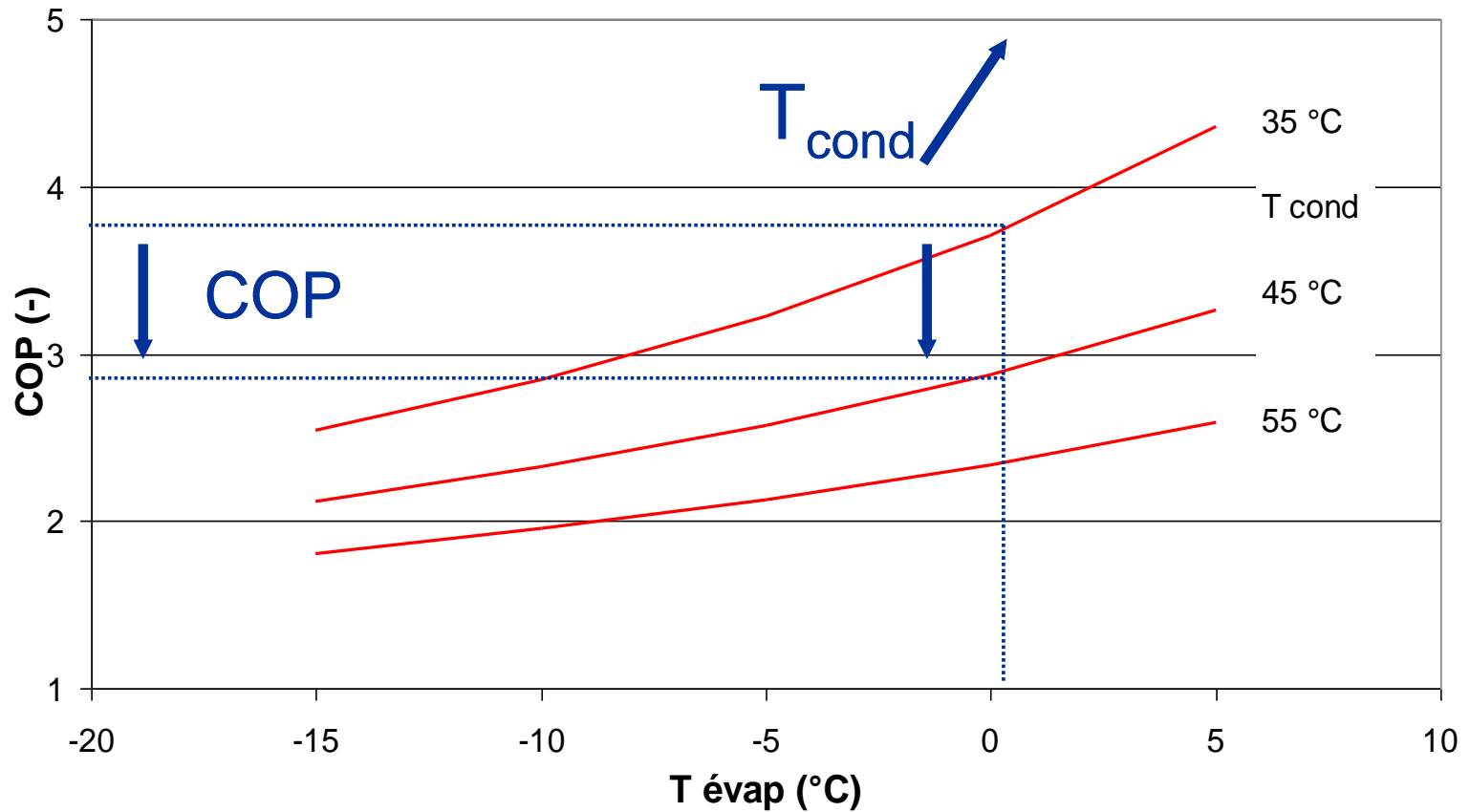


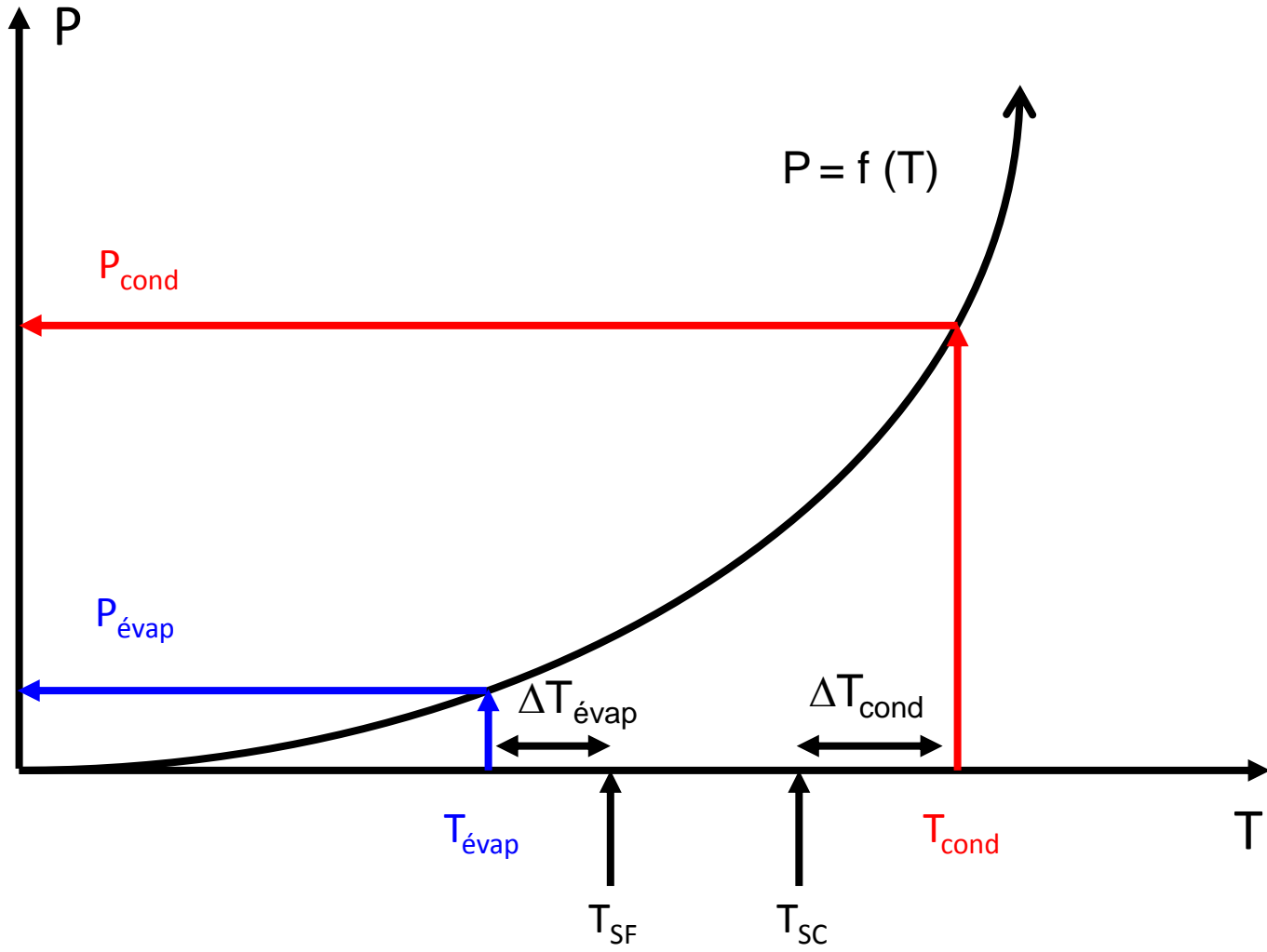
Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une PAC

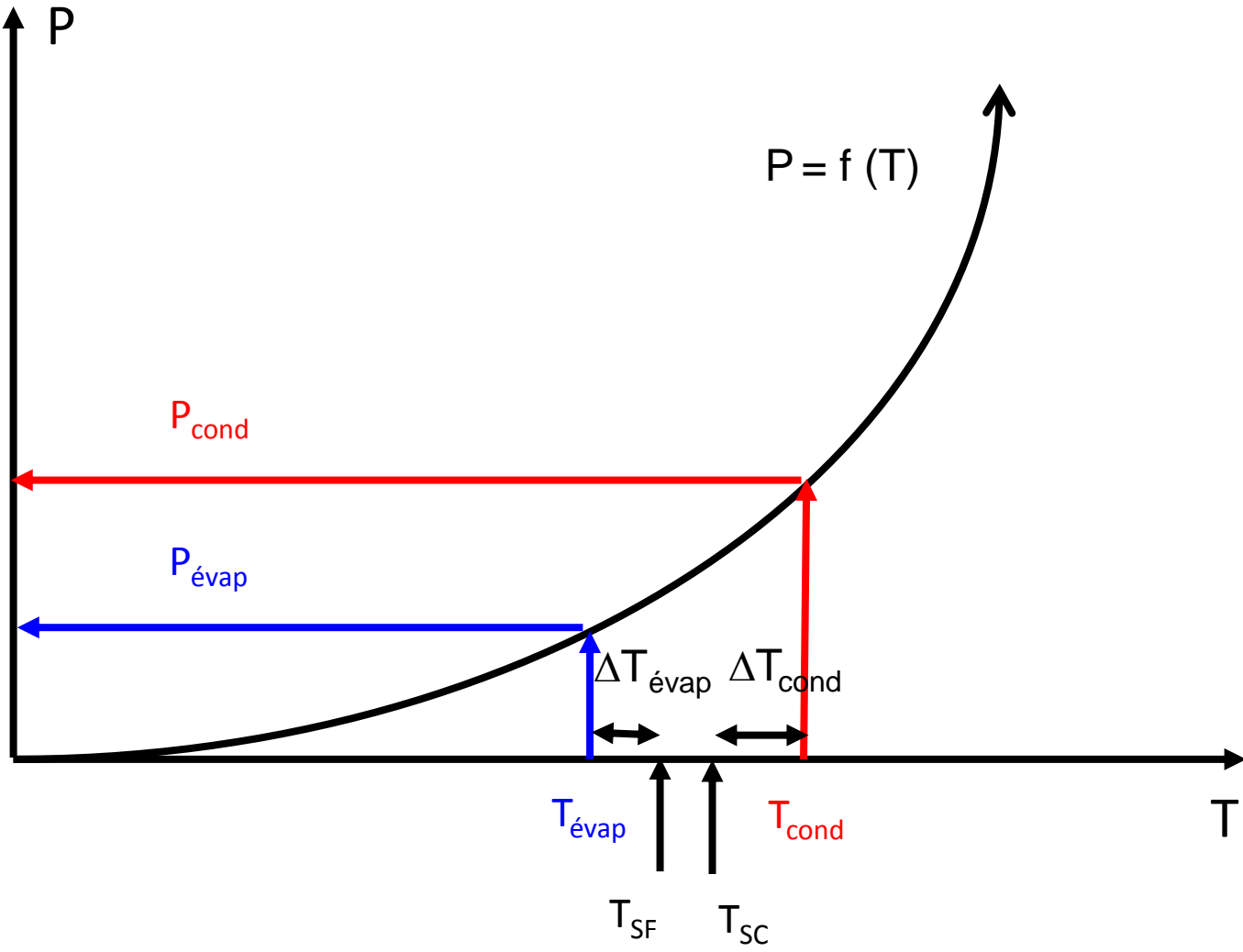




### Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une PAC







Les performances (flux de chaleur et COP) des pompes à chaleur seront d'autant plus élevés que **la température d'évaporation sera élevée et que la température de condensation sera basse.**

Ces températures dépendent elles-mêmes des **températures des sources** via les performances des échangeurs de chaleur.

Il faut donc **une source chaude à faible température et une source froide à haute température.**

Les  $\Delta T$  aux échangeurs **doivent être les plus faibles possibles.**

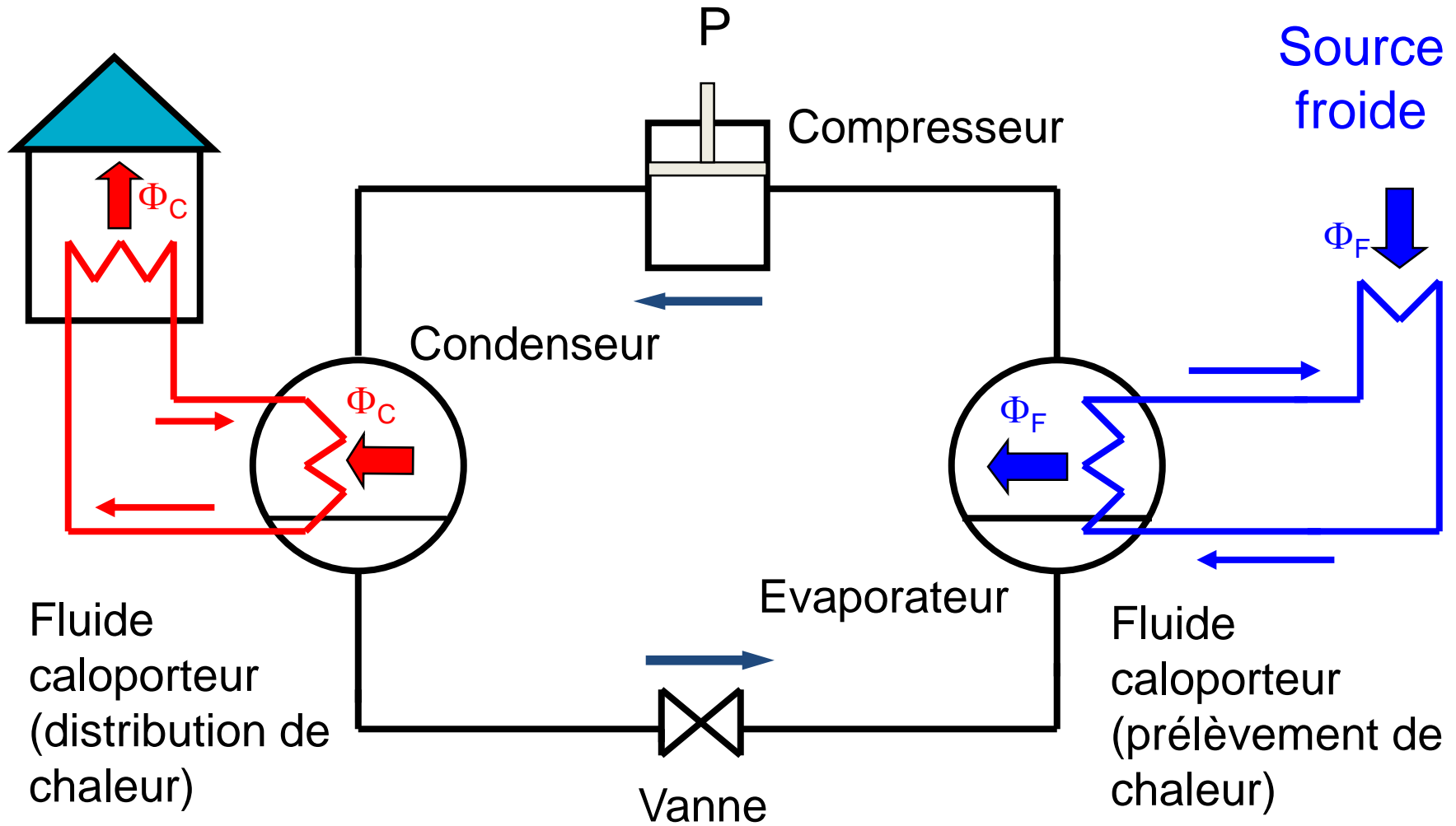
Les **températures des sources** et, potentiellement, les coefficients de transfert de chaleur sont **essentiellement variables** au cours du temps sur une saison de chauffe.

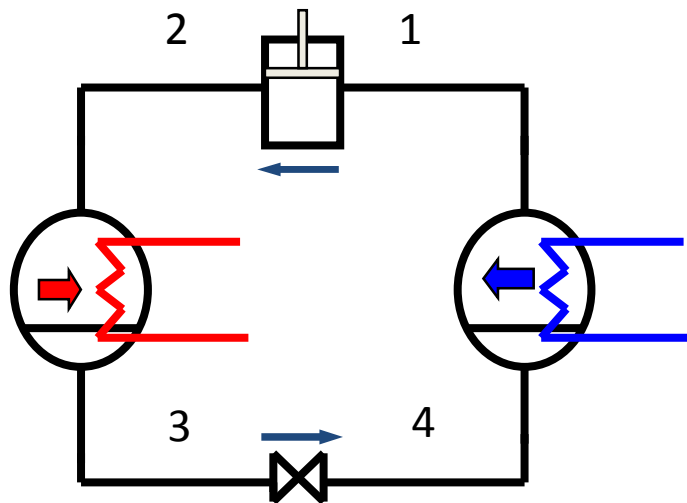
**Les performances de la pompe à chaleur sont donc également variables.**

**Assurer en permanence le confort thermique de bâtiment.**

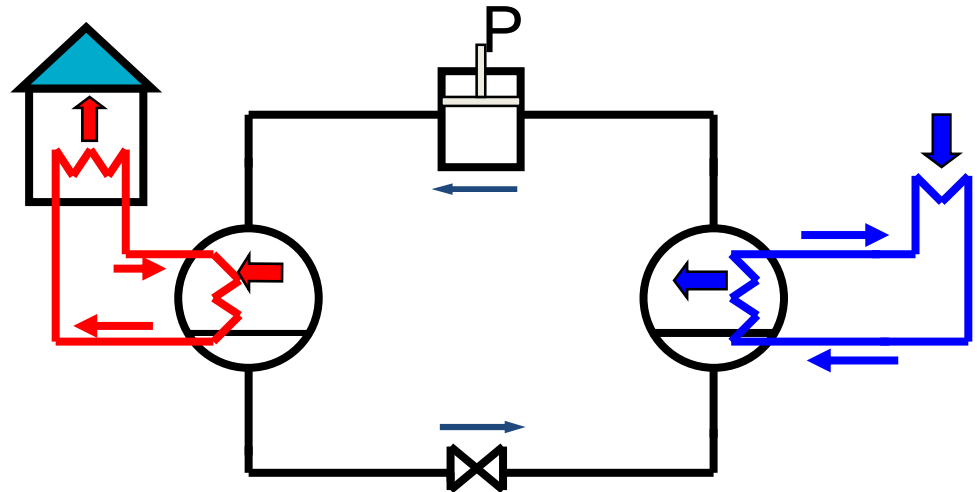
C'est la valeur du **coefficient de performance annuel** (SPF) qui est importante pour déterminer si la pompe à chaleur est intéressante.

