

AATIC

LES POMPES À CHALEUR MODERNES : QUELLES PERFORMANCES EN ATTENDRE ?

Dr Ir Eric Dumont, Prof. Marc Frère – Faculté polytechnique de Mons

Journée d'étude "La pompe à chaleur : une réponse au futur énergétique dans le tertiaire et grands complexes ?" Bruxelles - 18 novembre 2008

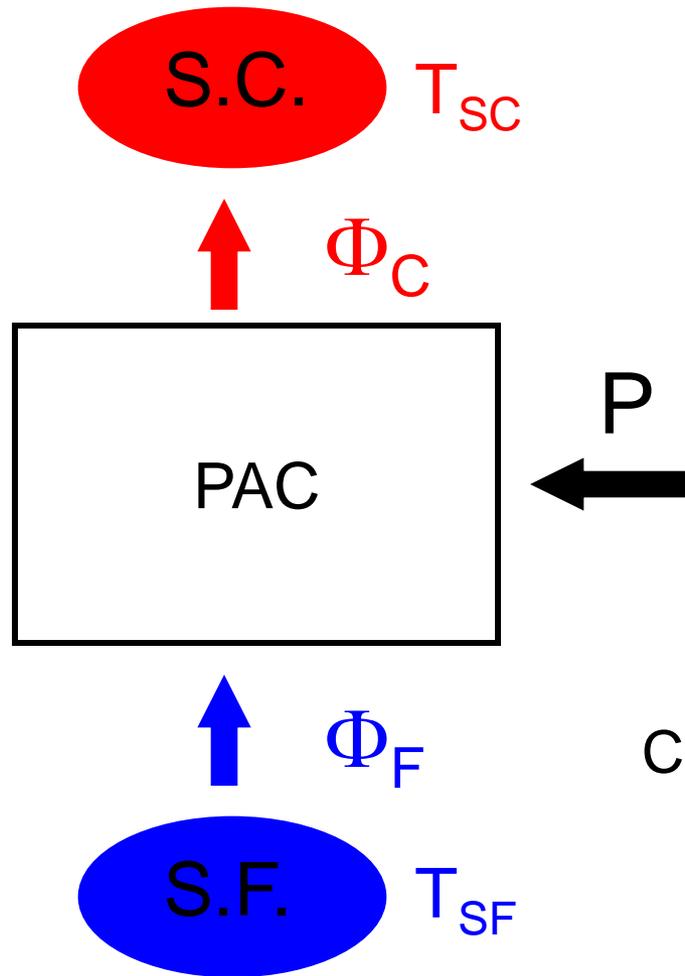


KONINKLIJKE TECHNISCHE VERENIGING VAN DE VERWARMINGS- EN VERLUCHTINGSNIJVERHEID EN DER AANVERWANTE TAKKEN
ASSOCIATION ROYALE TECHNIQUE DE L'INDUSTRIE DU CHAUFFAGE, DE LA VENTILATION ET DES BRANCHES CONNEXES

I. Plan

- Introduction
- Cycle thermodynamique “classique”
 - composants
 - sources
 - SPF attendus
 - SPF mesurés sur installations réelles
- Avenir
 - amélioration des composants
 - cycles modifiés
 - systèmes complexes
- Conclusion

II. Introduction



Utilisation assistée
d'une source
d'énergie gratuite

Coefficient de
performance :

