



## *Fluides de travail pour la production de froid*

---

# **Systèmes à compression de vapeur dans l'industrie: méthodologie de sélection de l'architecture thermodynamique et du fluide de travail**

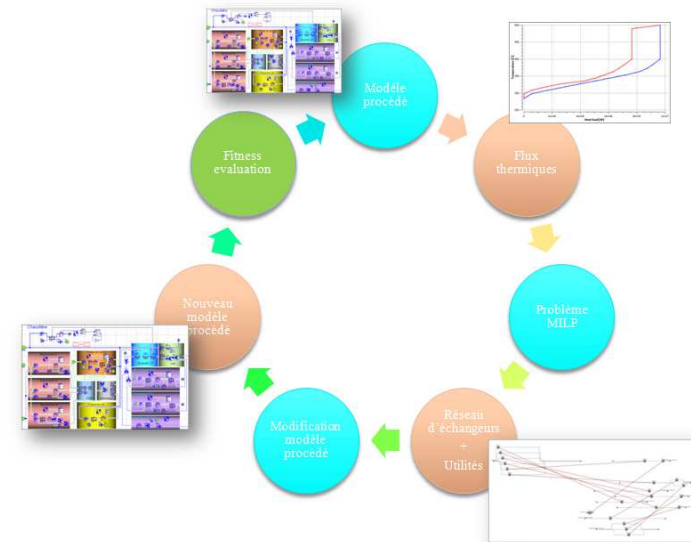
**Assaad Zoughaib**  
**16/03/2017**



# Méthodologie

Réduire et cibler les besoins d'énergie des procédés industriels

- Identification des besoins énergétiques minimaux relatifs au procédé étudié ;
- Choix par optimisation multi objectifs (exergie, économie, environnement...) des moyens de production des besoins énergétiques et les systèmes de valorisation de l'énergie perdue ;
- Conception optimisée du réseau d'échange de chaleur et des systèmes de production des besoins énergétiques;

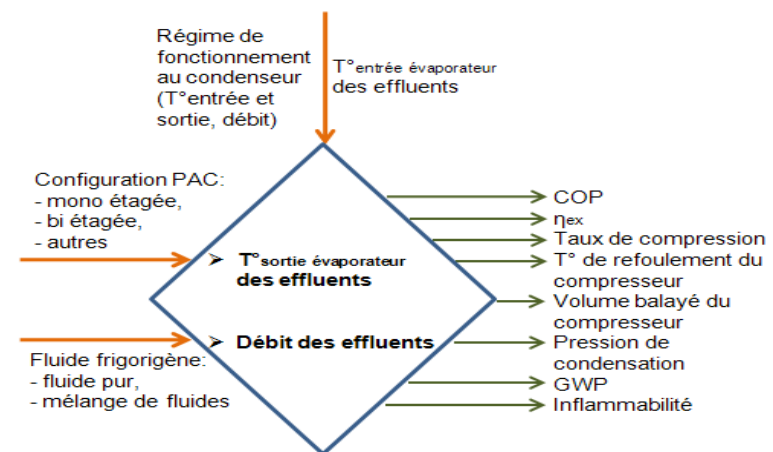
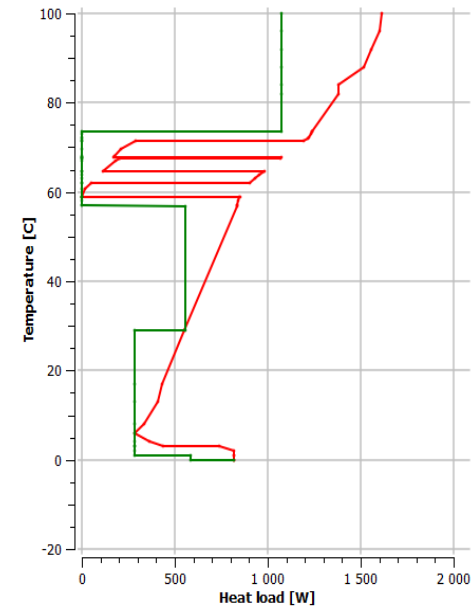


# Méthodologie

## Intégration de systèmes à compression de vapeur

Identification de leur emplacement idéal dans le procédé

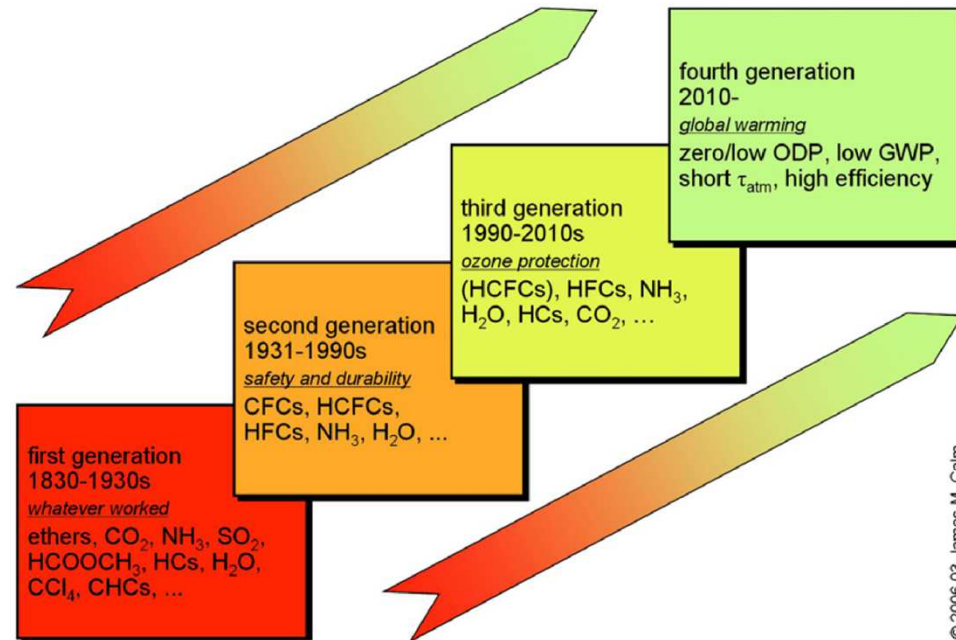
- Minimiser le besoin (destruction) d'exergie;
- Dans le cas de l'intégration de thermofrigopompe, la chaleur excédentaire de la zone en dessous du pincement est pompée vers la zone déficitaire;
- Conception optimisée des cycles thermodynamiques et choix des fluides de travail



# Faisabilité technologique

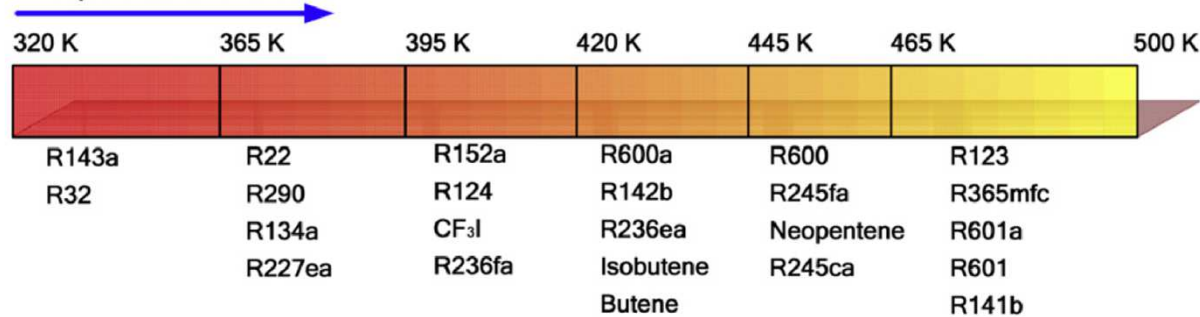
## Les fluides de travail

- Respect des réglementations (environnement et sécurité)
- Adéquation des propriétés thermodynamiques
- Cible de température



