

Les pompes à chaleur en rénovation de bâtiment

Dr Ir Eric Dumont

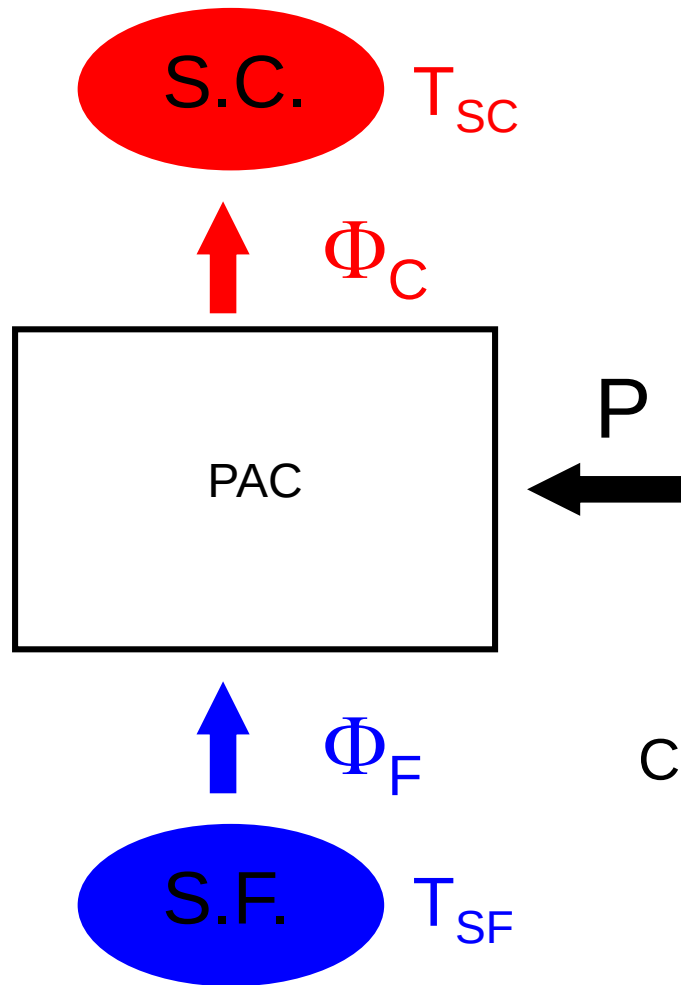
Université de Mons

Faculté Polytechnique, Service de Thermodynamique

Contact : eric.dumont@umons.ac.be

Retour aux sources...

Retour aux sources...



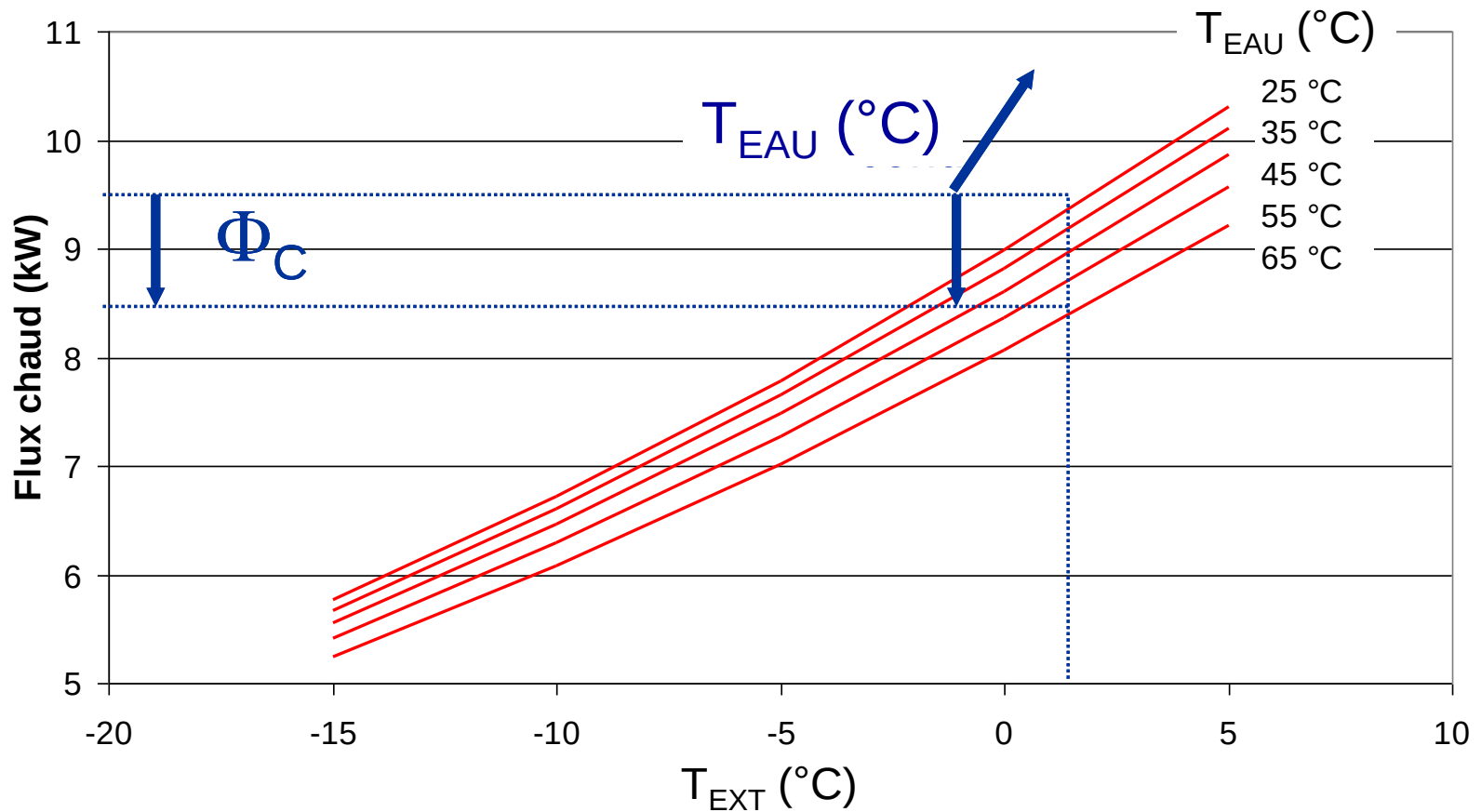
Utilisation assistée
d'une source
d'énergie gratuite

Coefficient de
performance :

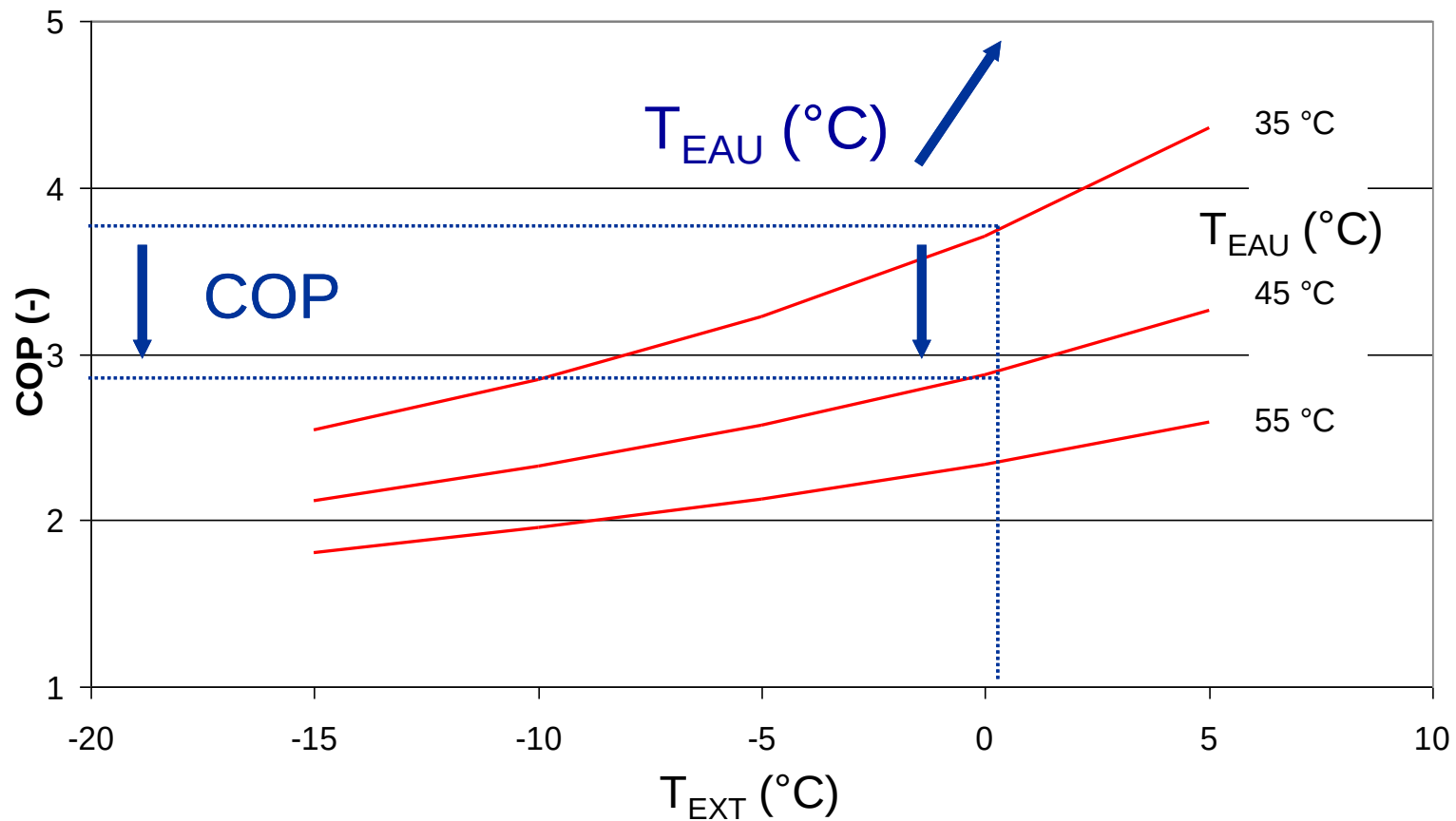
$$\text{COP} = \Phi_C / P$$

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

Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une PAC



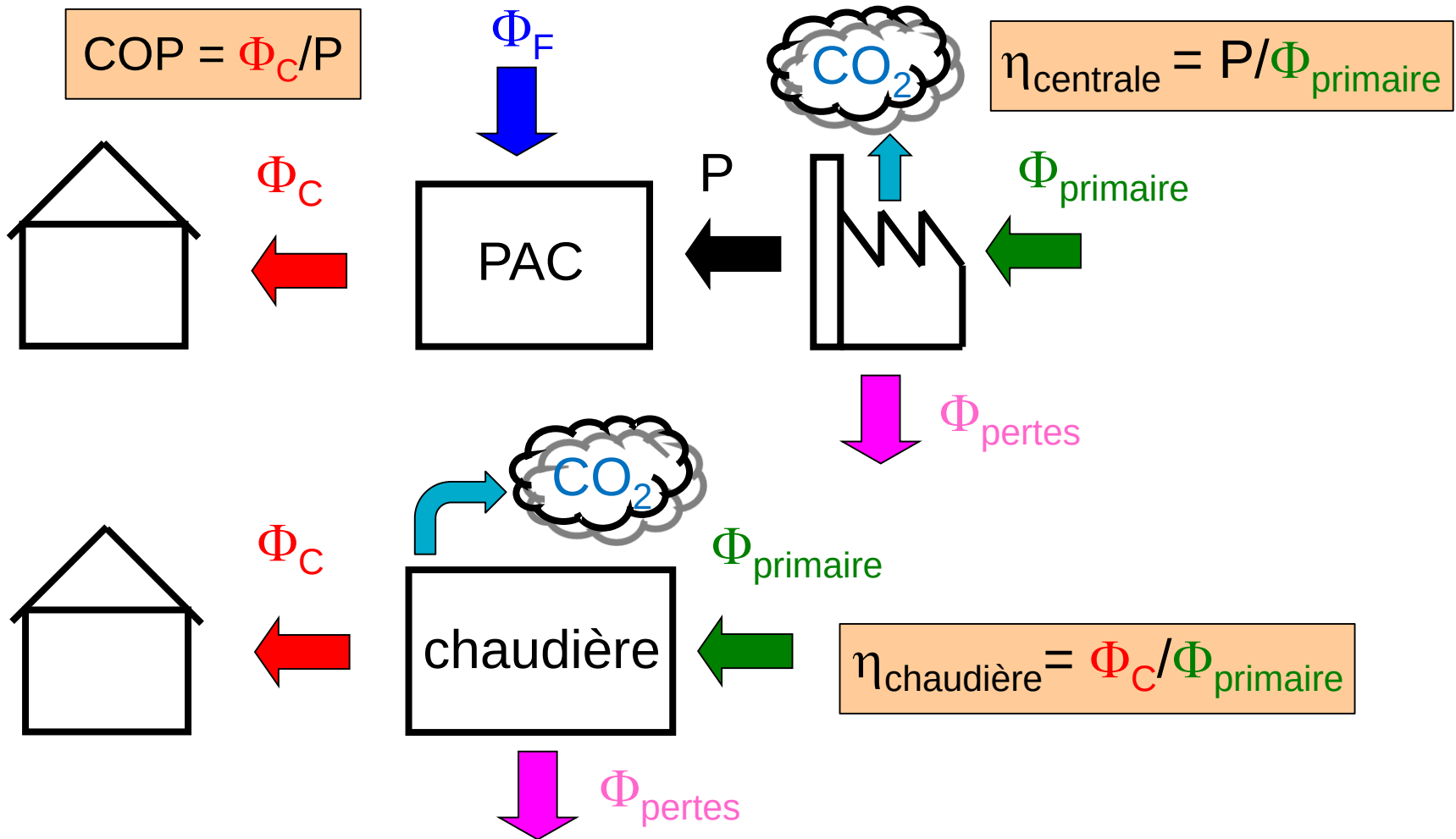
Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une PAC



Retour aux sources...