Cette valeur ne peut pas être déterminée aisément.

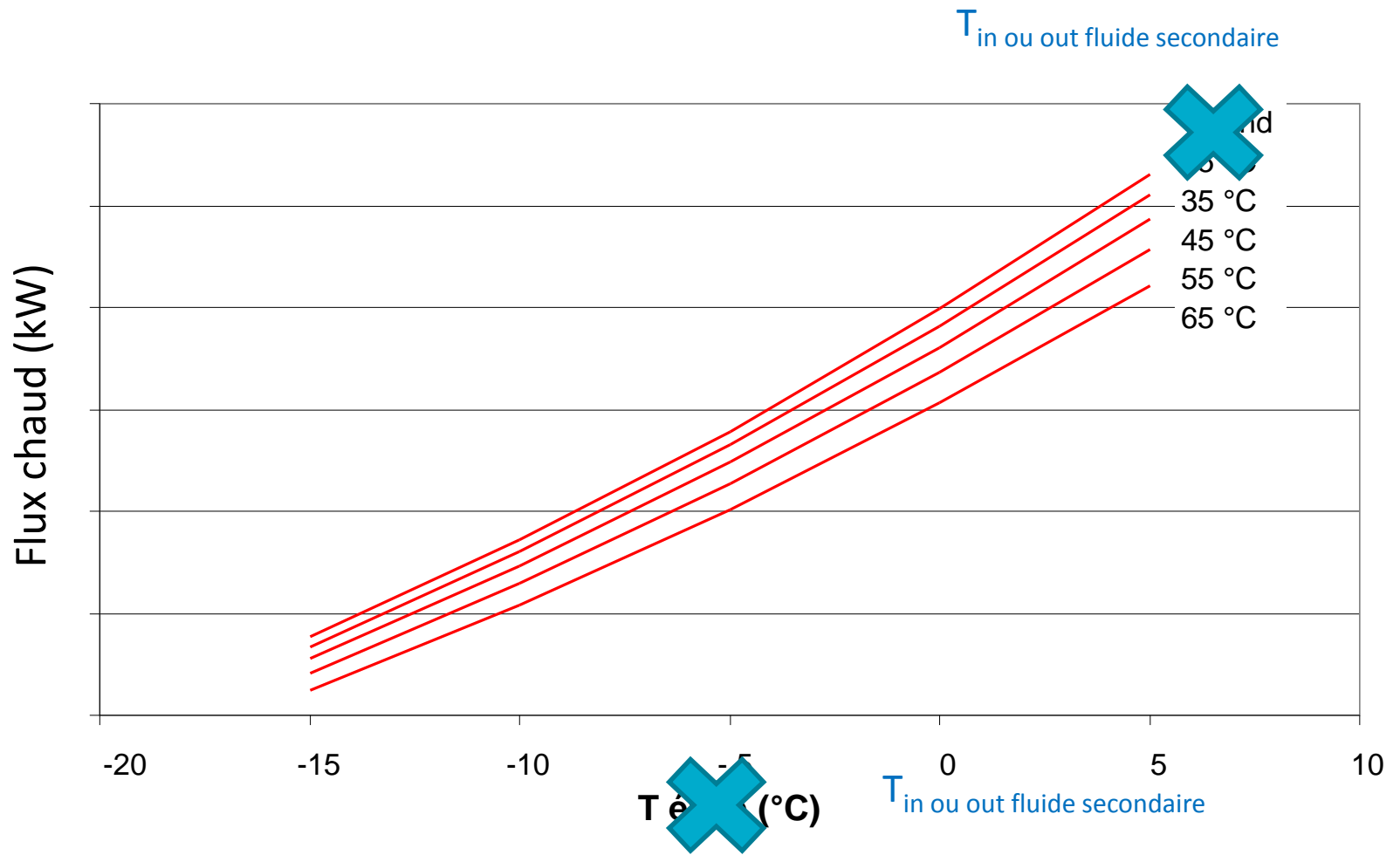




- Les performances (COP et Flux chaud) sont fournies en fonction de  $T_{\text{évap}}$  et de  $T_{\text{cond}}$

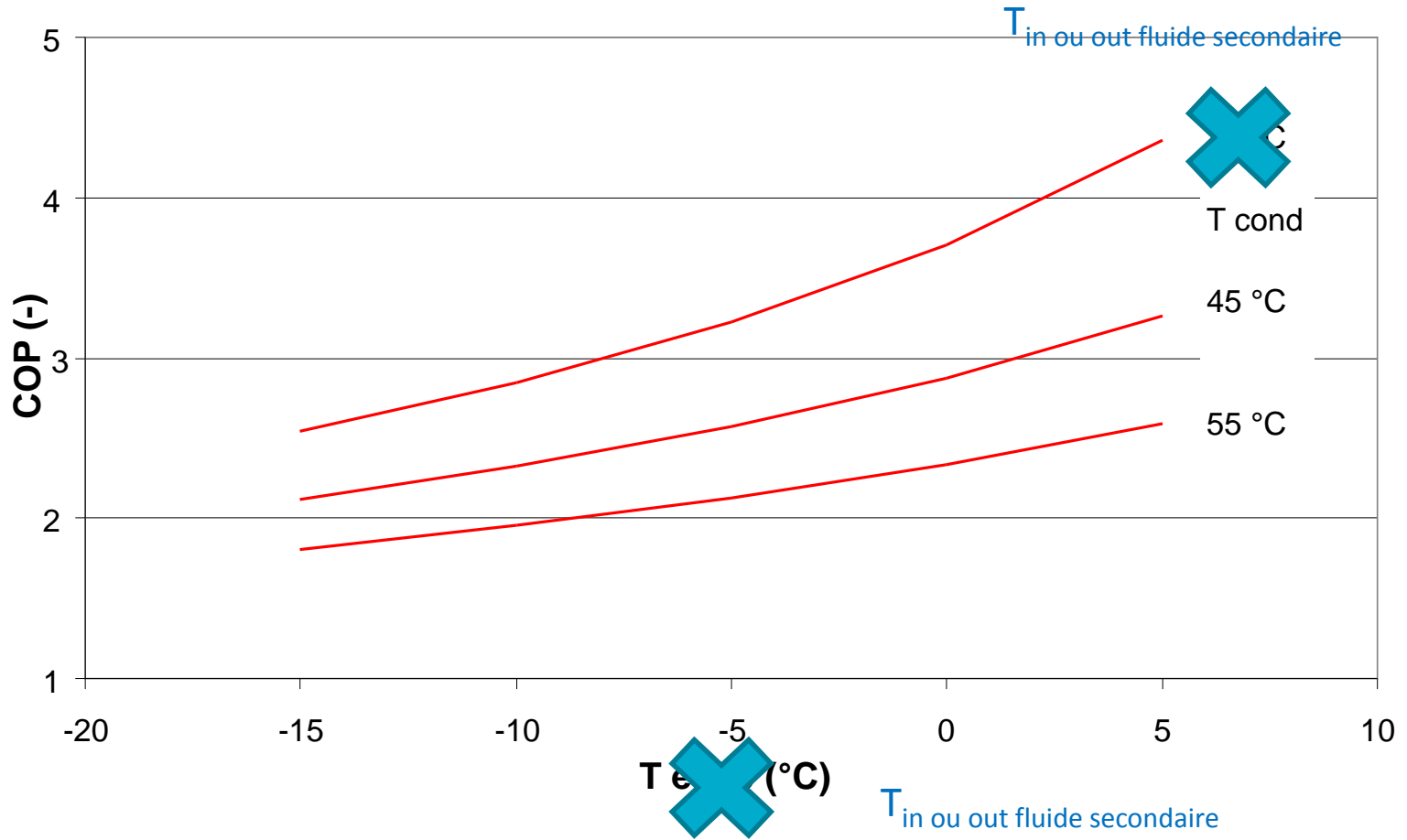


- Les performances (COP et Flux chaud) sont fournies en fonction des températures des fluides secondaires soit à l'entrée soit à la sortie



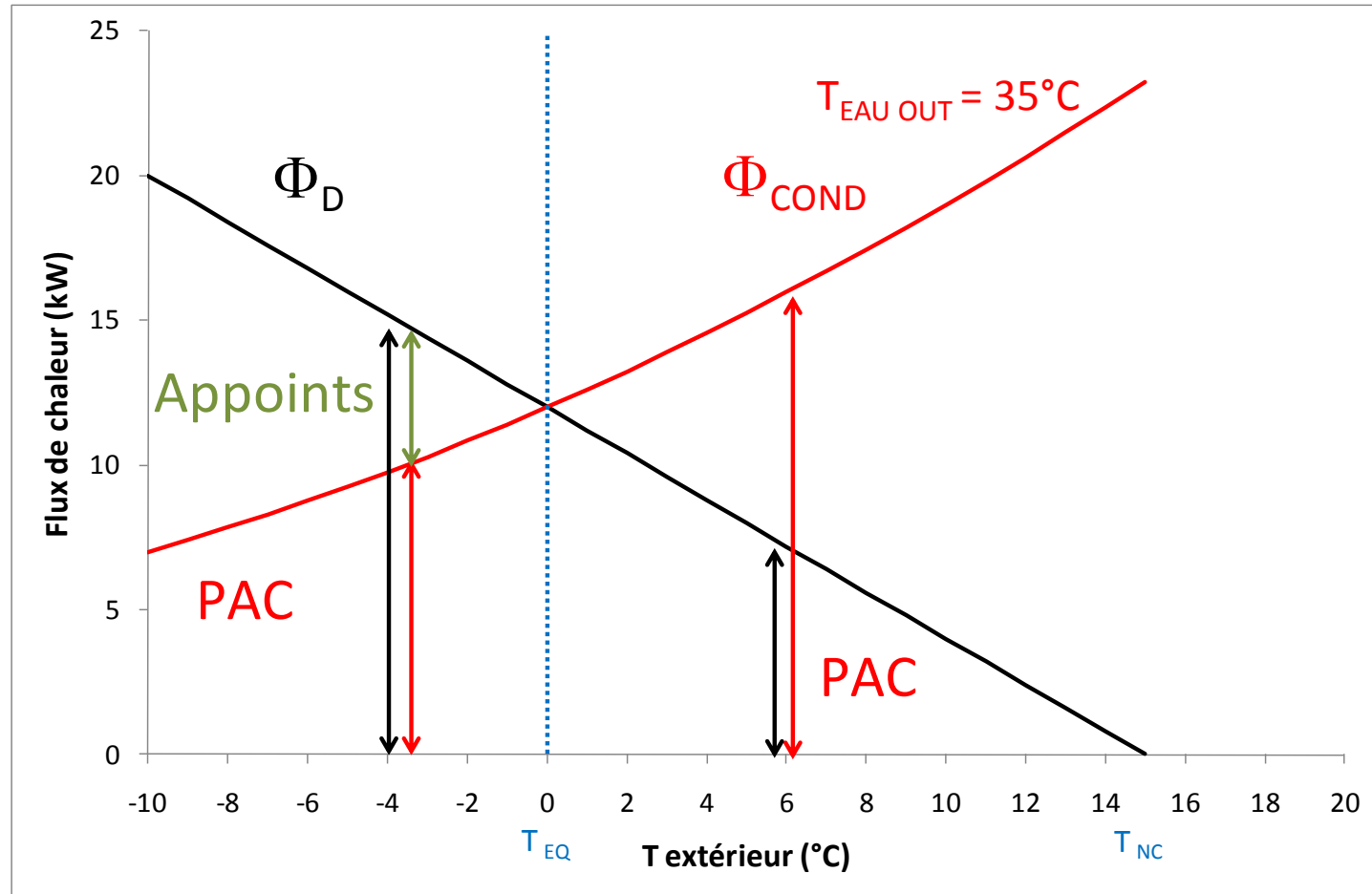


# Performances d'une PAC



# Adaptation d'une PAC à une habitation

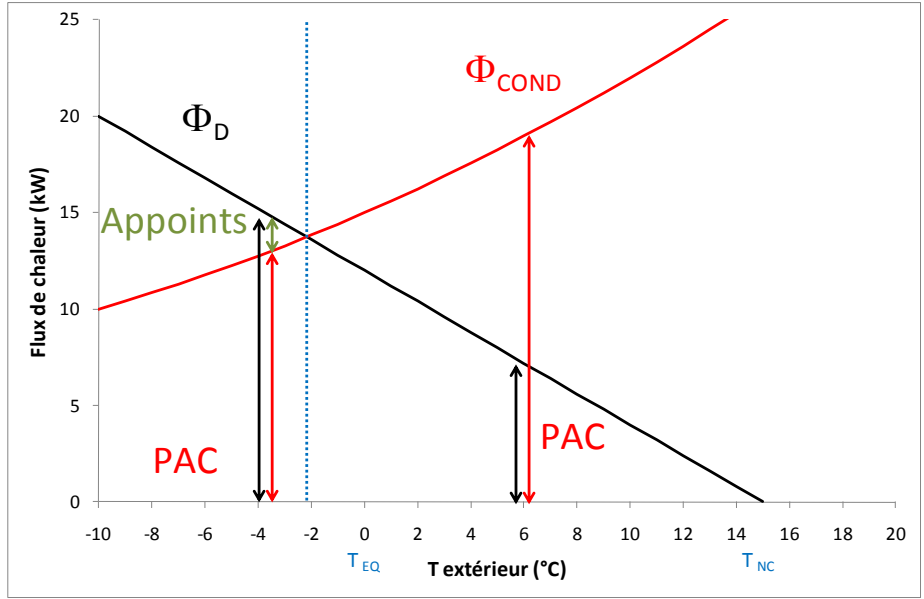
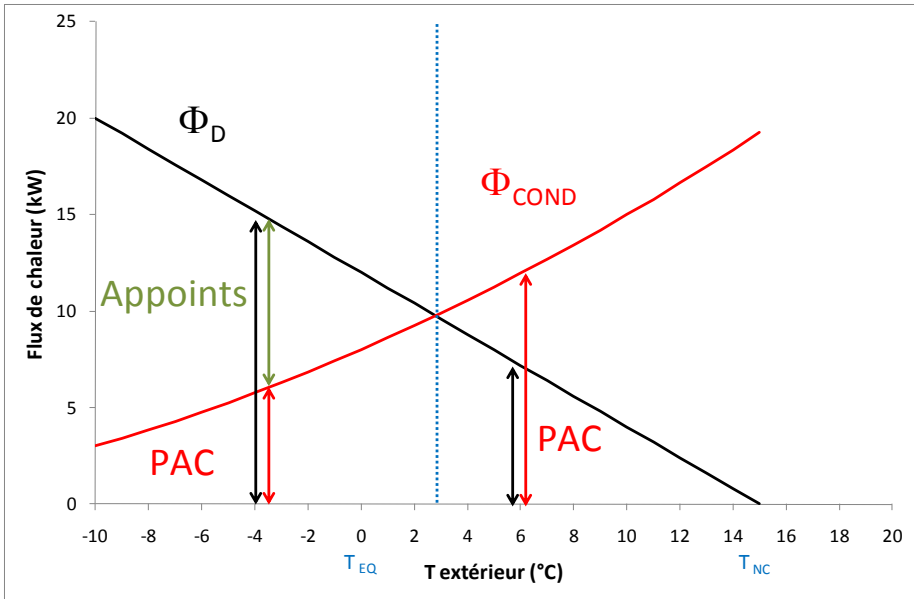
## PAC Air/Eau



En dessous de  $T_{EQ}$  : besoin d'appoints (souvent électriques)

