



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

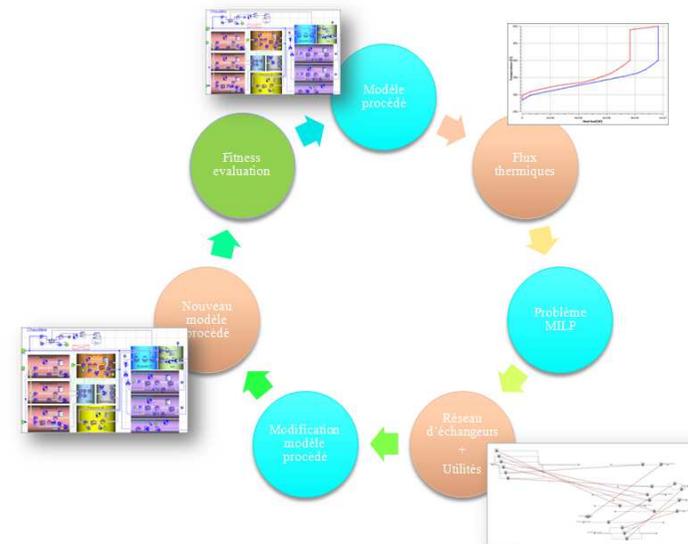
Assaad Zoughaib
16/03/2017



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;

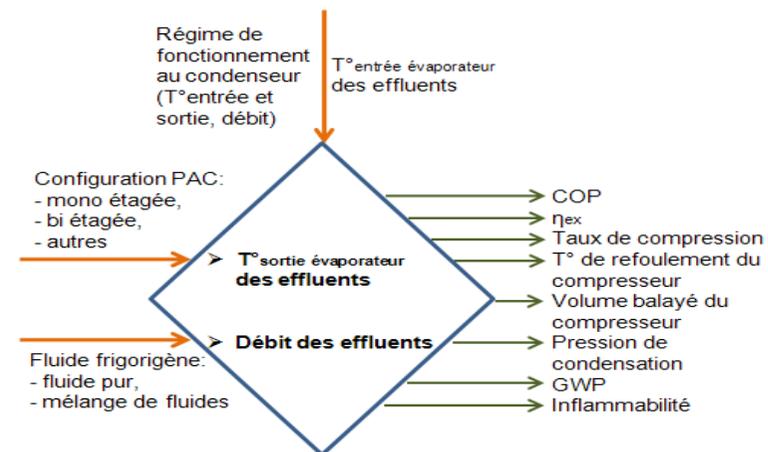
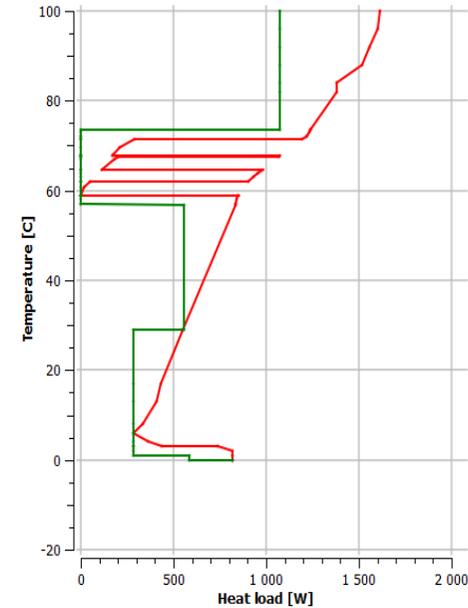


Méthodologie

Intégration de systèmes à compression de vapeur

Identification de leur emplacement idéal dans le procédé

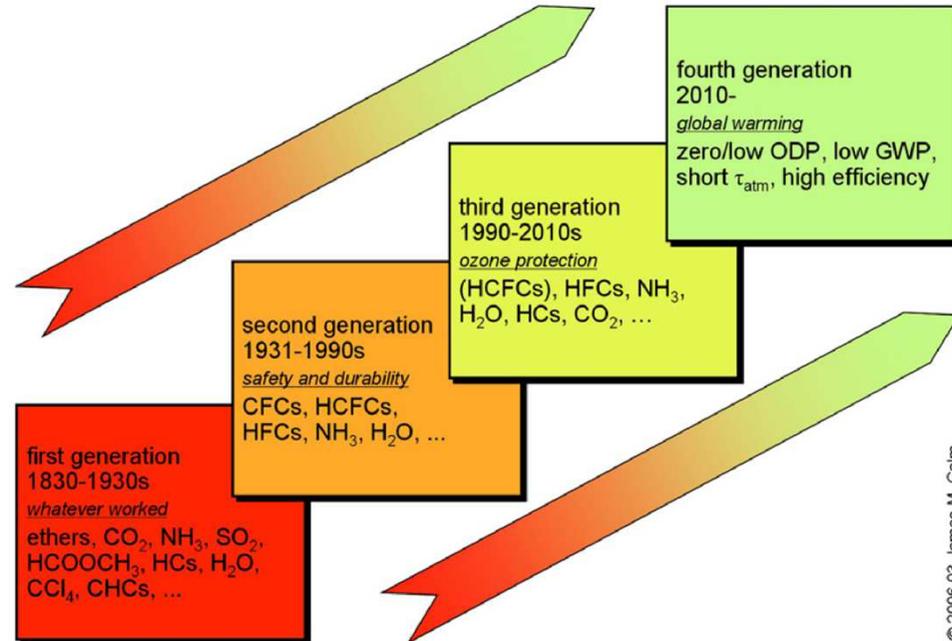
- Minimiser le besoin (destruction) d'exergie;
- Dans le cas de l'intégration de thermofrigopompe, la chaleur excédentaire de la zone en dessous du pincement est pompée vers la zone déficitaire;
- Conception optimisée des cycles thermodynamiques et choix des fluides de travail