- La thermodynamique étant vraie partout... une PAC de technologie donnée sera d'autant plus efficace qu'elle utilisera une source de chaleur à haute température et un système de distribution de chaleur à basse température. La logique voudrait que :
 - on privilégie les sondes géothermiques plutôt que l'air comme source de chaleur
 - on privilégie le plancher chauffant par rapport à l'air chaud pulsé et aux radiateurs haute température
 - on privilégie la technologie de PAC la plus performante (compresseur et échangeurs de chaleur performants)
- D'autres préoccupations entrent en jeu :
 - le coût de la PAC
 - les coûts d'investissement (cf coût de forage pour sondes géothermiques)
 - le niveau d'isolation du bâtiment (ancien – rénové – neuf) qui ne permet pas toujours de placer du plancher chauffant
 - la climatisation du bâtiment (secteur tertiaire)
 - l'aspect énergie renouvelable

Aspect énergie renouvelable



Aspect énergie renouvelable

- Intérêt énergétique (gain en énergie primaire) :

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

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

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

- On peut aussi définir le PER (Primary Energy Ratio) :

$$\text{PER} = \Phi_C / \Phi_{\text{primaire}} = \eta_{\text{centrale}} \text{COP}$$

- 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)

Aspect énergie renouvelable

- Les pompes à chaleur (PAC) peuvent jouer un rôle dans la production d'énergie renouvelable en Europe (perspective 2020 : 13%)
- Mais... Une Directive Européenne impose une efficacité minimale pour les PAC si elles veulent être considérées comme sources d'énergie renouvelable
- PAC efficace ? → économie de 15% d'énergie primaire (PER = 1.15)
 - Facile à réaliser dans de nouveaux bâtiments
 - Possible dans des vieux bâtiments (pas énergétiquement efficaces) ? (majorité du stock de bâtiments en Belgique)

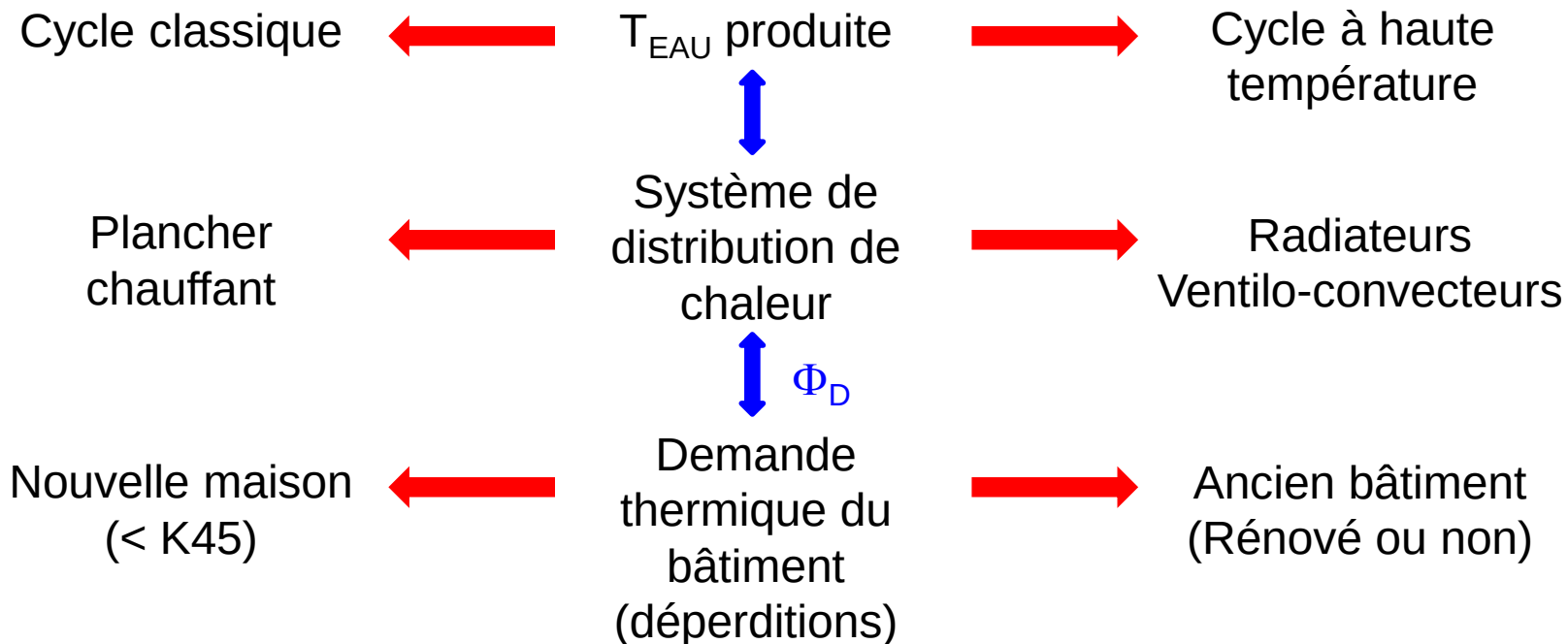
SPF > 2.88 avec $\eta_{\text{Centrale}} = 0.400$

SPF > 2.53 avec $\eta_{\text{Centrale}} = 0.455$

PAC et rénovation

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 !



PAC et rénovation

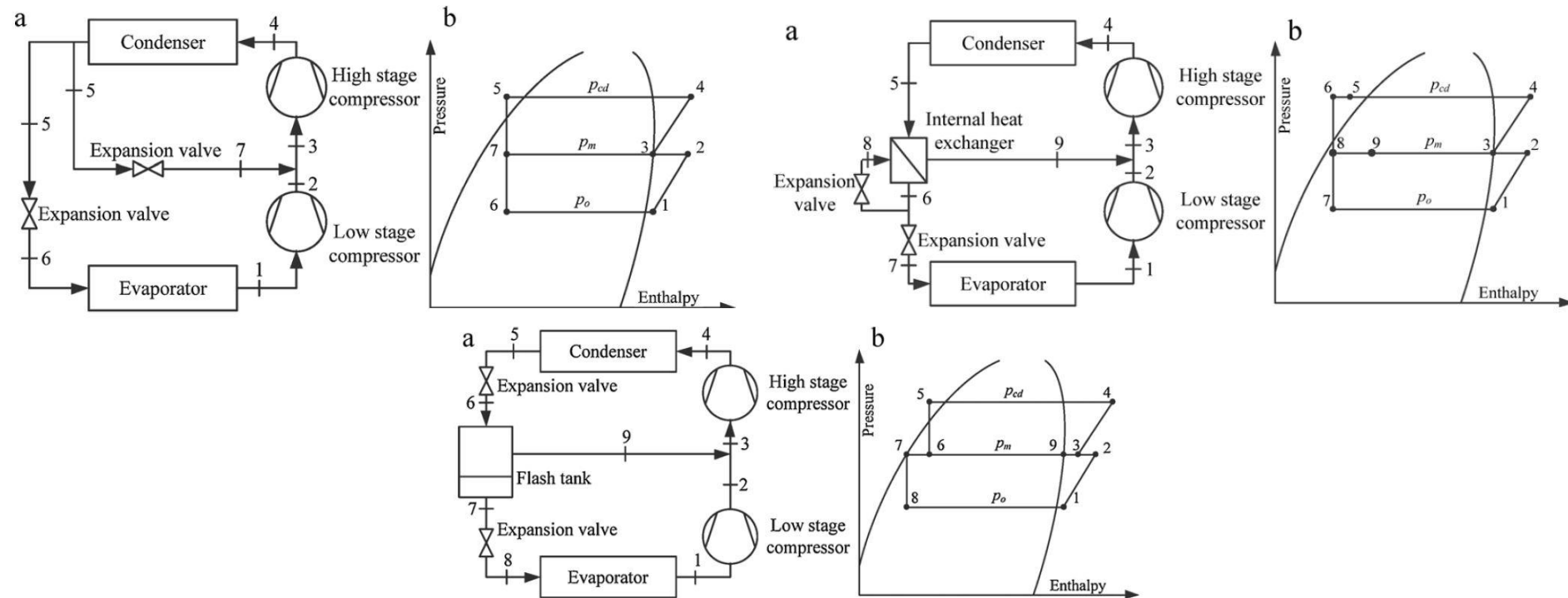
- Première solution

- 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 avec cycle plus complexe (ventilo-convecteurs)

PAC et rénovation

- 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 avec cycle plus complexe
 - PAC hybride
 - PAC à absorption
 - PAC à moteur à gaz

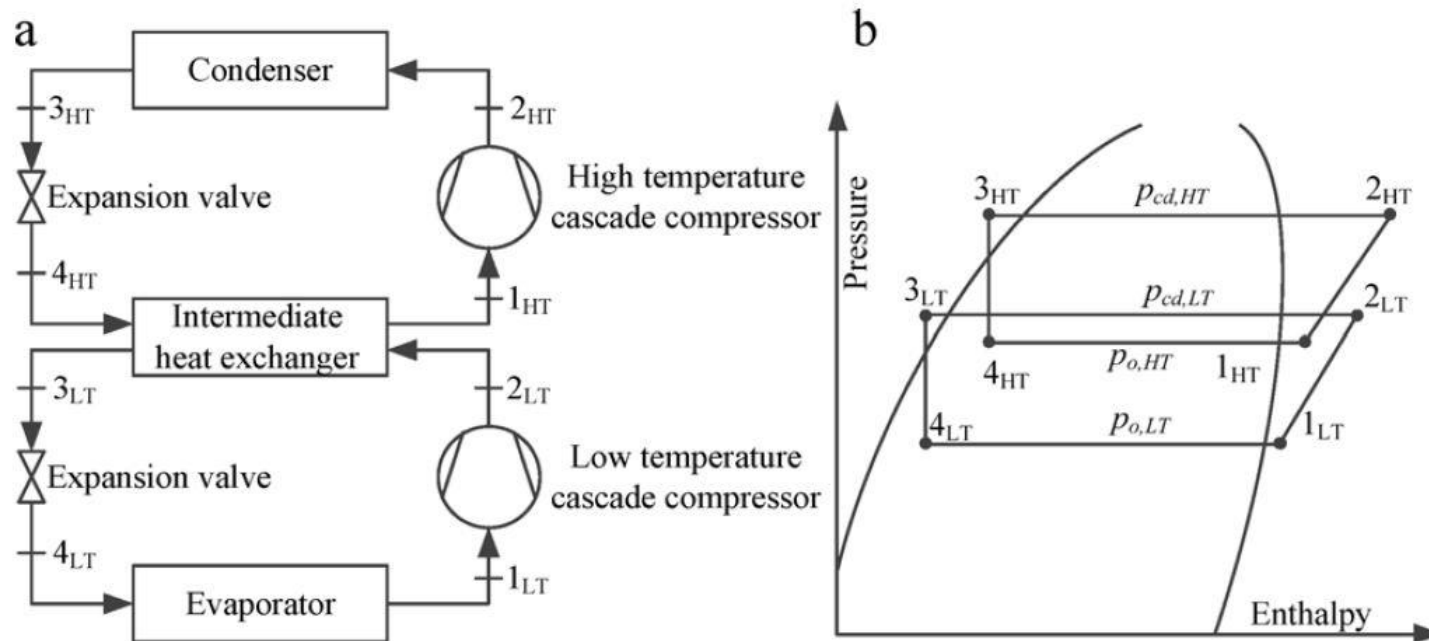
PAC haute température



Source : Antonijevic *et al.*, Energy and Buildings 49 (2012) 294-299

- Compression étagée dans un seul compresseur avec injection de vapeur intermédiaire (**PAC avec cycle à injection**) (plusieurs variantes)
- PAC de ce type sur le marché