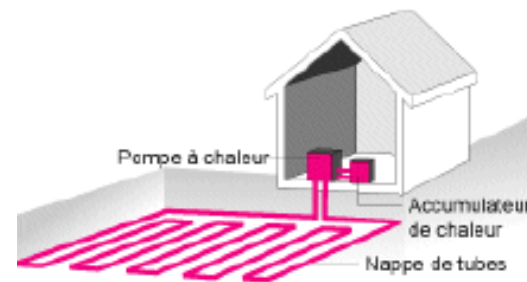
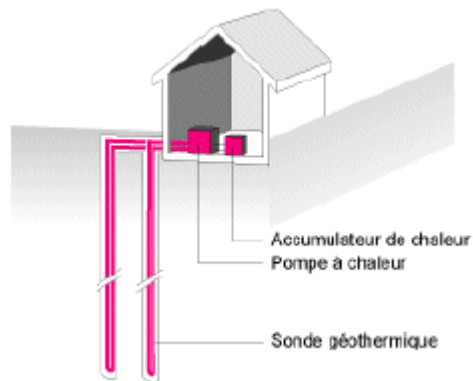
Au dessus de  $T_{EQ}$  : cycles de fonctionnement courts  
machine pas en régime -> mauvais COP

Trouver un compromis entre les deux effets



# Les différents types de PAC et leur dimensionnement

- Les pompes à chaleur (PAC) sont classés selon **la source froide et la source chaude** qu'elles utilisent, éventuellement en précisant **le type d'échangeur de chaleur**
- Les différentes **sources froides** possibles sont :
  - **le sol autour de l'habitation (échangeur horizontal, échangeur vertical)**
  - **l'air extérieur (pulsé ou statique)**
  - **l'eau de la nappe phréatique**
  - **l'eau d'une rivière, d'un étang.**
- Les différentes **sources chaudes** (systèmes de distribution de chaleur) possibles sont :
  - **l'air intérieur de l'habitation (air pulsé); ventilo-convecteur**
  - **le plancher de l'habitation**
  - **les radiateurs**
  - **l'eau d'un boiler d'eau chaude sanitaire (ECS)**



## ■ Captage de la chaleur dans le sol autour de l'habitation

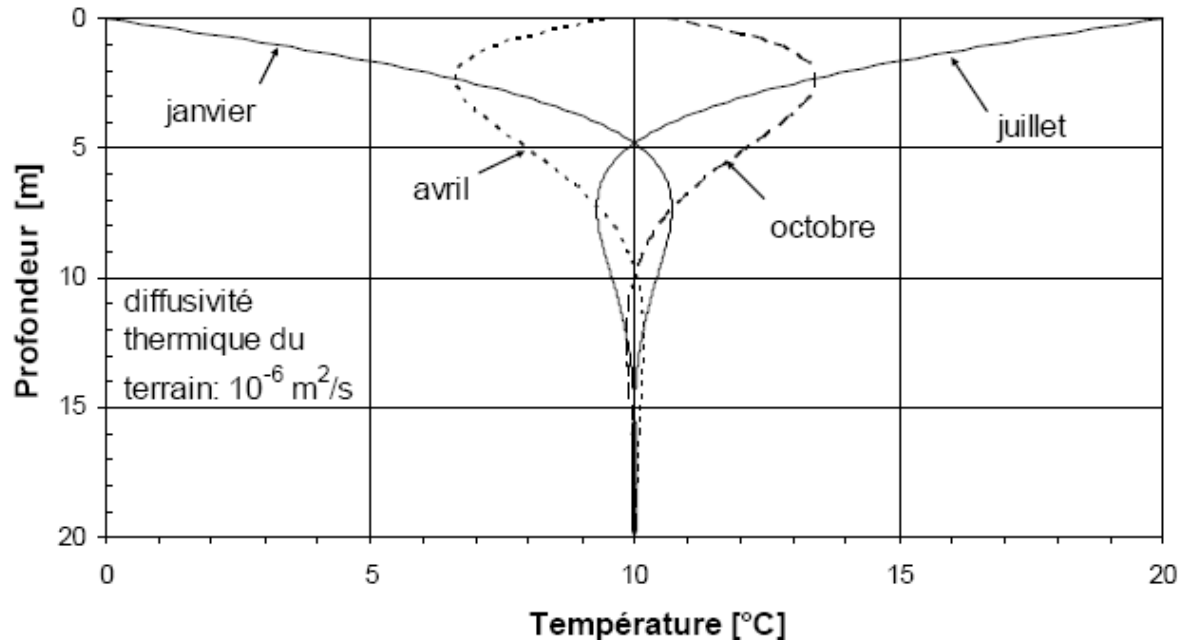
Le capteur peut :

- se situer à différentes profondeurs
- être horizontal ou vertical

Le captage de chaleur peut se faire :

- par évaporation directe
- par transfert de chaleur via un fluide caloporteur (eau glycolée)

## Les différents types de pompes à chaleur : le sol comme source froide



A 2 m de profondeur la température du sol varie entre 7°C et 13°C sur une année  
 Au-delà de 15 m de profondeur, la température du sol est de 10°C, température extérieure moyenne annuelle en Belgique.

Période de l'onde de chaleur	Profondeur de pénétration facteur d'amortissement = 1/3	Profondeur pour un facteur d'amortissement de 1/10
1 heure	0.03 m	0.08 m
1 jour	0.17 m	0.38 m
1 semaine	0.44 m	1.01 m
1 mois	0.91 m	2.1 m
1 année	3.17 m	7.29 m



### ■ Captage de la chaleur dans le sol autour de l'habitation

Avantages :

- température de la source **relativement élevée**
- température **stable**
- si profondeur faible, **peu de travaux de terrassement**
- **pas de pompe** si **évaporation directe**

Inconvénients :

- **limitation de la surface** du jardin (sauf capteurs verticaux mais alors coût du terrassement)
- la température du sol **diminue** lorsqu'on puise de la chaleur
- **confinement** du fluide frigorigène si **évaporation directe**
- influence sur **les plantations**

### ▪ L'air extérieur

Sa température est peu stable. Il y a de **fortes variations journalières** (jour/nuit) et **saisonnnières** (été/hiver)

L'air est une **source « dynamique »** : il y a renouvellement de l'air autour du capteur de chaleur.

Influence de **l'humidité de l'air** : elle peut former du **givre** sur le capteur de chaleur et **influencer l'efficacité** de cet échangeur.

## ■ Captage de la chaleur dans l'air extérieur

Le captage de chaleur peut se faire :

- par **évaporation directe**
- par transfert de chaleur **via un fluide caloporteur** (eau glycolée)

Ce captage peut se faire :

- soit par **air pulsé** (avec un ventilateur)
- soit par **air « statique »** (sans ventilateur)



### ■ Captage par air pulsé

Avantages :

- température élevée au printemps et en automne et le jour par rapport à la nuit
- bon transfert de chaleur grâce au ventilateur

Inconvénients :

- consommation électrique du ventilateur (5 à 10% de la consommation de la PAC)
- formation de givre sur l'échangeur, nécessité de cycles de dégivrage (3 à 5 % de la consommation annuelle de la PAC)

### ■ Captage par air statique

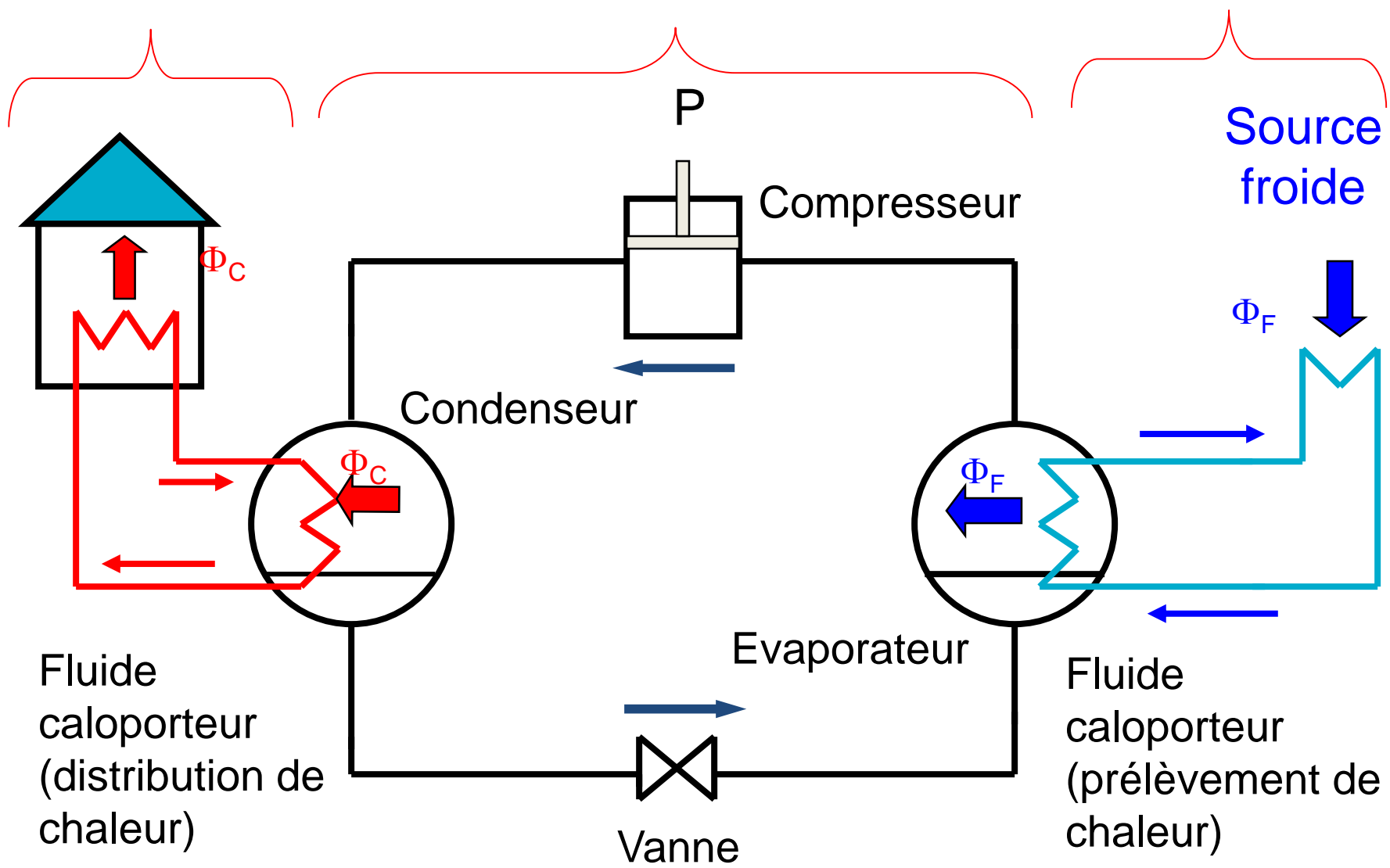
Avantages :

- température élevée au printemps et en automne et le jour par rapport à la nuit
- pas de ventilateur
- la formation de givre ne gêne pas le transfert de chaleur
- le soleil peut être employé comme source auxiliaire de chaleur

Inconvénients :

- moins bon transfert de chaleur car pas de ventilateur, donc température d'évaporation plus basse

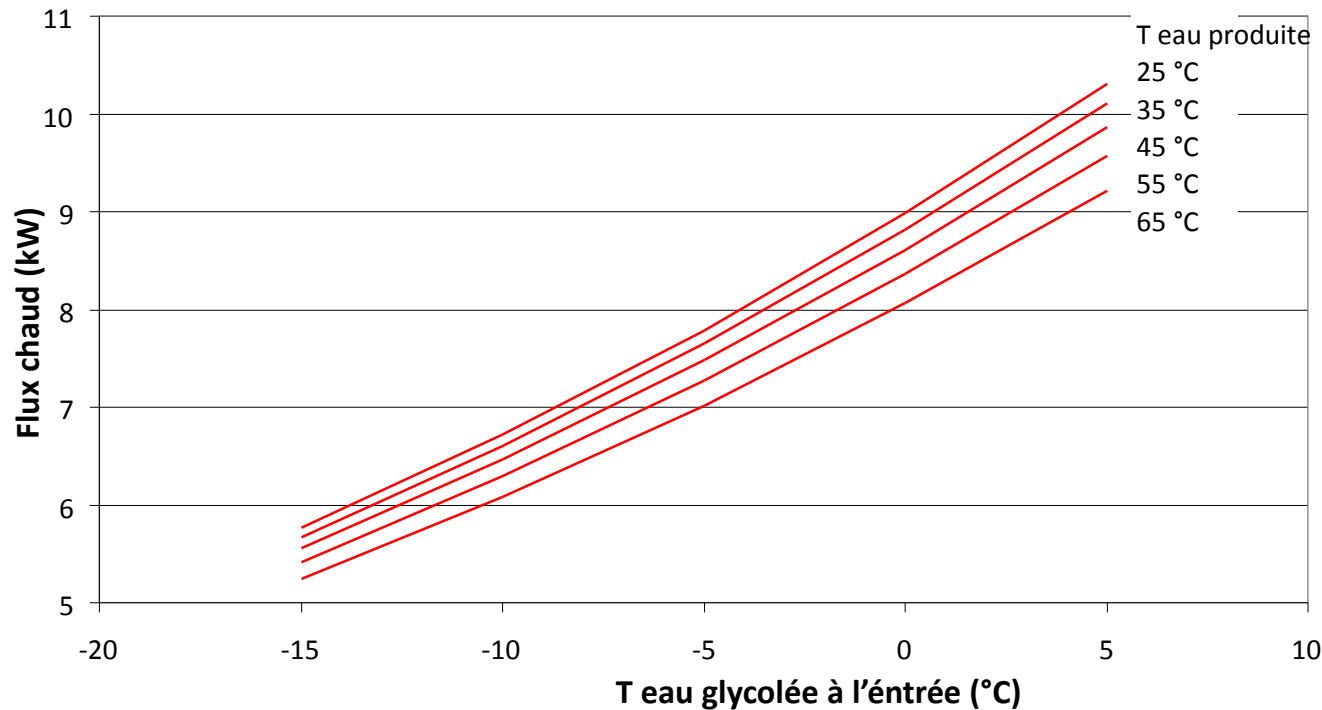
- Les pompes à chaleur (PAC) sont classés selon **la source froide et la source chaude** qu'elles utilisent, éventuellement en précisant **le type d'échangeur de chaleur**
- Exemples :
  - PAC sol-sol
  - **PAC sol-eau**
  - **PAC air pulsé-air**
  - **PAC air pulsé-eau**
  - PAC air statique-eau
  - PAC eau-eau
  - PAC sol-ECS
  - PAC air-ECS



- Fluides caloporteurs des deux côtés
- Les performances sont donc données en fonction de la température de l'eau glycolée entrant dans l'évaporateur et de la température de l'eau produite au condenseur en toute rigueur pour des débits donnés à l'évaporateur et au condenseur.
- Un modèle de PAC sol (eau glycolée) – eau est caractérisé par son compresseur, son détendeur, son condenseur et son évaporateur (système de prélèvement de chaleur et système de distribution de chaleur à dimensionner correctement)



## Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une PAC eau g -eau



- Le flux chaud et la puissance électrique sont donnés en fonction de  $T_{\text{eau glycolée}}$  et  $T_{\text{eau produite}}$  en toute rigueur pour des débits donnés.