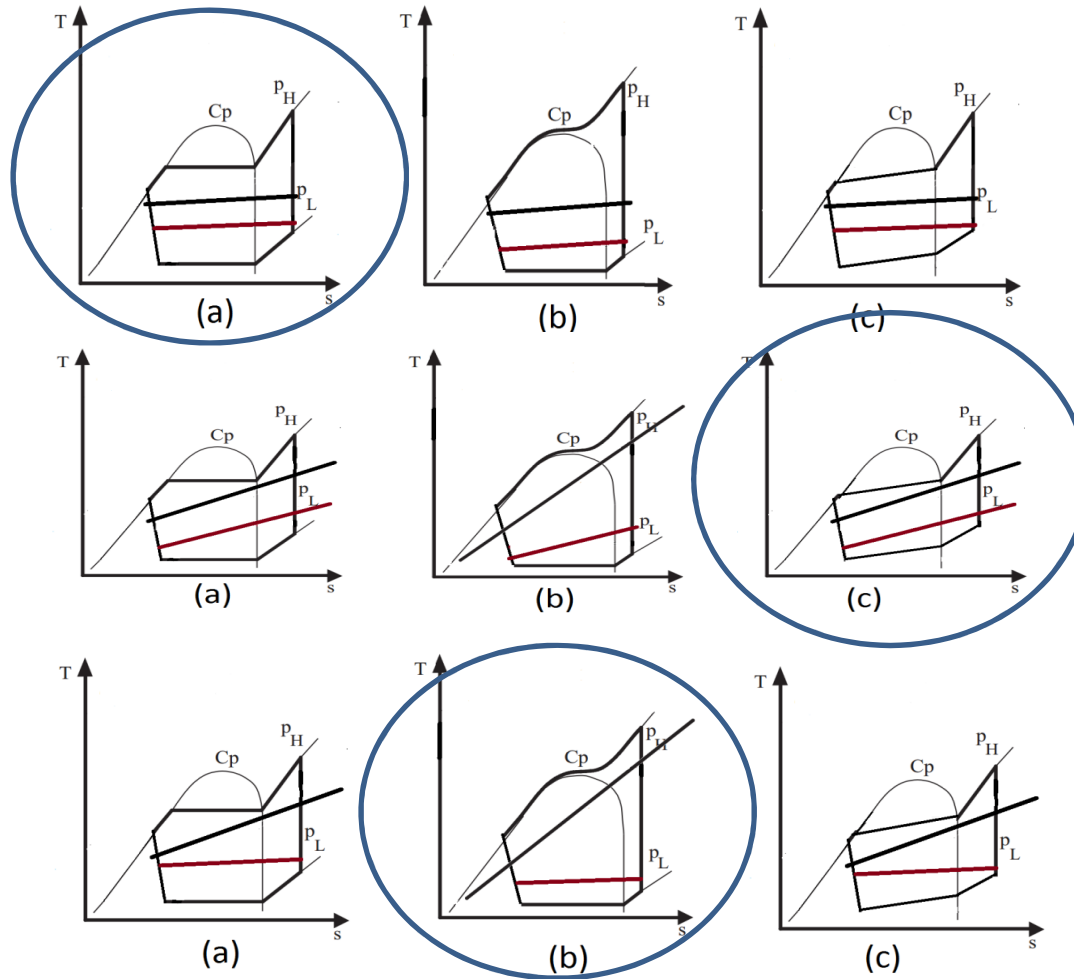
© 2006.03 James M. Calm

Temperature Increase



# Faisabilité technologique

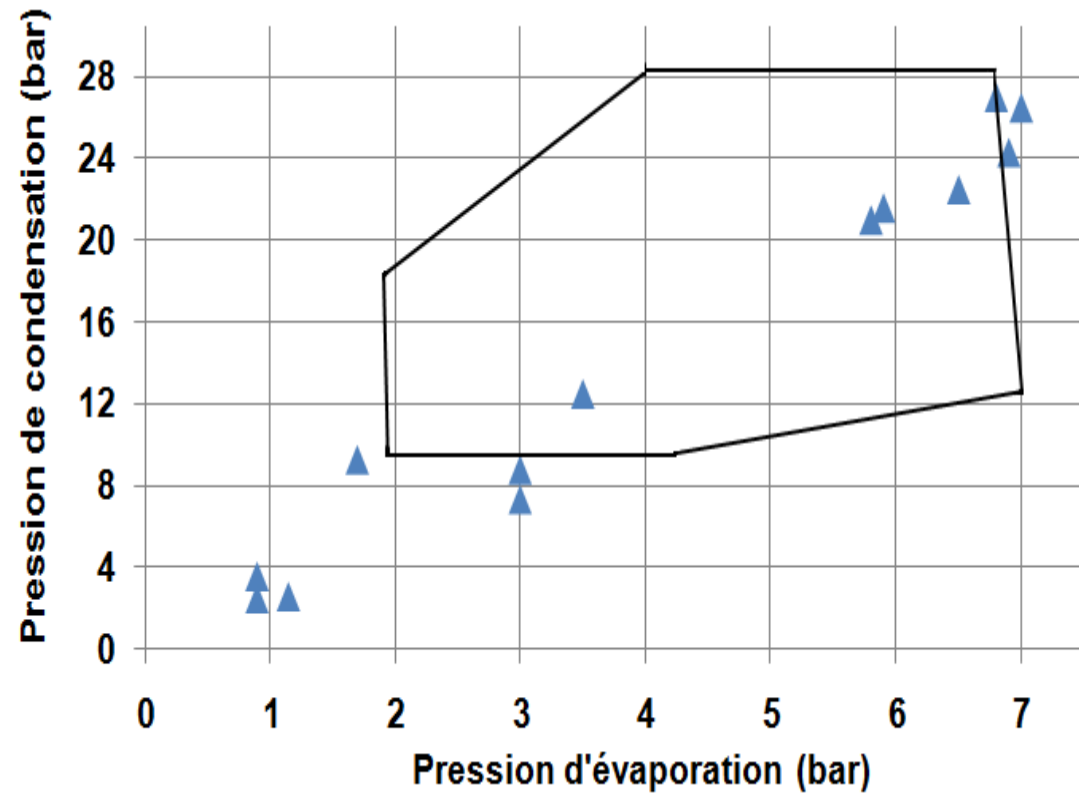
## Les adéquations cycle thermo/flux procédés



# Faisabilité technologique

## Les machines tournantes

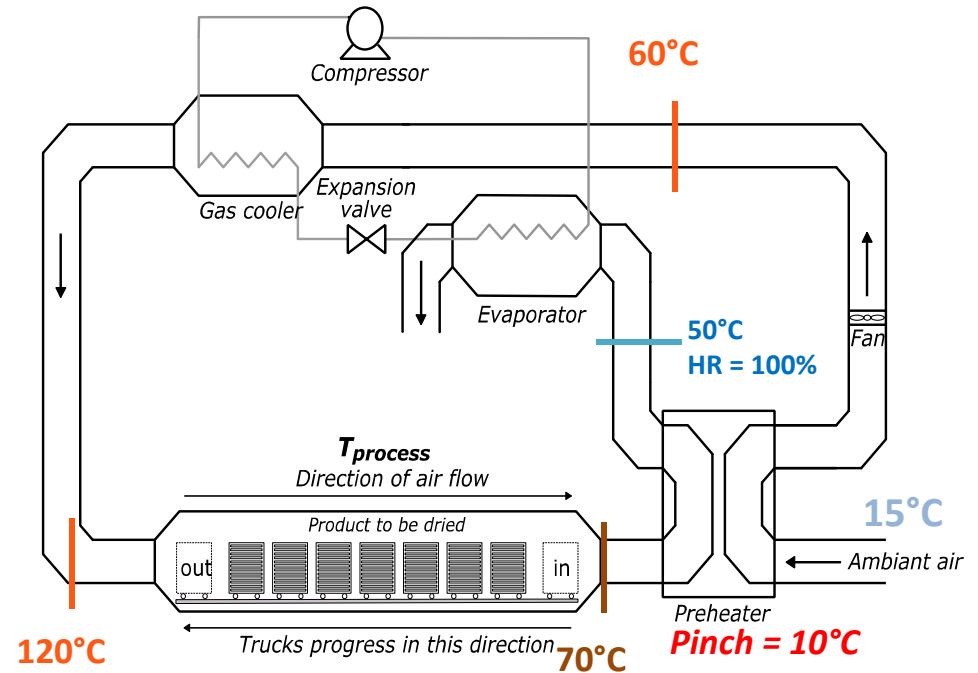
- Technologies (cinétiques vs volumétriques)
- Niveau de haute pression
- Rapport de pression
- Lubrification



# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## Procédés de séchage

- Atteindre des hautes températures  $\sim 120^\circ\text{C}$
- Grande évolution de température du fluide chauffé  $\sim 60\text{ K}$
- COP élevé ( $>3.5$ )

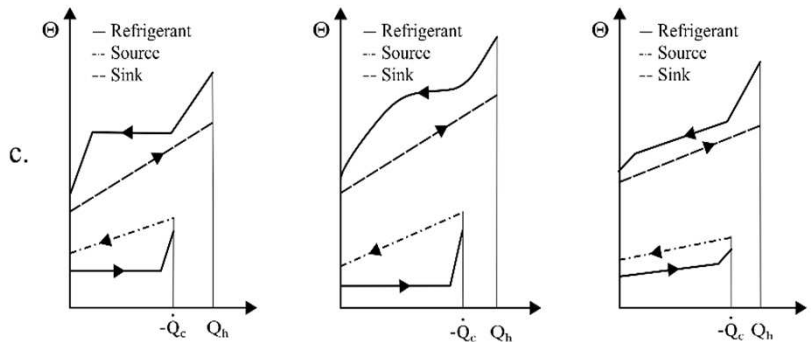
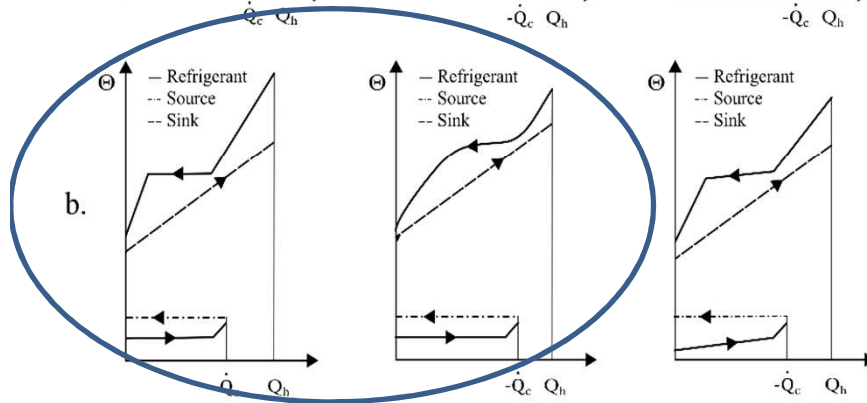
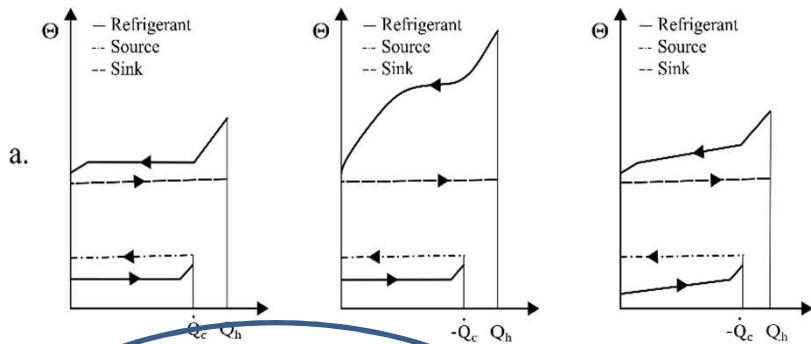


# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

Subcritical Cycle  
Single Fluid  
Azeotropic Mixture

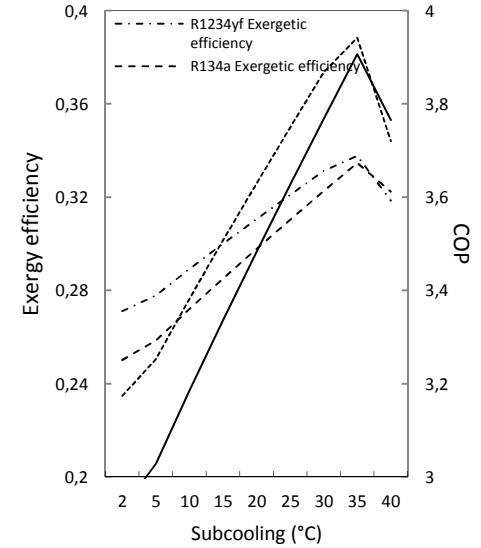
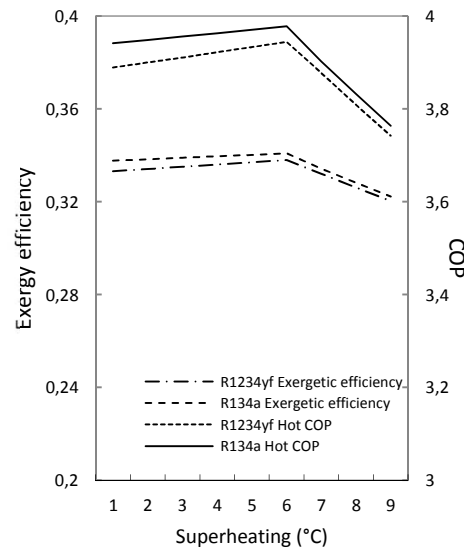
Transcritical Cycle  
Single Fluid  
Azeotropic Mixture