PAC haute température

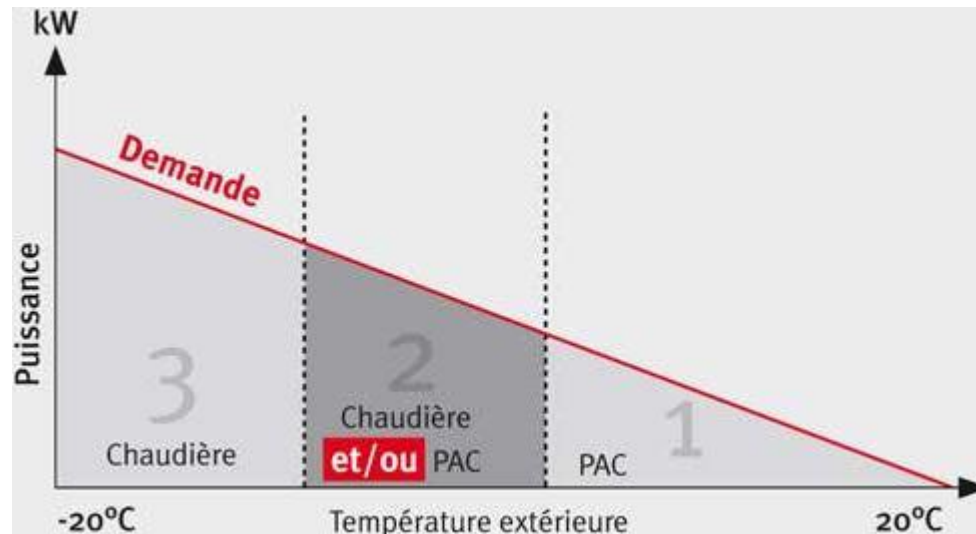


Source : Antonijevic *et al.*, Energy and Buildings 49 (2012) 294-299

- PAC à deux cycles thermodynamiques (**PAC avec cycle en cascade**)
- PAC de ce type sur le marché

PAC hybride

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

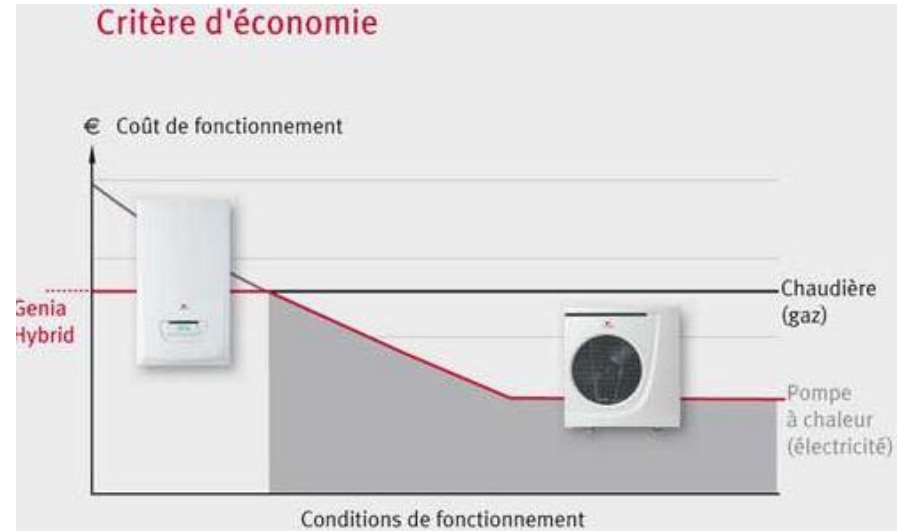
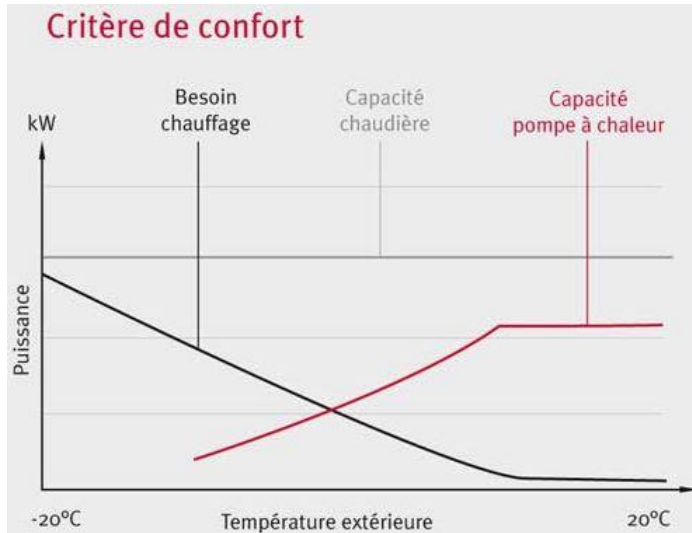


Source : <http://conseils.xpair.com/>

- 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)

PAC hybride

■ Régulation hybride

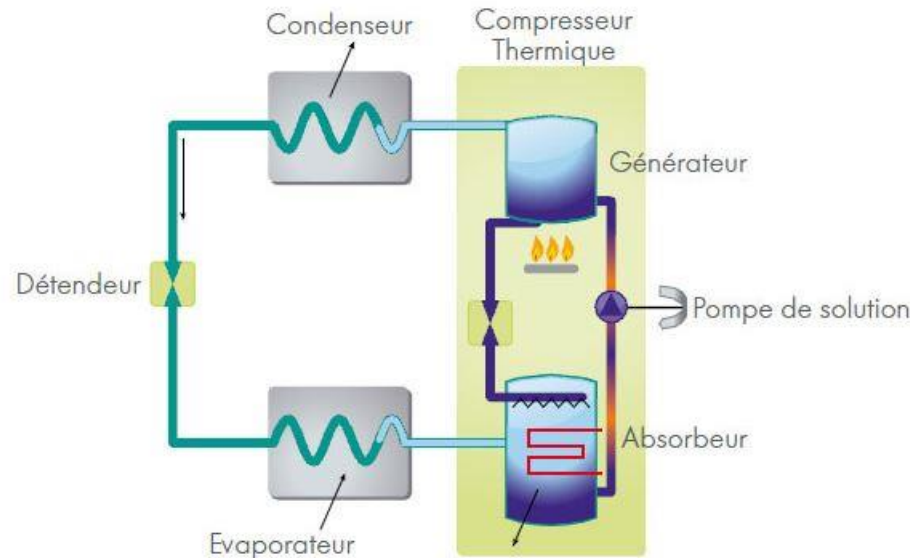


Source : <http://conseils.xpair.com/>

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

PAC à absorption

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

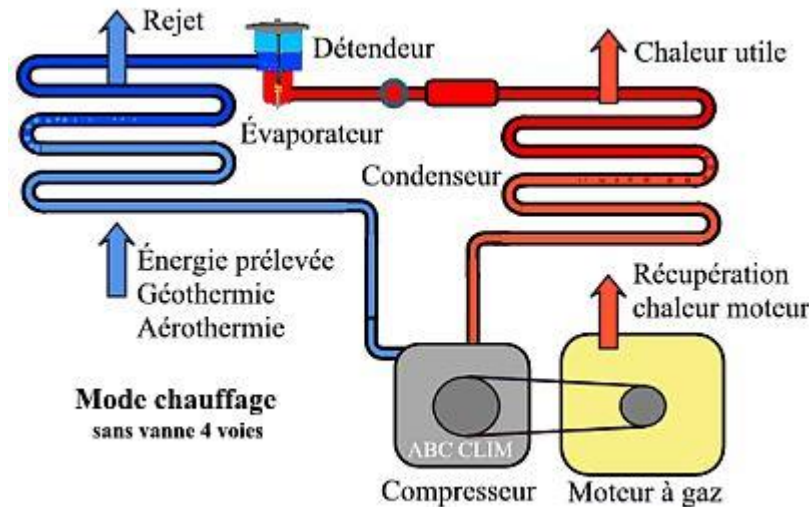


Source : <http://conseils.xpair.com/>

- Chauffage et ECS (T jusque 65°C)
- PAC : 20 à 70 kW avec modulation de 50% de la puissance
- PER = 1.2 = SPF (sur gaz naturel)

PAC à moteur à gaz

- 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 : 20 à 80 kW avec modulation de 10% de la puissance
- PER = 1.2 = SPF (sur gaz naturel)

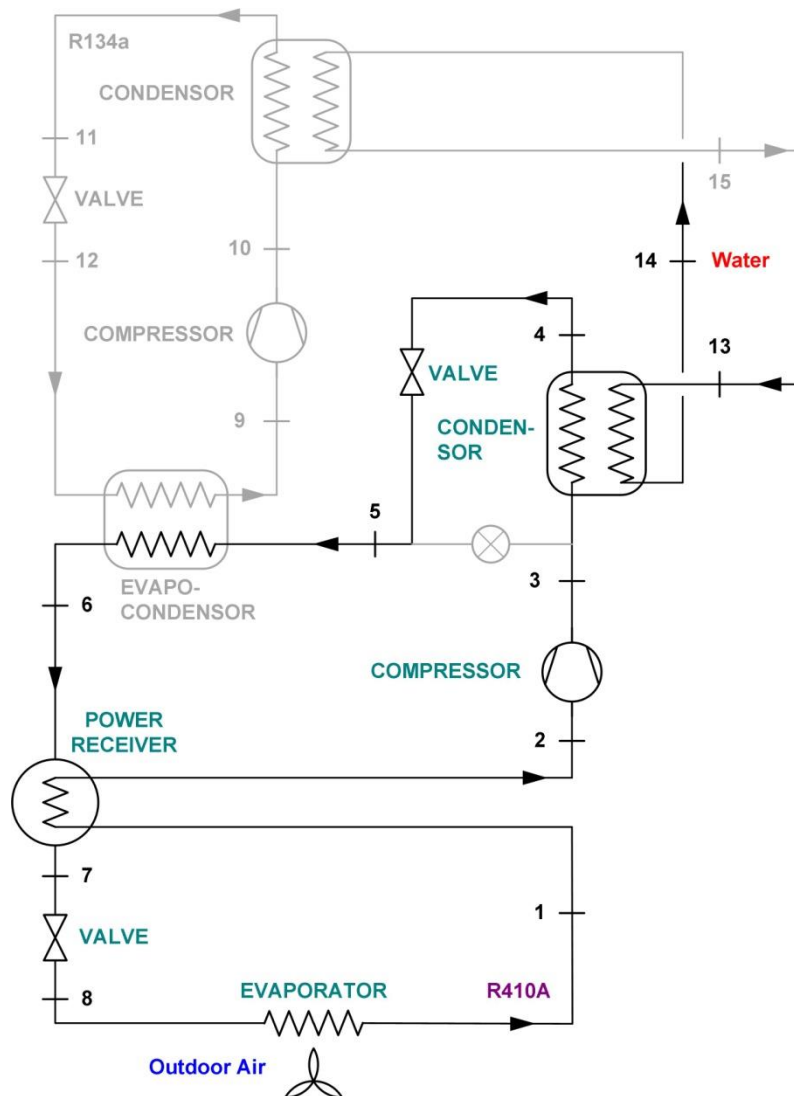
Monitoring d'une PAC haute température (cycle en cascade)

PAC : Introduction

- Monitoring d'une PAC air-eau (AJ-Tech) qui utilise un cycle en cascade original avec compresseur à vitesse variable
- PAC installée dans une maison 4 façades non isolée bâtie en 1973 (K98) à Froyennes
- La PAC est utilisée pour le chauffage (avec les radiateurs existants) et pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS)
- Flux chaud nominal = 14.5 kW
- La chaudière au gaz a été conservée pour les jours les plus froids (fonctionnement séparé)
- La PAC a été complètement instrumentée pour des mesures détaillées en septembre 2013