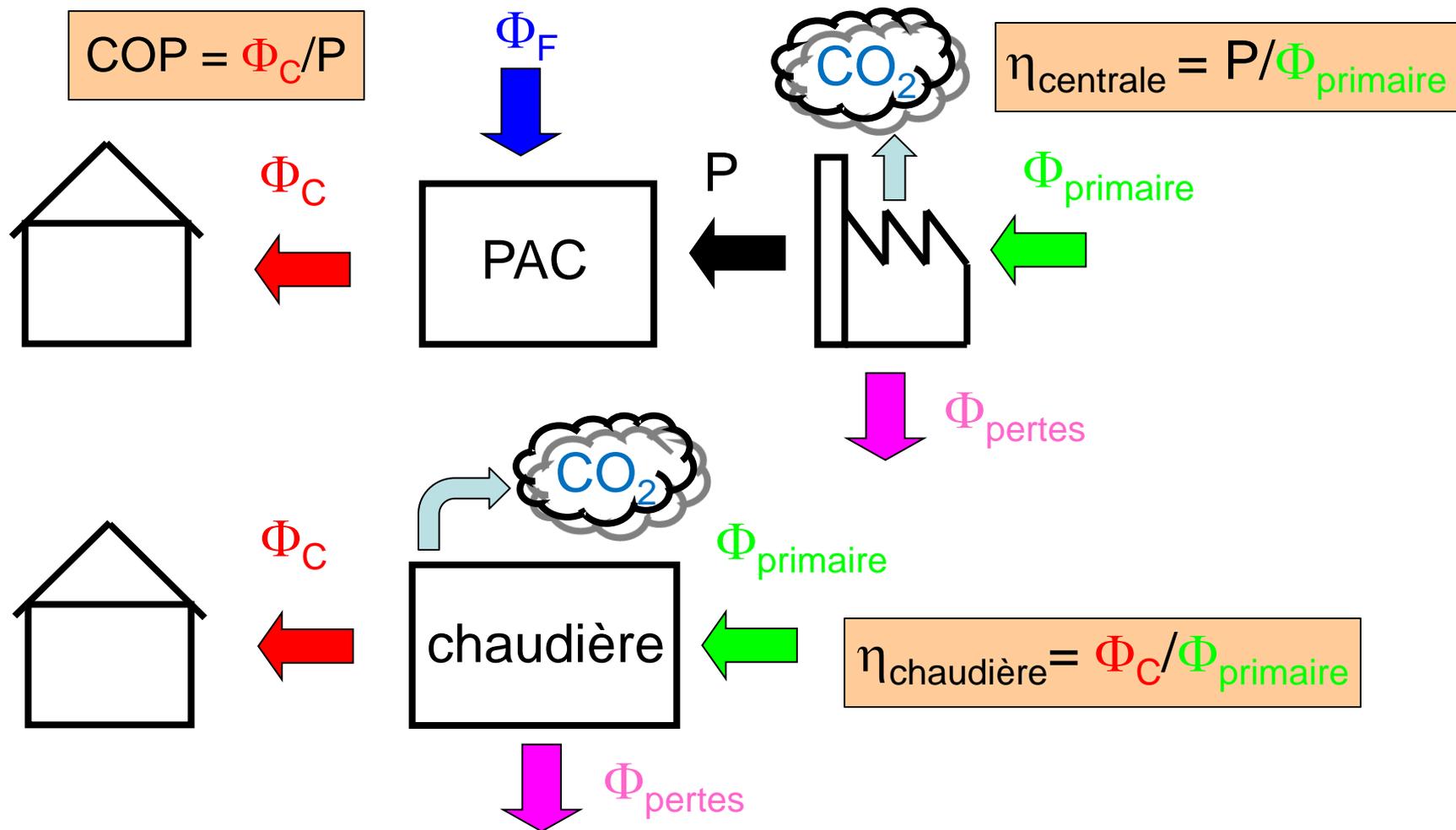
$$\text{COP} = \Phi_C / P$$

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

II. 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**

II. Introduction



II. 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)

$$\text{SPF} > 2.5$$

II. 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

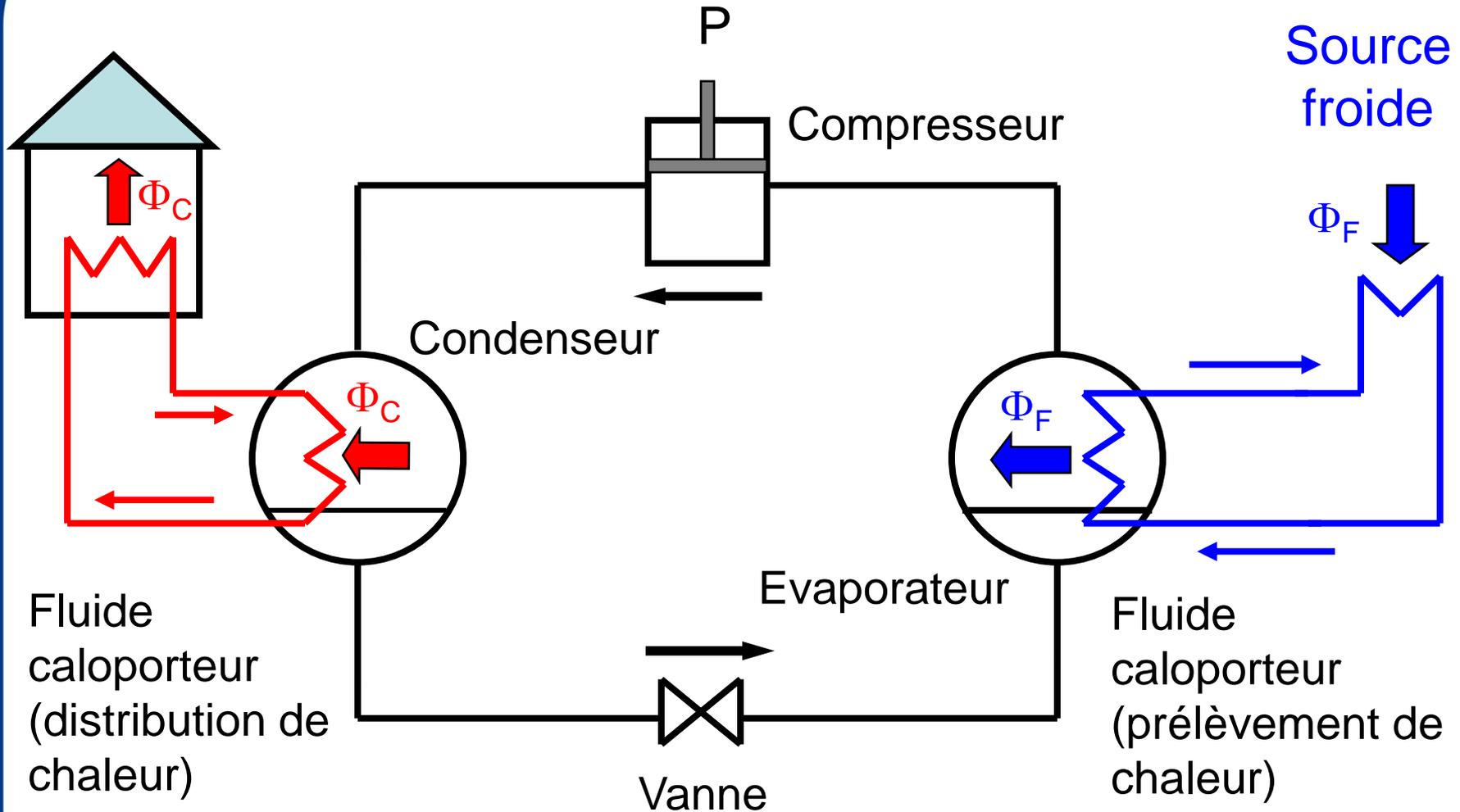
SPF > 1.8

- 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
 - en comparaison au gaz naturel :

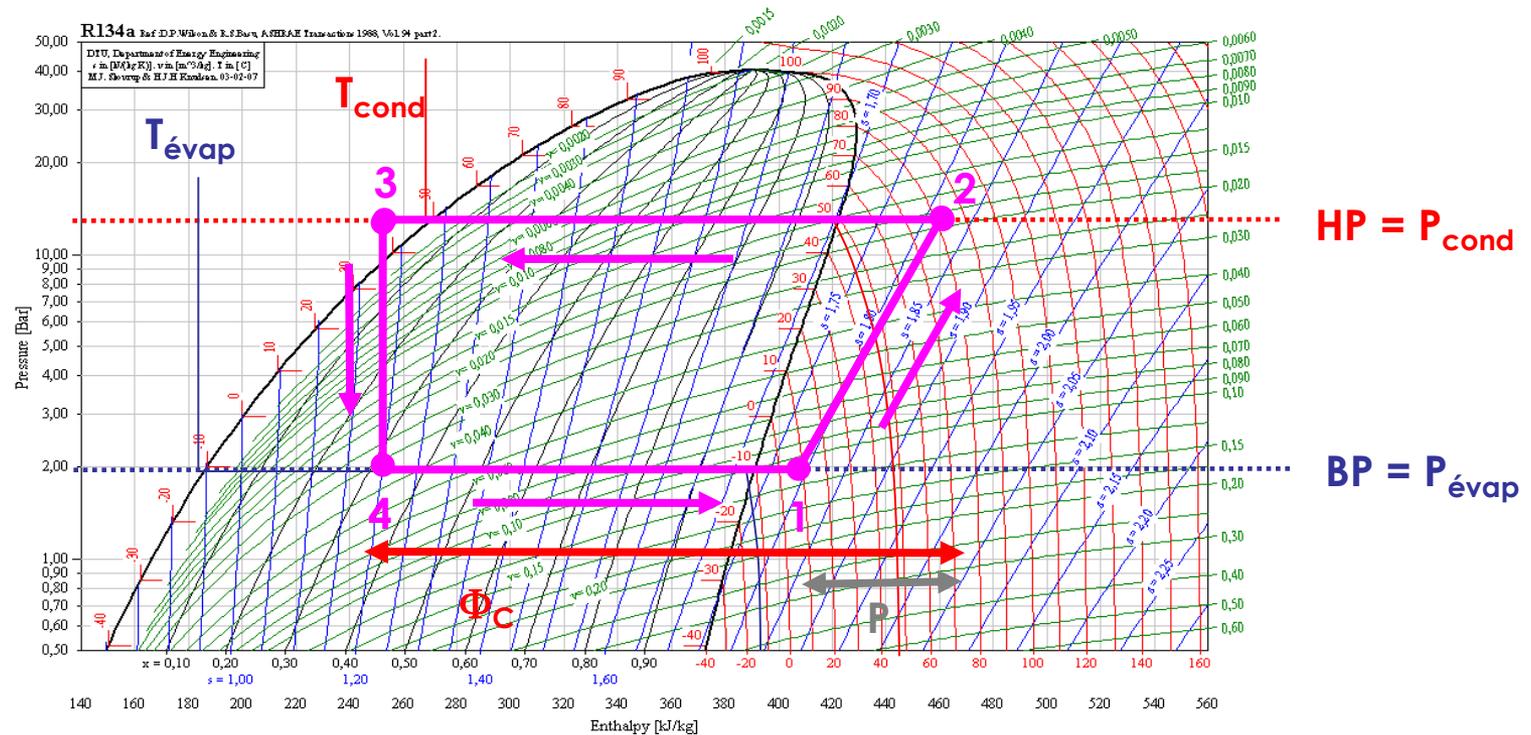
SPF > 1.9 (100% nuit, tarif domestique)

SPF > 2.5 (100% jour, tarif domestique)