Subcritical Cycle  
Non Azeotropic Mixture



16 Mars 2017

## Optimisation des paramètres

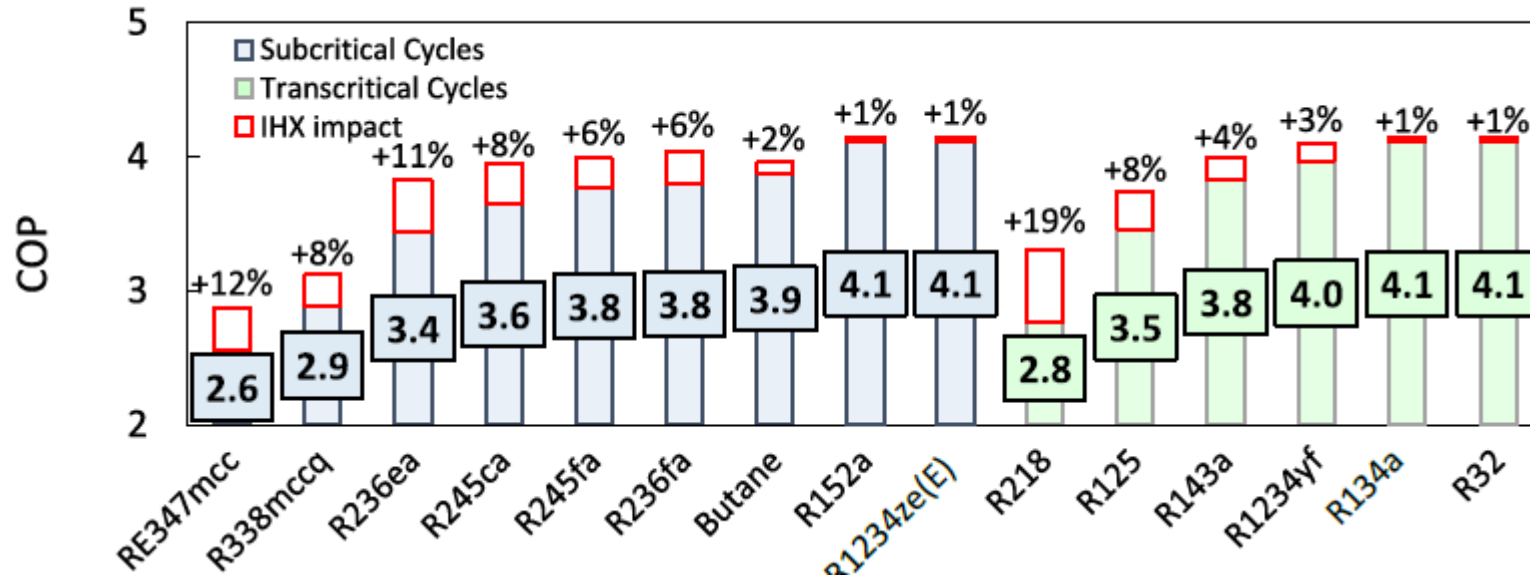


## Balayage des fluides dans une shortlist

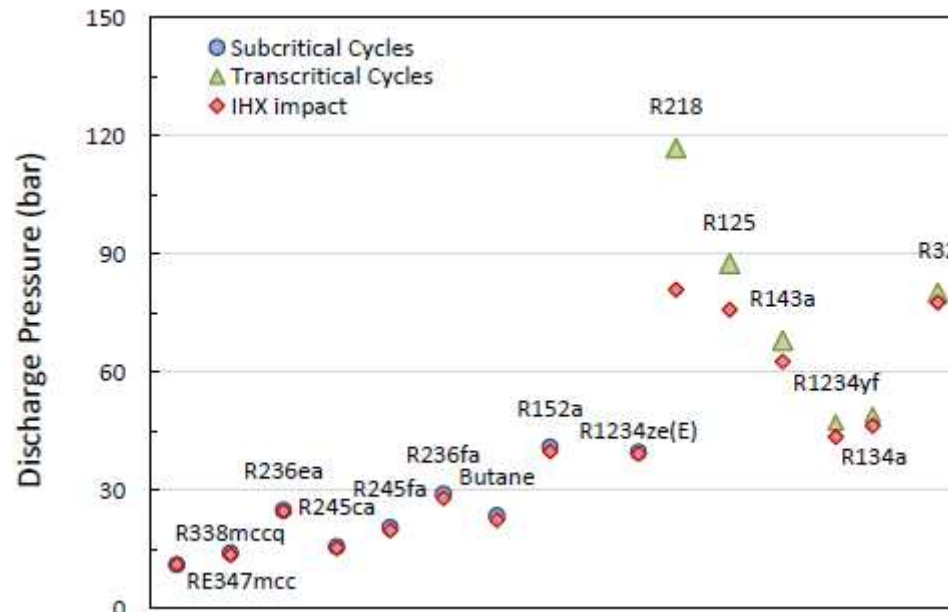


# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## ☐ Résultats en terme de COP

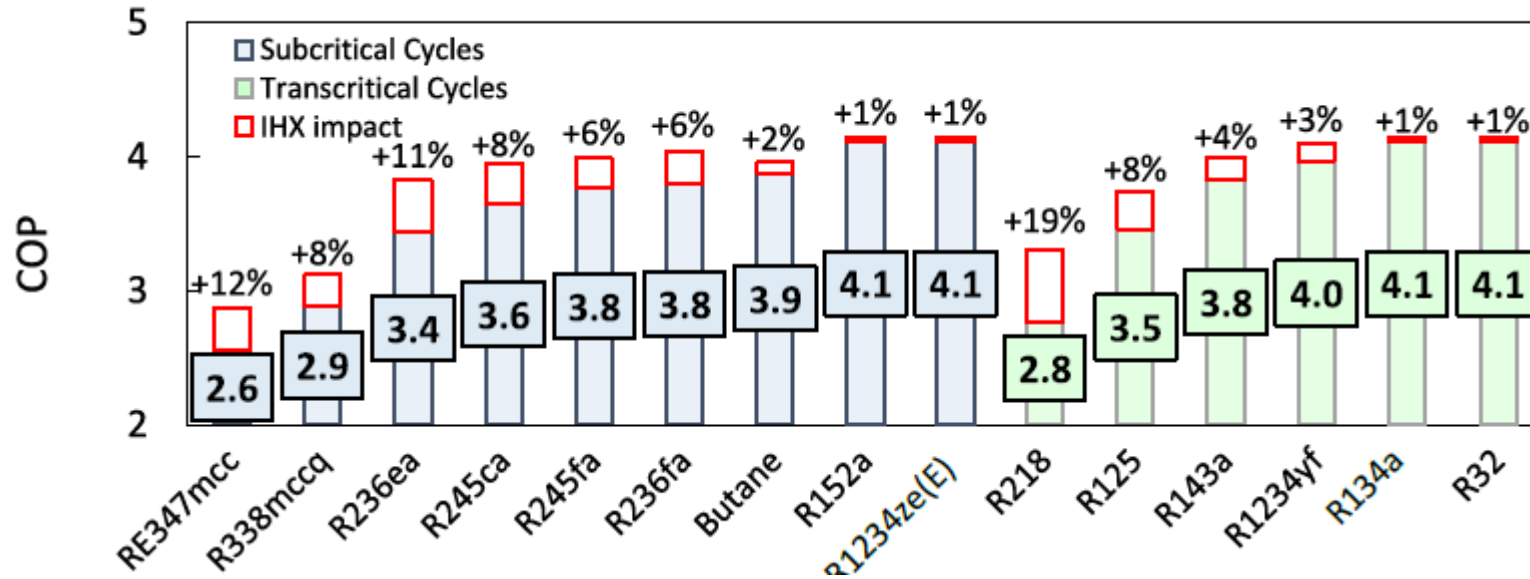


## ☐ Pression de refoulement

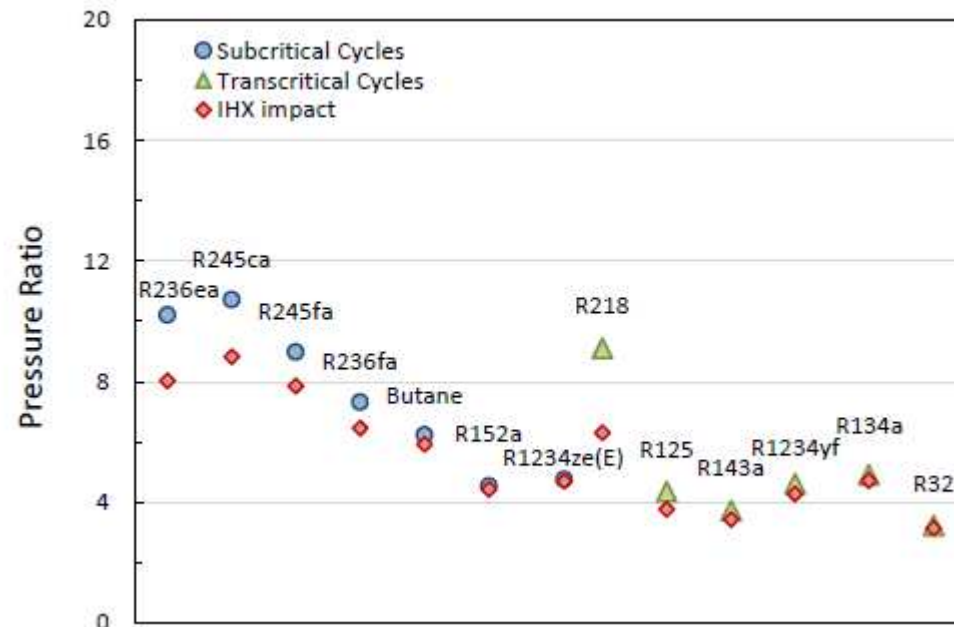


# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## ☐ Résultats en terme de COP