Faisabilité technologique

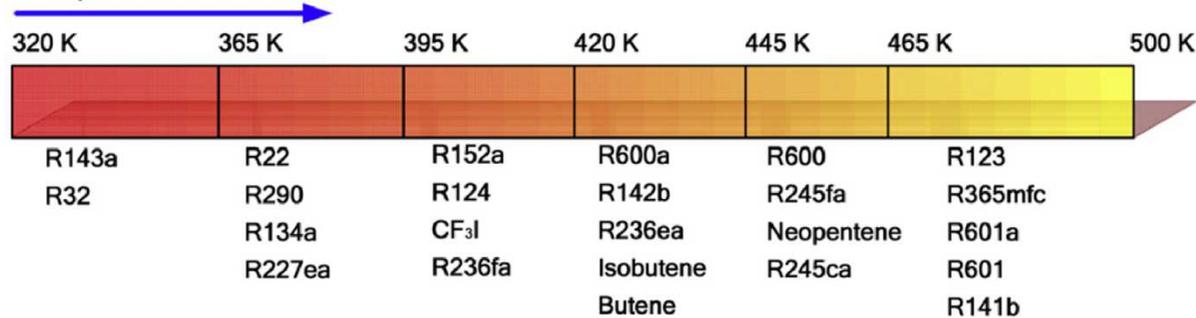
Les fluides de travail

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



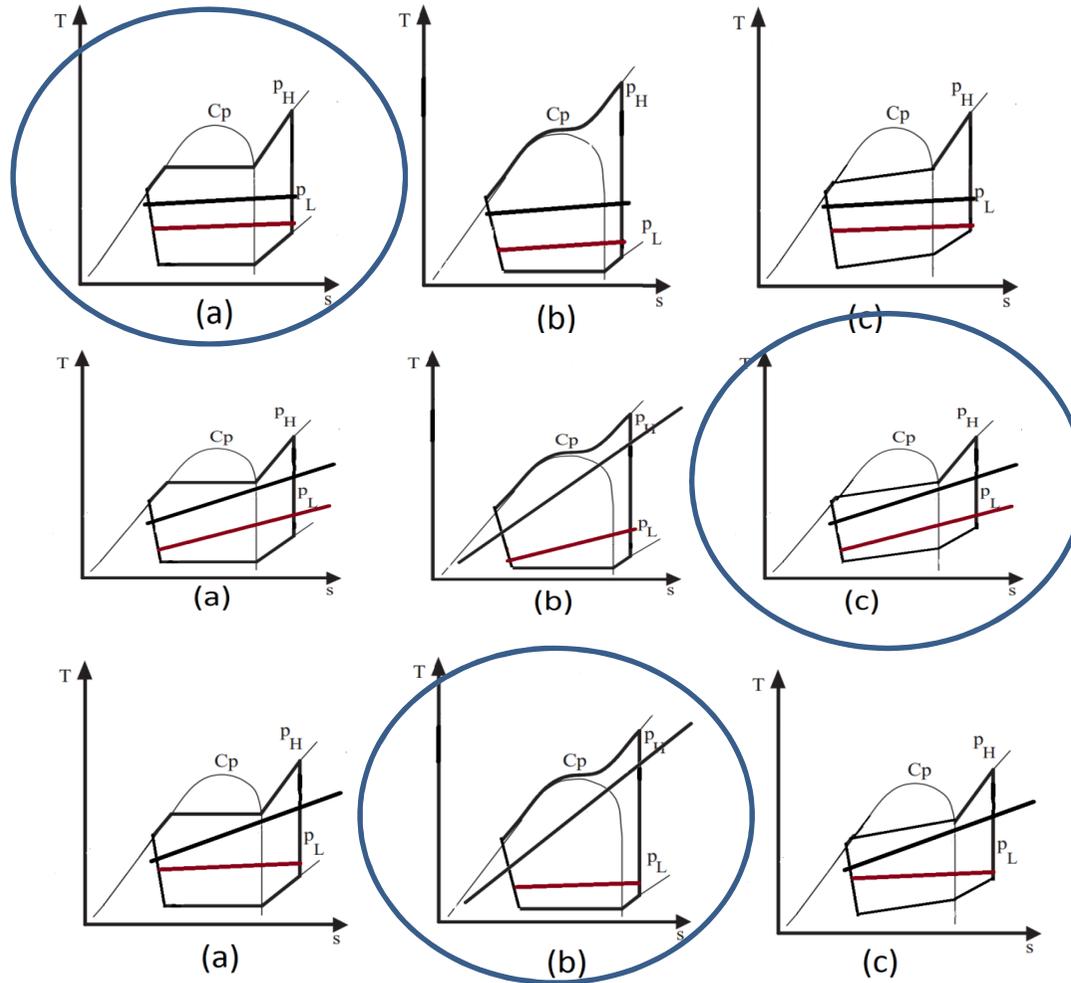
© 2006.03 James M. Calm

Temperature Increase



Faisabilité technologique