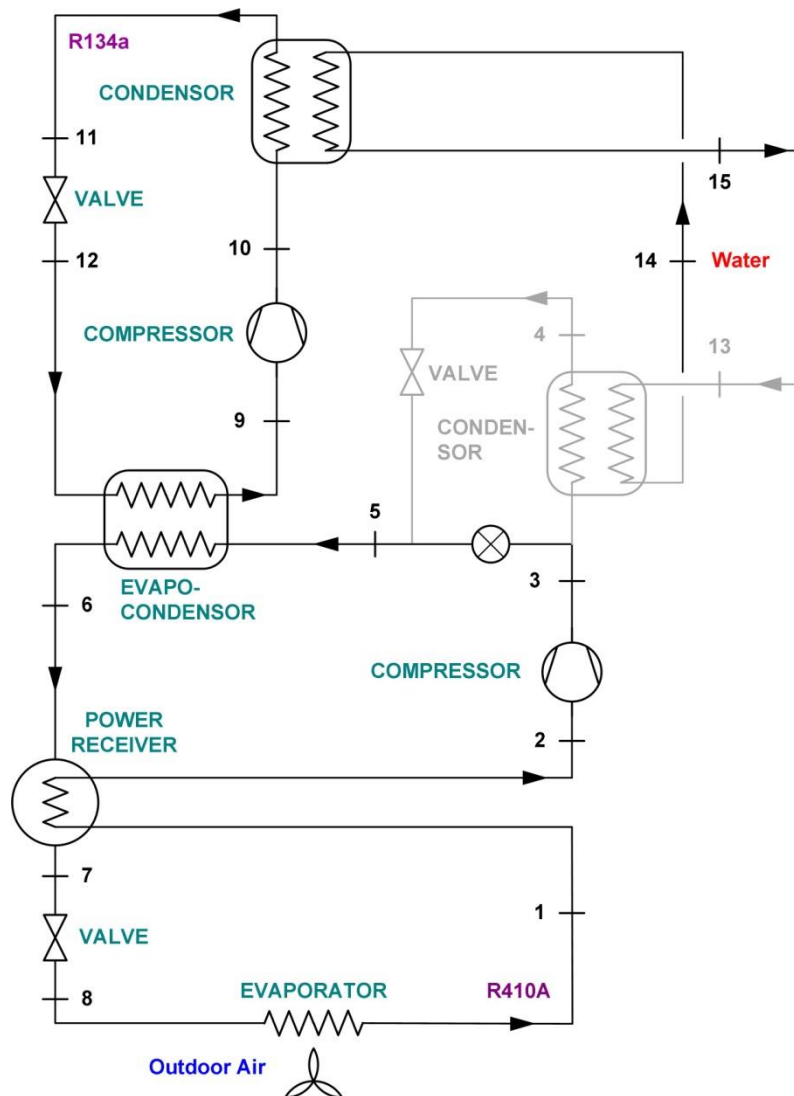
PAC : Fonctionnement

■ Mode #1



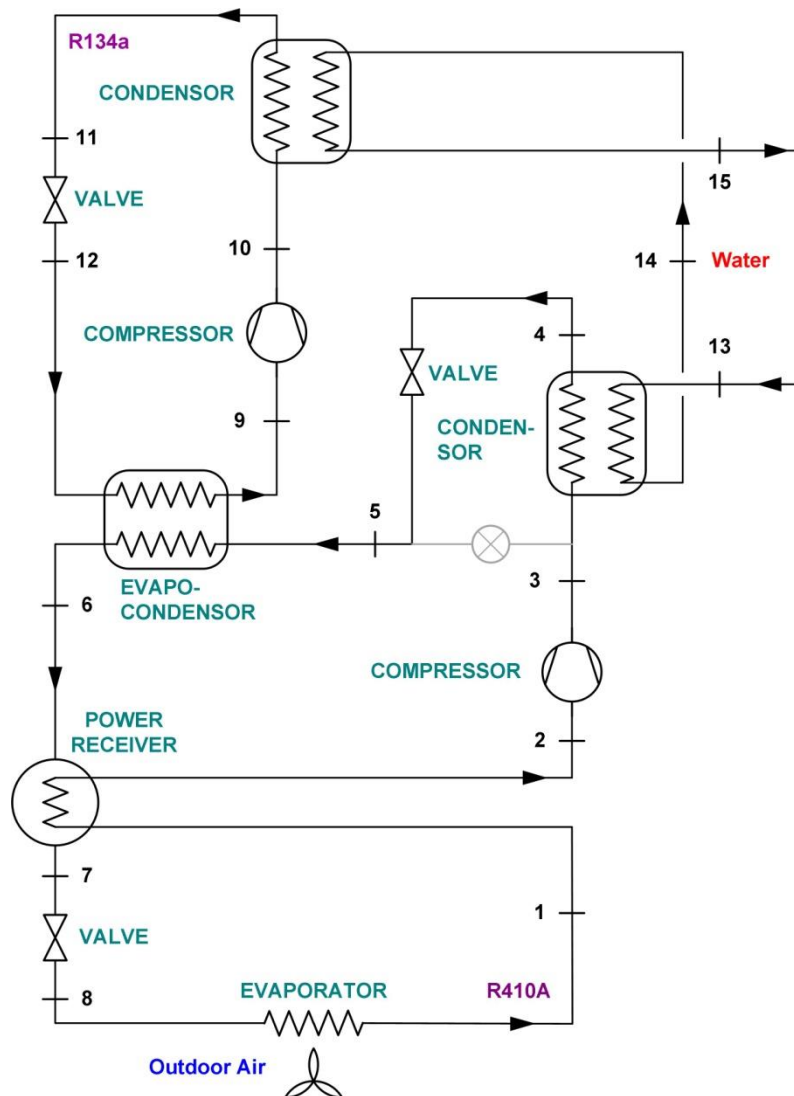
PAC : Fonctionnement

■ Mode #3



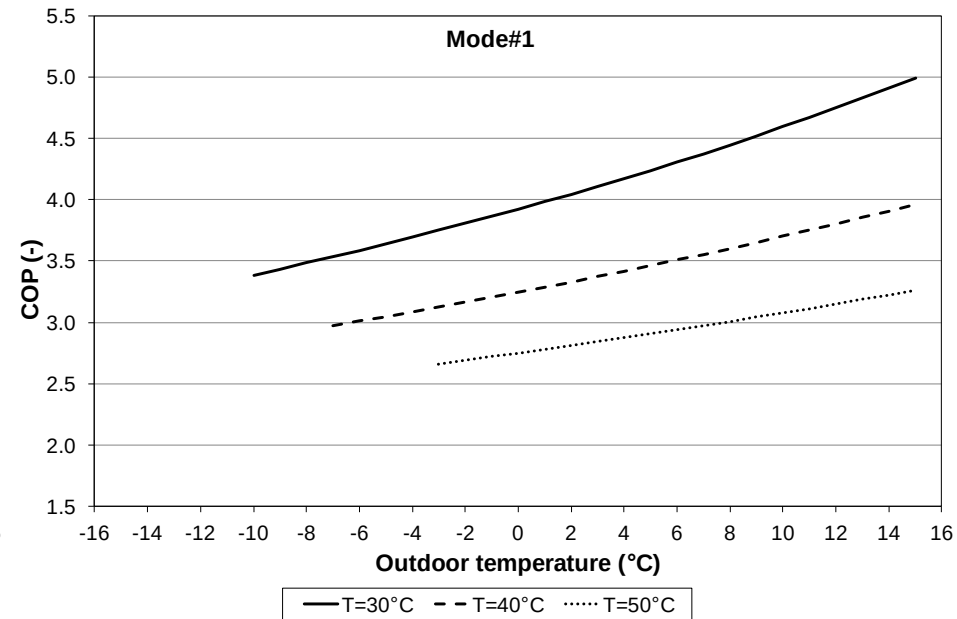
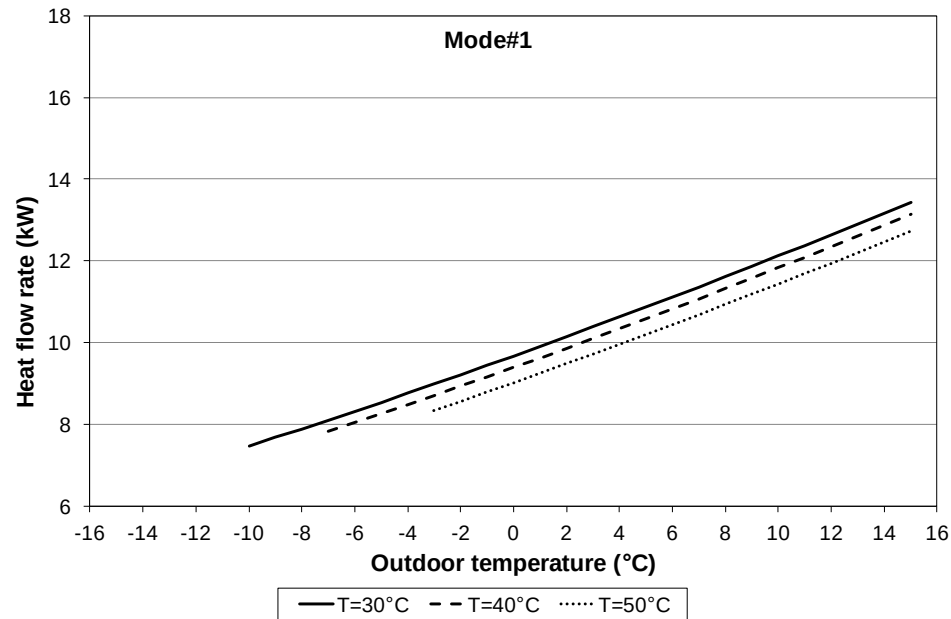
PAC : Fonctionnement

■ Mode #2



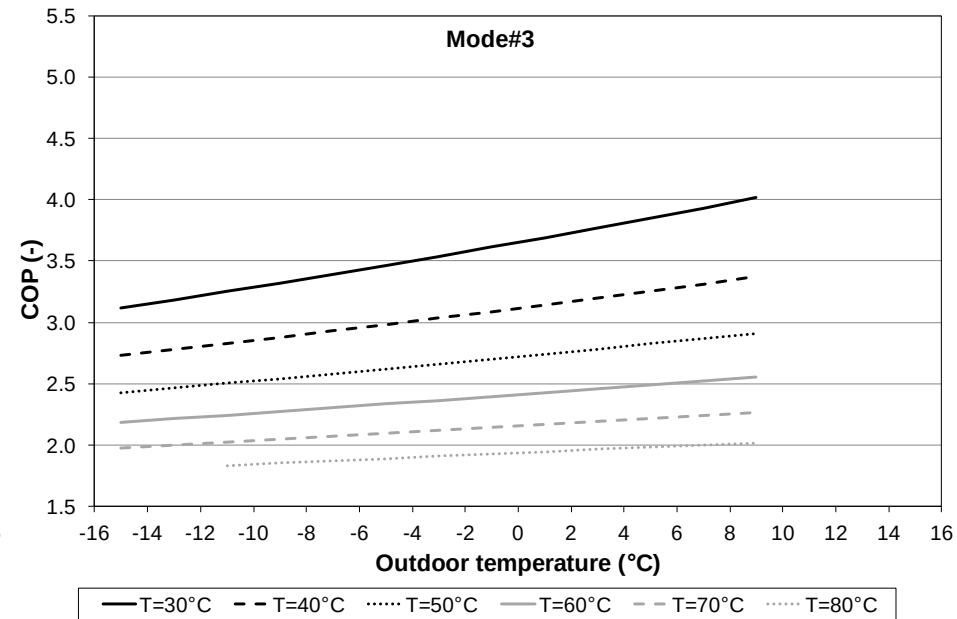
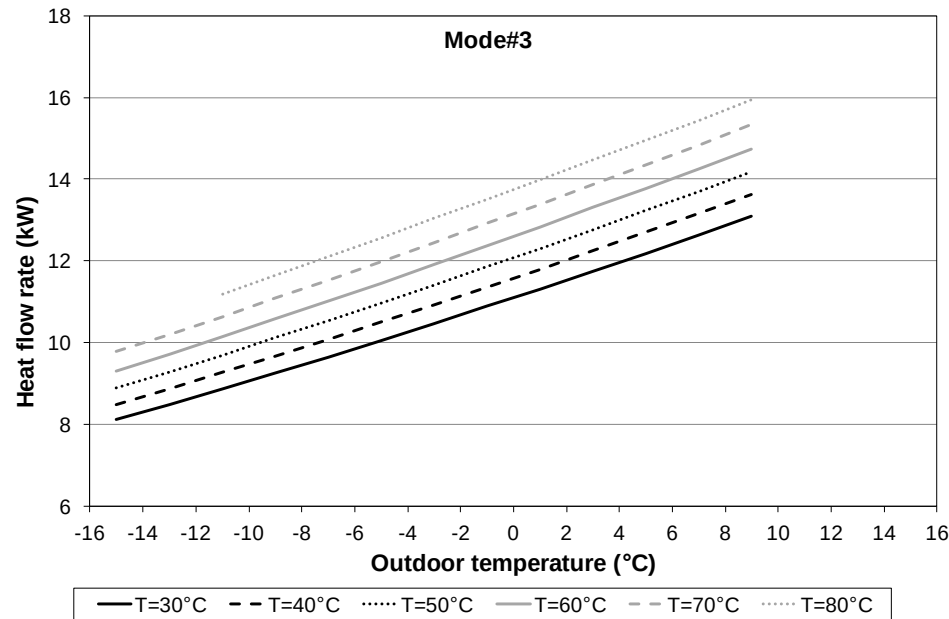
PAC : Performance

- Modèle du mode #1 (vitesse de compresseur nominale)