III. Cycle classique



III. Cycle classique

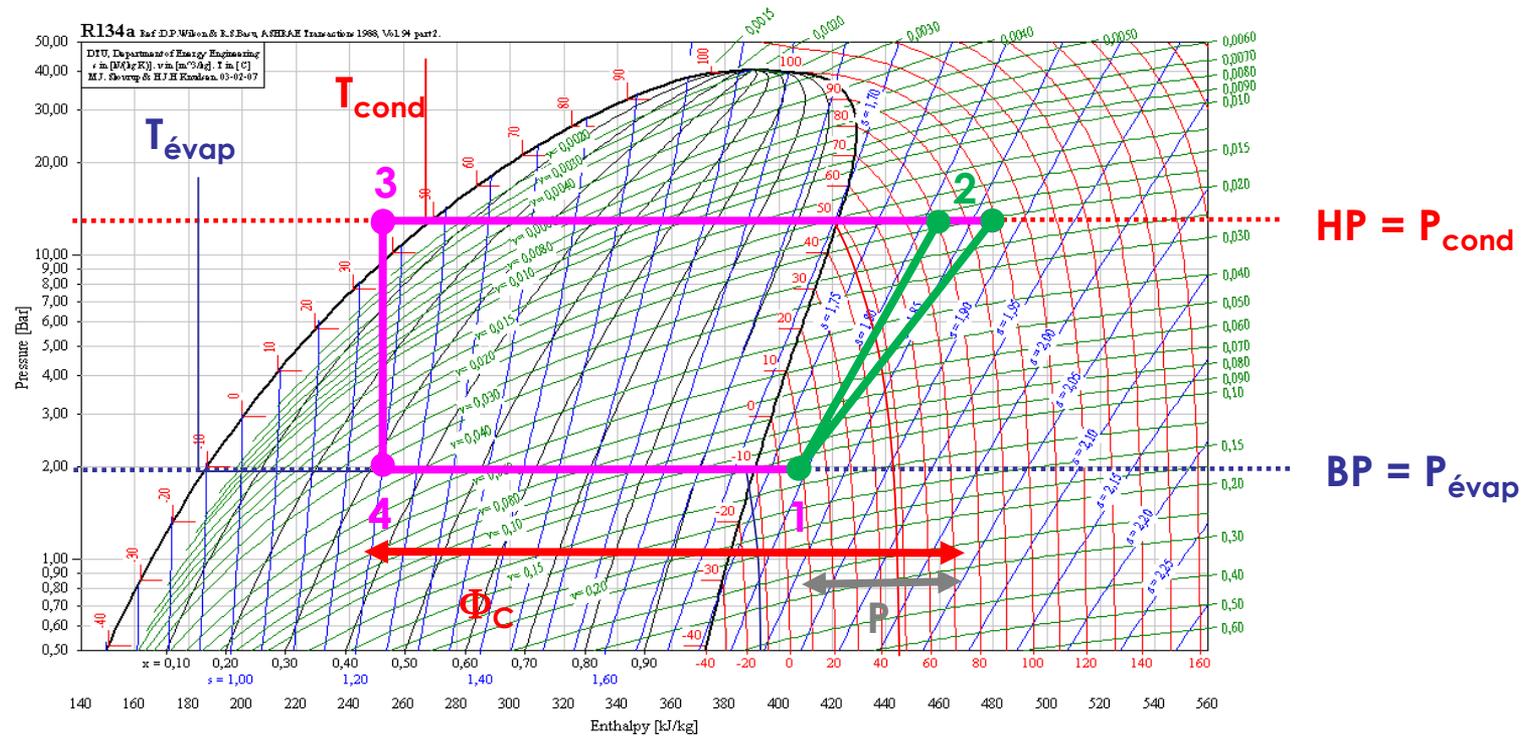


$$\Phi_C = \dot{q}_M (h_3 - h_2) \quad P = \dot{q}_M (h_2 - h_1)$$

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

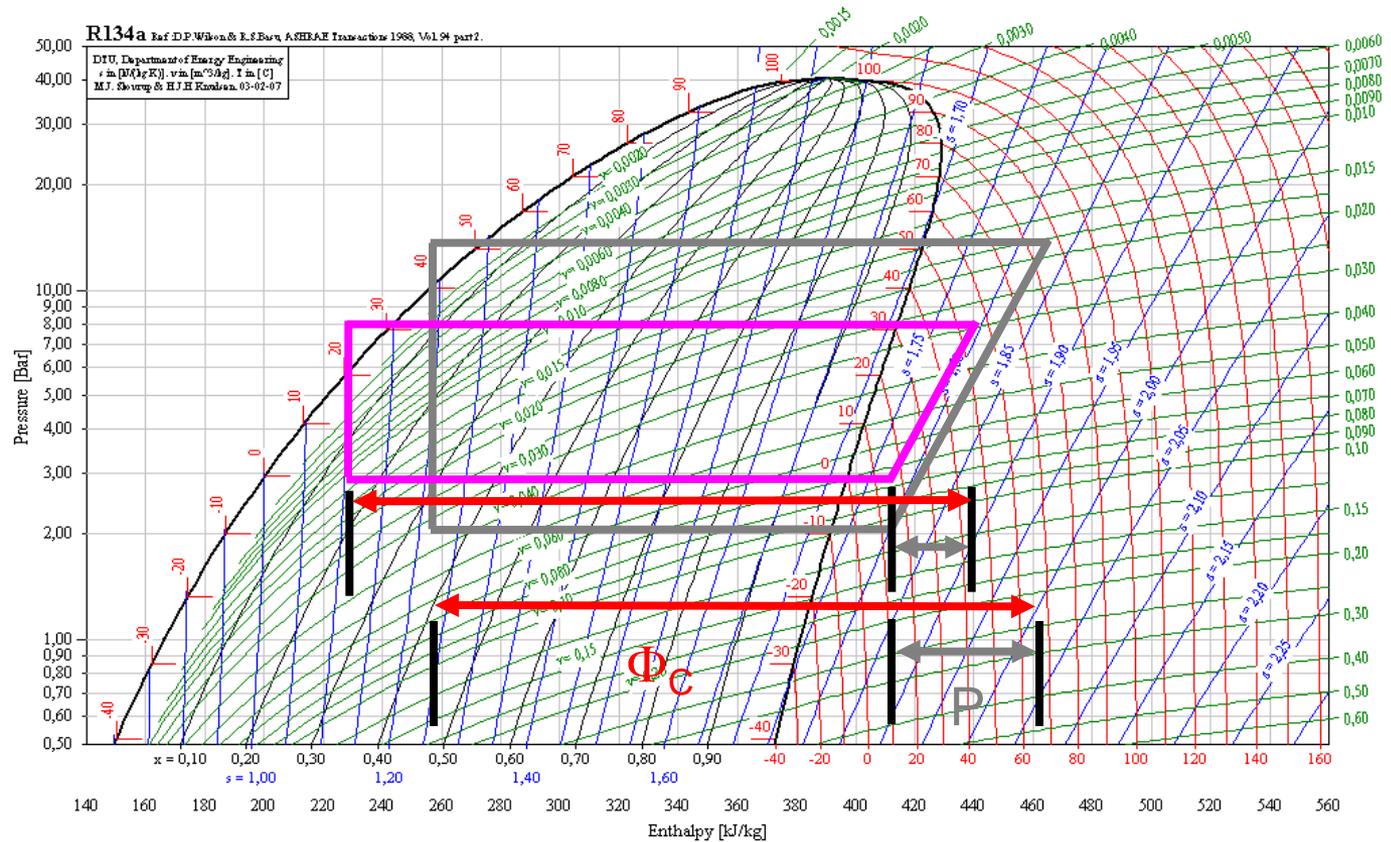


III. Cycle classique



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

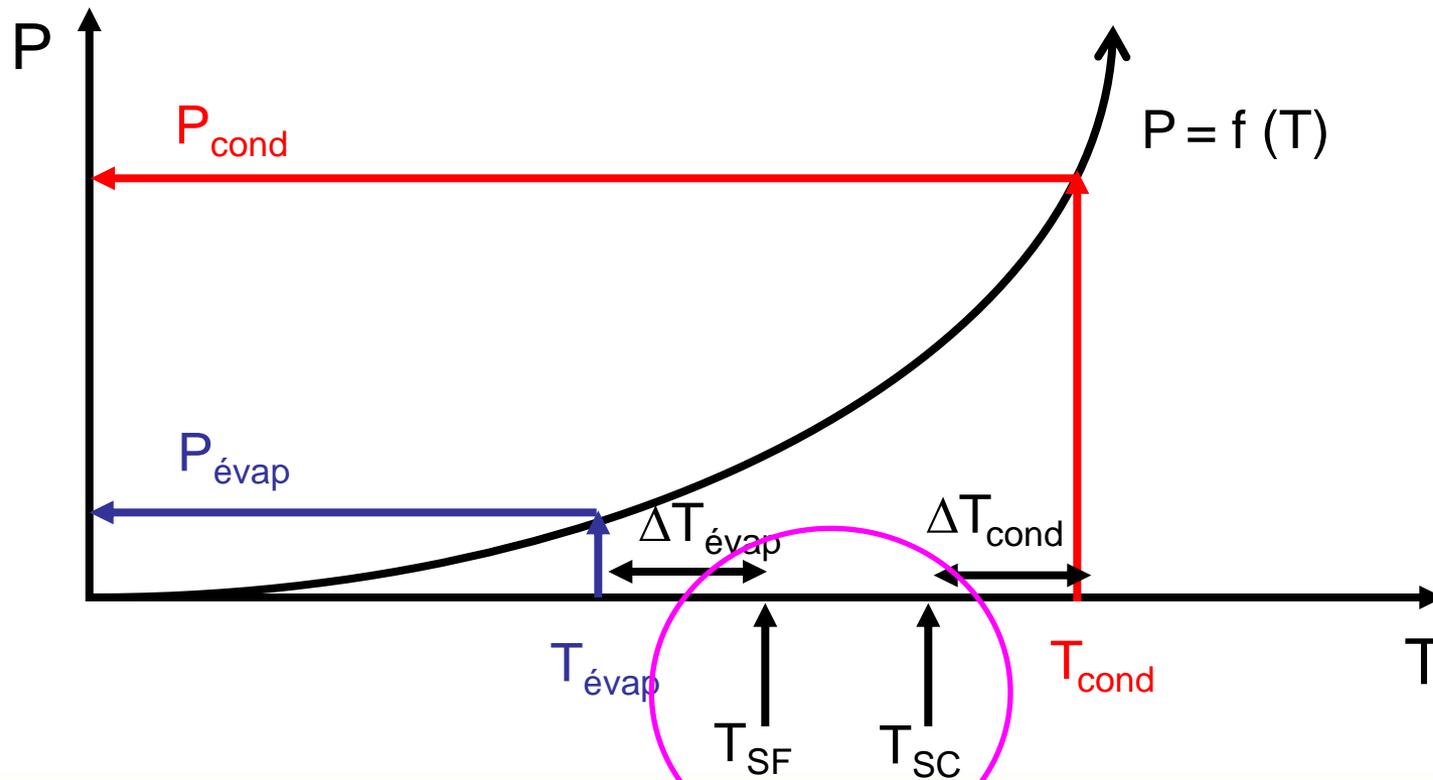
III. Cycle classique



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

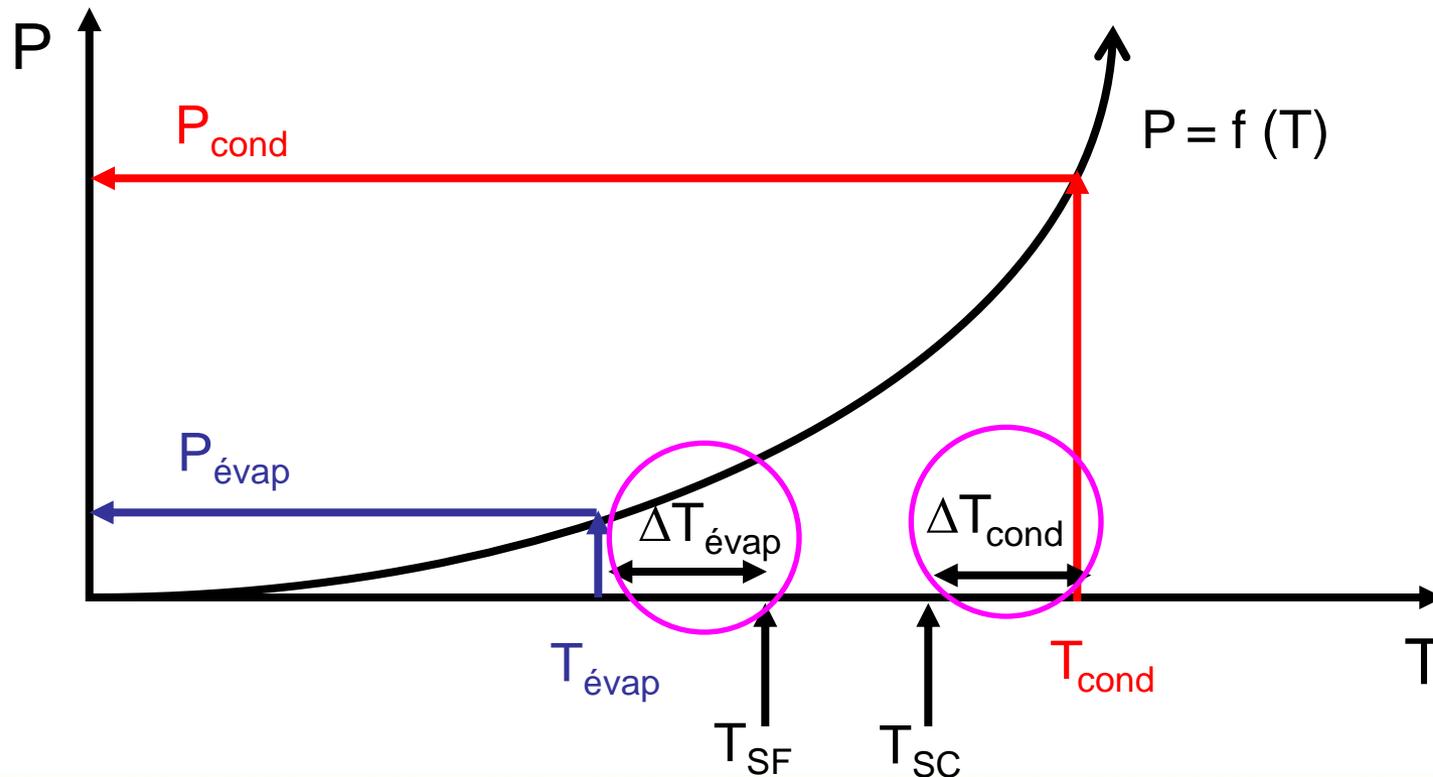
III. Cycle classique

- 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}



III. Cycle classique

- 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)



III. Cycle classique : compresseur – échangeurs de chaleur

- Rendement iso-s des compresseurs stable dans les années à venir :
 - petits compresseurs : 0.6
 - gros compresseurs : 0.7
- Echangeurs utilisés :
 - échangeurs tubes et virole
 - **échangeurs à plaques**
 - etc.
- Efficacité des échangeurs améliorées dans un proche avenir

III. Cycle classique : sources

- Sources utilisables pour les PAC dans les grands systèmes :
 - air extérieur : peu utilisé en Europe du Nord, présent aux USA là où existe une climatisation de type air/air
 - sol : très utilisé en Europe du Nord
 - eau : utilisé en Europe du Nord
- Fluides frigorigènes utilisés pour les PAC dans les grands systèmes :
 - (R22), R134a, R407C, R717, R290, R744

III. Cycle classique : sources

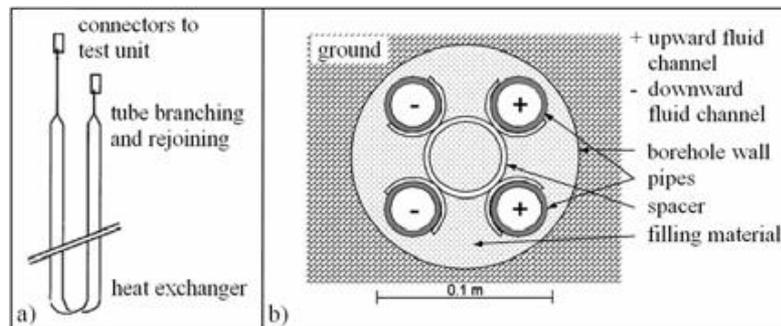
- Quelles performances attendre en terme de SPF pour les grands systèmes ?
- Calcul du COP avec hypothèses raisonnables pour différentes températures de sources :

COP réels	T eau/brine (°C)	T eau produite (°C)			Fluide	T eau produite (°C)			
		35	45	55		35	45	55	
	0	R134a	3,93	3,19	2,67	R407C	3,58	3,01	2,51
	5	R134a	4,46	3,54	2,92	R407C	4,06	3,33	2,73
	10	R134a	5,16	3,98	3,21	R407C	4,68	3,73	3,00
	15	R134a	6,10	4,53	3,57	R407C	5,52	4,23	3,32

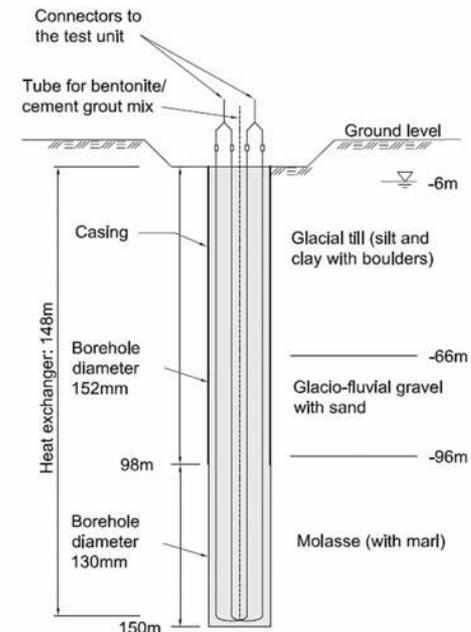
- $2.5 < \text{SPF} < 6.1$
- les critères énergétique, environnemental et économique devraient être remplis

III. Cycle classique : le sol comme source froide

- L'utilisation du sol se fait le plus souvent pour les grands complexes avec des **sondes verticales (sondes géothermiques)**
- Le SPF dépendra du type de sol, de la longueur et du nombre de sondes
- Les sondes verticales fournissent une saumure (brine) qui lors de la période de chauffe en Europe du Nord varie entre 0 et 7 °C



Source : EPFL



III. Cycle classique : le sol comme source froide