- Le dimensionnement se fait suivant la règle suivante :

$\Phi_C (T_{\text{EAU GLYCOLEE}} = -7^\circ\text{C}, T_{\text{DEPART PLANCHER}} = 35^\circ\text{C}) = 0.8 \text{ à } 1 \times \text{Besoins} (T_{\text{EXT}} = -10^\circ\text{C})$  en horizontal

$\Phi_C (T_{\text{EAU GLYCOLEE}} = 0^\circ\text{C}, T_{\text{DEPART PLANCHER}} = 35^\circ\text{C}) = 0.8 \text{ à } 1 \times \text{Besoins} (T_{\text{EXT}} = -10^\circ\text{C})$  en vertical

Les courbes sont valables uniquement pour des débits donnés (corrections éventuelles). Adapter éventuellement la température d'eau produite au système de distribution de chaleur

- Dimensionnement du système de distribution :
  - $\Phi_C$  (par  $-7^\circ\text{C}$  ou  $0^\circ\text{C}; +35^\circ\text{C}$ ) et déperditions pièce par pièce
  - On considère une émission de  $10\text{ W/m}$  et un flux max de  $90\text{ W/m}^2$ : détermination de la longueur des tubes, vérification de la possibilité de travailler avec un plancher chauffant (attention aux petites pièces !)
  - Si système de distribution de chaleur non adapté au  $35^\circ\text{C}$ , prendre les données relatives à une autre température d'eau produite.
  - Si débit de fluide secondaire réel différent de celui pris pour l'établissement des données, adapter les données (facteur correctif)
  
- Dimensionnement des systèmes de prélèvement de chaleur :
  - 10 W/m de prélèvement dans le sol en captage horizontal
  - 30 à 50 W/m en sonde verticale

	1800 h/an	2400 h/an
Sable, gravier sec	<25 W/m	<20 W/m
Sable, gravier saturé en eau	65 à 80 W/m	55 à 65 W/m
Gravier, sable avec mouvement d'eau	80 à 100 W/m	80 à 100 W/m
Argile humide	35 à 50 W/m	30 à 40 W/m
Calcaire	55 à 70 W/m	45 à 60 W/m
Grès	65 à 80 W/m	55 à 65 W/m
Granite	65 à 85 W/m	55 à 70 W/m

Différence max de température sol non perturbé – température de retour: 11°C

Profondeur: 50 à 100 m

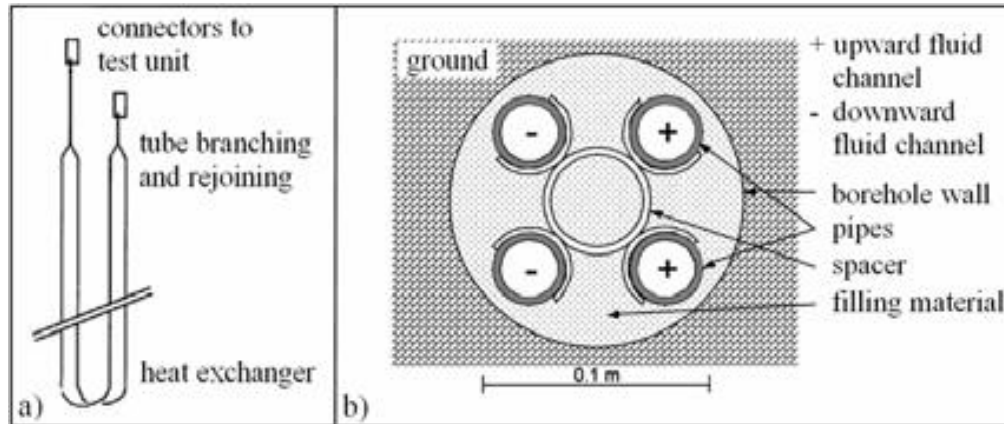
Distance entre sondes: 10 m minimum

Double tubes en U

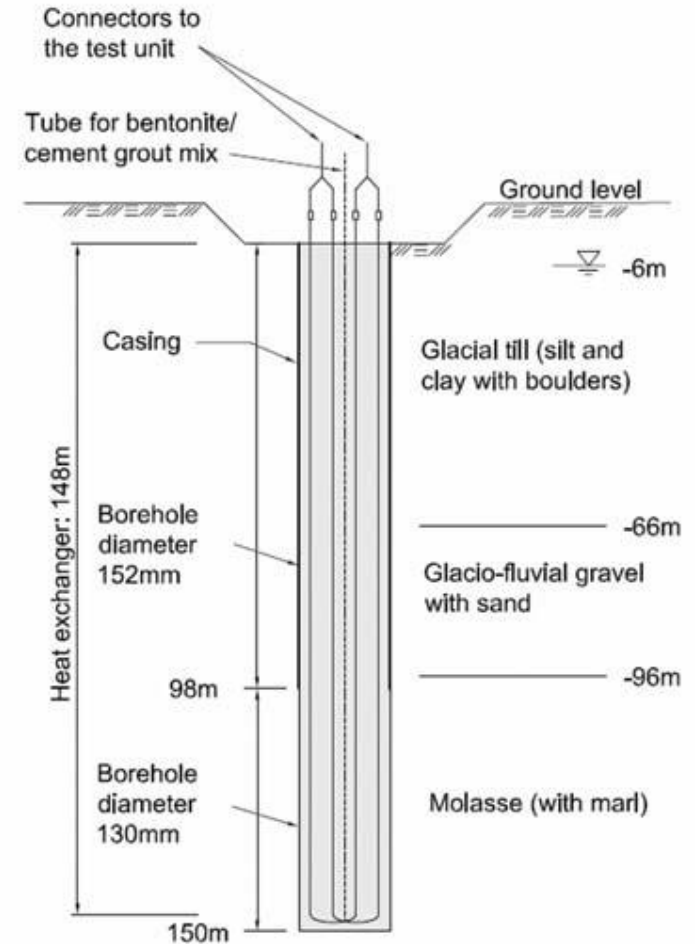
$Q_{\max}$  extrait entre 100 et 150 kWh/(m an)

## Mesure in situ des propriétés thermiques des sols (sondes verticales)

- Réalisés sur un forage test qui sera intégré à la future installation
- TRT: Thermal Response Test



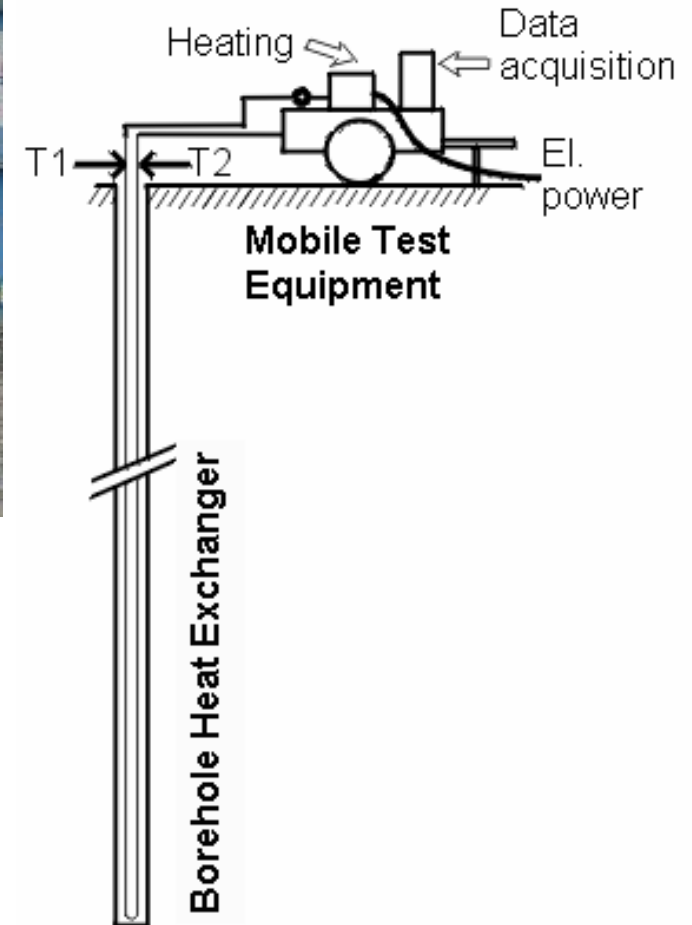
Source: EPFL







Source: BEMCO



Source: UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar, Germany

- Performances stables
- Faciles à dimensionner
- SPF attendu: légèrement supérieur à 3 au minimum, souvent supérieur à 3.5 (surtout sondes verticales)
- Auxiliaires relativement peu consommateurs (attention à la pompe sur sonde verticale : peut consommer jusque 15% de la puissance du compresseur)
- Maîtrise de  $T_{\text{eau retour sol}}$  et  $T_{\text{eau produite}}$

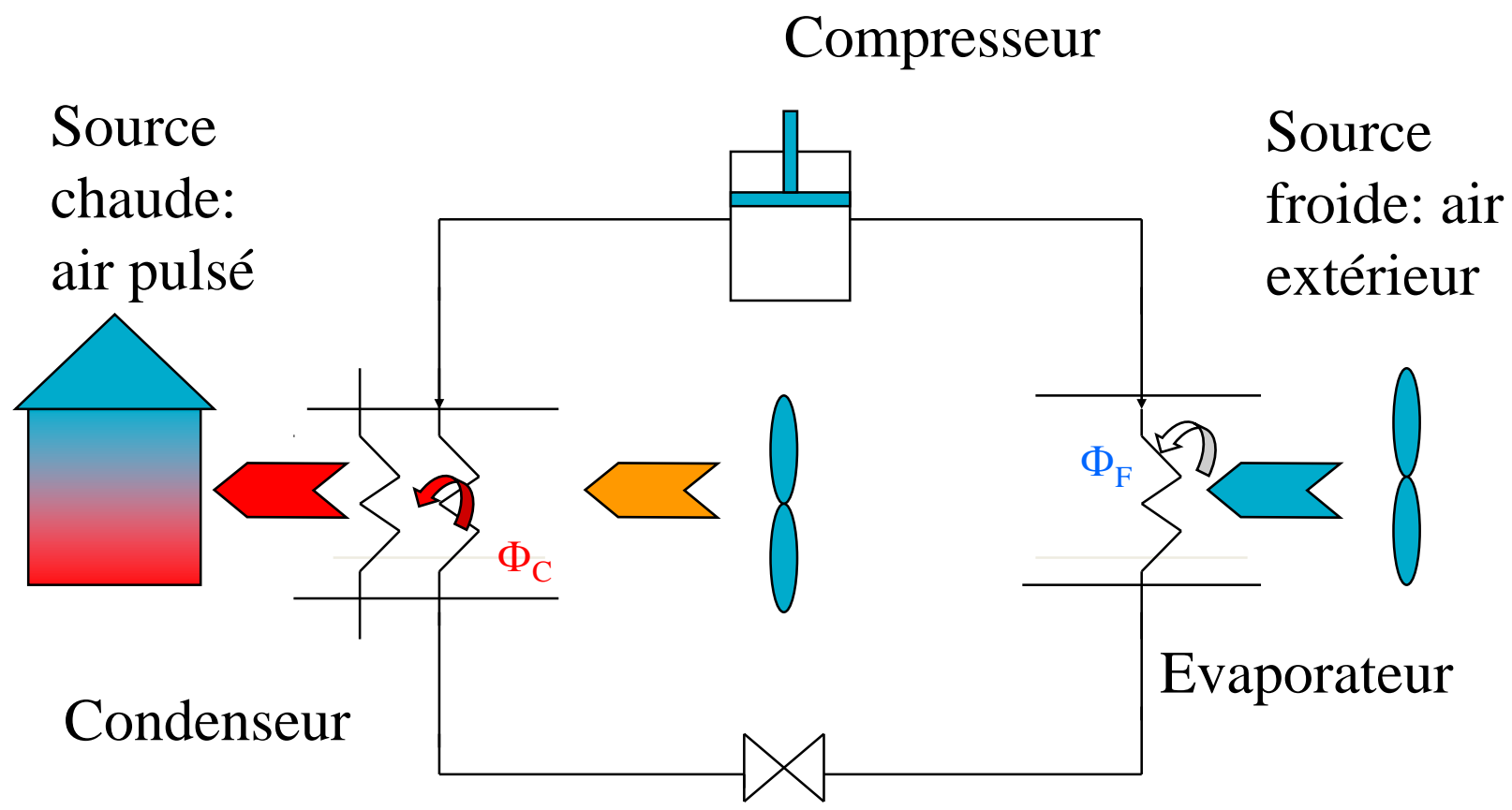




**Unité extérieure:**  
évaporateur, compresseur,  
détendeur, ventilateur

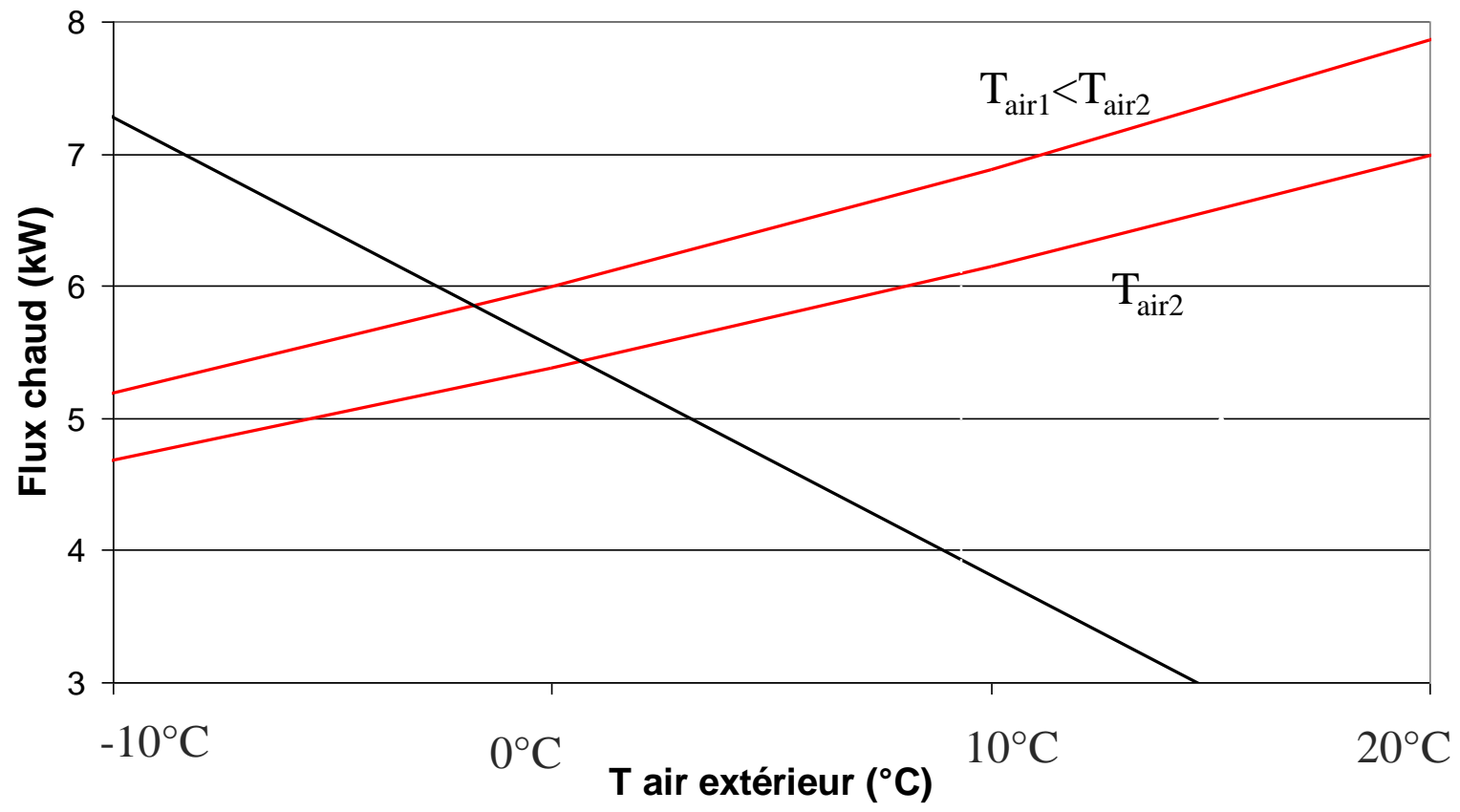


**Unité intérieure:**  
condenseur, ventilateur,  
appoint



- Fluides caloporteurs des deux côtés mais qui sont en fait les sources.
- Les performances sont donc données en fonction de la température d'air extérieur et de la température de l'air repris au condenseur en toute rigueur pour des débits d'air donnés à l'évaporateur et au condenseur.
- Un modèle de PAC air pulsé-air est caractérisé par son compresseur, son détendeur, son condenseur et son évaporateur (système de prélèvement de chaleur intégré à la pompe à chaleur)

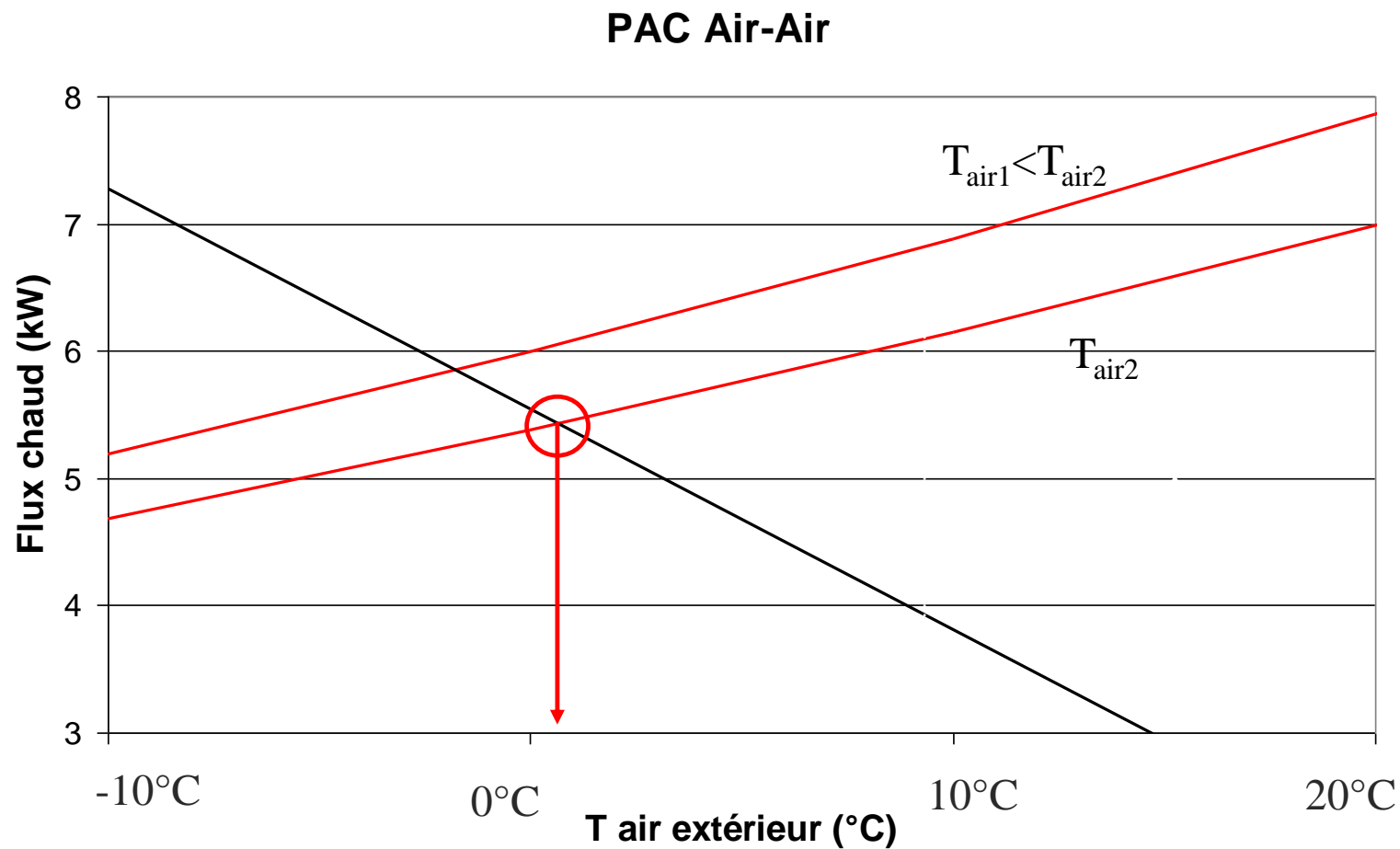
### PAC Air-Air



Courbes valables pour des débits d'air donnés

- Le dimensionnement se fait suivant la règle suivante :

$$\Phi_C (T_{\text{AIR INT}} = 20 \text{ °C}, T_{\text{EXT}} = -5 \text{ °C à } 0 \text{ °C}) = \text{Flux de déperdition } (T_{\text{EXT}} = -5 \text{ °C à } 0 \text{ °C})$$