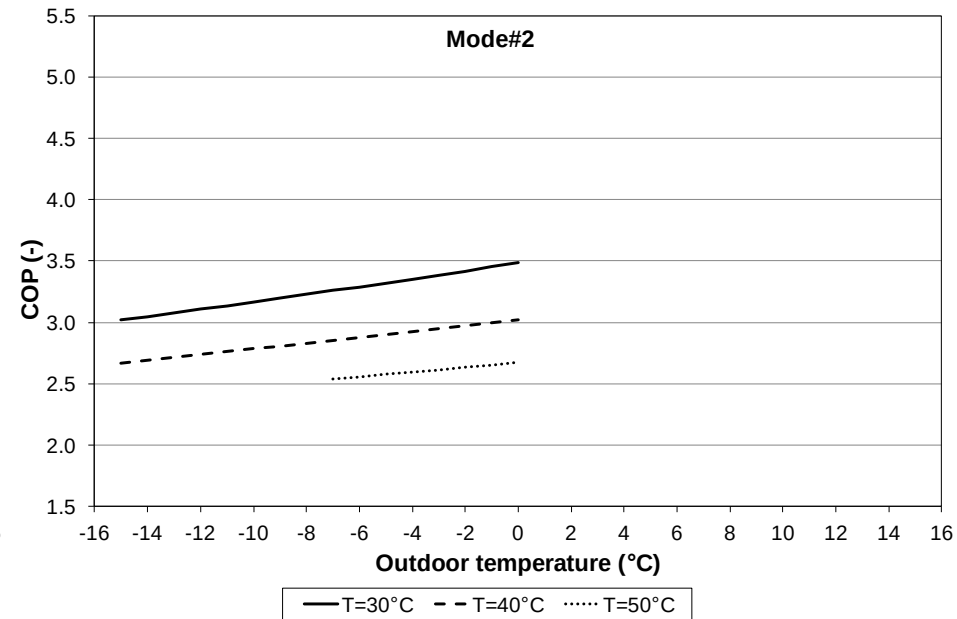
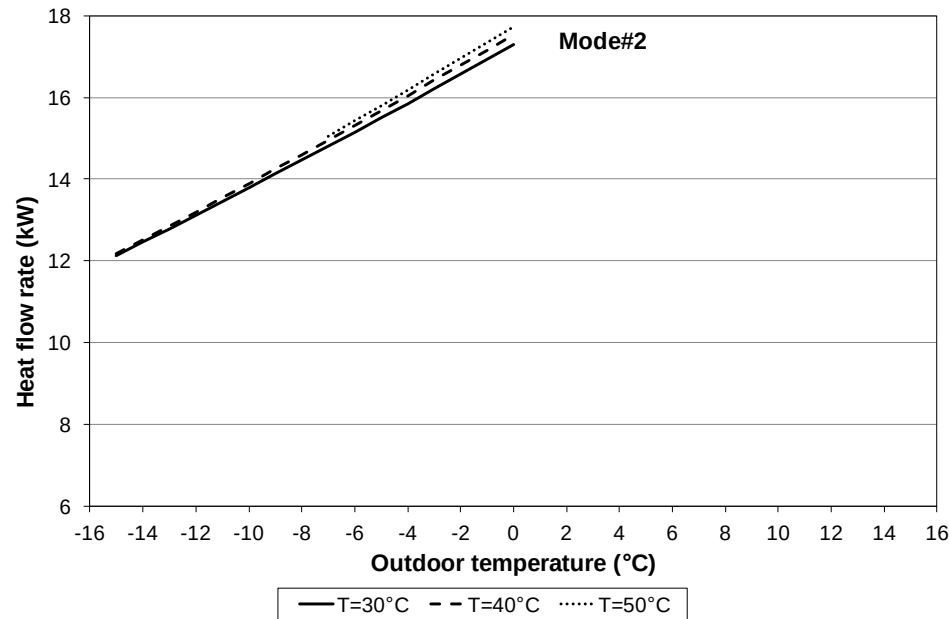
PAC : Performance

- Modèle du mode #3 (vitesse de compresseur nominale)



PAC : Performance

- Modèle du mode #2 (vitesse de compresseur nominale)



PAC : Régulation

- Combinaison des modes de la PAC et de la température d'eau à l'entrée des radiateurs (♦)
- Loi d'eau : $T_{EAU} = 60 - 1.75 * T_{EXT}$

		Water temperature (°C)						
		<25	25-35	36-45	46-55	56-65	66-75	76-85
T outdoor (°C)	<-15							♦
	-15 to -10							♦
	-9 to -5						♦	
	-4 to 0					♦		
	1 to 5				♦			
	6 to 10			♦	♦			
	11 to 15			♦				
	>15		♦					

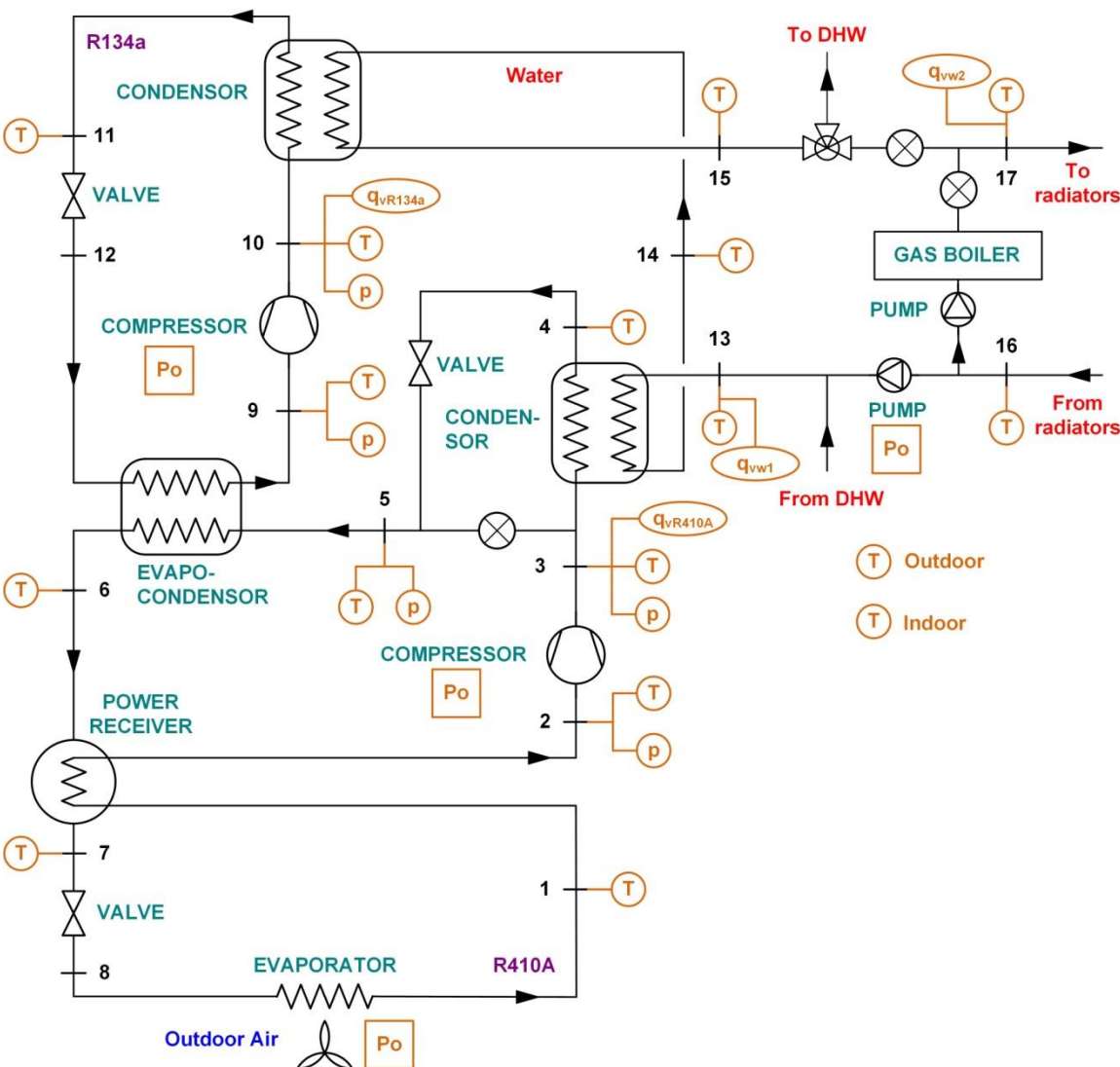
Mode 1

Mode 1 or 2

Mode 2

Mode 3

PAC : Monitoring



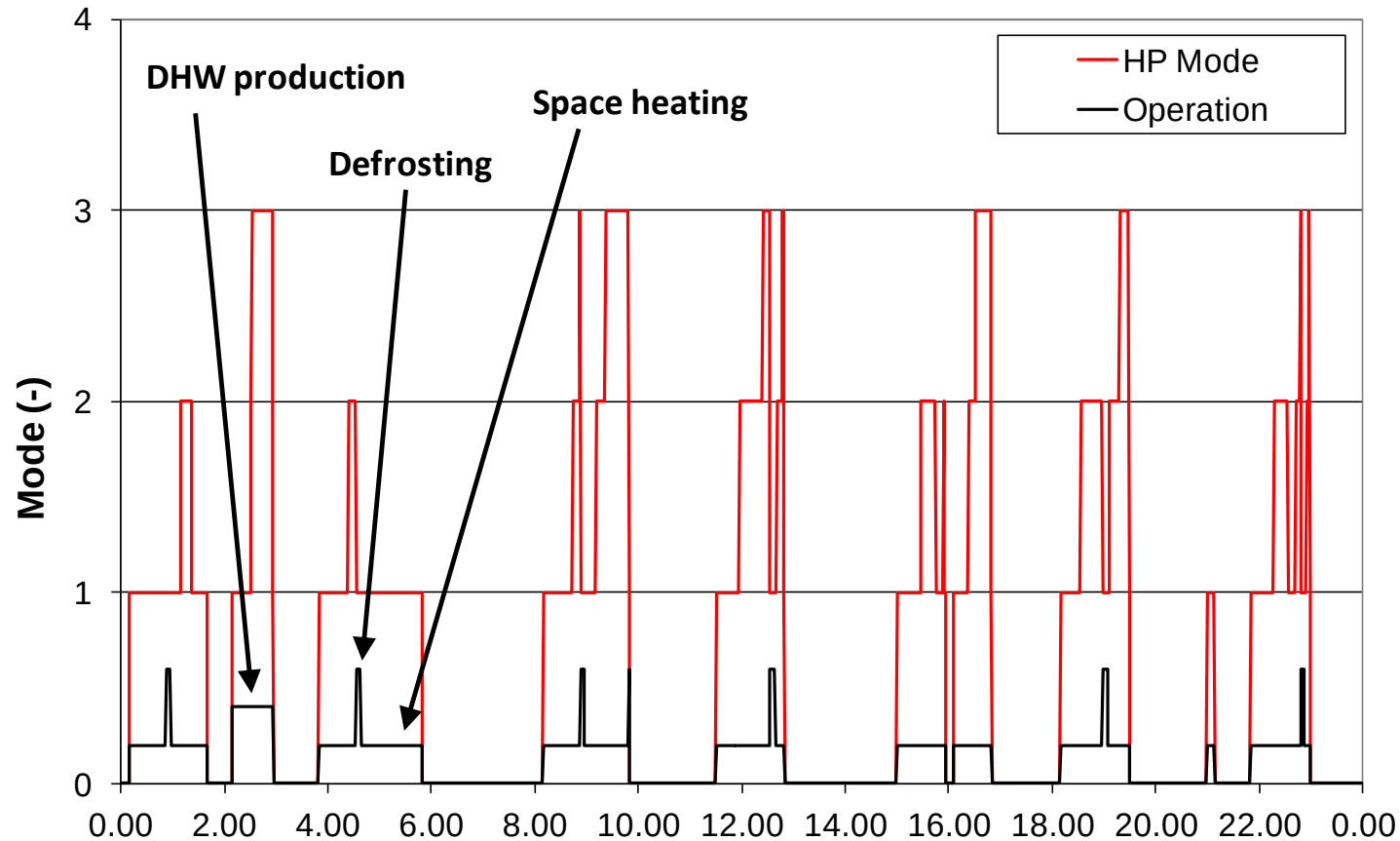
Monitoring :

- mesure de T, p, débits volumiques de R410A, de R134a et d'eau au condenseur
- mesure de la consommation électrique des deux compresseurs, du ventilateur extérieur et des pompes de circulation
- mesure des températures intérieure et extérieure

Mesures effectuées chaque seconde, moyennées sur une minute et stockées dans un enregistreur (durée : 2 ans)