COP réels		T eau produite (°C)			T eau produite (°C)			
T eau/brine (°C)	Fluide	35	45	55	Fluide	35	45	55
0	R134a	3,93	3,19	2,67	R407C	3,58	3,01	2,51
5	R134a	4,46	3,54	2,92	R407C	4,06	3,33	2,73
10	R134a	5,16	3,98	3,21	R407C	4,68	3,73	3,00
15	R134a	6,10	4,53	3,57	R407C	5,52	4,23	3,32

$2.5 < SPF < 5.1$

Sondes géothermiques				
Type de bâtiment	Pays	Année	Fluide	SPF
Poytechnical Institute	Espagne	2003	R290	3,46
Town Hall	Grèce	2003	R22	4,00
Health resort	Pologne	2005	R407C	2,62
Airport	Suisse	2005	R717	3,90
Production Hall	Allemagne	2006	?	4,60
Office building	Allemagne	2007	?	4,30
Multiple Residences	Belgique	2008	R134a	3,50

III. Cycle classique : l'eau comme source froide

- L'utilisation de l'eau comme source de chaleur peut se faire par **pompage sur la nappe phréatique**, **par pompage dans une rivière** ou par **utilisation d'eau de rejet de station d'épuration**
- L'utilisation de l'eau de mer est aussi envisageable

- Température de l'eau en Europe du Nord :
 - eau de rivière ou de mer : 10 °C
 - eau de nappe phréatique : 10 à 15 °C
 - eau de rejet : 10 à 15 °C

III. Cycle classique : l'eau comme source froide

COP réels	T eau/brine (°C)	T eau produite (°C)			Fluide	T eau produite (°C)		
		35	45	55		35	45	55
0	R134a	3,93	3,19	2,67	R407C	3,58	3,01	2,51
5	R134a	4,46	3,54	2,92	R407C	4,06	3,33	2,73
10	R134a	5,16	3,98	3,21	R407C	4,68	3,73	3,00
15	R134a	6,10	4,53	3,57	R407C	5,52	4,23	3,32

$$3.0 < \text{SPF} < 6.1$$

Aquifères/eau de rejet				
Type de bâtiment	Pays	Année	Fluide	SPF
Office Building	France	1998	R134a	3,83
Office Building	Grèce	2002	R22	4,13
District heating	Norvège	2005	R134a	2,83
Hospital	Belgique	2005	R22	5,50
Swimming pool	Italie	2005	?	5,50
Town Hall	France	2006	?	4,10
Workshop	Allemagne	2006	R407C	5,40
District Heating	Finlande	2006	R134a	3,51

III. Cycle classique : comparaison eau/sol

- L'eau permet d'atteindre des SPF plus élevés vu les niveaux de température plus élevés que la saumure réchauffée par le sol (5 °C de plus)
 - Les "sources" d'eau sont plus rares (rivière, eau de mer, eau de rejet) ou plus difficiles à atteindre (nappe phréatique)
 - La législation est très contraignante pour le rejet d'eau dans les nappes et les rivières
-
- Le sol permet d'atteindre des SPF un peu moins élevés (0.5 en moins en moyenne)
 - Le sol est disponible partout
 - Pas de législation particulière pour le puisage de chaleur dans le sol (sauf forage)
 - Le sol permet le stockage inter-saisonnier de chaleur (en théorie)