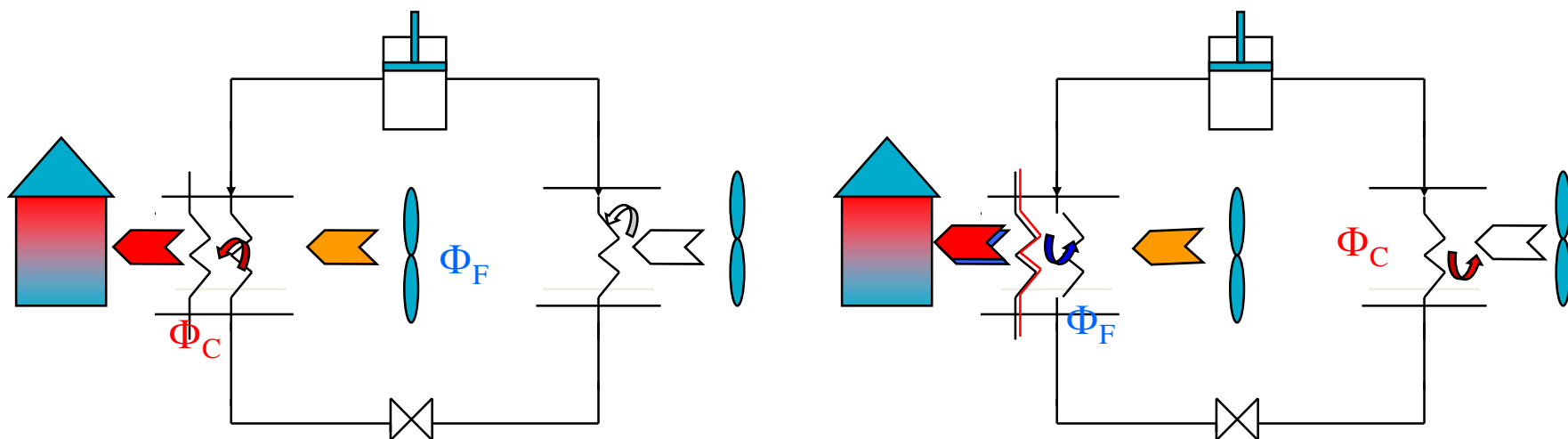
- Nécessité d'un appoint en aval du condenseur
- Conception du gainage-calcul des pertes de charge
- Courbes caractéristiques du ventilateur intérieur (débit en fonction des pertes de charge pour trois vitesses de ventilateur)
- L'unité intérieure et le gainage permettent-ils de véhiculer le débit calculé correspondant aux valeurs prises pour le dimensionnement (débit relatif aux courbes caractéristiques) ?
- Sinon, adapter le gainage ou corriger les données « constructeur »

- Dimensionnement du système de distribution:
  - Isolation du gainage  $K < 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  si  $T < 10^\circ\text{C}$
  - Vitesse max = 5 m/s en sortie 3.5 m/s à l'entrée
  - Vitesse max au niveau des grilles: 1,5 m/s au sol; 3 m/s en plafond; 2,5 m/s à la reprise; 2 m/s grilles de transfert
  - Filtre lavable à la reprise
  - Equilibrage
  - Grille de transfert
  - Coude à l'entrée et à la sortie du groupe de pulsion (transmission bruit ventilateur)
  - Joints élastiques (transmission vibrations)

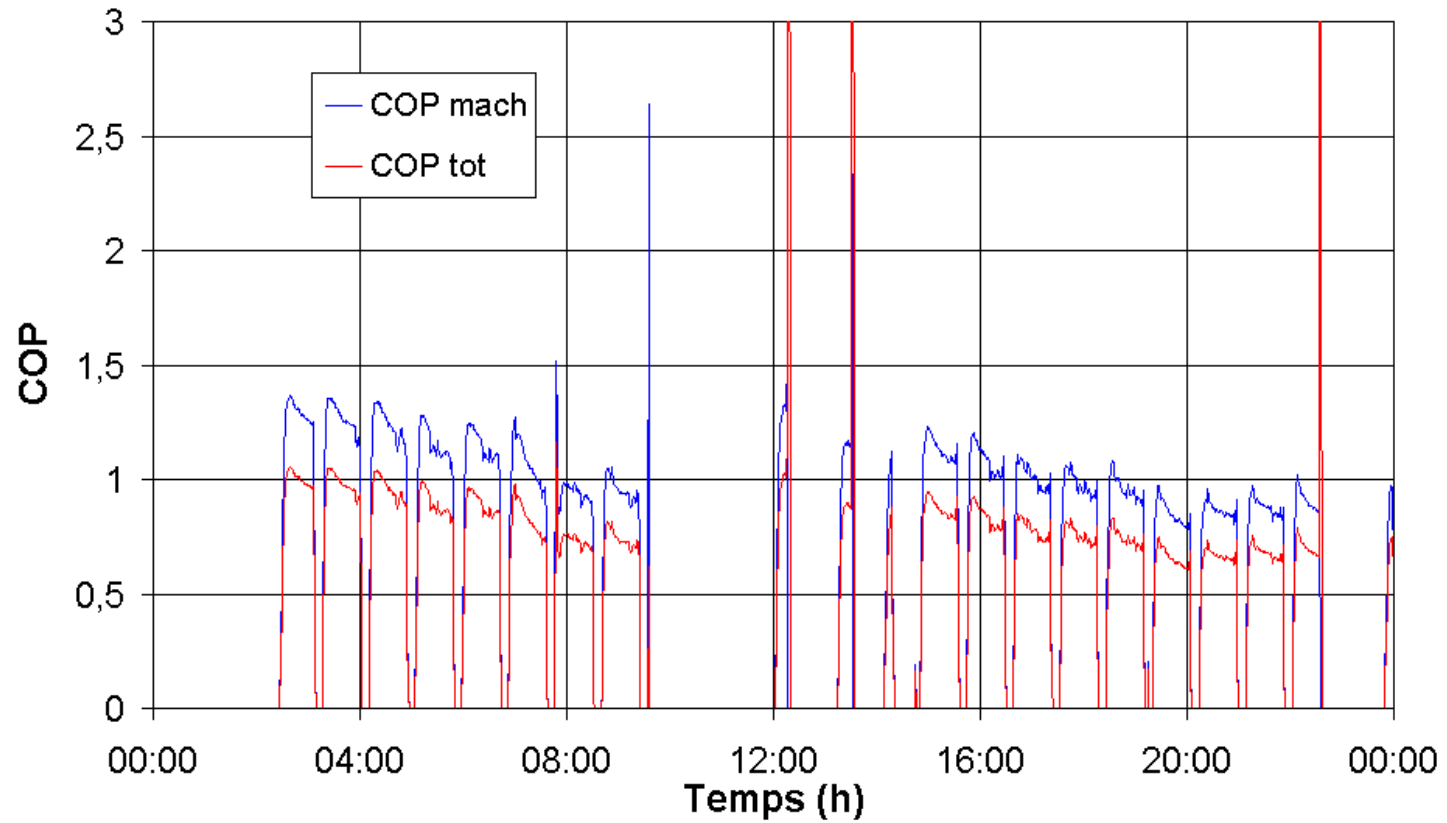
- Unité extérieure:
  - hauteur minimale de 15 cm par rapport au sol
  - niveau de bruit acceptable 45dB à 10m et à 1m50 de hauteur
- Résistance d'appoint:
  - en aval du condenseur
  - $P > 0,75 P_{\text{thermique PAC}}$



- Dégivrage vers 7°C de Text – inversion du cycle



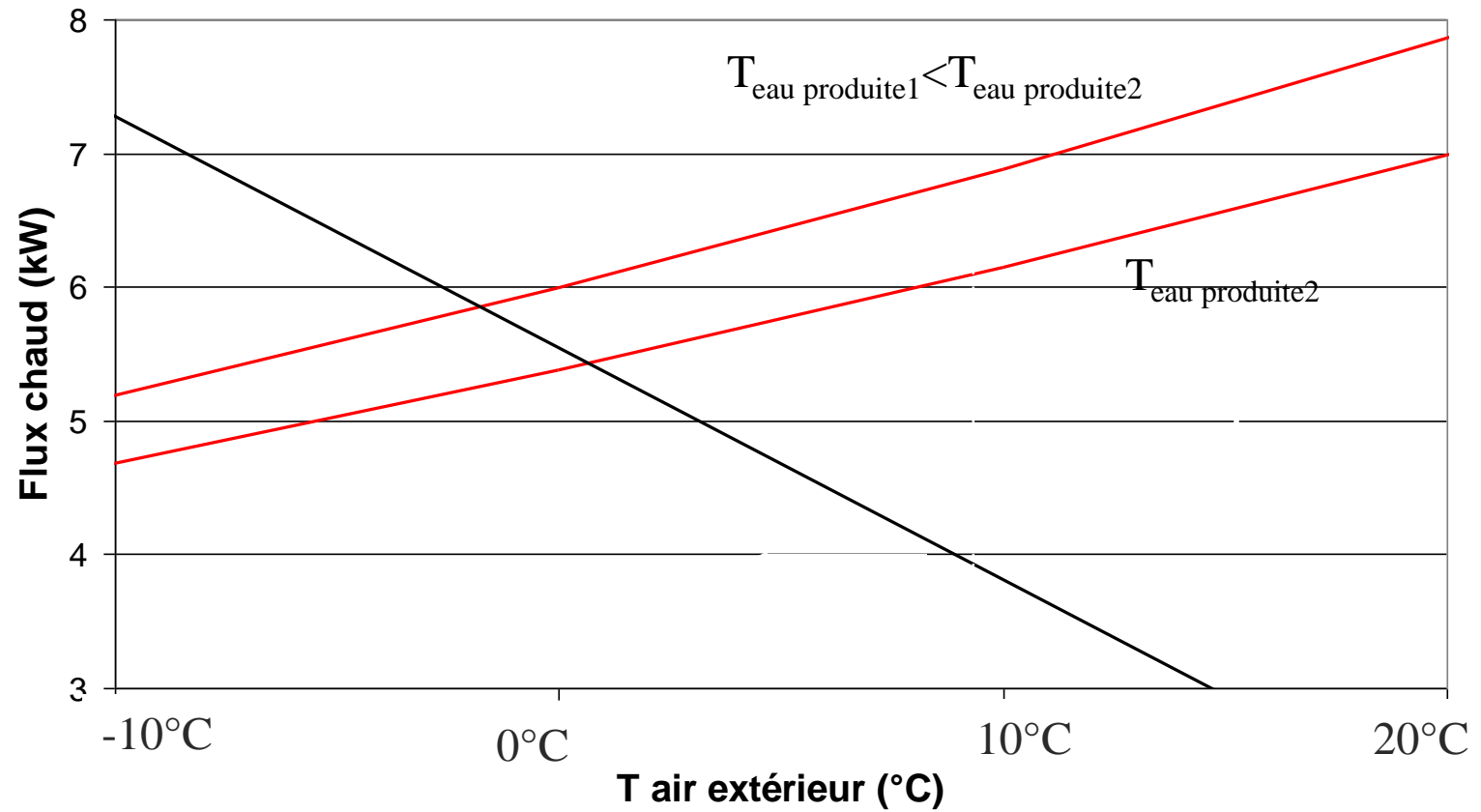
Si dysfonctionnement du dégivrage



- Performances peu stables: difficulté de dimensionner
- Point d'équilibre entre 0 et -5°C, pas d'inertie, appoint nécessaire
- Formation de givre, nécessité du dégivrage; appoint nécessaire
- Appoint 10% de la consommation électrique
- Auxiliaires fortement consommateurs ( qq 100 W)
- SPF attendu: 2.7 (et plus actuellement avec la vitesse variable)
- Pas de stockage possible
- Peu coûteuse
- Conditionnement d'air
- Intéressant si personnes peu présentes
- Performances accrues; machines à vitesse variable



- Fluides caloporteurs des deux côtés (du côté froid, il s'agit de la source)
- Les performances sont donc données en fonction de la température d'air extérieur et de l'eau produite pour des débits d'air et d'eau donnés.
- Un modèle de PAC air pulsé-eau est caractérisé par son compresseur, son détendeur, son condenseur et son évaporateur (système de prélèvement de chaleur intégré à la pompe à chaleur, système de distribution de chaleur à dimensionner correctement)



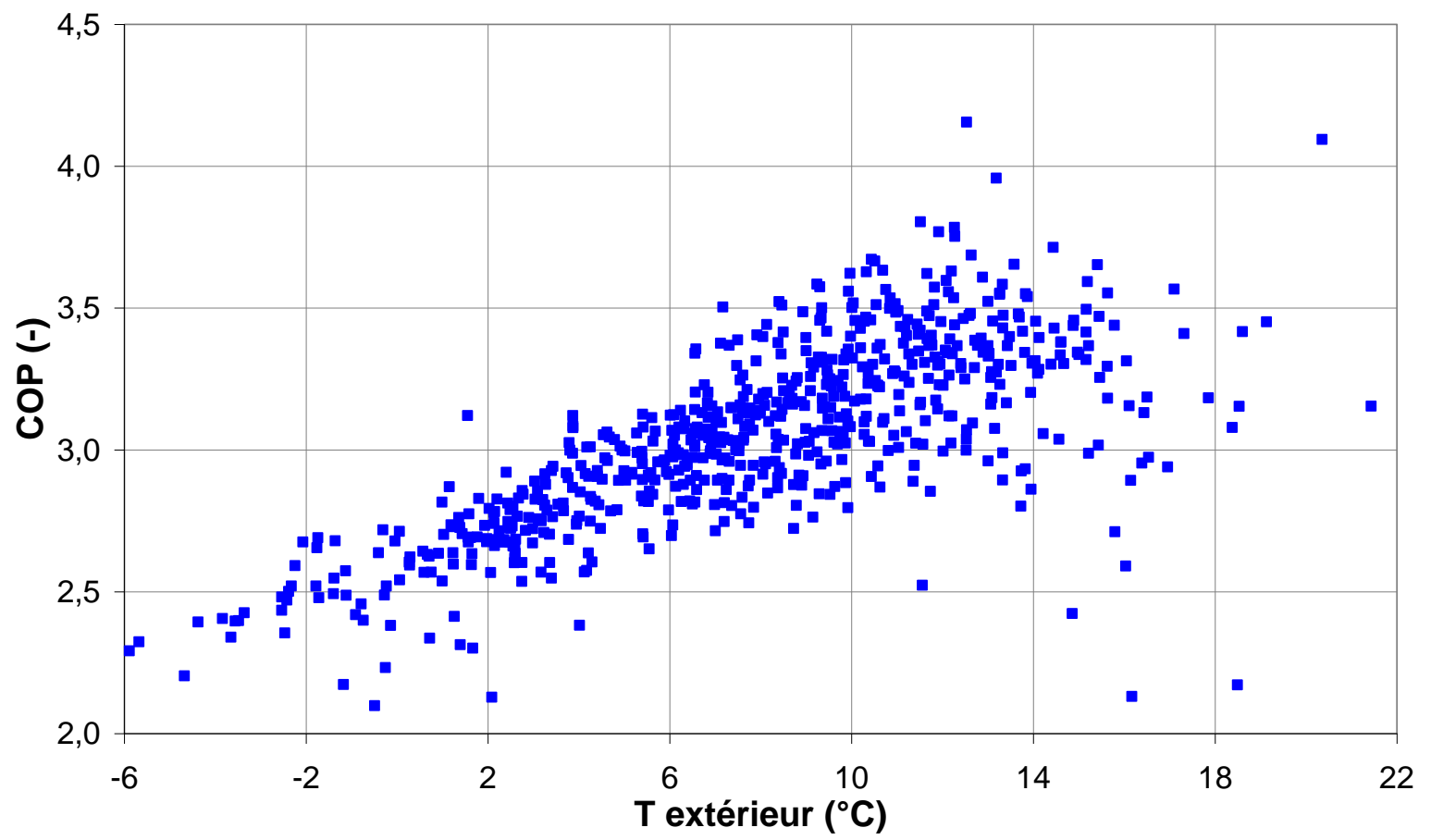
Courbes valables pour des débits donnés d'air et d'eau