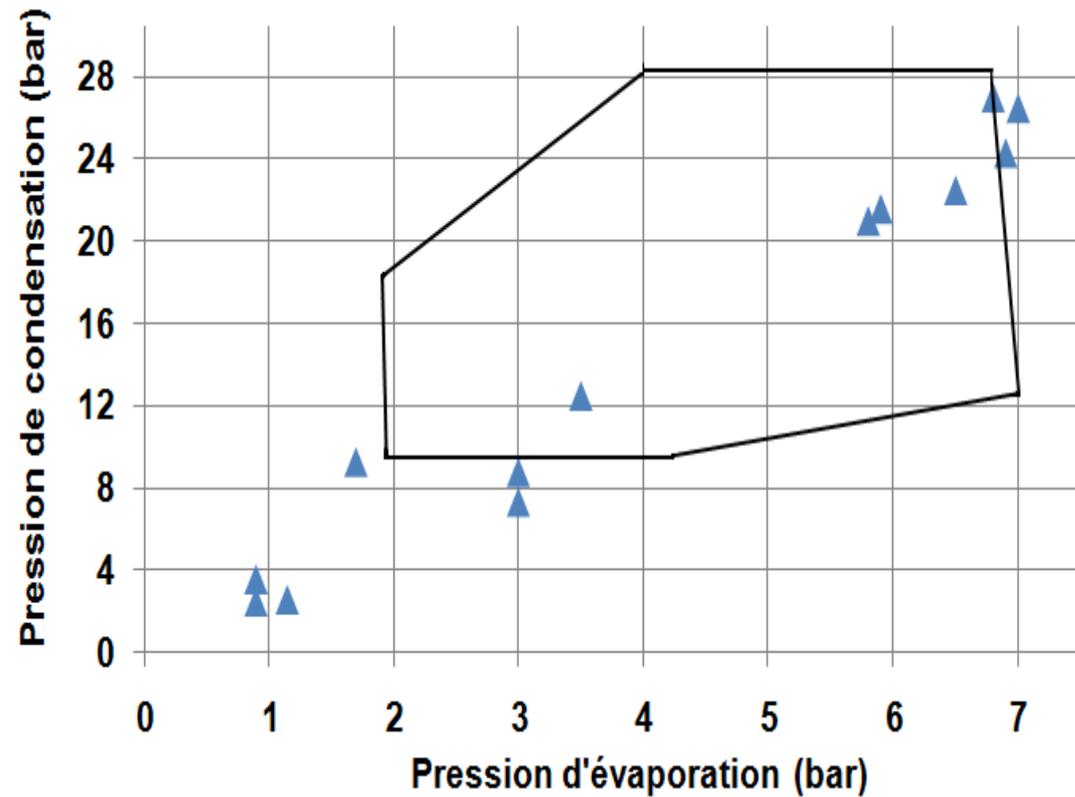
Les adéquations cycle thermo/flux procédés



Faisabilité technologique

Les machines tournantes

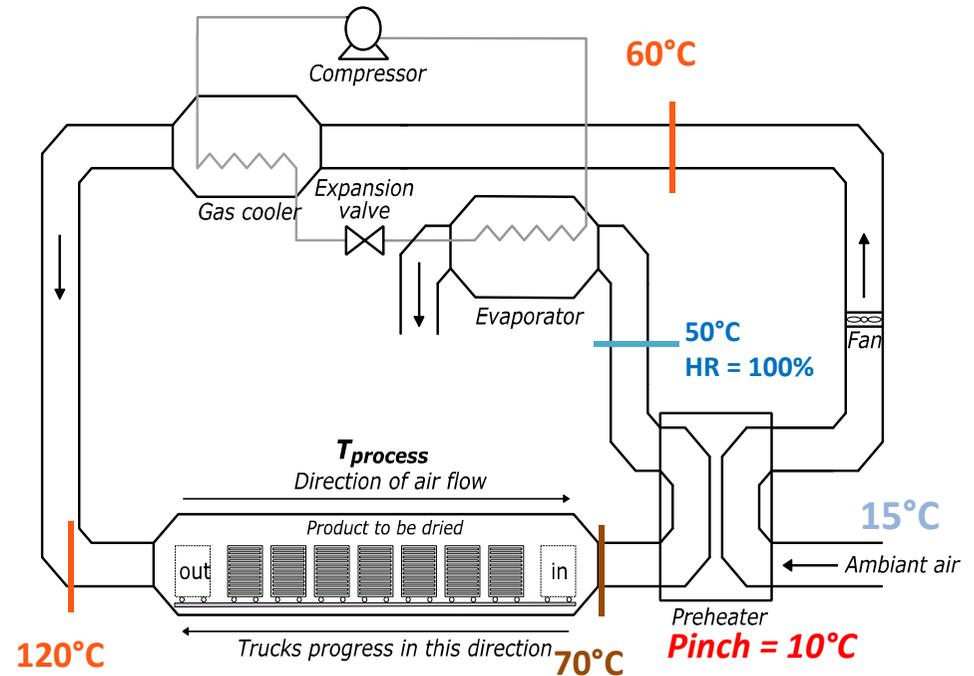
- Technologies (cinétiques vs volumétriques)
- Niveau de haute pression
- Rapport de pression
- Lubrification