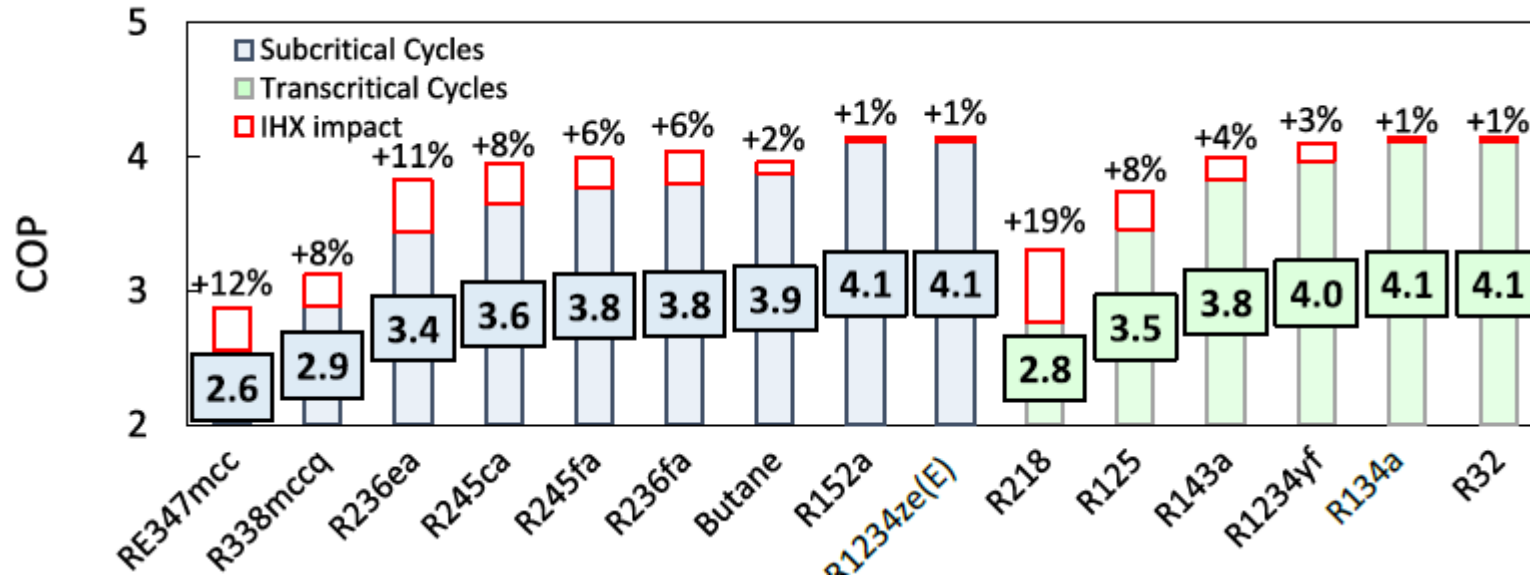


## ☐ Taux de compression

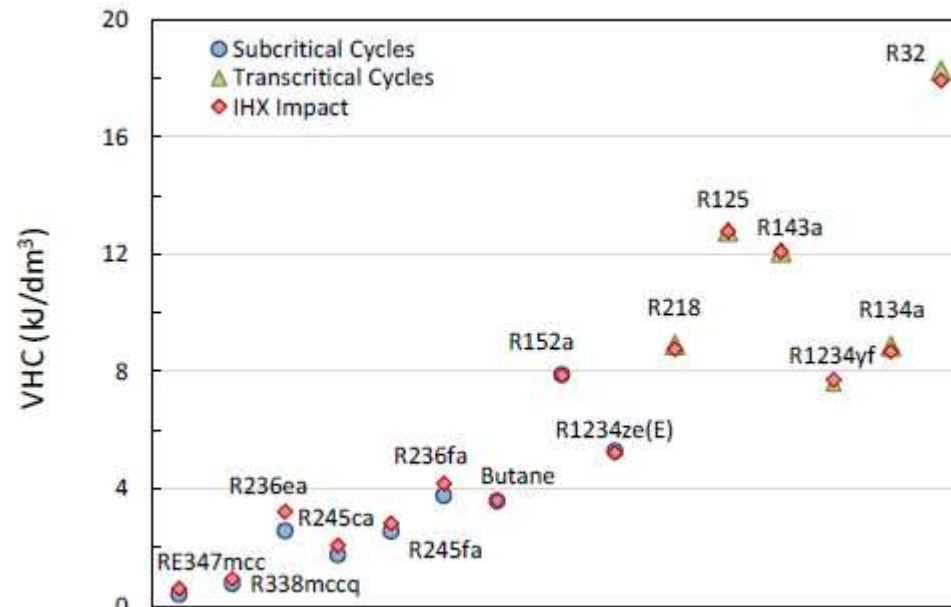


# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## ☐ Résultats en terme de COP