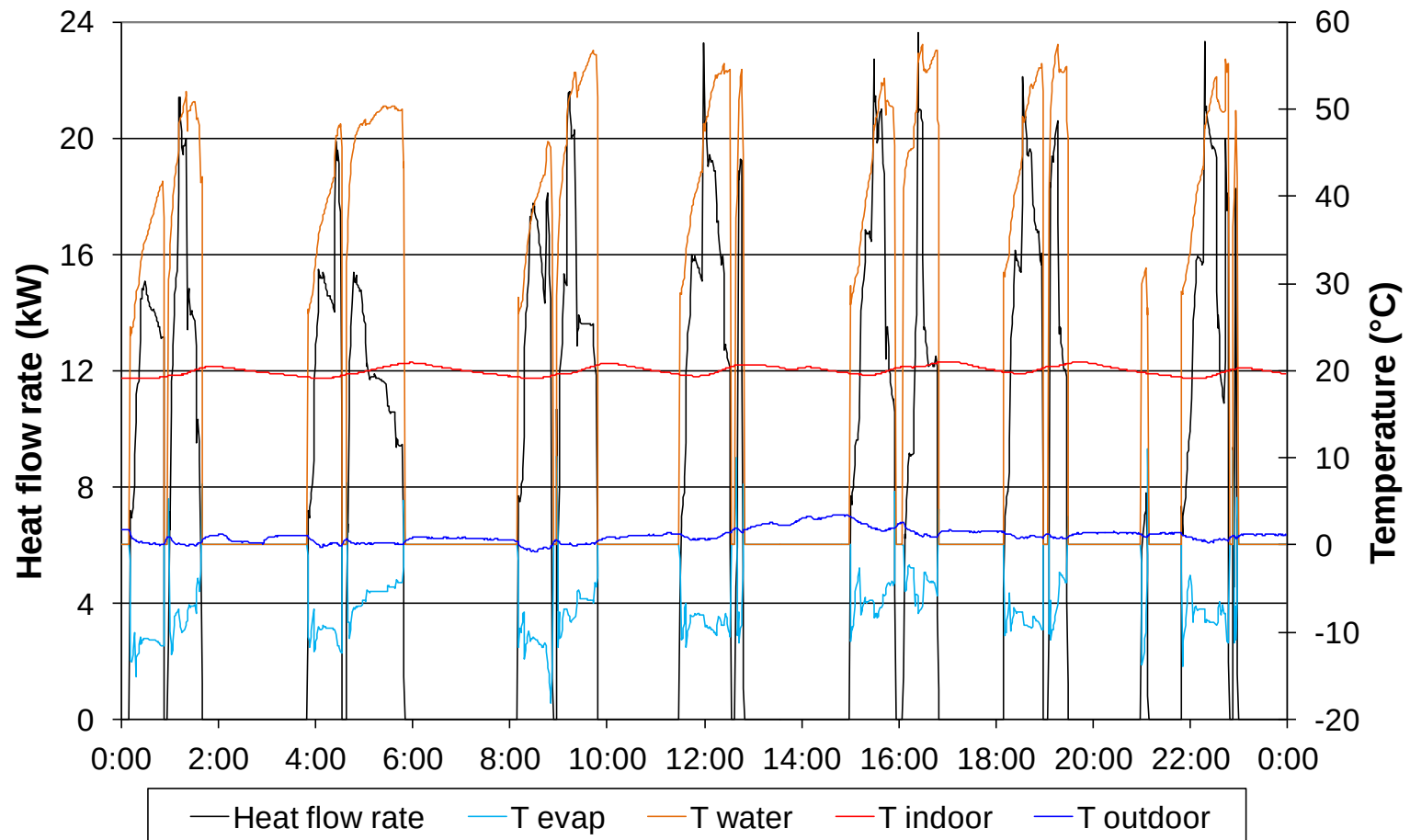
PAC : Résultats

■ 12 décembre 2013



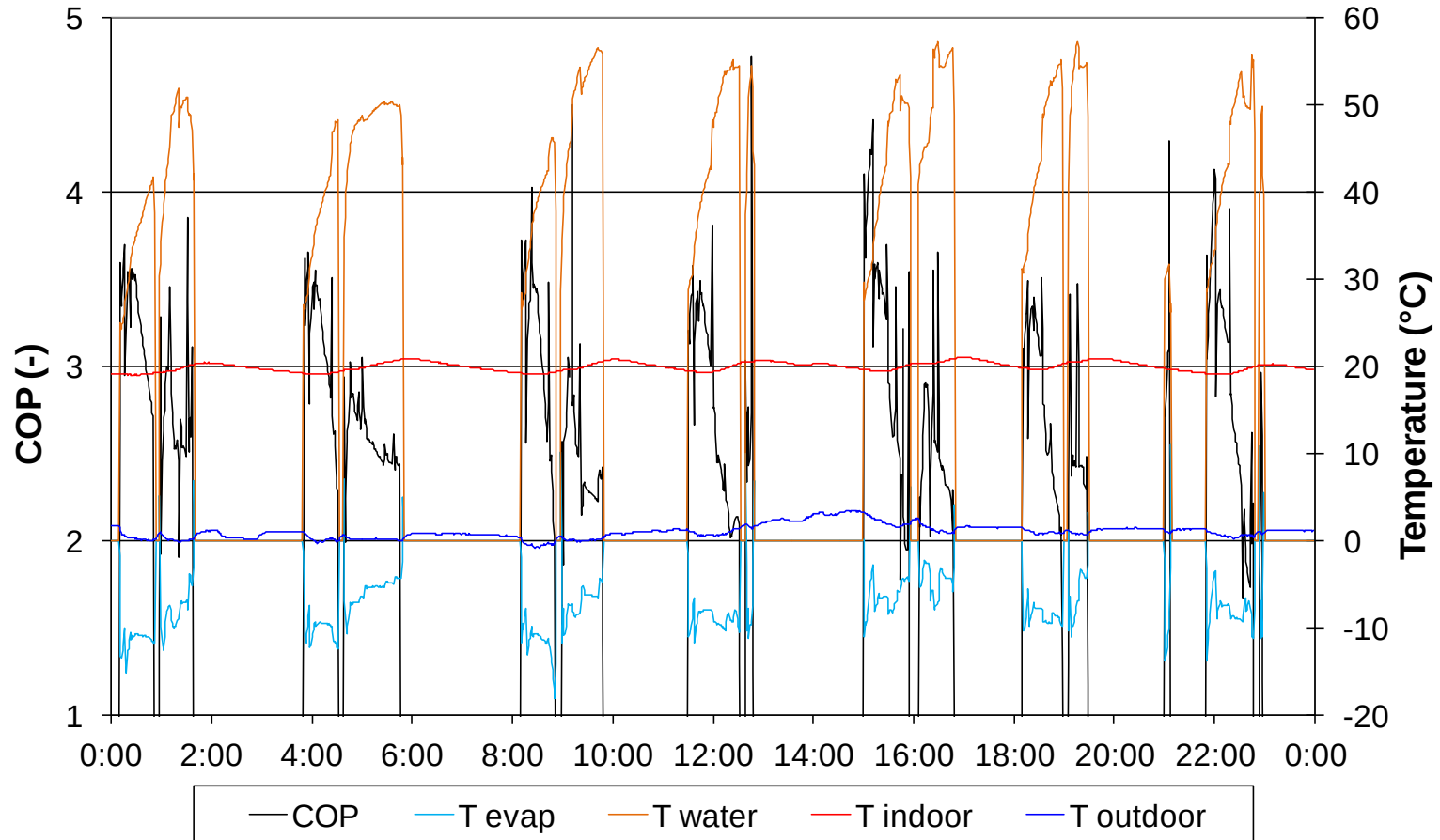
PAC : Résultats en chauffage

■ 12 décembre 2013



PAC : Résultats en chauffage

■ 12 décembre 2013



PAC : Résultats en chauffage

- Résultats mensuels pour la période Octobre 2013 – Septembre 2014

Month	E_{HP} (kWh)	E_{WP} (kWh)	E_{DEF} (kWh)	E_{SB} (kWh)	Q (kWh)	$COPM_{SYS}$ (-)	$COPM_{TOT}$ (-)
October	135.1	4.0	0.0	7.0	521.5	3.75	3.57
November	650.9	15.5	1.2	15.9	2229.2	3.35	3.26
December	963.2	18.5	2.0	17.3	2953.3	3.01	2.95
January	942.4	19.9	1.1	16.2	3039.4	3.16	3.10
February	795.6	18.5	0.4	14.2	2679.1	3.29	3.23
March	313.7	8.4	0.2	19.9	1074.3	3.34	3.14
April	188.3	6.1	0.0	15.6	714.6	3.68	3.40
May	154.8	5.1	0.0	14.5	612.1	3.83	3.51
June	34.3	1.3	0.0	12.8	132.4	3.71	2.74
July	8.6	0.4	0.0	10.2	42.1	4.65	2.19
August	14.4	0.5	0.0	15.2	66.3	4.44	2.21
September	7.1	0.2	0.0	15.0	31.1	4.25	1.40
Year	4208.2	98.5	4.9	173.5	14095.3	3.27	3.14

93.8%

PAC

2.2%

Circ.

0.1%

Dégivrage

3.9%

Stand-by

PER = 1.43

PAC : Résultats production ECS

- Résultats mensuels pour la période Octobre 2013 – Septembre 2014
- $T_{ECS} = 55^{\circ}\text{C}$ (semaine) ou 65°C (week-end)

Month	E_{HP} (kWh)	E_{WP} (kWh)	Q (kWh)	$COPM_{sys}$ (-)
October	49.9	1.5	125.5	2.45
November	110.0	3.2	285.5	2.52
December	128.8	3.8	338.5	2.55
January	102.7	3.0	271.2	2.57
February	114.5	3.5	317.1	2.69
March	74.8	2.4	209.7	2.72
April	79.7	2.7	228.2	2.77
May	97.5	3.4	285.9	2.83
June	79.6	2.9	233.8	2.84
July	79.0	2.7	220.0	2.70
August	76.5	3.1	223.3	2.80
September	64.9	2.2	174.0	2.59
Year	1057.7	34.1	2912.6	2.67

96.9%

PAC

3.1%

Circ.

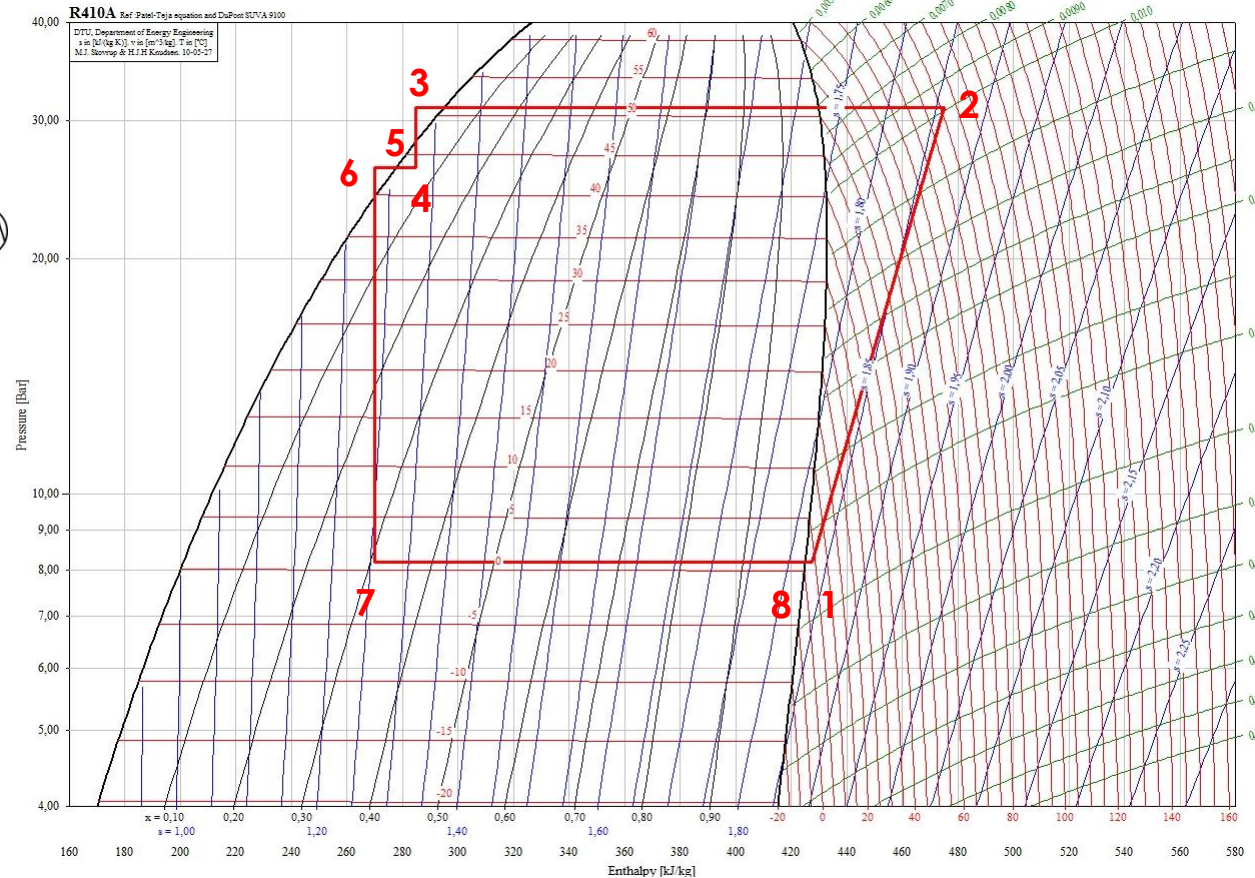
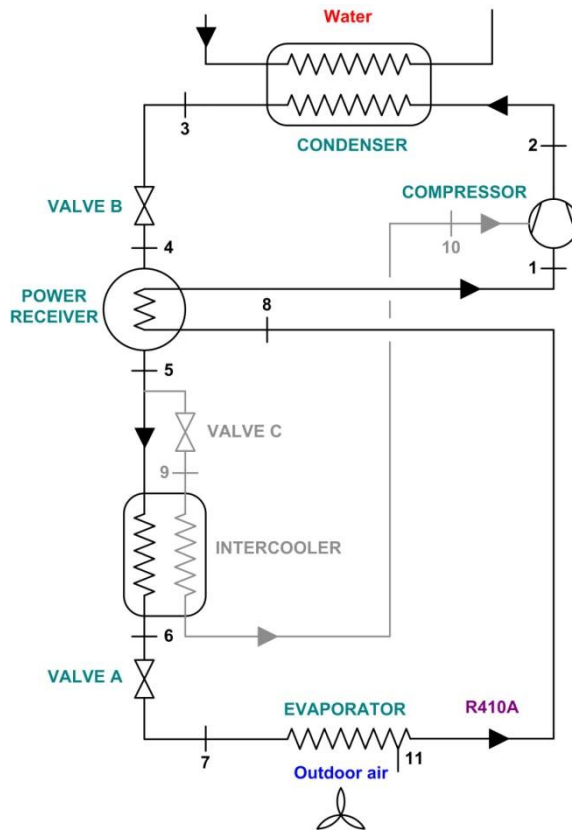
PER = 1.21