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)

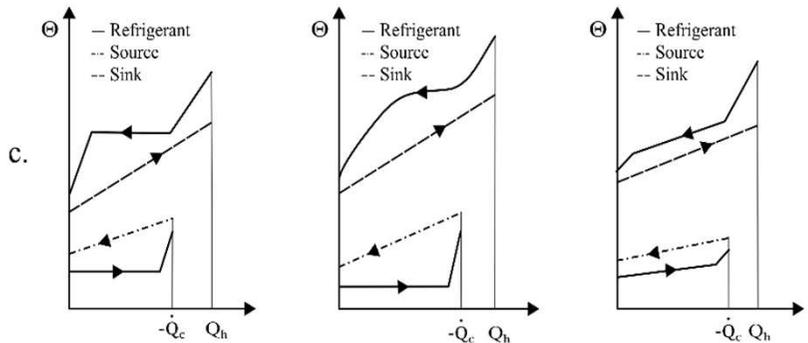
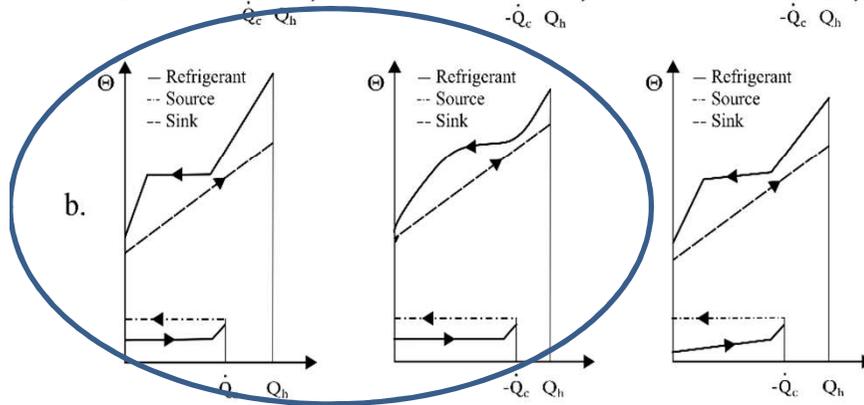
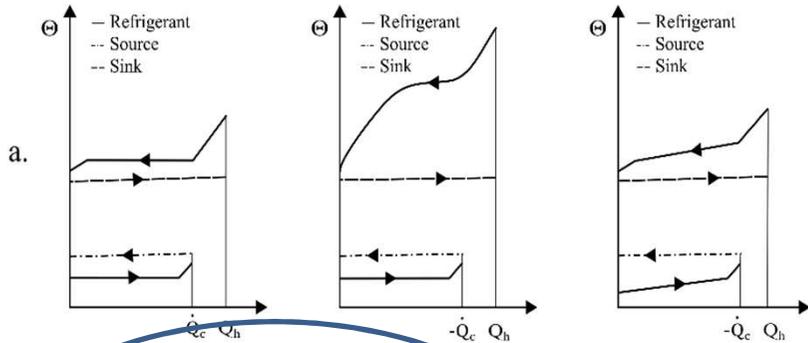


Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

Subcritical Cycle
Single Fluid
Azeotropic Mixture

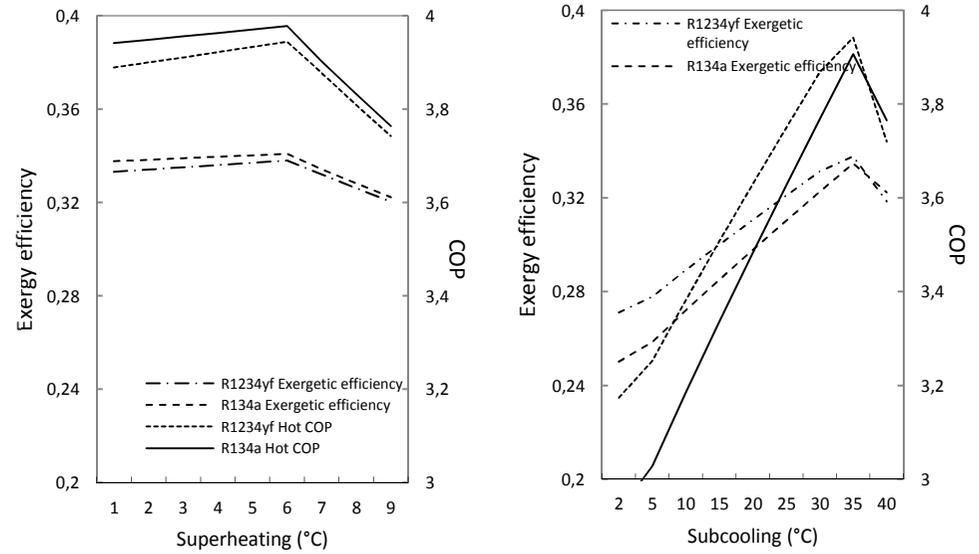
Transcritical Cycle
Single Fluid
Azeotropic Mixture