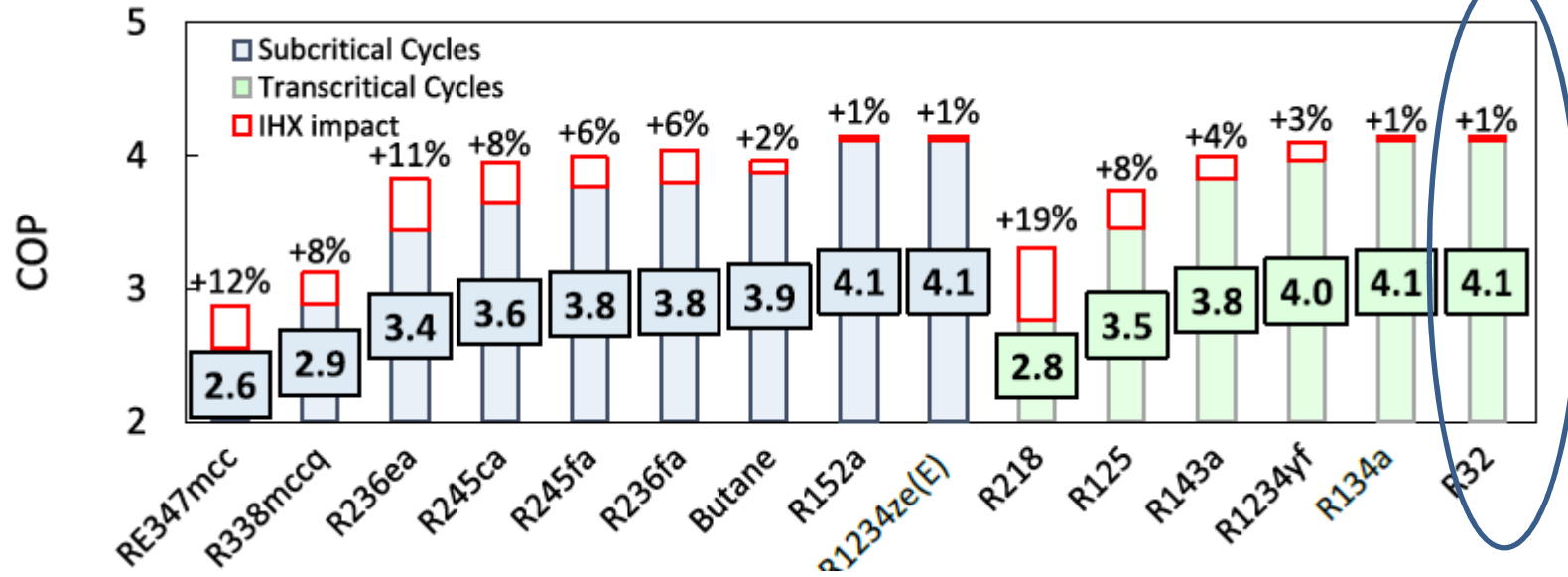


## ☐ Capacité calorifique volumétrique

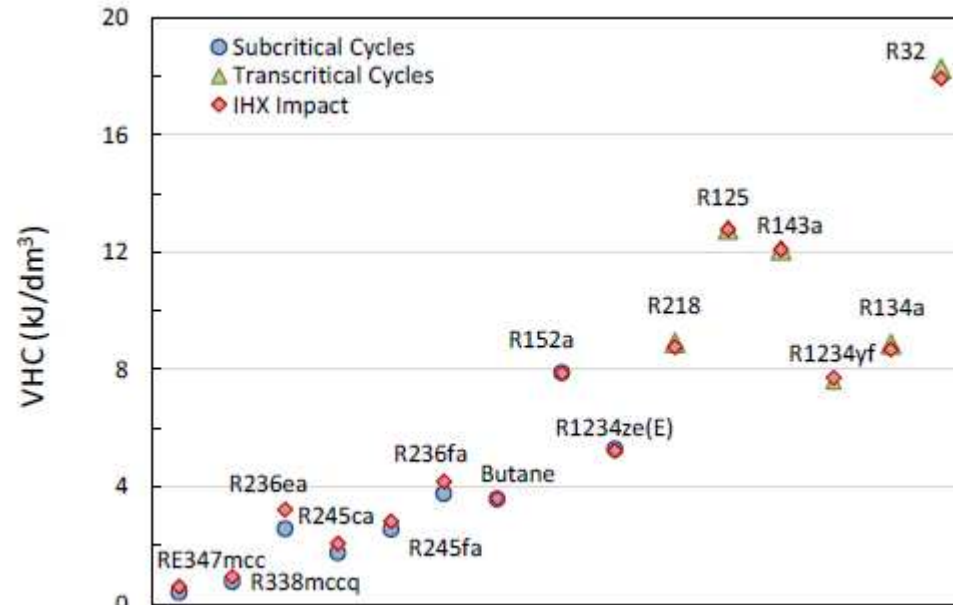


# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## ☐ Résultats en terme de COP



## ☐ Capacité calorifique volumétrique



# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## Verrous technologiques

- Haute pression (>70 bar)
- Trefoulement  $\sim 150^{\circ}\text{C}$
- Composants existants mais pour des domaines différents
- Echangeur à contre courant sur des gaz

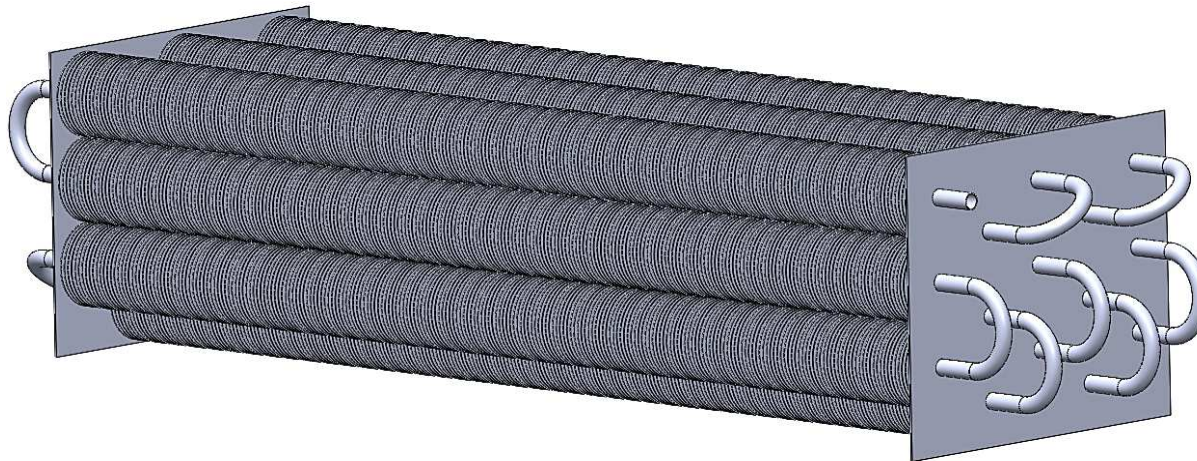


Figure a : Photo en profil perdu



Figure b : Photo de 3/4

Voir catalogue : *GEA Grasso screw compressor*



# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## Construction d'un démonstrateur



Photographie du banc d'essai TRANSPAC 20-05/2014  
*CES palaiseau*

Le banc est composé de trois parties:

1. Pompe à chaleur TRANSPAC
2. Unité de préparation d'air humide saturé à 50°C
3. Unité de préparation d'air chaud à 60°C
4. Unité de refroidissement d'air de 120°C à 60°C