IV. Avenir

- COP idéaux pas atteints par les cycles classiques :

COP idéaux	T eau/brine (°C)	Fluide	T eau produite (°C)			Fluide	T eau produite (°C)		
			35	45	55		35	45	55
0		R134a	6,41	5,39	4,69	R407C	6,41	5,39	4,69
5		R134a	7,23	5,94	5,09	R407C	7,23	5,94	5,09
10		R134a	8,29	6,61	5,56	R407C	8,29	6,61	5,56
15		R134a	9,72	7,46	6,13	R407C	9,72	7,46	6,13

COP réels/COPid (%)	T eau/brine (°C)	Fluide	T eau produite (°C)			Fluide	T eau produite (°C)		
			35	45	55		35	45	55
0		R134a	61	59	57	R407C	56	56	54
5		R134a	62	60	57	R407C	56	56	54
10		R134a	62	60	58	R407C	56	56	54
15		R134a	63	61	58	R407C	57	57	54

- COP réel = 55 à 65 % du COP idéal (maximum)

IV. Avenir

- L'amélioration du SPF passe par :
 - 1) l'amélioration du transfert de chaleur :
 - amélioration des efficacités des échangeurs
 - utilisation de caloducs (heat pipes) dans le sol

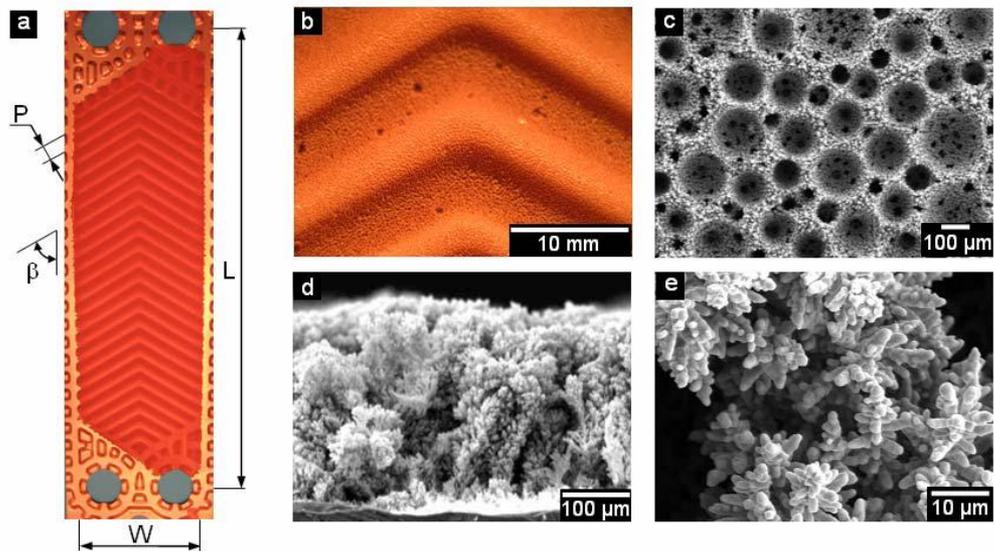
 - 2) la gestion de la vitesse du compresseur :
 - compresseurs à vitesse variable

 - 3) l'utilisation de cycles modifiés :
 - cycle à compression étagée
 - compresseurs à injection
 - cycle transcritique au CO₂
 - cycle avec récupération de l'énergie de détente

 - 4) l'utilisation de PAC dans des systèmes complexes (combi-systèmes)

IV. Avenir : échangeurs de chaleur

- Efficacités améliorées dans un proche avenir :
 - échangeurs à plaques améliorés
 - tubes avec promoteurs de turbulence
 - échangeurs à micro-ailettes
 - etc.



Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008

IV. Avenir : caloducs

- Utilisation de caloducs (heat pipes) au CO₂ dans le sol (2005) :



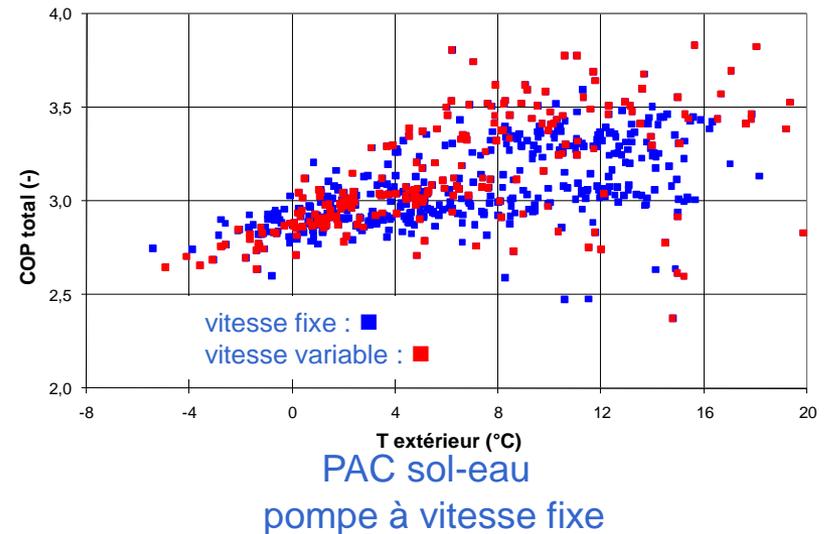
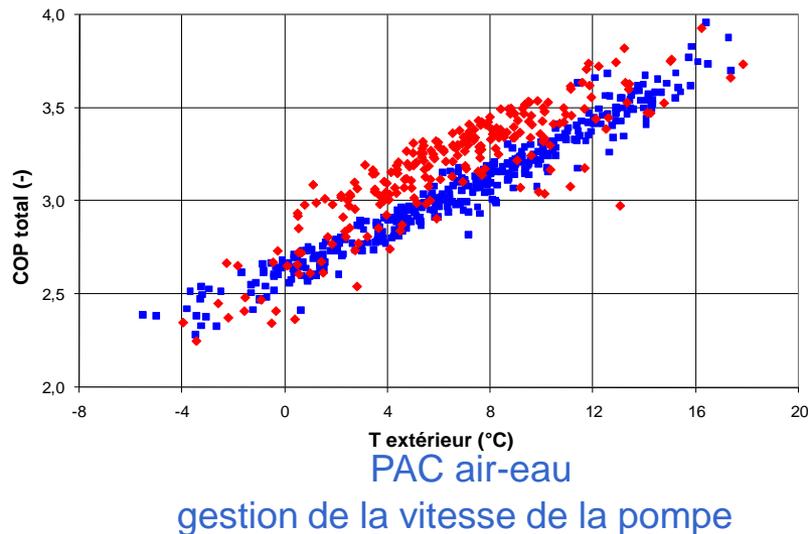
Evaporateur

- 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

IV. Avenir : compresseurs à vitesse variable

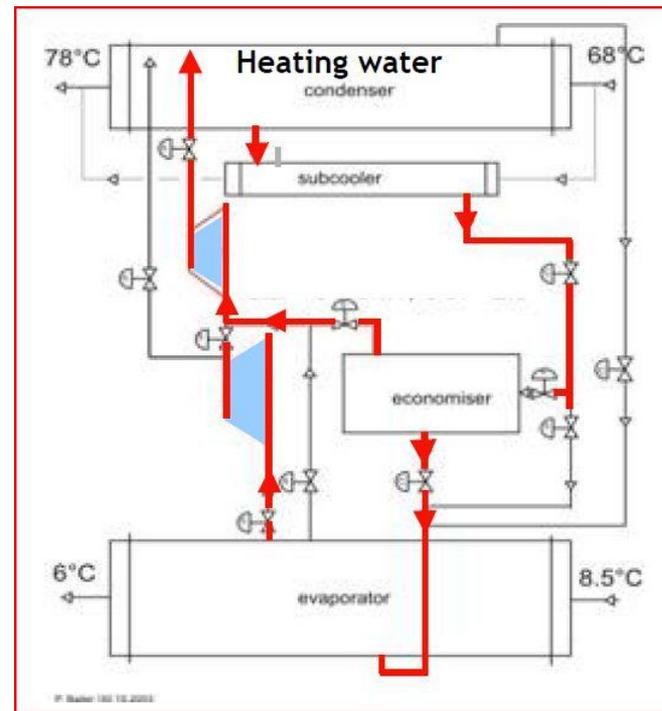
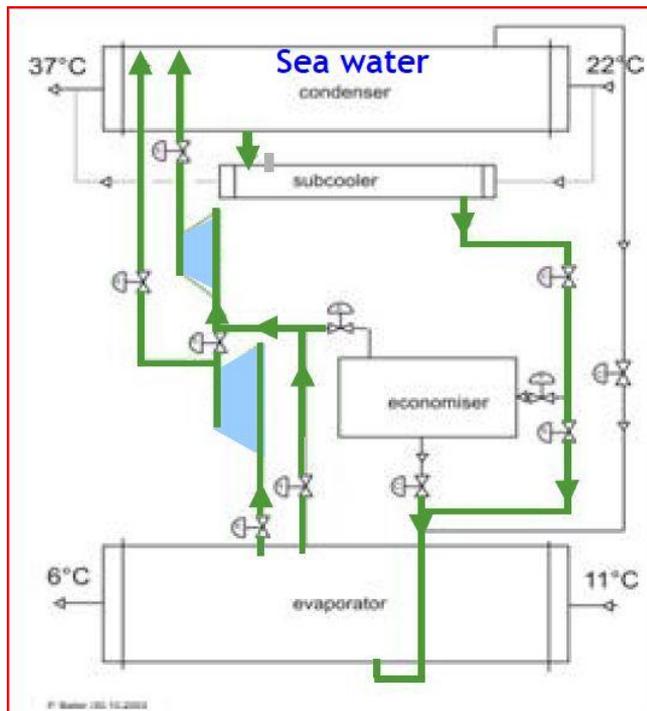
- Compresseurs à vitesse variable (inverter) :
 - permet d'augmenter le SPF de 0.2 à 0.3 si gestion intelligente des auxiliaires (vitesse variable des pompes et ventilateurs)