Subcritical Cycle
Non Azeotropic Mixture



16 Mars 2017

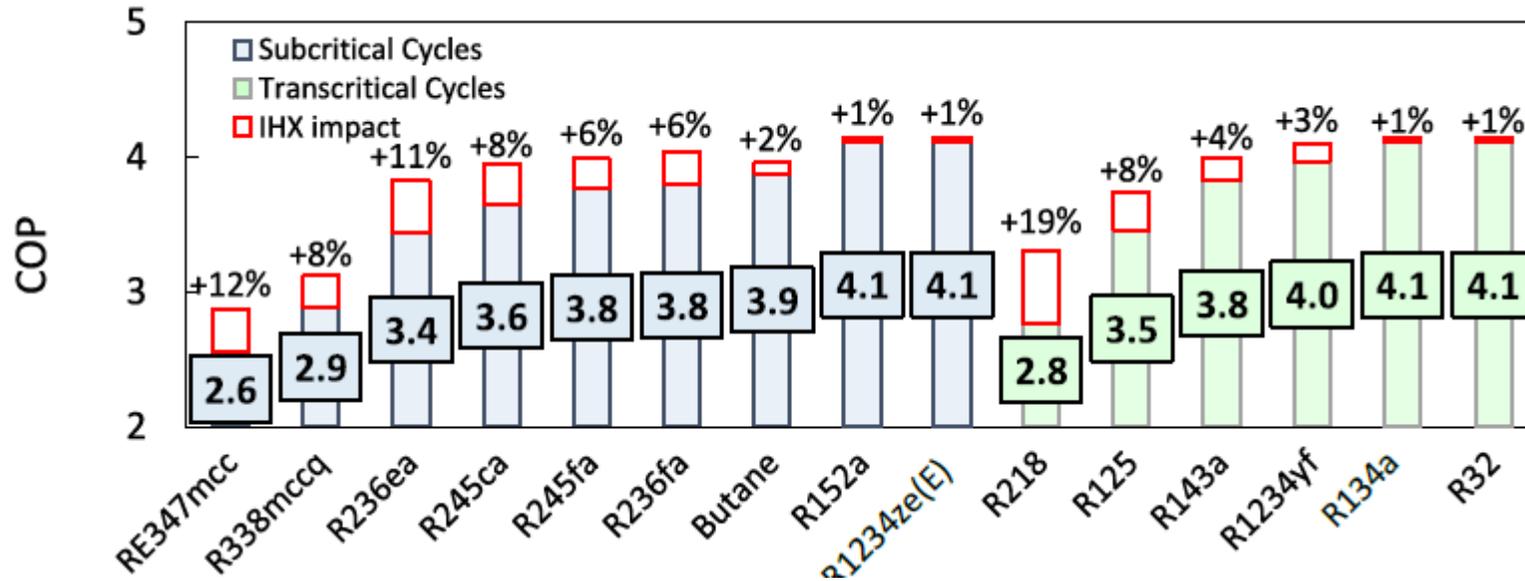
Optimisation des paramètres



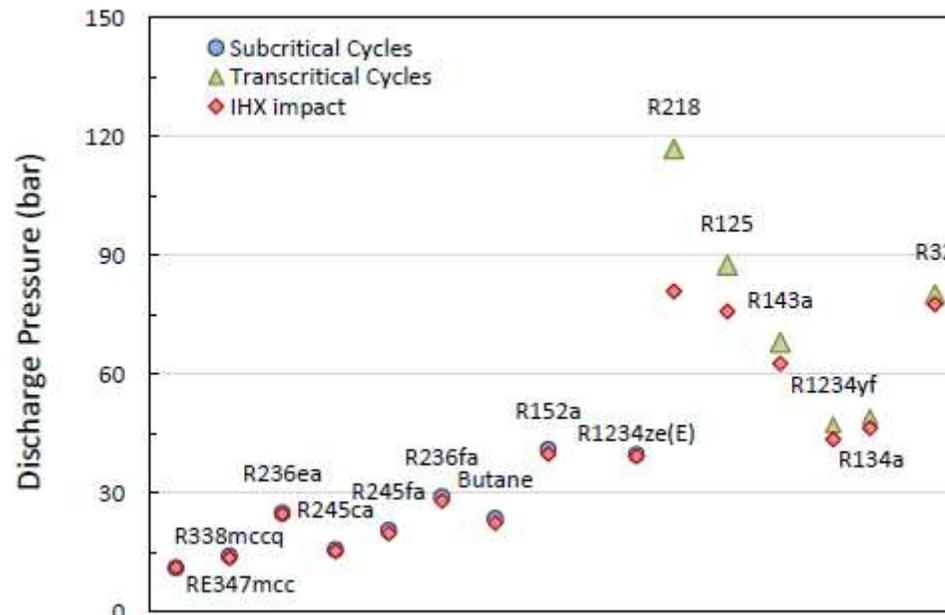
Balayage des fluides dans une shortlist

Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

☐ Résultats en terme de COP

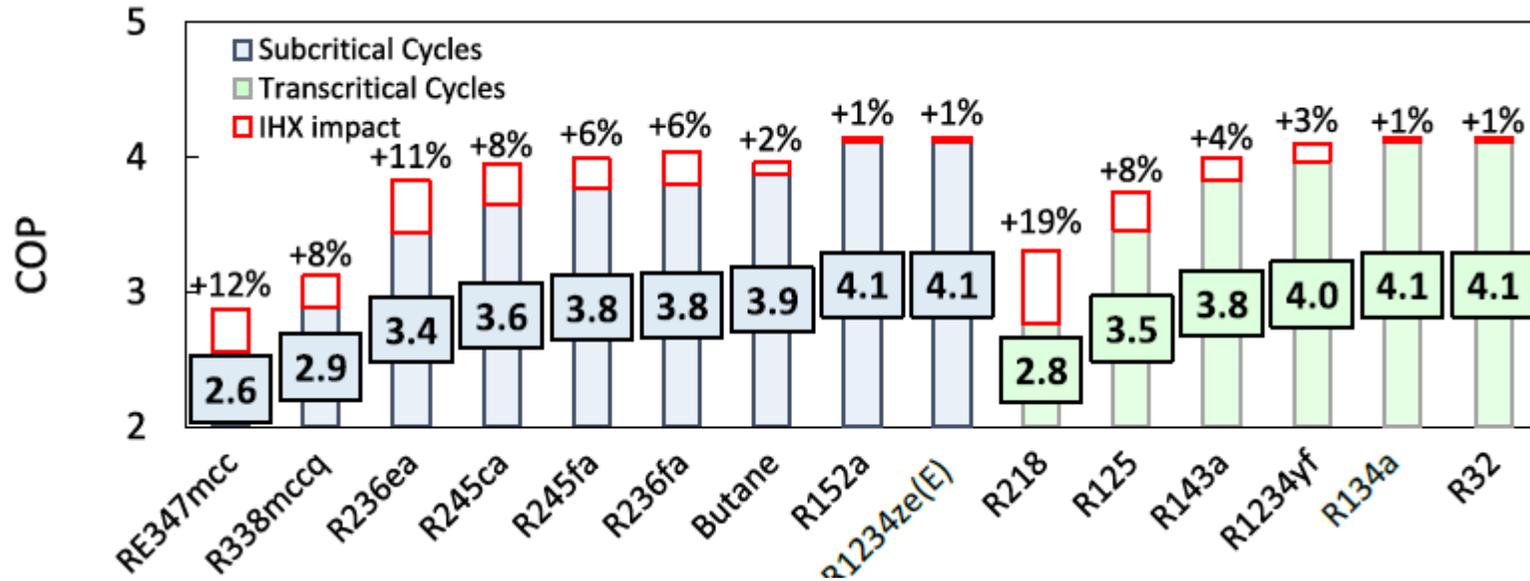