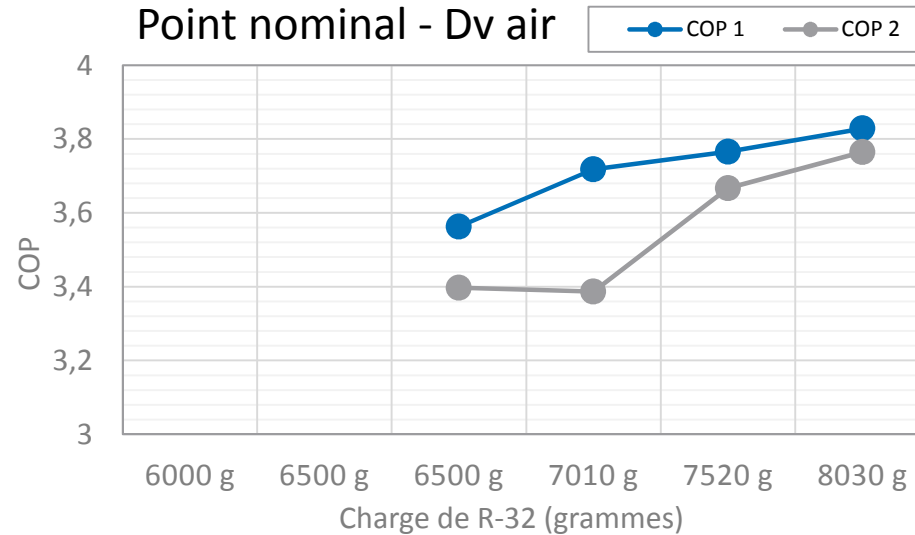


# Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

## Validation des performances

$$COP1 = \frac{\dot{Q}_{gascooler}}{\dot{W}_{thermo}}$$

$$COP2 = \frac{\dot{Q}_{gascooler}}{\dot{W}_{elec}}$$

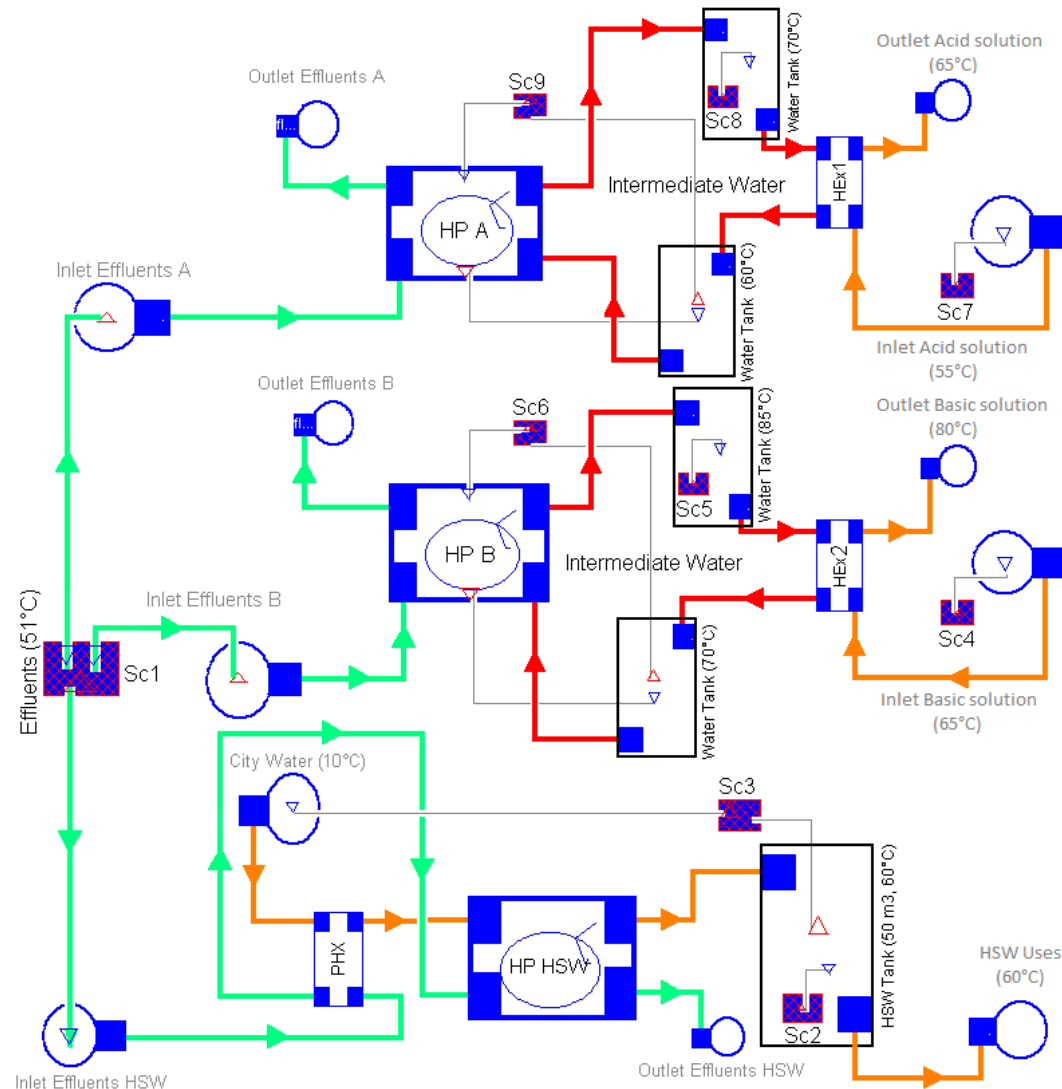


Charge (kg)	<u>Air chaud</u> <u>Te-Ts (°C)</u>	W.elec (W)	Débit (g/s)
6.50	<b>60-110</b>	7254	114
7.01	<b>60-111</b>	7324	112
7.52	<b>60-112</b>	7257	105
8.03	<b>59-115</b>	7518	103
<b>Point Nominal</b>	<b>60-120</b>	<b>7895</b>	<b>110</b>

# Exemple 2: Production ECS et NEP en laiterie (CES et BEL)

## Architecture de l'integration énergétique

- Trois PAC et systèmes de stockage

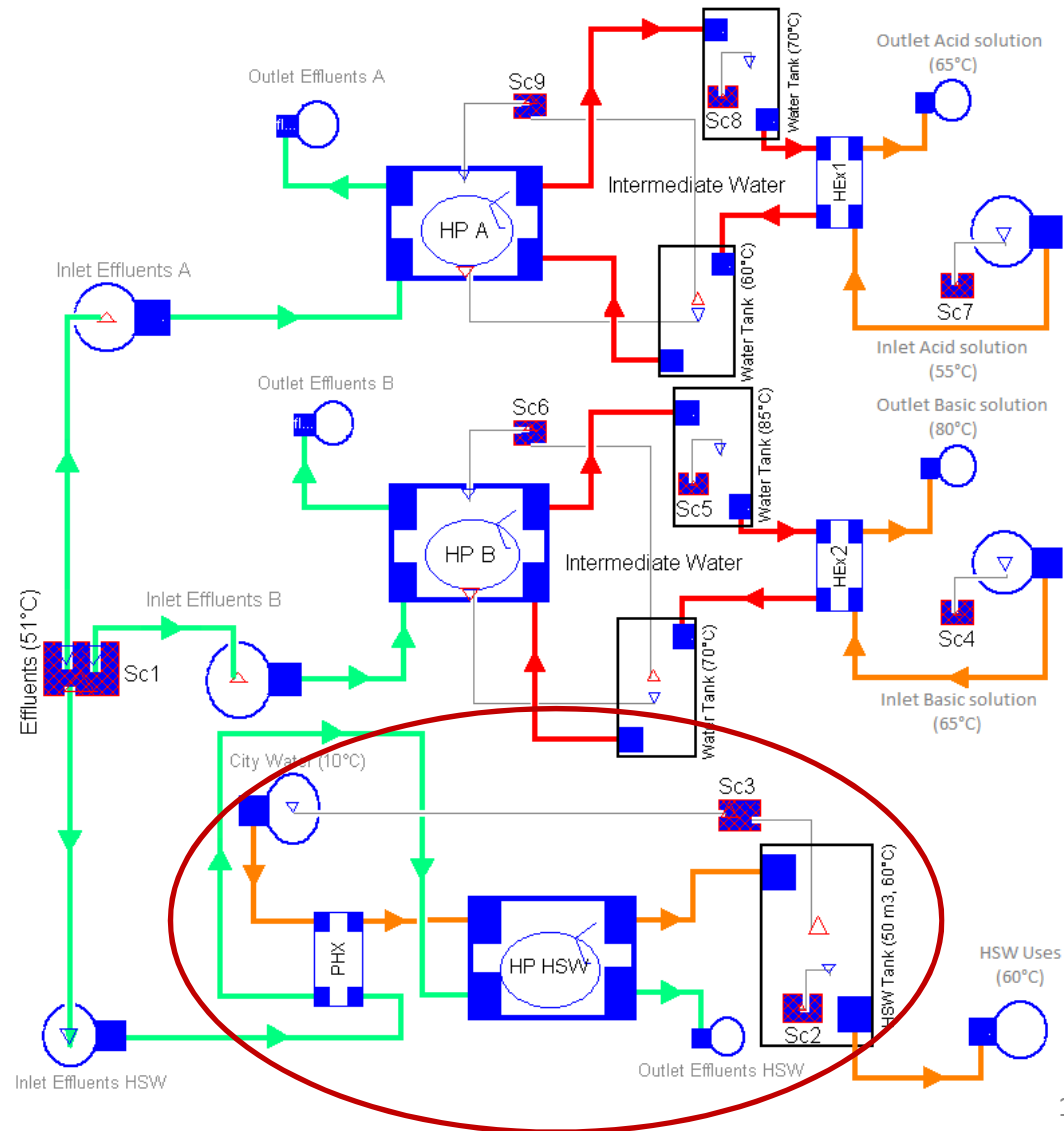




# Exemple 2: Production ECS et NEP en laiterie (CES et BEL)

## Architecture de l'intégration énergétique

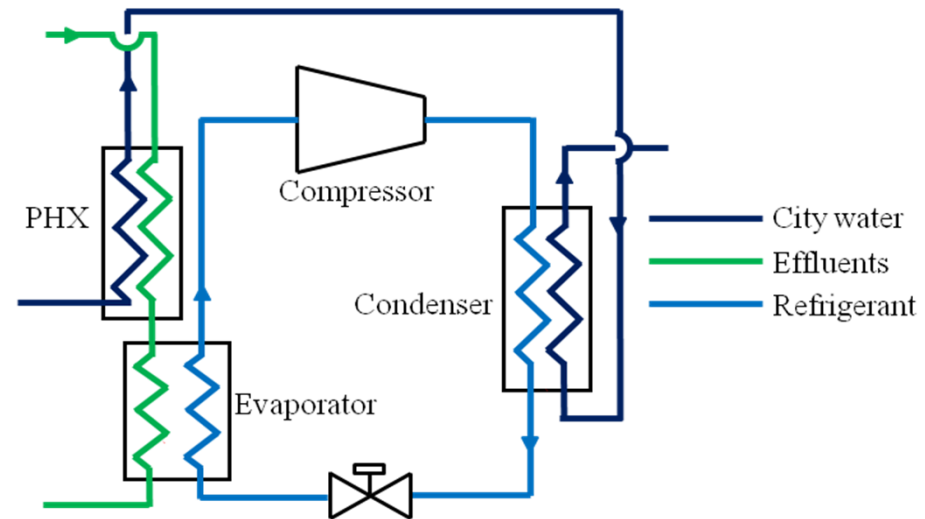
- Trois PAC et systèmes de stockage
- Préchauffage ECS en amont PAC