- Le dimensionnement se fait suivant la règle suivante :

$$\Phi_C (T_{\text{eau produite}} = 35 \text{ °C}, T_{\text{EXT}} = -5\text{°C à } 0\text{°C}) = \text{Besoins} (T_{\text{EXT}} = -5\text{°C à } 0\text{°C})$$

- Se référer à la PAC eau glycolée-eau pour les remarques concernant le système de distribution de chaleur
- Se référer à la PAC air pulsé-air pour les remarques concernant le système de prélèvement de chaleur
- Appoint en aval du condenseur: pas nécessaire en dégivrage

**COP total**  
**TEMPLoux : Décembre 2000 - Janvier 2004**

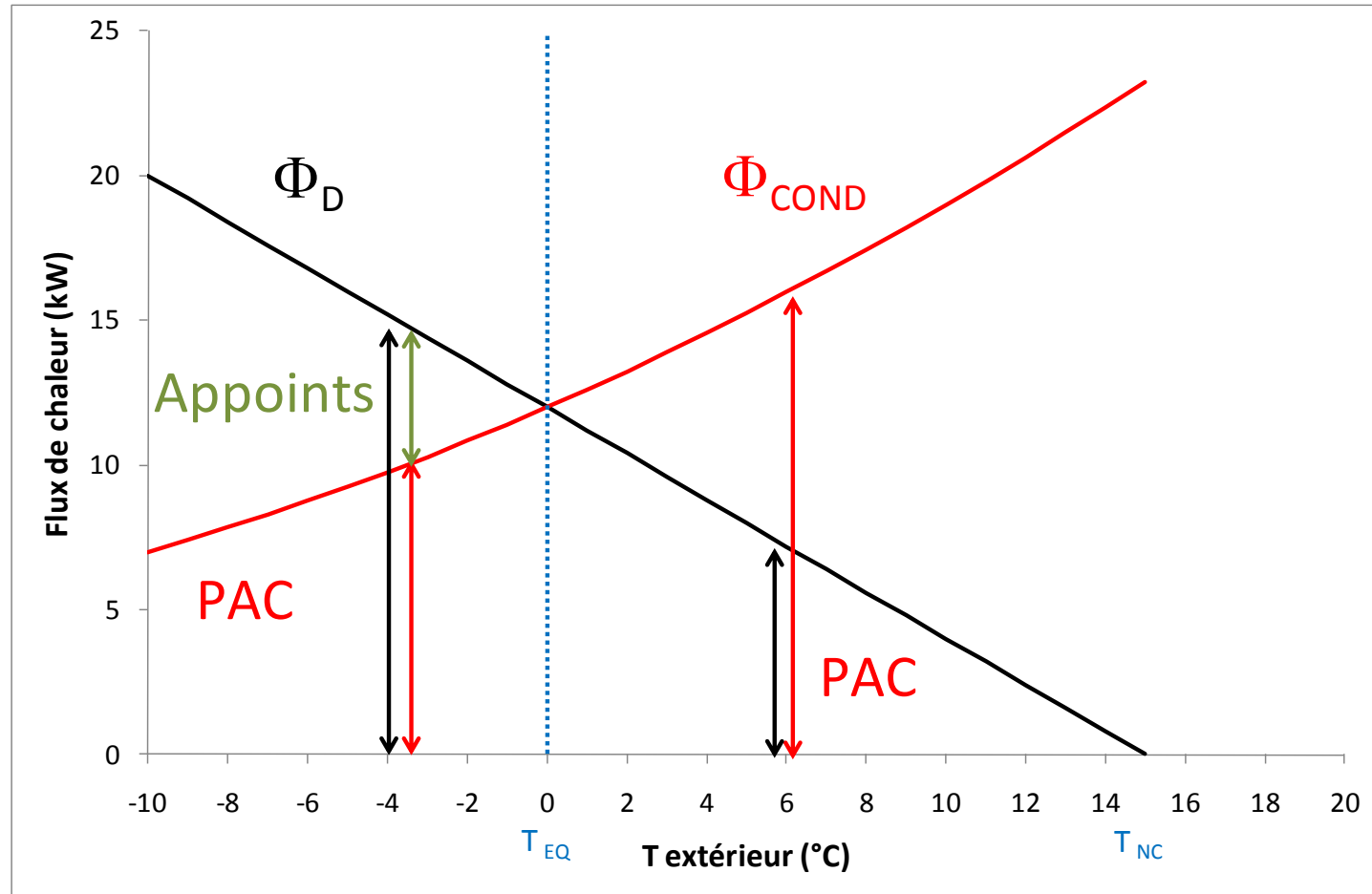




- Performances peu stables: difficulté de dimensionner
- Point d'équilibre entre 0 et -5°C, appoint potentiellement nécessaire
- Formation de givre, nécessité du dégivrage; appoint pas nécessaire pendant le dégivrage
- Appoint qq% de la consommation électrique
- Auxiliaires (qq 100 W pour le ventilateur, qq 10 W pour le circulateur)
- Inertie : tarif bi-horaire
- SPF attendu: 3.0 (et plus si vitesse variable)
- Relativement peu coûteuse
- Gain important en COP pour les machines à vitesse variable
- Rafrachissement par le sol

Règles de dimensionnement d'une PAC air/eau :

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

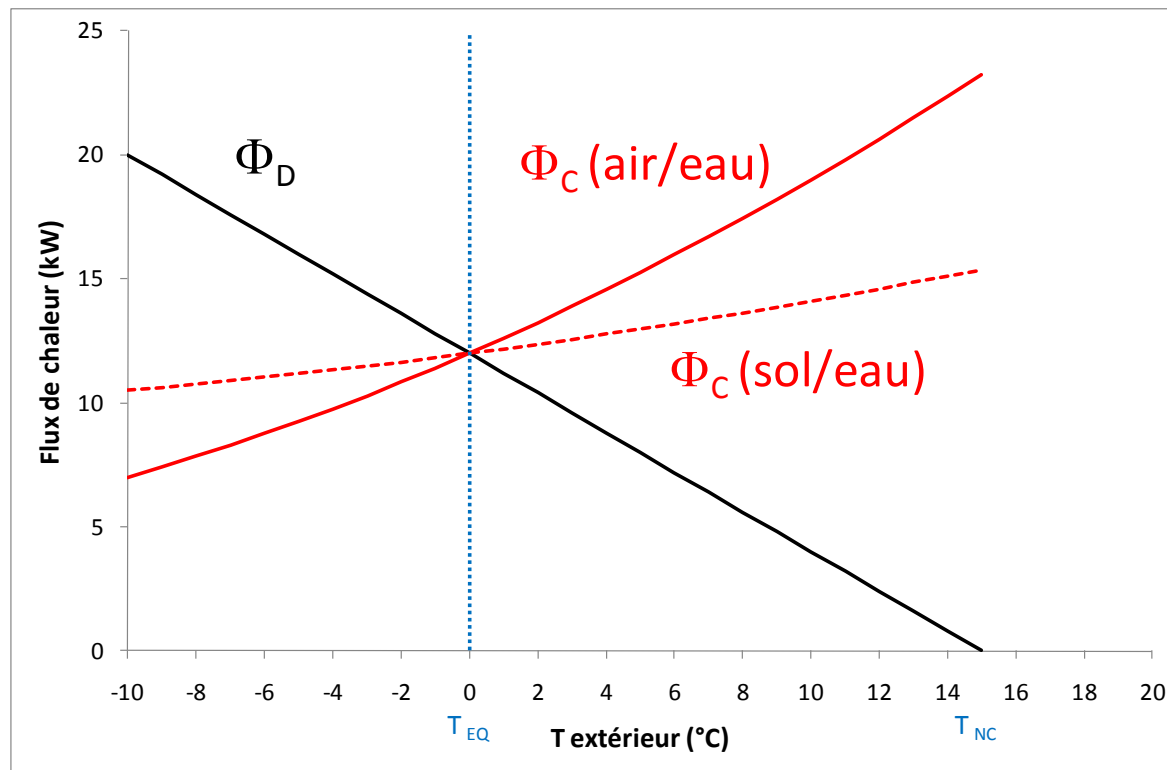


PAC « normalement » dimensionnée

Intérêt de la vitesse variable :

avoir un degré de liberté supplémentaire pour tenter d'adapter  $\Phi_{\text{CPAC}}$  au flux de déperditions  $\Phi_{\text{D}}$  lorsque  $T_{\text{EXT}}$  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



PAC à vitesse variable = capacity controlled heat pump

Comment se comporte une PAC lorsque la vitesse varie ?

- vitesse = vitesse de rotation du moteur, liée à la fréquence de l'alimentation électrique -> utilisation d'un régulateur de vitesse électronique (inverter)
- la vitesse de rotation du moteur est directement proportionnelle au débit volumique circulé par le compresseur  $q_v$  [ $m^3/s$ ] :

$$q_v = N V \quad \text{avec } V [m^3] \text{ le volume circulé pour un tour de compresseur et } N \text{ la vitesse de rotation [tour/s]}$$

- le débit massique [ $kg/s$ ] est directement lié au débit volumique :

$$q_M = q_v \rho_{in \text{ comp}} \quad \text{avec } \rho_{in \text{ comp}} [kg/m^3] \text{ la masse volumique du fluide frigorigène à l'entrée du compresseur}$$

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  $\Phi_C$  mieux adapté au flux de déperditions  $\Phi_D$   
- la vitesse diminuant, le COP sera meilleur

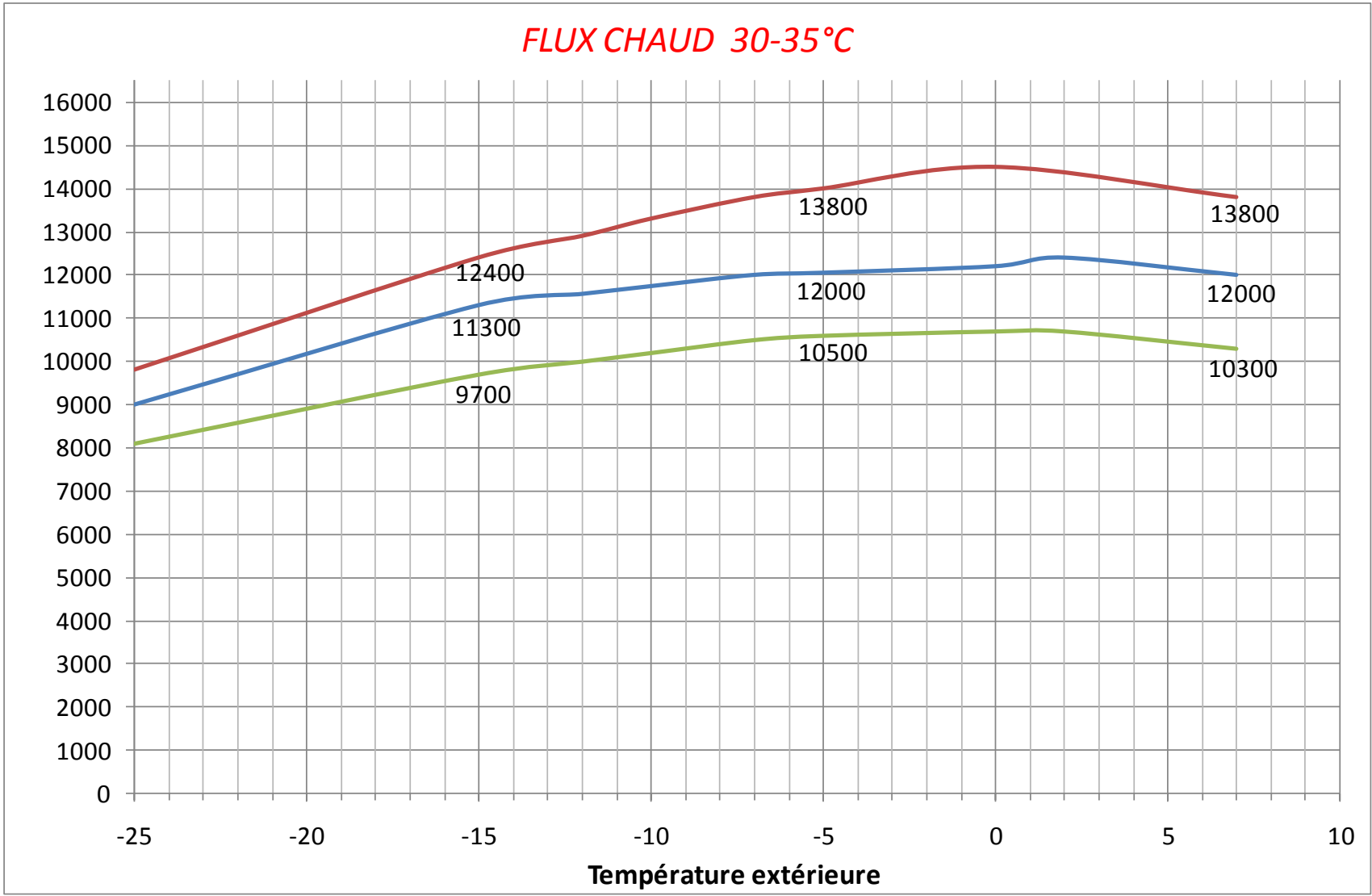
2) en dessous du point d'équilibre ( $T_{EXT} < T_{EQ}$ ), on peut augmenter la vitesse pour augmenter le flux chaud de la PAC afin de moins utiliser les appoints (ou de ne pas les utiliser du tout)  
- la vitesse augmentant, le COP sera moins bon mais meilleur qu'une résistance électrique (COP=1)

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

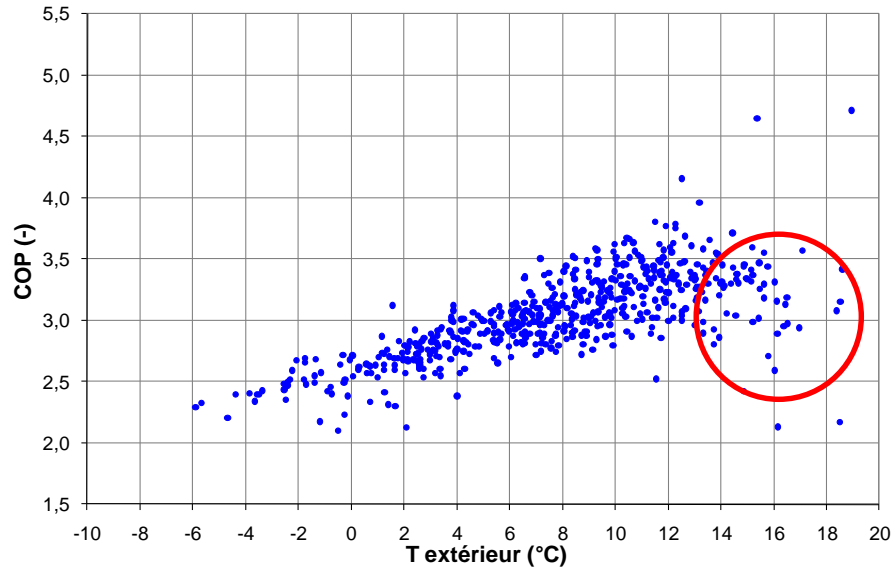
$$\Phi_{CPAC} (T_{EXT} = -10^{\circ}\text{C}, T_{EAU} = 35^{\circ}\text{C}) = \Phi_D (T_{EXT} = -10^{\circ}\text{C})$$

Intérêt de la vitesse variable :

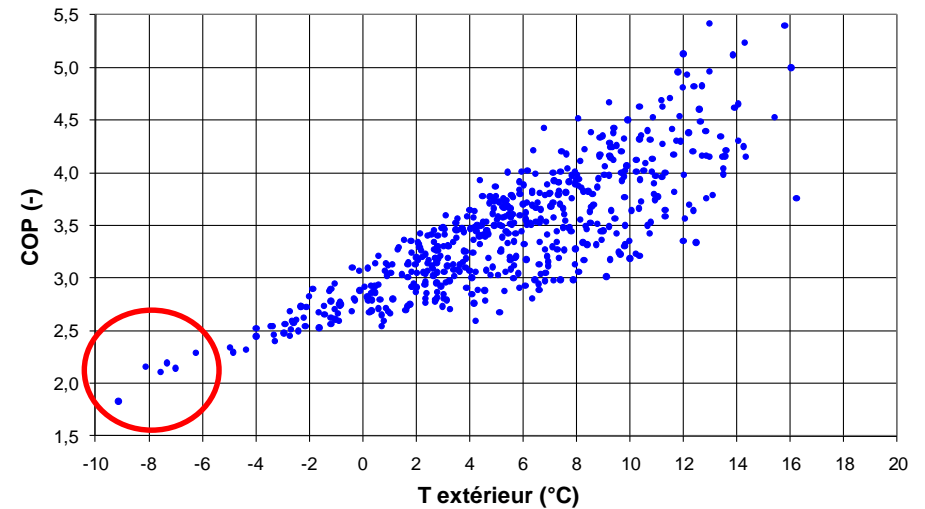
- 3) le démarrage et l'arrêt du compresseur se font en douceur lors des cycles de fonctionnement et permet d'allonger la durée de vie du compresseur
  