☐ Pression de refoulement

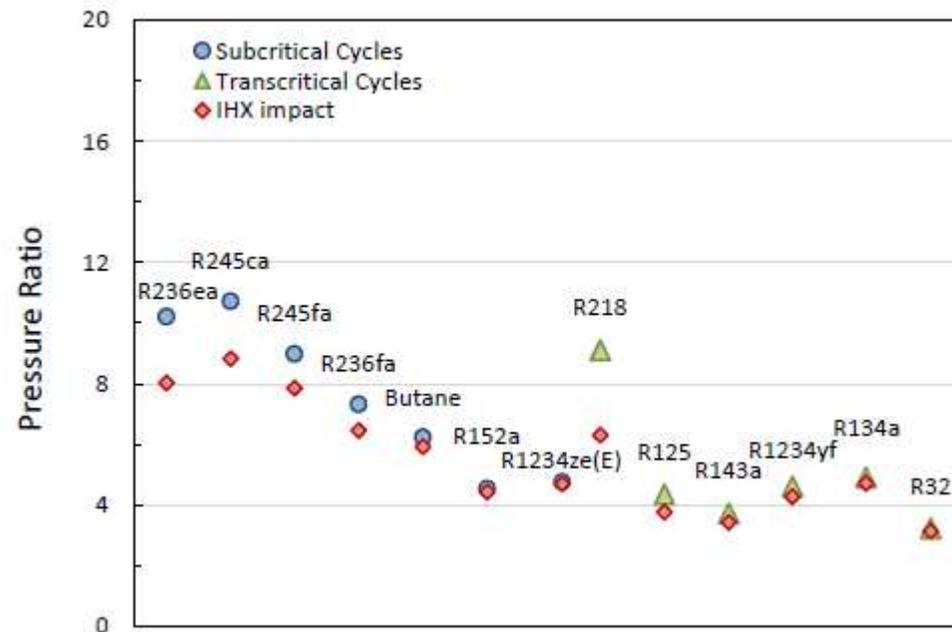


Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

☐ Résultats en terme de COP

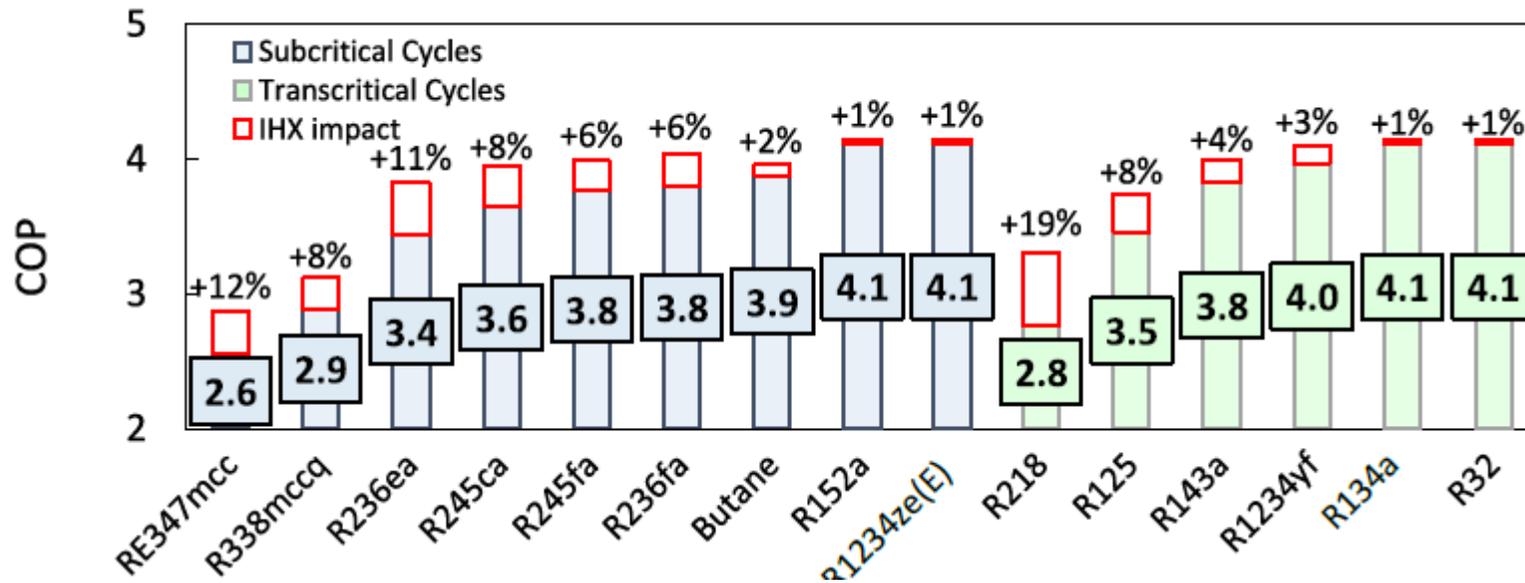


☐ Taux de compression

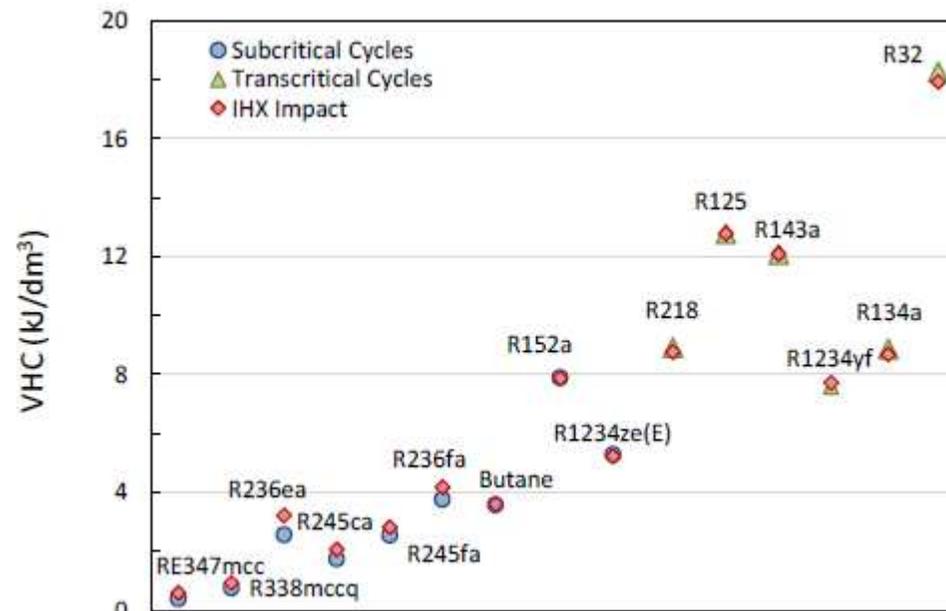


Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