# Exemple 2: Production ECS et NEP en laiterie (CES et BEL)

## Architecture de l'intégration énergétique

- Trois PAC et systèmes de stockage
- Préchauffage ECS en amont PAC
- Malgré le préchauffage, l'ECS présente un large DT au condenseur ainsi que les effluents à l'évaporateur

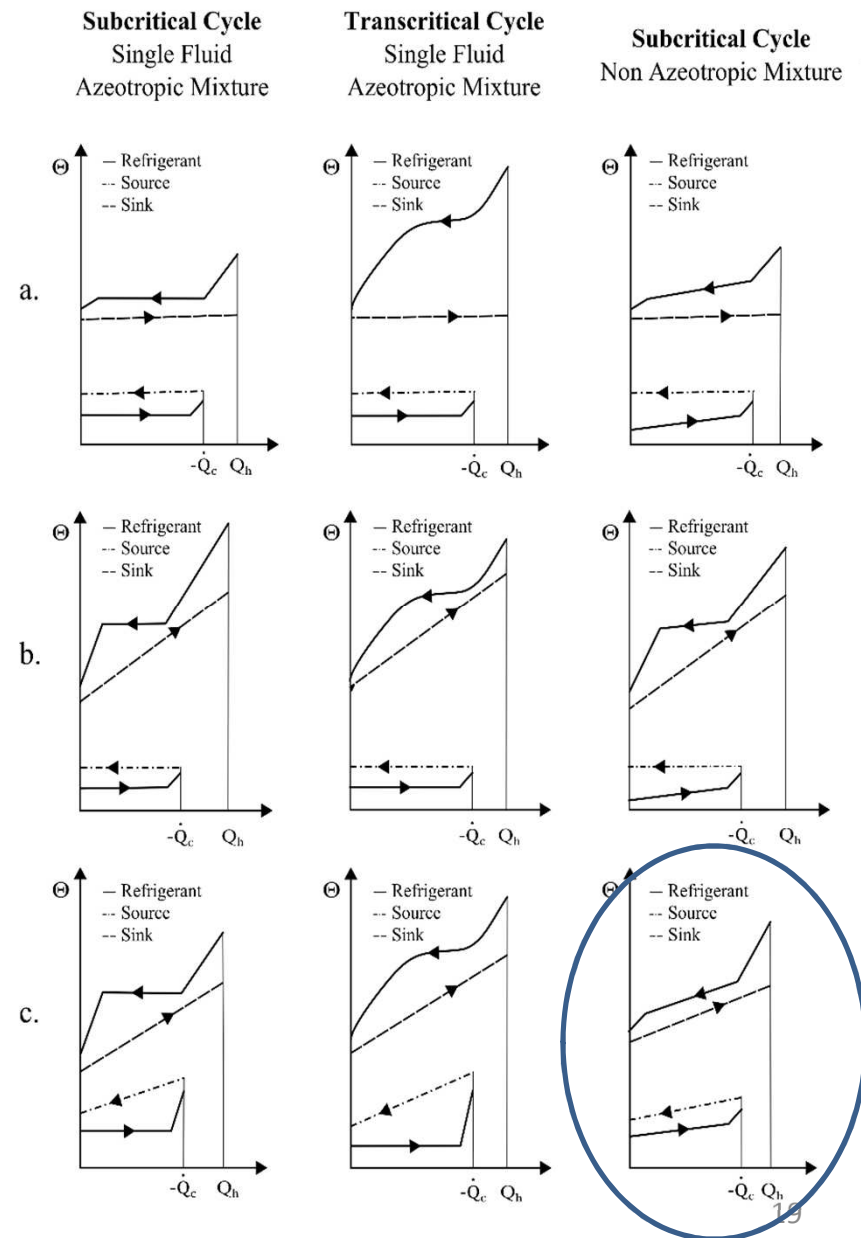


	PHX		Heat pump	
	Inlet T (° C)	Outlet T(° C)	Inlet T (° C)	Outlet T (° C)
Heat integration network	51	30	30	24
Hot water	10	46	46	60

# Exemple 2: Production ECS et NEP en laiterie (CES et BEL)

## Architecture thermodynamique

- Trois PAC et systèmes de stockage
- Préchauffage ECS en amont PAC
- Malgré le préchauffage, l'ECS présente un large DT au condenseur ainsi que les effluents à l'évaporateur
- Conditions favorables à un mélange non azéotropique

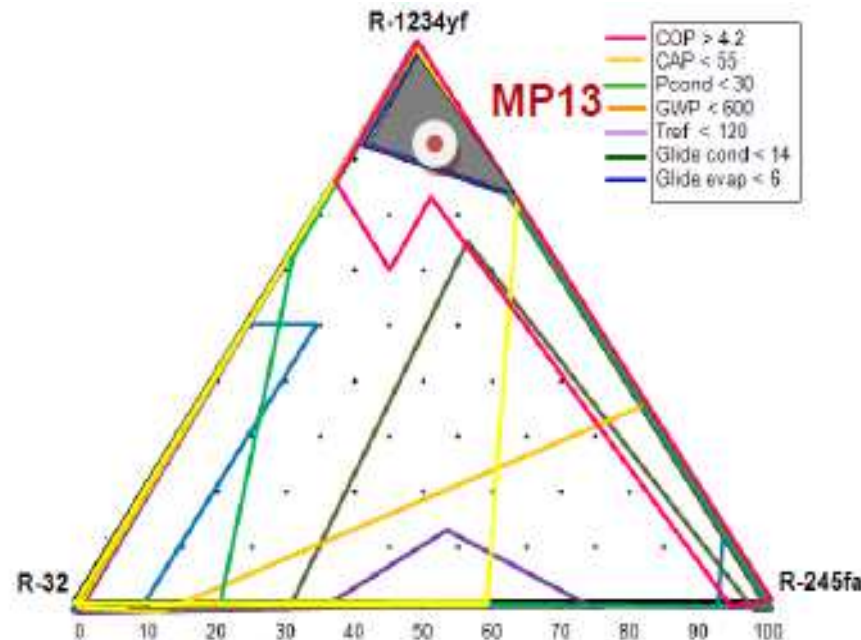


# Exemple 2: Production ECS et NEP en laiterie (CES et BEL)

## Conception du mélange

- Mélanges binaires et ternaires dans une short list
- Représentation des propriétés attendues (ex. mélange ternaire)

Symbol	Mm (g/mol)	T <sub>crit</sub> (° C)	P <sub>crit</sub> (MPa)	NBT (° C)	GWP (kgeq CO2)
R-134a	102.03	101.06	4.06	-26.1	1300
R-152a	66.05	113.26	4.52	-24	132
R-1234yf	114.04	94.8	3.26	-29.2	4
R-245fa	134.05	154.1	4.43	15.1	820
R-32	52.02	78.1	3.64	-51.7	670
R-125	120.02	66.02	3.45	-48.09	3500
R-744	44.01	30.97	7.38	-78.4	1



# Exemple 2: Production ECS et NEP en laiterie (CES et BEL)

## Comparaison multicritères meilleurs mélanges et corps purs

Refrigerant	MP11	MP12	MP13	R-134a	R-152a	R-1234yf	R-245fa
Mass composition (%)	85% R-134a, 10% R-245fa, 5% R-32	85% R-152a, 10% R-245fa, 5% R-32	85% R-1234yf, 10% R-245fa, 5% R-32	100	100	100	100
$P_{\text{cond}}$ (MPa)	1.7	1.55	1.79	1.8	1.6	1.73	0.52
$\text{COP}_{\text{heat pump}}$	4.24	4.26	4.27	3.8	4	3.6	3.97
SV ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	52	58	51	56.4	58.4	63.2	196
$T_{\text{outcomp}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	83	92	77	83	93	75	76
GWP	1220	228	119	1300	132	4	820
Ex destruction (kW)	7.63	7.42	7.27	8.86	8.44	9.3	8.13
Evap glide (k)	4.5	3.43	7.28	0	0	0	0
Cond glide (k)	4.37	3.23	5.26	0	0	0	0