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

IV. Avenir : cycle à compression étagée

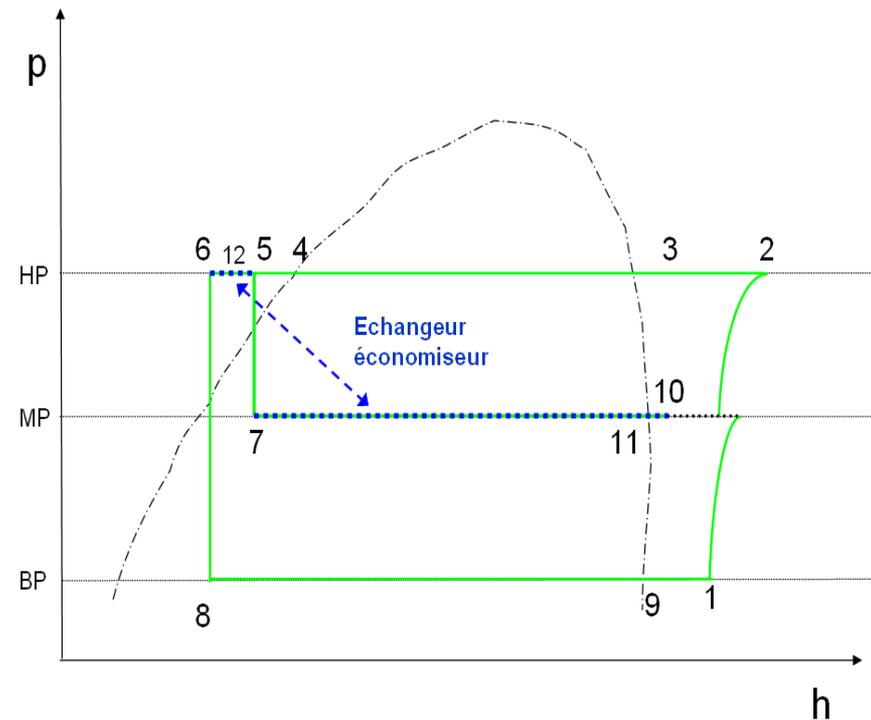
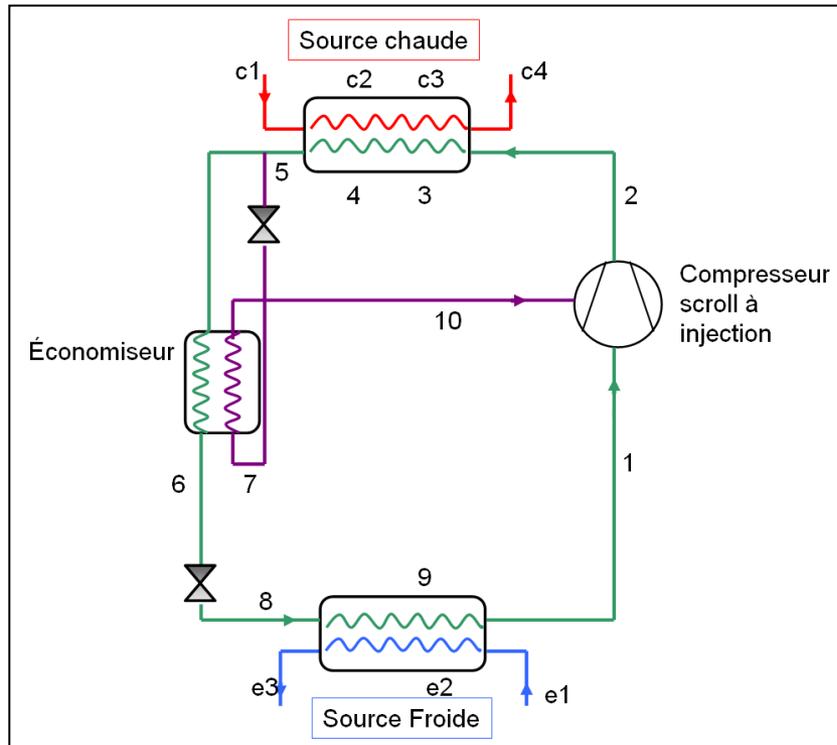
- District Heating and Cooling à Stockholm (Suède) (2002) :



Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008

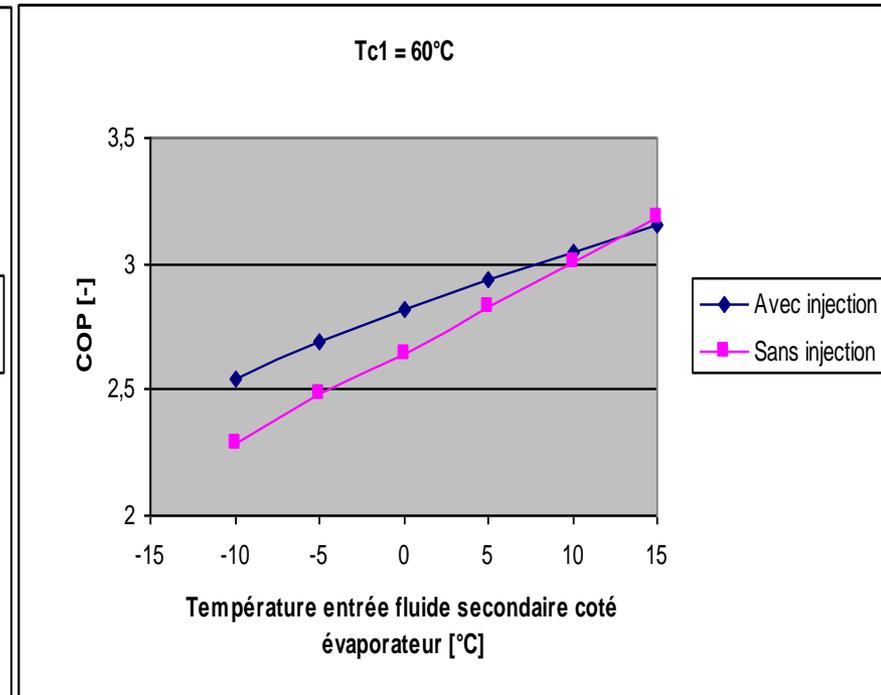
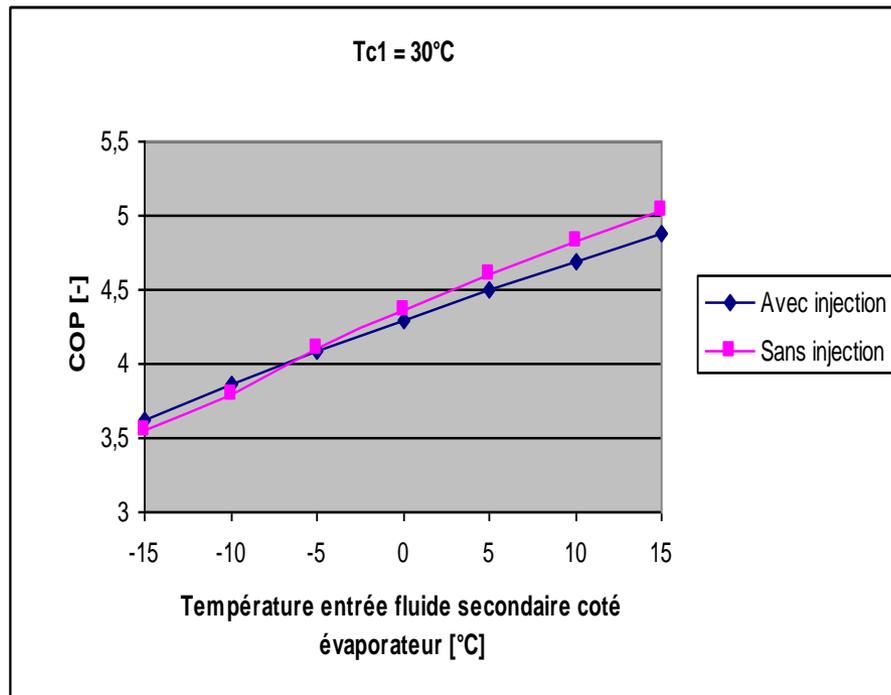
IV. Avenir : compresseurs à injection

- Lancement sur le marché domestique
- Tertiaire ?