- 4) le vitesse du ventilateur de l'évaporateur peut aussi être variable pour optimiser le fonctionnement
  
- 5) la gamme de vitesse (fréquence) est 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



COP Air-Eau (vitesse fixe)



COP Air-Eau (vitesse variable)



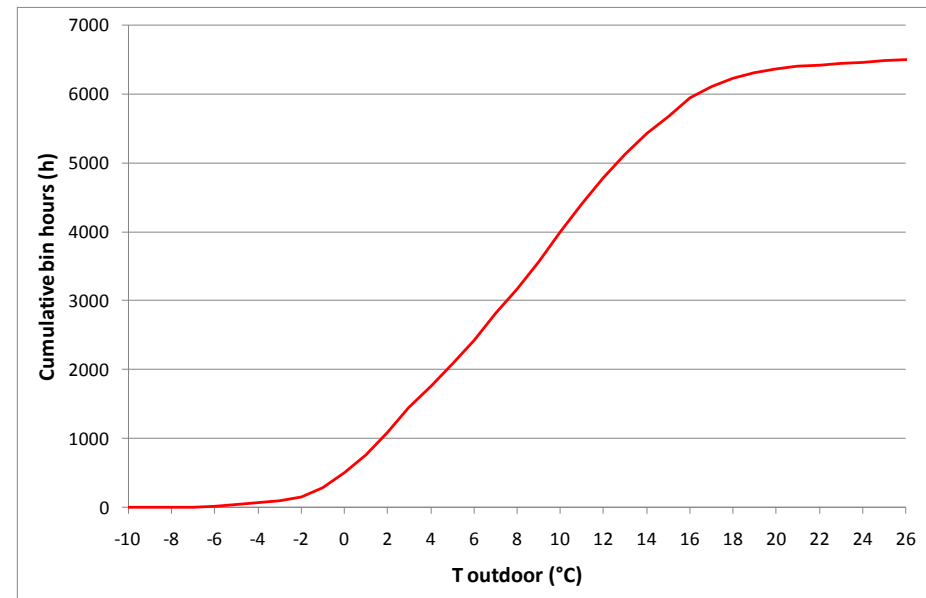
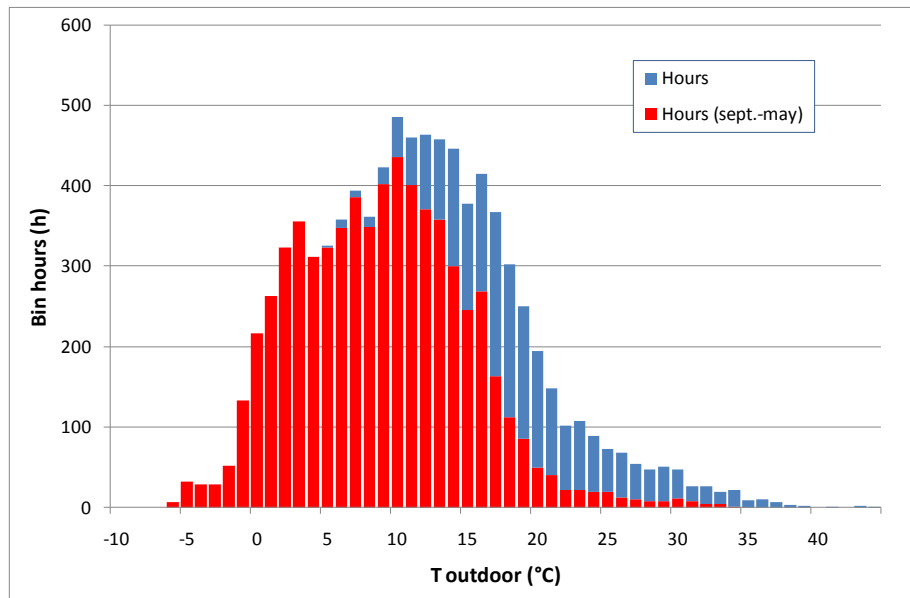
Intérêt de la vitesse variable :

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



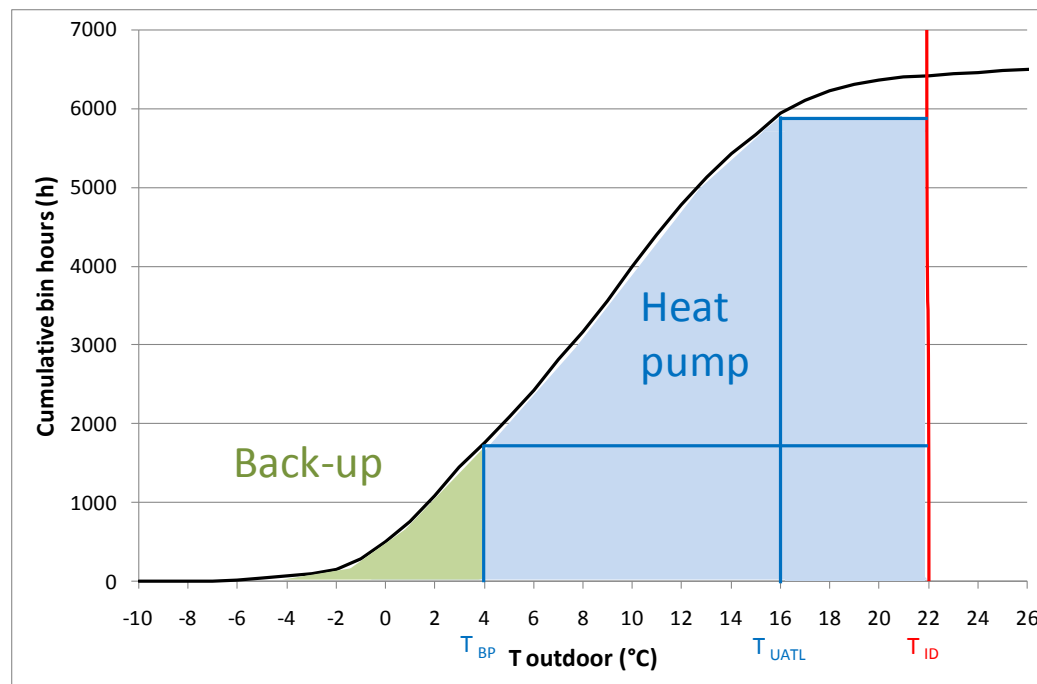
# Principe de calcul du SPF

- Les performances d'une PAC dépendent des températures de sources (source chaude, source froide) : la méthode de calcul se base sur les performances calculées pour différentes périodes ayant des températures de sources différentes.



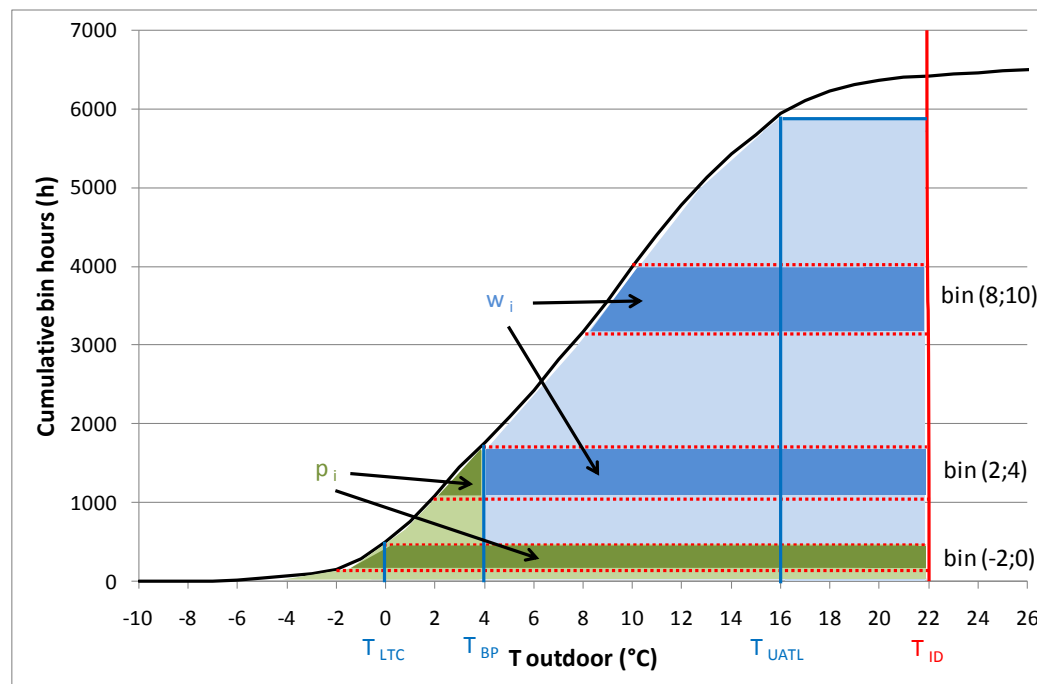
- Le calcul nécessite les besoins en chauffage de l'habitation  $Q$ , la température d'équilibre  $T_{BP}$ , la température de non-chauffage  $T_{UATL}$  et la température intérieure de confort  $T_{ID}$
- On peut alors calculer le nombre de degrés-heures de chauffage de la période de chauffe  $HDH_t$  qui est supposé proportionnel à  $Q$  :

$$HDH_t = \sum_{i=1}^{T_{UATL}} n_i (T_{ID} - T_i) = k Q$$



- La quantité de chaleur  $Q_{iHP}$  (PAC) et  $Q_{iBH}$  (appoints) de chaque intervalle de température (bin) est supposée proportionnelle au nombre de degrés-heures de chauffage de cet intervalle :

$$Q_{iHP} = w_i Q \quad Q_{iBH} = p_i Q$$



- Calcul de la consommation d'énergie de la PAC ( $E_{HP}$ ) et des appoints ( $E_{BH}$ ) :

$$E_{HP} = \sum_i \frac{Q_{iHP}}{COP_i}$$

$$E_{BH} = \sum_i Q_{iBH}$$

- Calcul du SPF de la PAC :

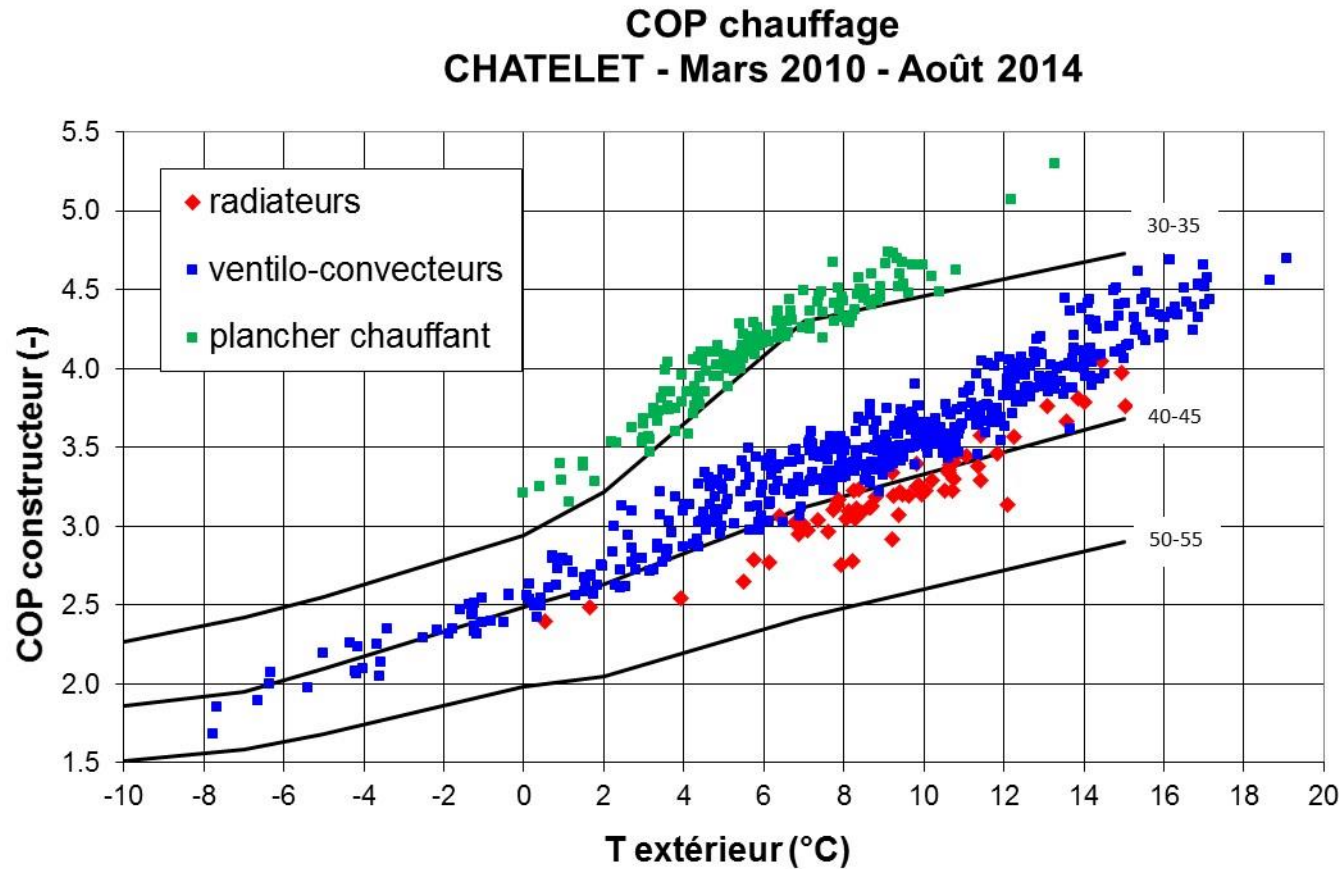
$$SPF = \frac{\sum_i Q_{iHP}}{E_{HP}}$$

# Quelques résultats expérimentaux

- PAC installée dans une maison 4 façades faiblement isolée bâtie en 1995 (K100) à Châtelet :  $\Phi_{\text{PERTES}} (T_{\text{EXT}} = -10^{\circ}\text{C}) = 11 \text{ kW}$
- La PAC est utilisée pour le chauffage et pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS, ballon de 200 l)
- Monitoring d'une PAC air-eau (AJ TECH/ARKTEOS ZURAN 100) qui utilise un cycle à injection avec compresseur à vitesse variable
- Flux chaud nominal PAC = 12 kW
- La PAC a été complètement instrumentée pour des mesures détaillées en avril 2010



- COP journaliers chauffage – période mars 2010 – août 2014





- Résultats annuels chauffage pour les saisons 2010-2011 et 2011-2012 (ventilo-convecteurs)

Period	$E_{HP}$ (kWh)	$E_{WP}$ (kWh)	$E_{DEF}$ (kWh)	$E_{SB}$ (kWh)	$E_{CONV}$ (kWh)	$E_{RES}$ (kWh)	Q (kWh)	$COP_{SYS}$ (-)	$COP_{TOT}$ (-)
1/7/2010-30/6/2011	4952.53	148.20	54.20	205.31	72.59	2.31	15060.48	2.95	2.81
1/7/2011-30/6/2012	5034.21	178.70	20.46	200.51	86.25	0.00	16405.16	3.15	3.02

94.5%    3.0%    0.7%    3.8%  
 PAC    Circ.    Deg.    Stand-by

PER = 1.12 à 1.22

- Résultats annuels chauffage pour la saison 2013-2014 (plancher chauffant)

Period	$E_{HP}$ (kWh)	$E_{WP}$ (kWh)	$E_{DEF}$ (kWh)	$E_{SB}$ (kWh)	$E_{RES}$ (kWh)	Q (kWh)	$COP_{SYS}$ (-)	$COP_{TOT}$ (-)
1/9/2013-31/8/2014	2337.37	110.61	14.35	232.91	0.00	10013.06	4.09	3.72