Monitoring d'une PAC haute température (cycle à injection)

PAC : Introduction

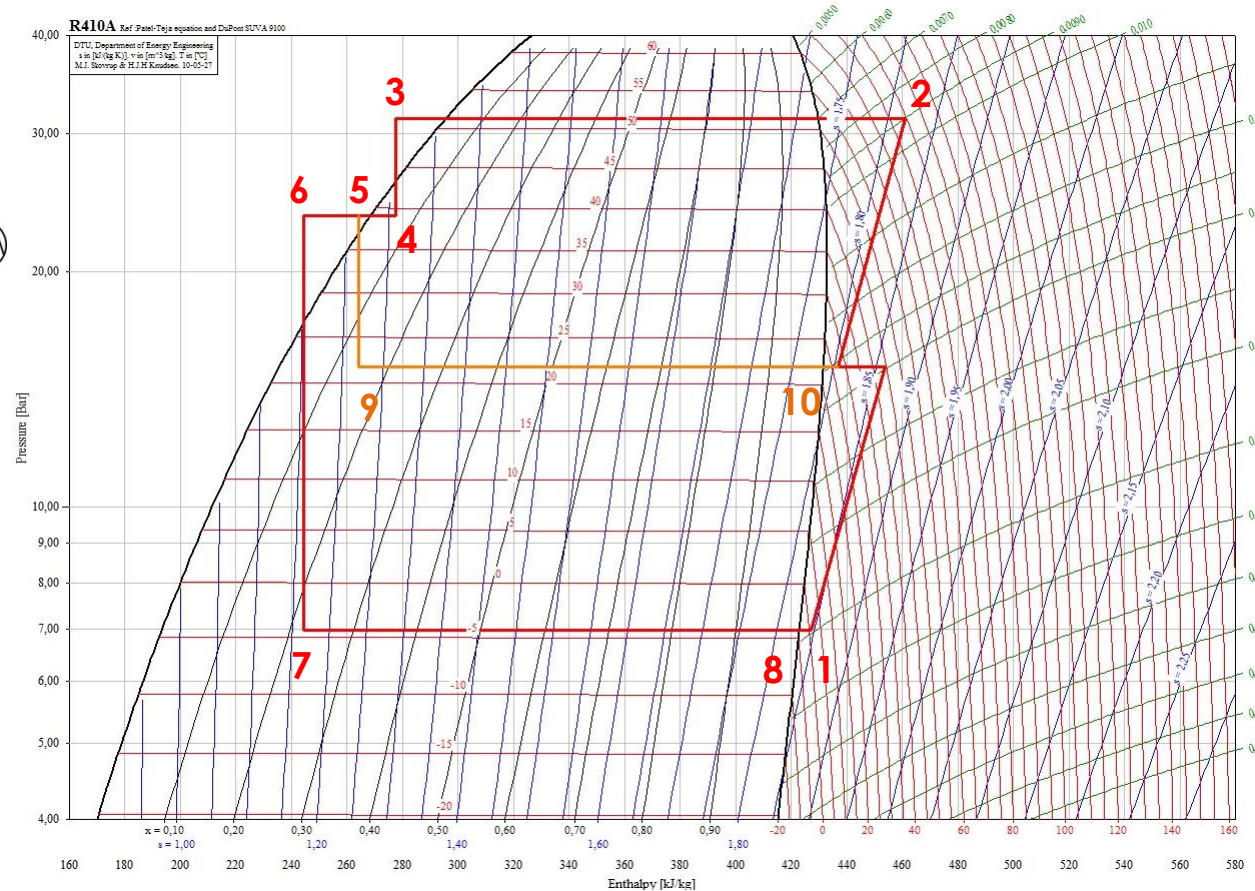
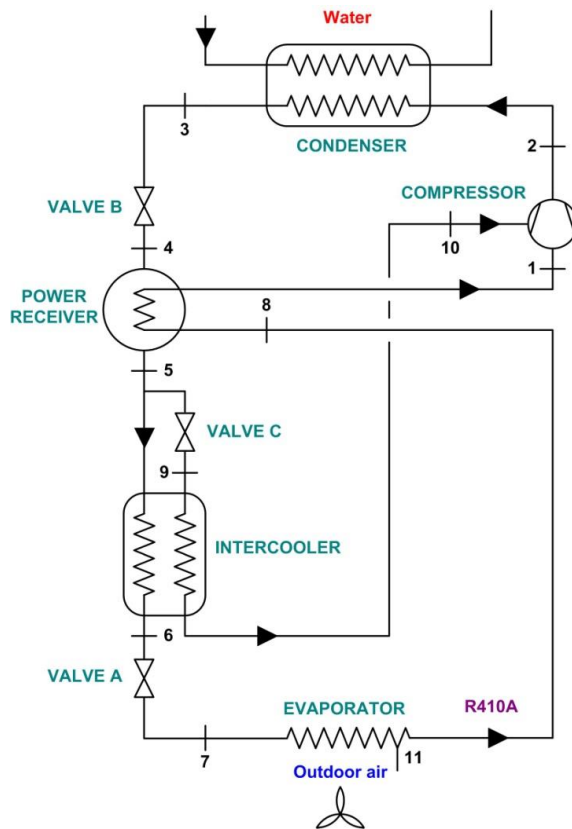
- Monitoring d'une PAC air-eau (Mitsubishi Zuran) qui utilise un cycle à injection avec compresseur à vitesse variable
- PAC installée dans une maison 4 façades faiblement isolée bâtie en 1995 (K100) à Châtelet
- La PAC est utilisée pour le chauffage (avec les radiateurs existants, puis avec des ventilo-convecteurs, puis avec plancher chauffant) et pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS)
- Flux chaud nominal = 12 kW
- La PAC a été complètement instrumentée pour des mesures détaillées en avril 2010

PAC : Fonctionnement



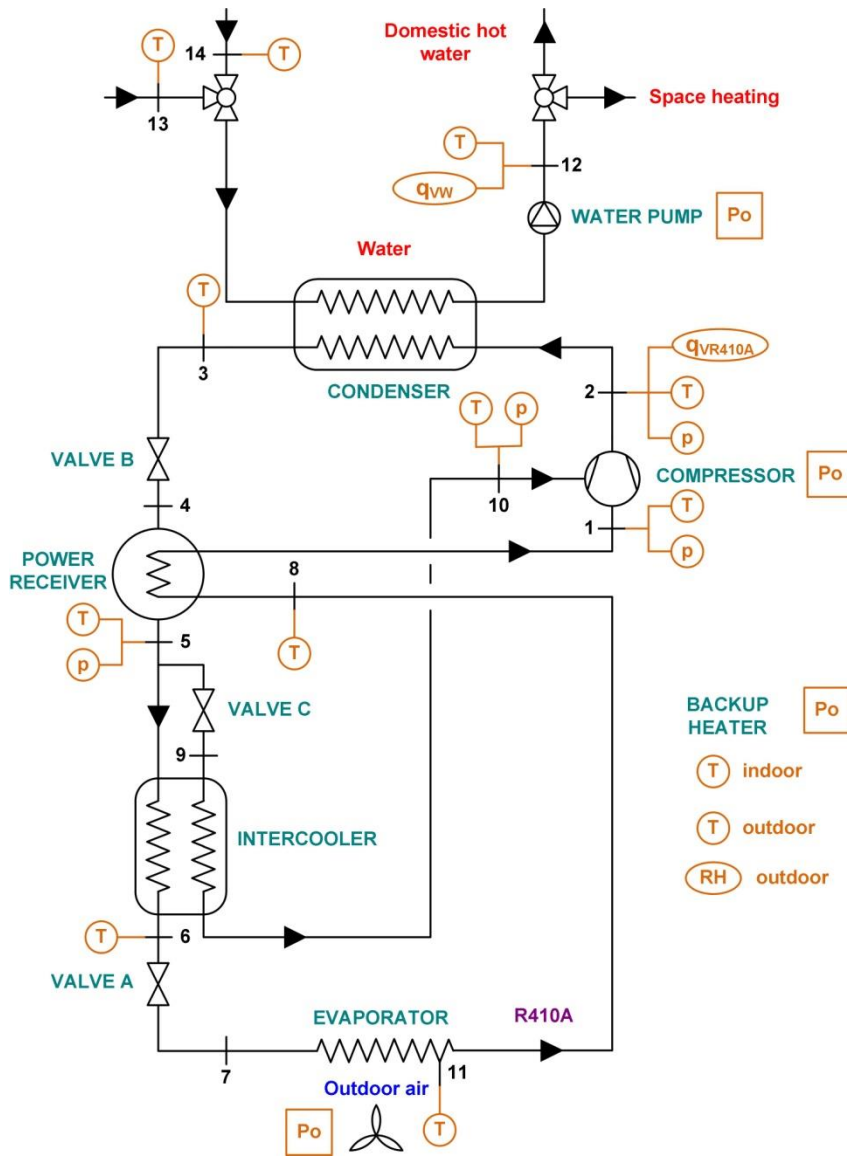
Sans injection (1^{er} avril 2010)

PAC : Fonctionnement



Avec injection (1^{er} avril 2010)

PAC : Monitoring



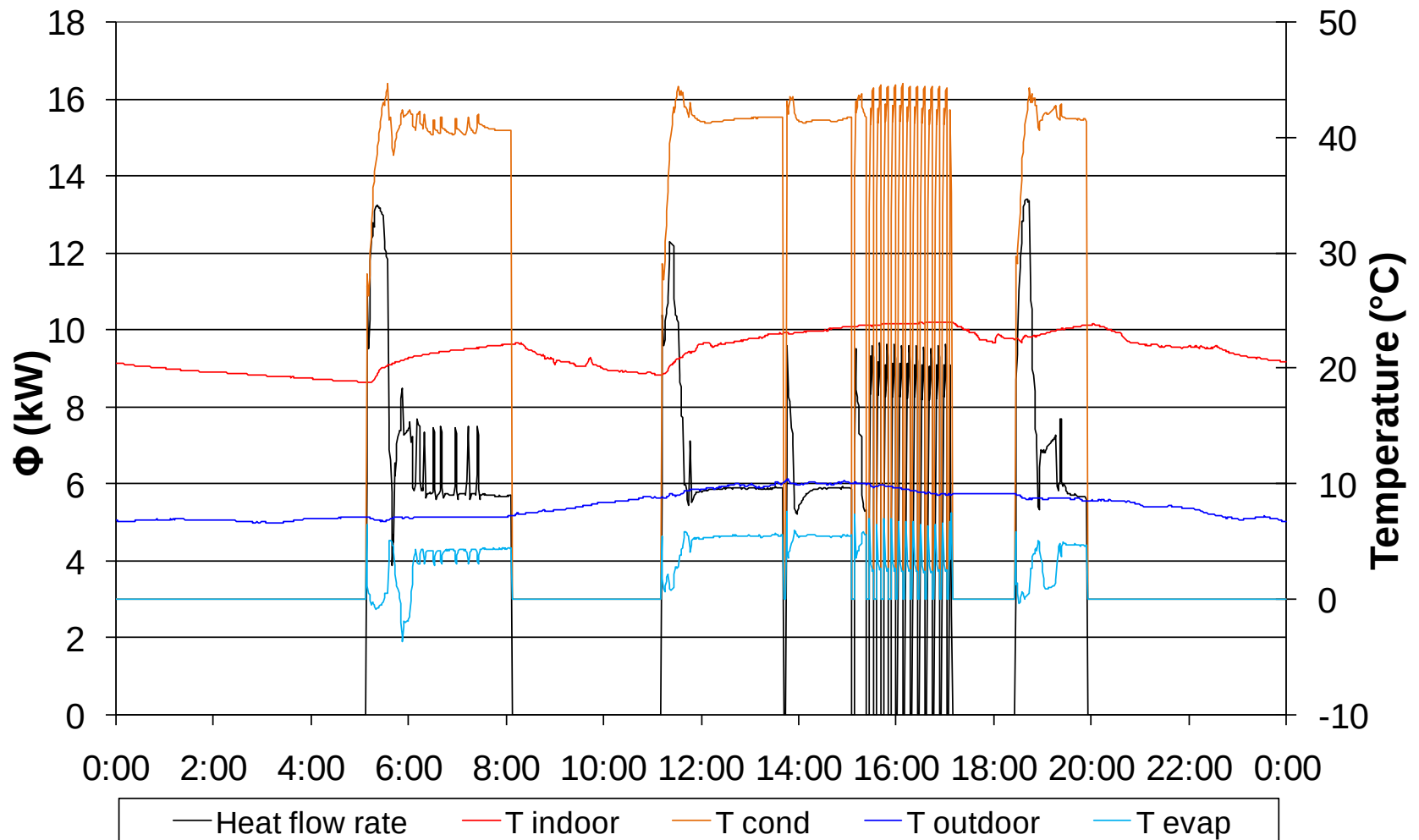
Monitoring :