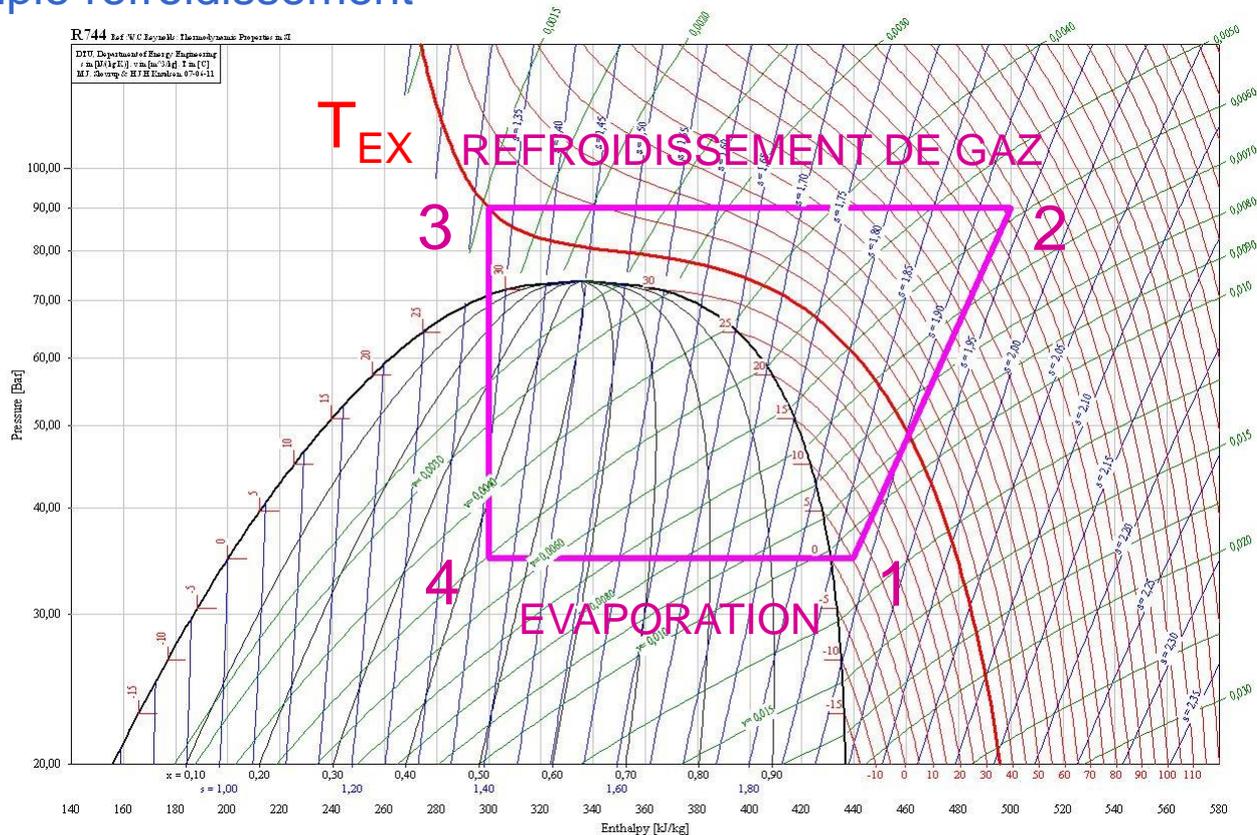
IV. Avenir : compresseurs à injection

- Utile pour les climats froids et/ou pour la production d'eau chaude à haute température



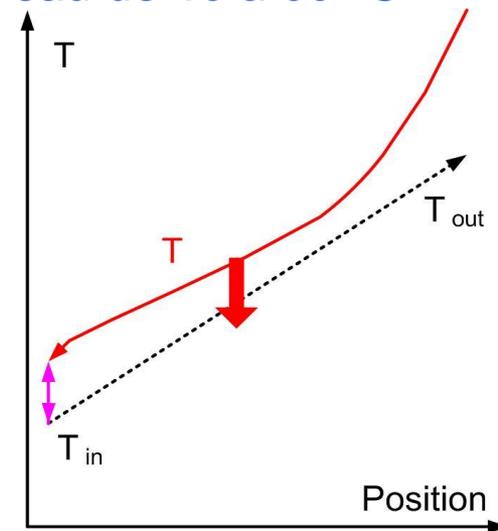
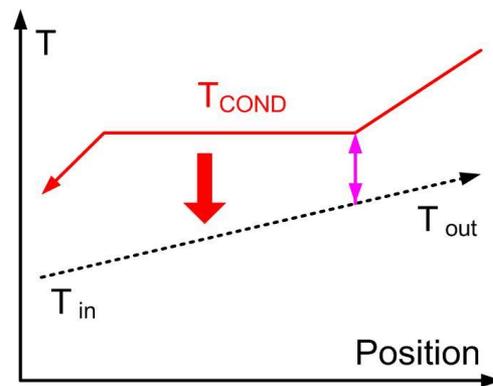
IV. Avenir : cycle transcritique au CO₂

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



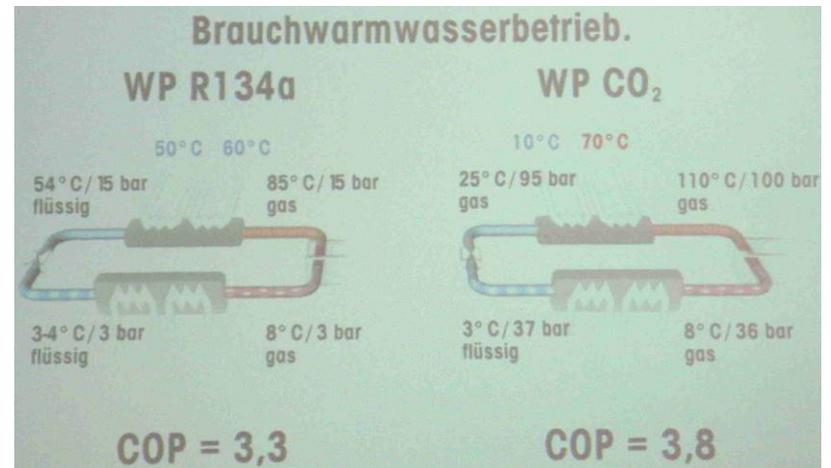
IV. Avenir : cycle transcritique au CO₂

- 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



IV. Avenir : cycle transcritique au CO₂

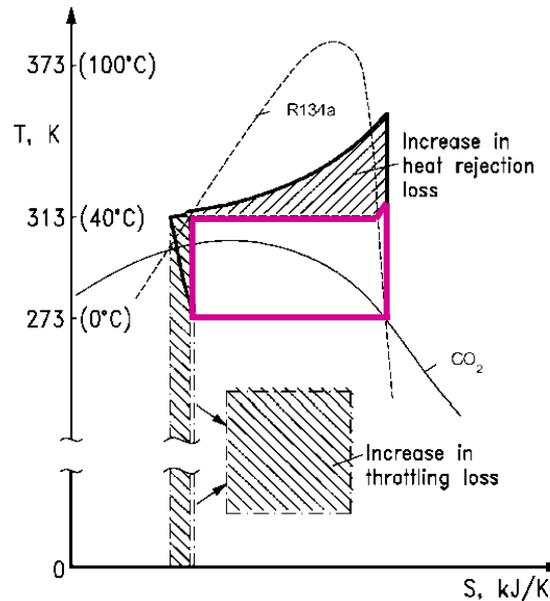
- Uniquement production d'eau chaude sanitaire sur le marché (Japon, Suisse)
- Projets pour chauffage de bâtiments
- Centrale de production d'eau chaude sanitaire à 70 °C installée dans un centre sportif à Zürich (Suisse) (2005) :