86.7%    4.1%    0.6%    8.6%  
 PAC    Circ.    Deg.    Stand-by

PER = 1.49

- Résultats annuels ECS pour les saisons 2010-2011, 2011-2012 et 2013-2014

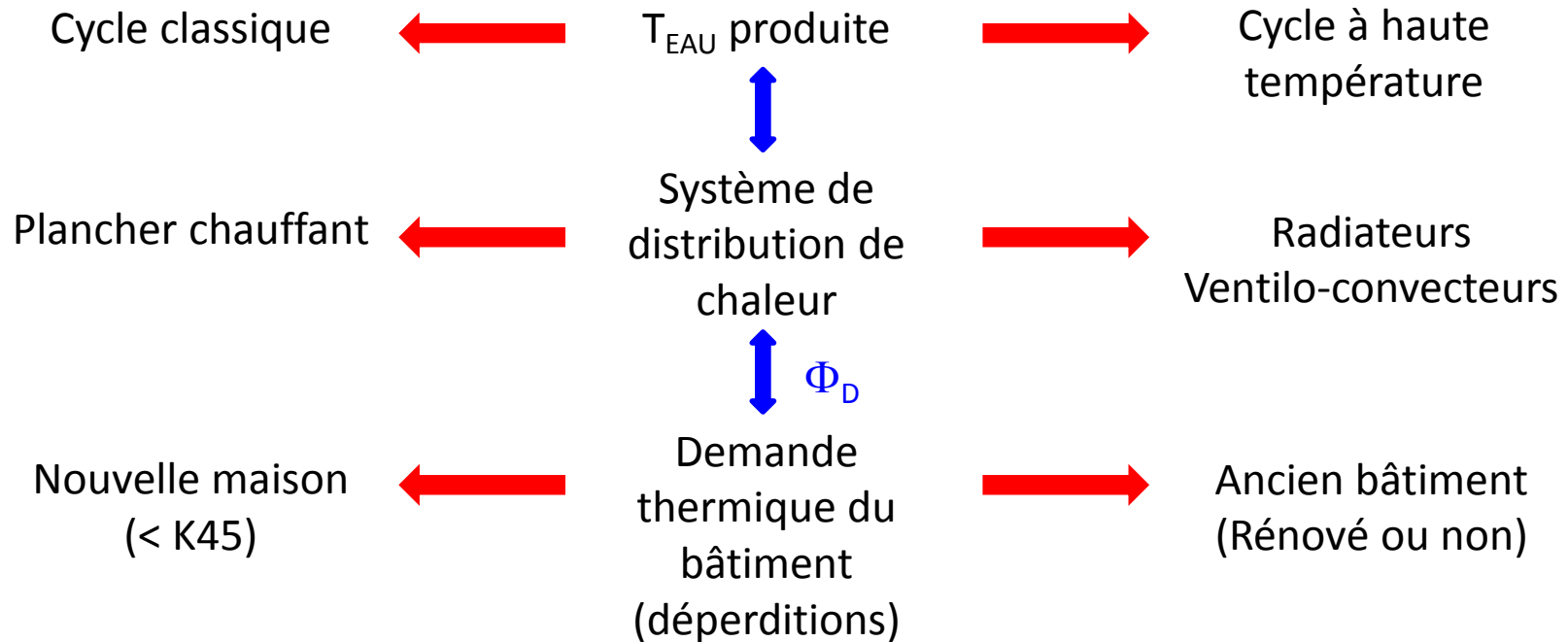
Period	$E_{HP}$ (kWh)	$E_{WP}$ (kWh)	Q (kWh)	$COP_{SYS}$ (-)
1/7/2010-30/6/2011	713.41	19.97	1828.88	2.49
1/7/2011-30/6/2012	653.59	17.07	1714.26	2.56
1/9/2013-31/8/2014	763.12	20.84	2057.44	2.62

97.4%      2.6%

PAC      Circ.      PER = 1.00 à 1.05

# PAC et rénovation

- C'est la combinaison PAC - système de distribution de chaleur qui fixera la température de l'eau produite !
- Si la température de l'eau produite n'est pas suffisante pour le niveau d'isolation de la maison, la température intérieure de confort ne sera pas atteinte !

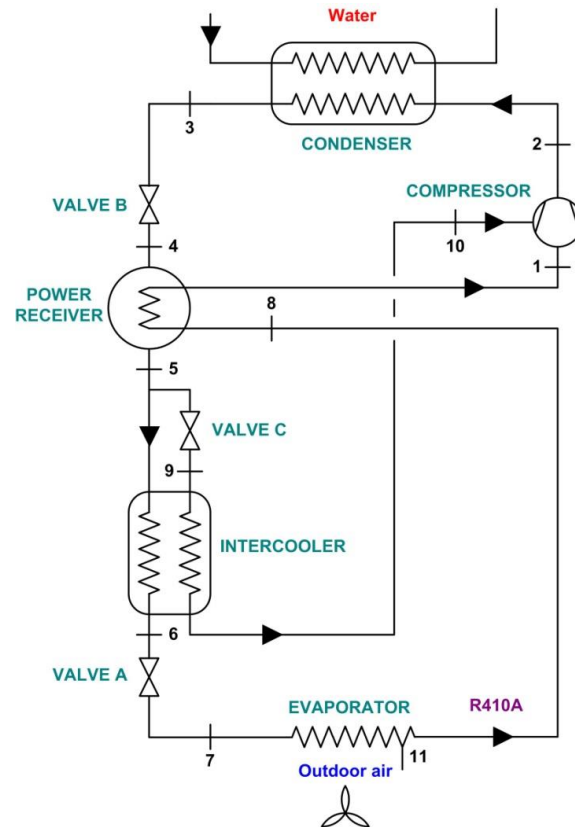


- Première solution
  - Changer les émetteurs de chaleur à haute température (60-70°C) par des émetteurs à moyenne température (ventilo-convecteurs : 40-50°C) ou à basse température (plancher chauffant : 30-35°C)
  - Investissement important (isolation de l'habitation, changement d'émetteur, investissement dans une PAC)
  - Technologie :
    - PAC « standard » avec un cycle thermodynamique « classique »  
(plancher chauffant)
    - PAC haute température (ventilo-convecteurs)

- Deuxième solution

- Placer un système de chauffage qui utilise une pompe à chaleur mais avec les émetteurs de chaleur haute température existants (60-70°C)
- Investissement moindre (isolation légère ou pas d'isolation, investissement dans une PAC)
- Technologie :
  - PAC haute température
  - PAC hybride
  - PAC à absorption/adsorption
  - PAC à moteur à gaz

- PAC à haute température présentes sur le marché :
  - Compression étagée dans un seul compresseur avec injection de vapeur intermédiaire (**PAC avec cycle à injection**)
  - PAC à deux cycles thermodynamiques (**PAC avec cycle en cascade**)
- Ces PAC utilisent des technologies plus complexes qu'une PAC classique et sont donc plus chères à l'achat mais ont de meilleurs COP pour de l'eau à haute température
- Existent uniquement pour des PAC air/eau



Chauffage :

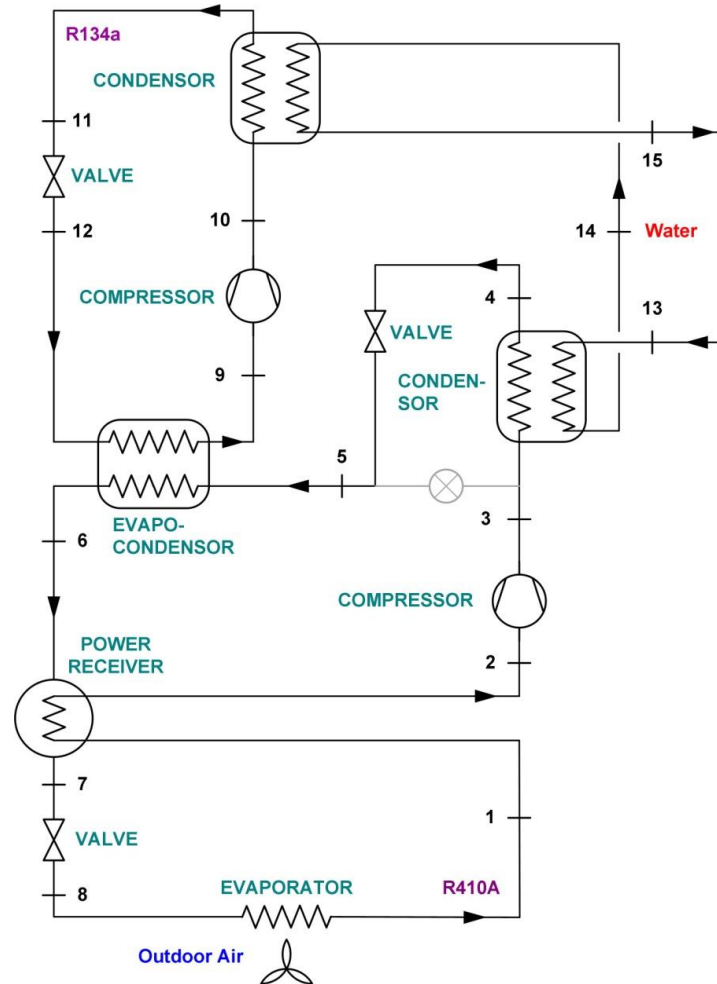
SPF = 2.8 à 3.0      SPER = 1.12 à 1.22 (ventilo-convecteurs),

SPF = 3.7            SPER = 1.49 (plancher chauffant)

Eau chaude sanitaire :

SPF = 2.5 à 2.6      SPER = 1.0 à 1.05 (Teau = 50°C)





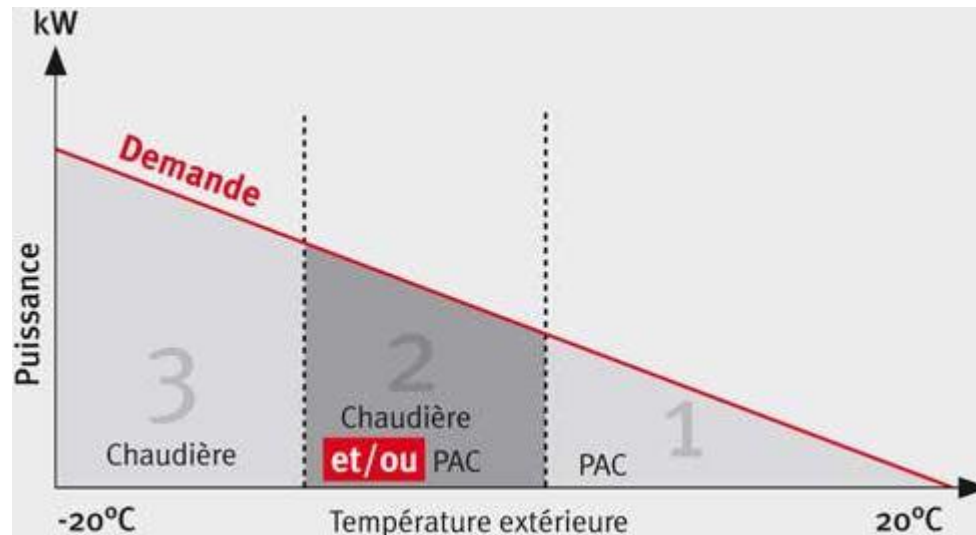
Chauffage :

SPF = 2.9 à 3.1      SPER = 1.16 à 1.26 (radiateurs)

Eau chaude sanitaire :

SPF = 2.7      SPER = 1.07 (Teau = 60°C)

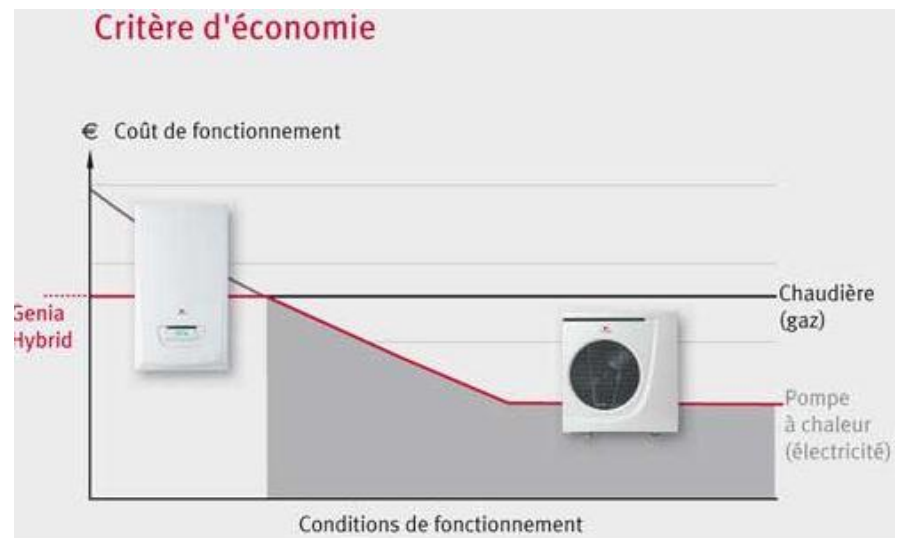
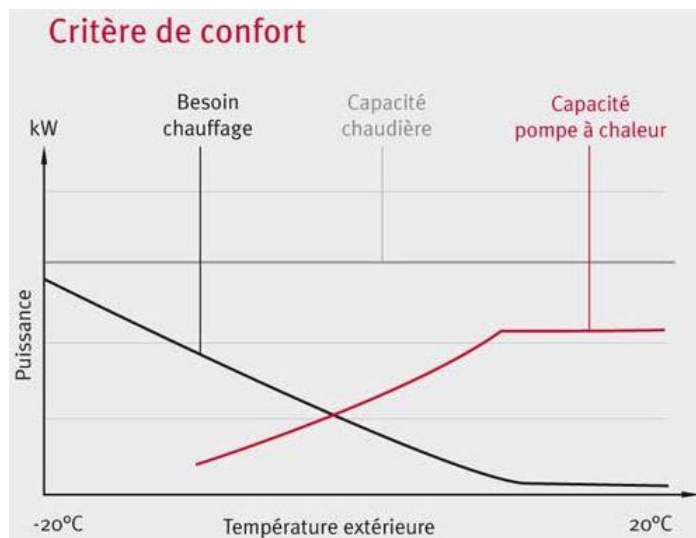
- Combinaison d'une chaudière (mazout/GN) avec une PAC



Source : <http://conseils.xpair.com/>

- Fonctionnement alterné ou simultané
- Chauffage et ECS
- PAC : 2 à 10 kW (eau à basse température)
- Chaudière : 5 à 25 kW (eau à haute température)

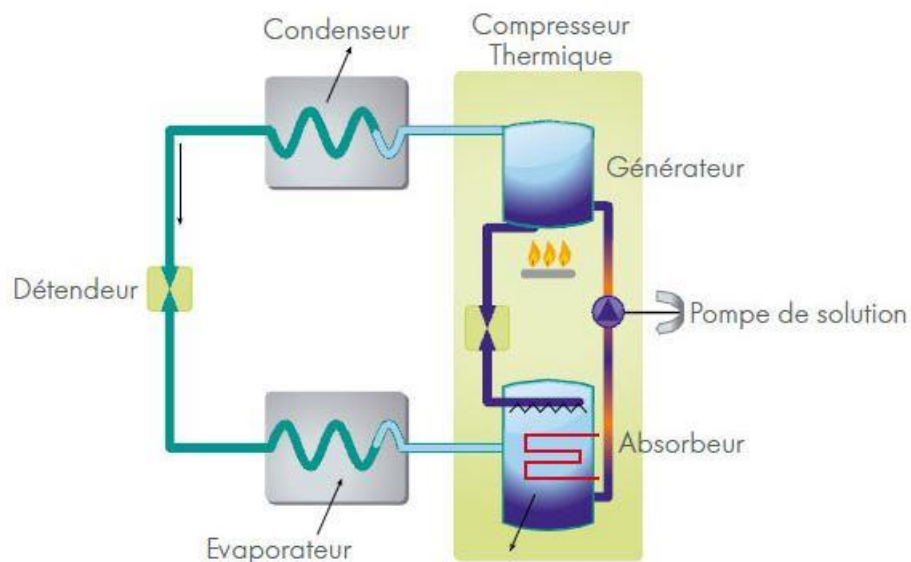
## ■ Régulation hybride



Source : <http://conseils.xpair.com/>

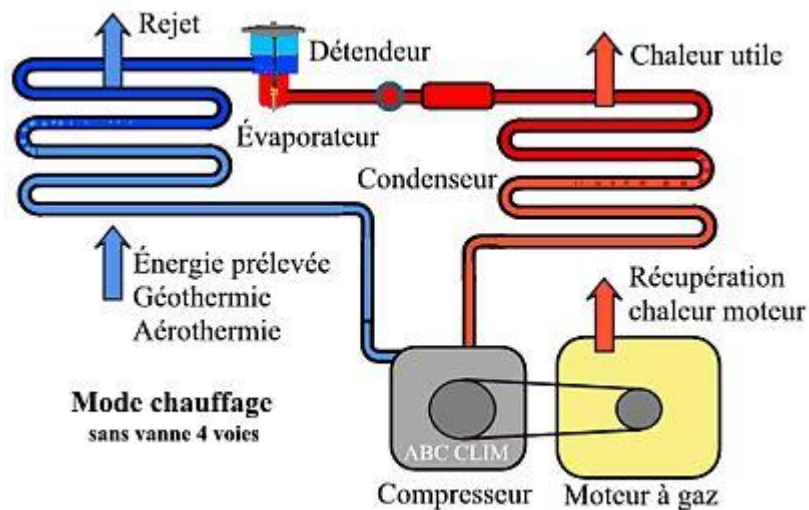
- Optimisation du confort et/ou du coût énergétique
- SPER = ? Attention au ratio temps de fonctionnement de la PAC/temps de fonctionnement de la chaudière !

- PAC dont le compresseur est remplacé par un « compresseur chimique » qui fonctionne avec de la chaleur (brûleur au gaz naturel).



- Chauffage et ECS (T jusque 65°C)
- PAC : 10 à 70 kW avec modulation de 50% de la puissance
- SPER = 1.12 à 1.26 (sur gaz naturel)

- PAC classique dont le compresseur est entraîné par un moteur à gaz. La récupération de chaleur du moteur permet de produire de l'eau à haute température



Source : <http://www.abcclim.net/>

- Chauffage et ECS (T jusque 65°C)
- PAC : 23 à 80 kW avec modulation de 10% de la puissance
- SPER = 1.2 (sur gaz naturel)

**Merci de votre attention**