- mesure de T, p, débit volumique de R410A et d'eau au condenseur
- mesure de la puissance du compresseur, du ventilateur, de la résistance électrique et du circulateur
- mesure du climat extérieur (T, HR) et intérieur (T)

Mesures effectuées chaque seconde, moyennées sur une minute et stockées dans un enregistreur (durée : 2 ans)

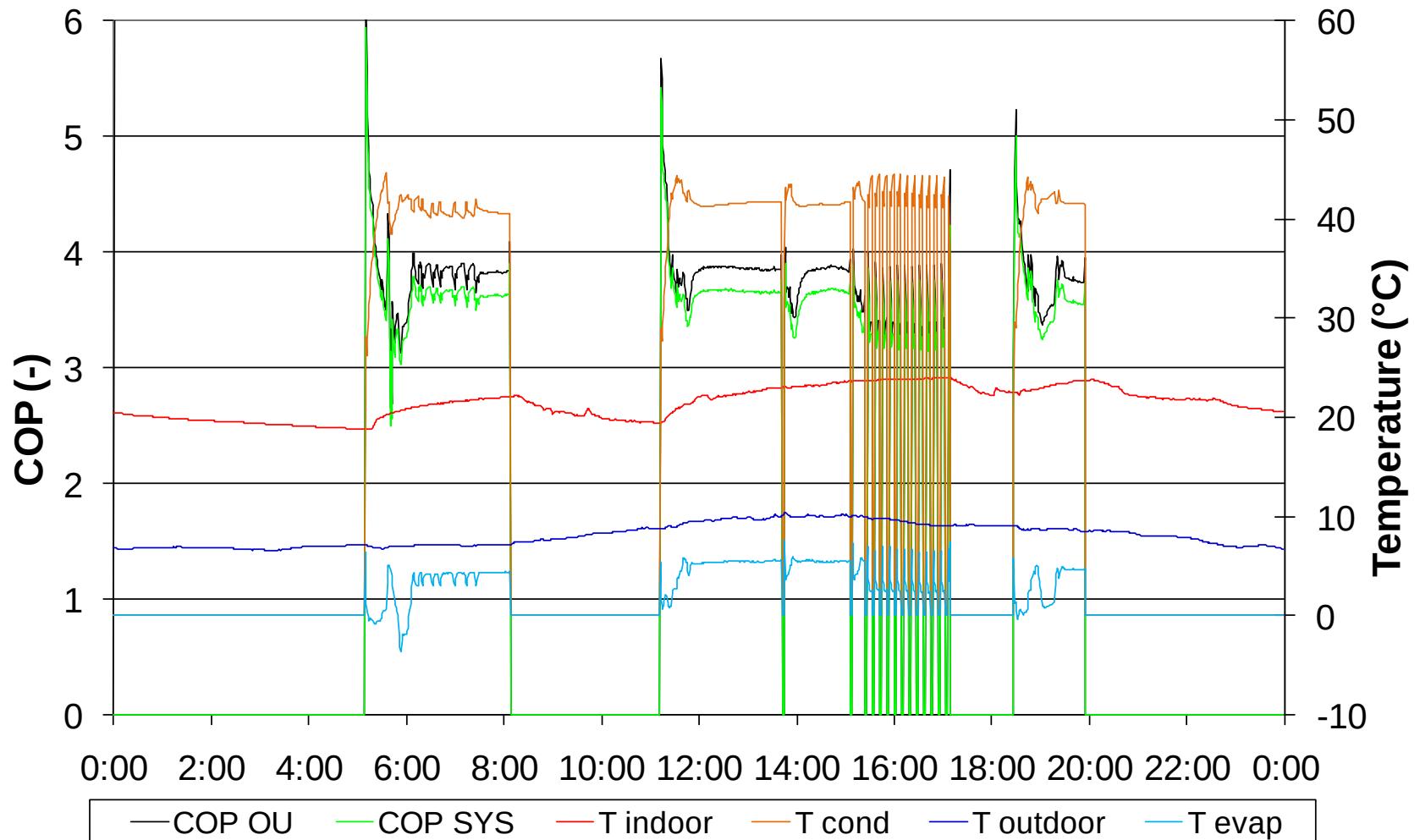
PAC : Résultats en chauffage

■ 10 novembre 2010



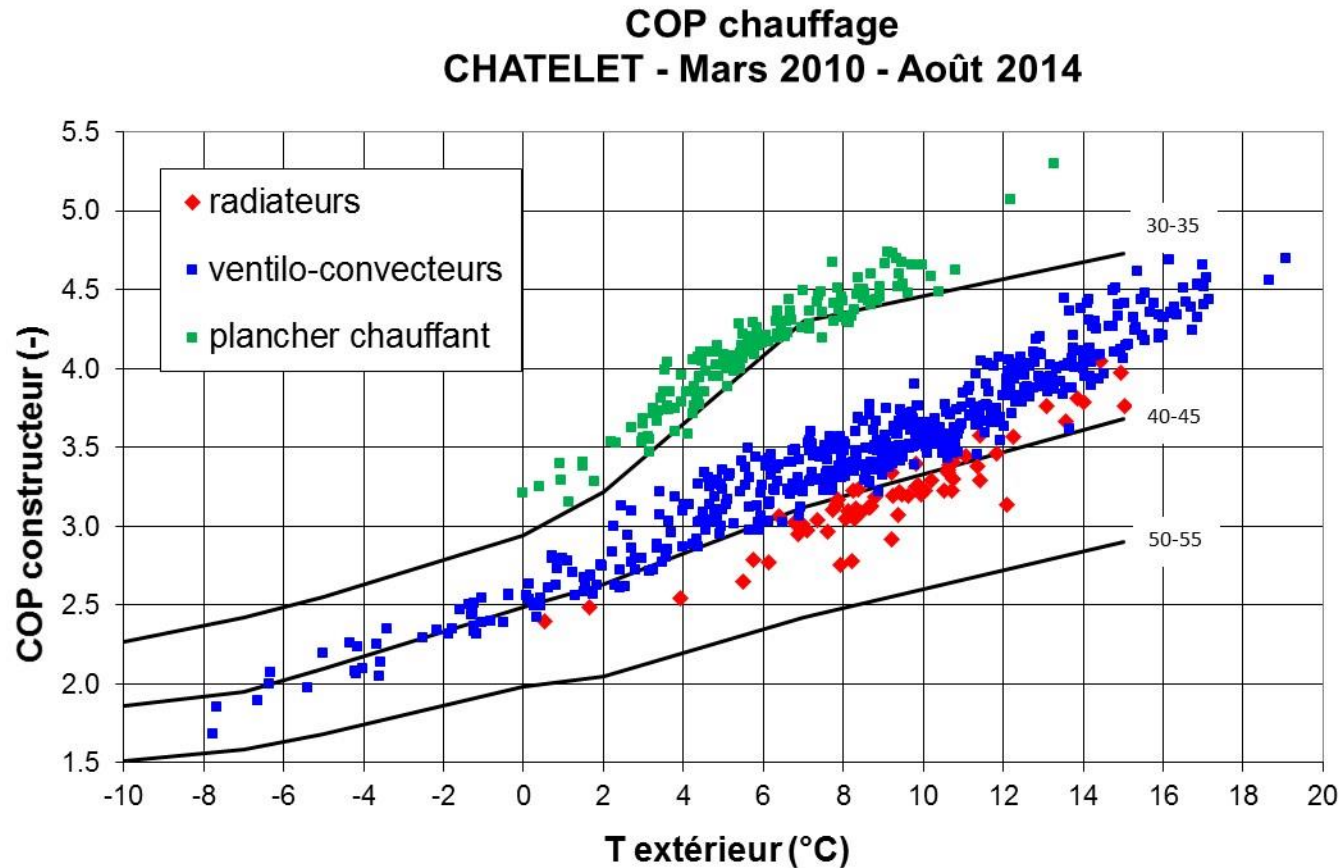
PAC : Résultats en chauffage

■ 10 novembre 2010



PAC : Résultats en chauffage

- COP journaliers – période mars 2010 – août 2014



PAC : Résultats en chauffage

- Résultats annuels pour les saisons 2010-2011 et 2011-2012 (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 = 1.28 à 1.37

- Résultats annuels 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 = 1.69

PAC : Résultats production ECS

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

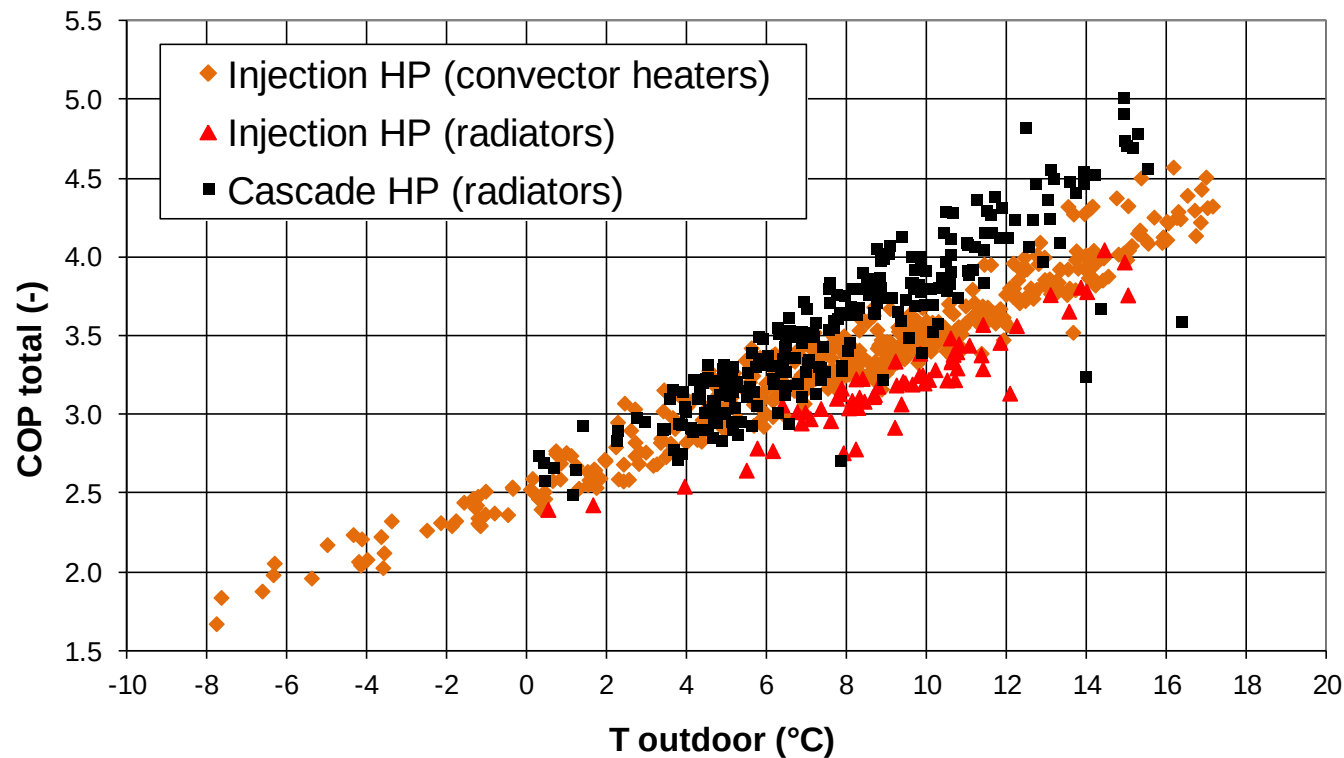
Period	E_{HP} (kWh)	E_{WP} (kWh)	Q (kWh)	COP_{SYS} (-)
1/7/2010-30/6/2011	713.41	19.97	1828.88	2.49
1/7/2011-30/6/2012	653.59	17.07	1714.26	2.56
1/9/2013-31/8/2014	763.12	20.84	2057.44	2.62

97.4% 2.6%

PAC Circ. PER = 1.13 à 1.19

PAC : Cascade vs Injection

- COP journalier (sans énergie de Stand-by, en chauffage)
- PAC avec cycle en cascade meilleur que PAC avec cycle à injection



Merci de votre attention !