Source : 9th IEA Heat Pump Conference 2008 - EWZ

IV. Avenir : cycle avec récupération de l'énergie de détente

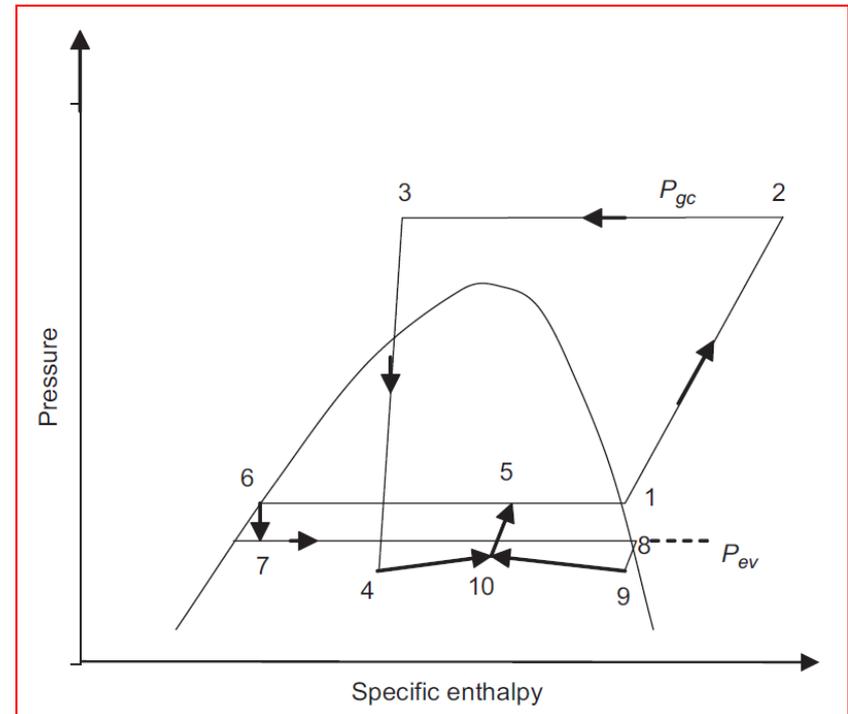
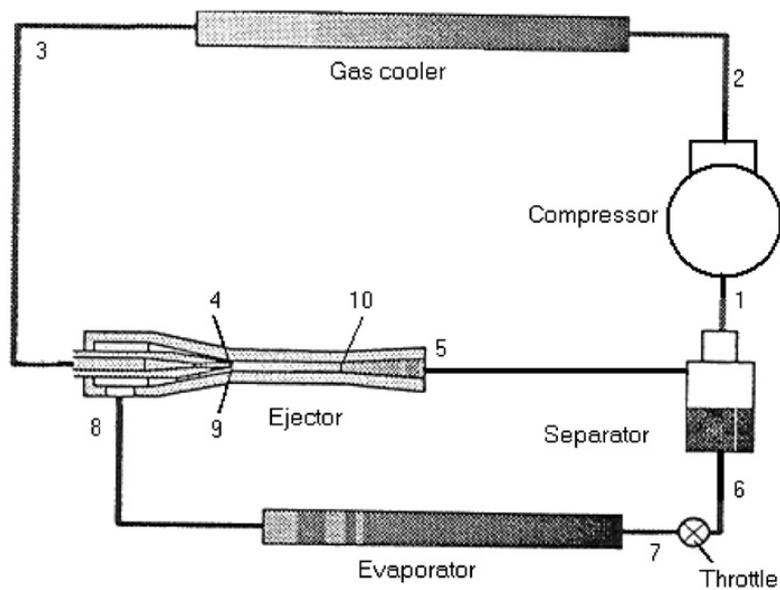
- La récupération de l'énergie de détente n'est intéressante que pour les cycles qui ont une détente fort irréversible : cycle au CO₂ transcritique



- La récupération peut utiliser un élément “tournant” (piston, turbine, etc.) ou un élément “statique” (éjecteur).
- Uniquement prototypes

IV. Avenir : cycle avec récupération de l'énergie de détente

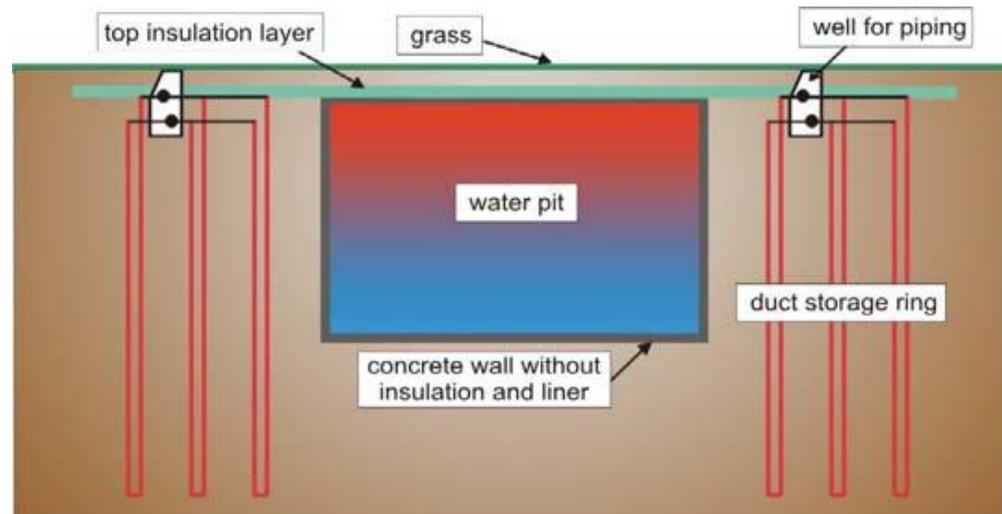
▪ Cycle avec éjecteur :



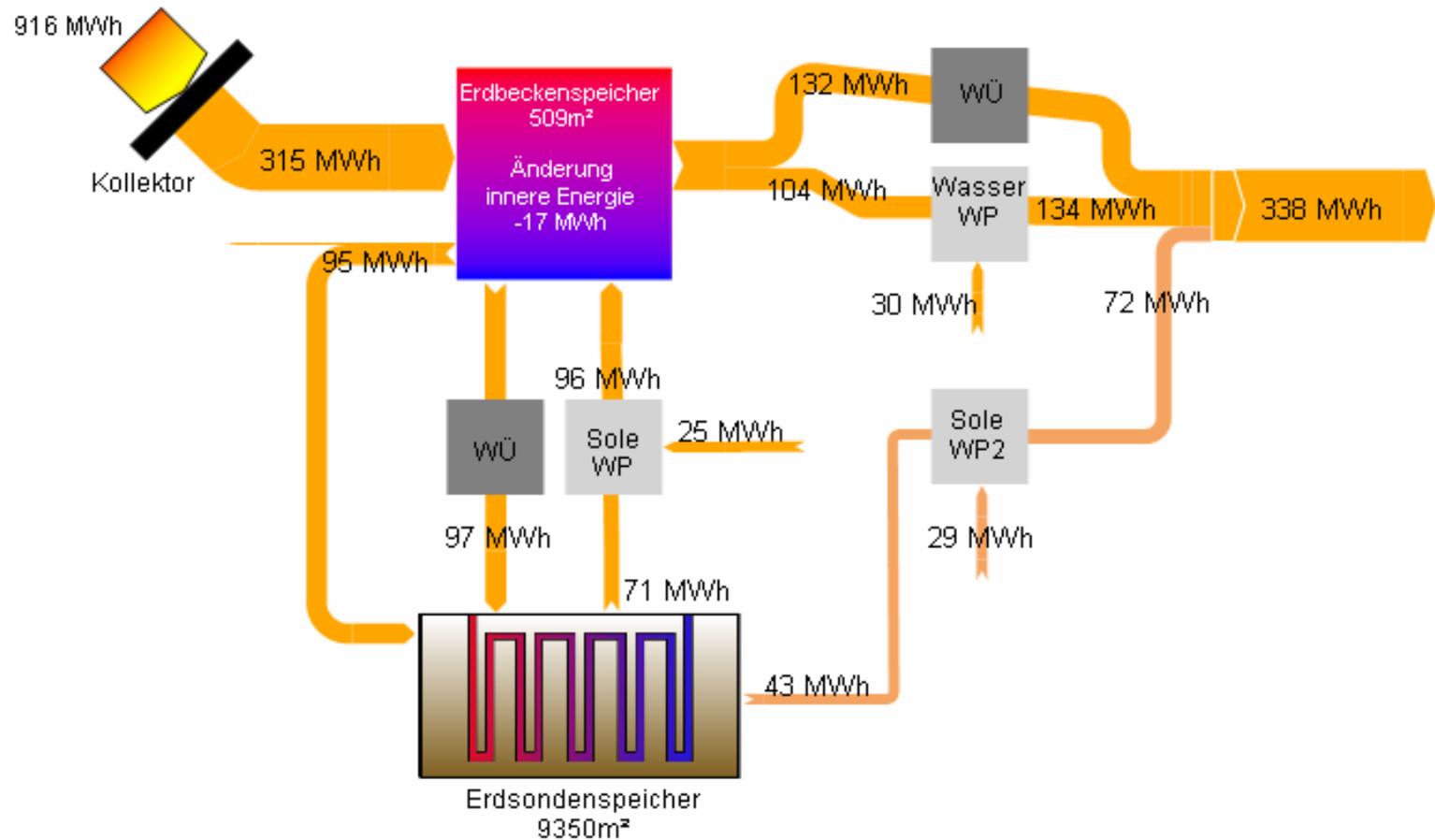
Source : Energy (2008), doi : 10.1016/j.energy.2008.04.007

IV. Avenir : combi-systèmes

- Combinaison de capteurs solaires + PAC + stockage
- Exemple : 30 logements (Attenkirchen-Allemagne) (2002) :
 - Demande thermique : 385 MWh/an
 - Surface de capteurs solaires : 836 m²
 - Energie solaire incidente (estimation) : 916 MWh
 - Stockage (eau, enterré) : 500 m³
 - Stockage (sol) : 10500 m³, 90 forage de 30 m



IV. Avenir : combi-systèmes



IV. Avenir : combi-systèmes



Source : Ecostock Thermal Energy
Storage Conference 2006



V. Conclusion et perspectives

- Le SPF des systèmes actuels installés dans les grands complexes est déjà satisfaisant suivant les 3 critères énoncés (3.4 à 5.5)
- L'amélioration future du SPF des PAC viendra :
 - d'une amélioration des composants (compresseur, échangeurs, etc.)
 - de l'utilisation de cycles modifiés et de combinaisons de PAC avec d'autres systèmes (panneaux solaires, stockages, etc.)
 - d'une gestion intelligente du fonctionnement du système
- L'amélioration du SPF n'est pas l'unique facteur :
 - la production combinée ou alternée de froid et de chaleur offre un potentiel d'économie d'énergie important
 - les coûts d'investissements doivent également être pris en compte