☐ Résultats en terme de COP

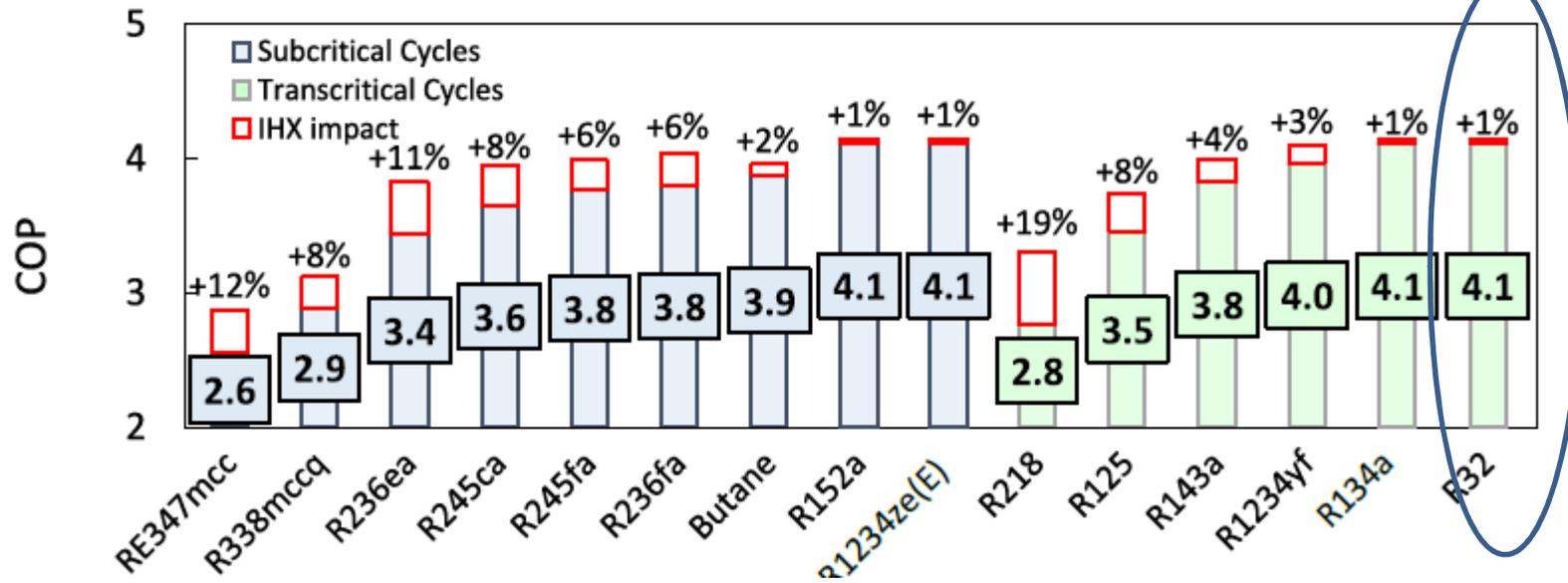


☐ Capacité calorifique volumétrique

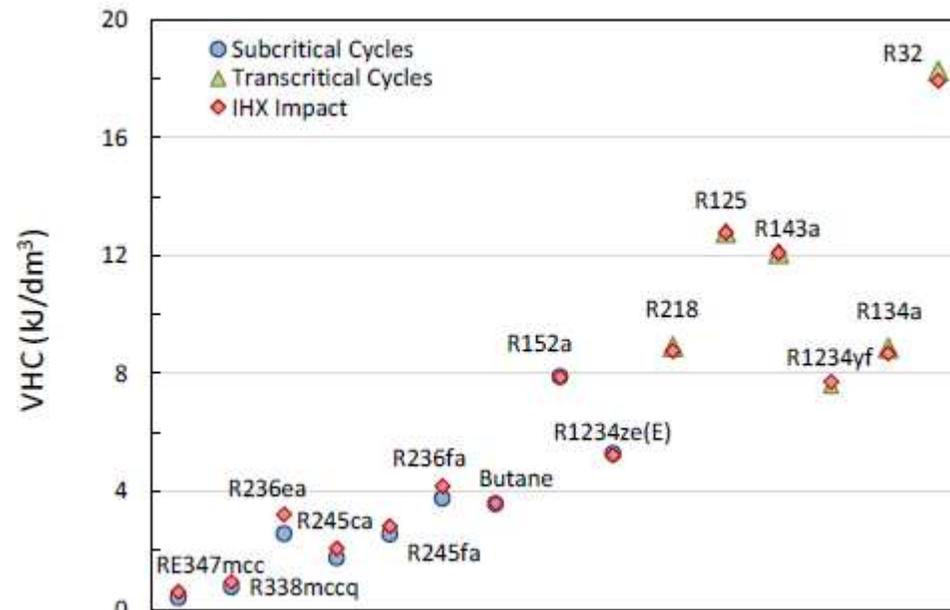


Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

☐ 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:

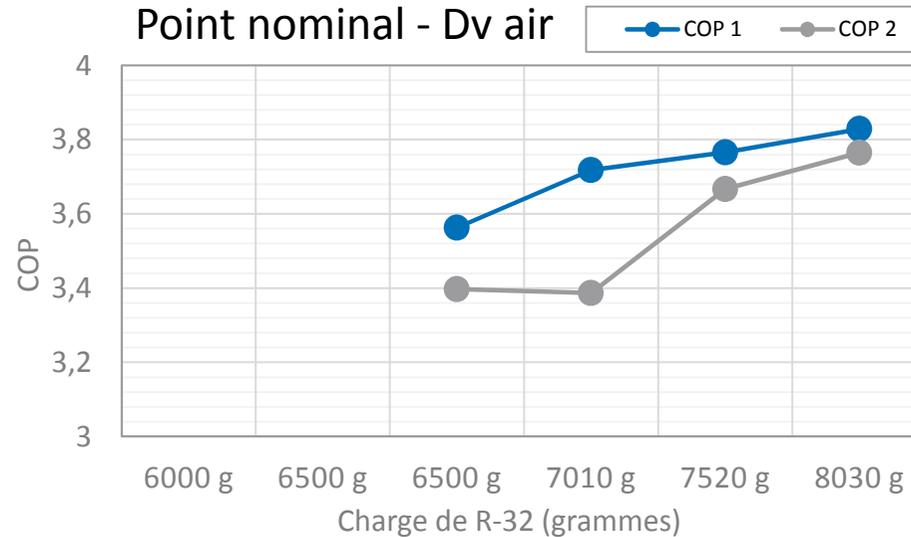
1. Pompe à chaleur TRANSPAC
2. Unité de préparation d'air humide saturé à 50°C
3. Unité de préparation d'air chaud à 60°C
4. Unité de refroidissement d'air de 120°C à 60°C

Exemple: TRANSPAC (CES et EDF)

Validation des performances

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

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

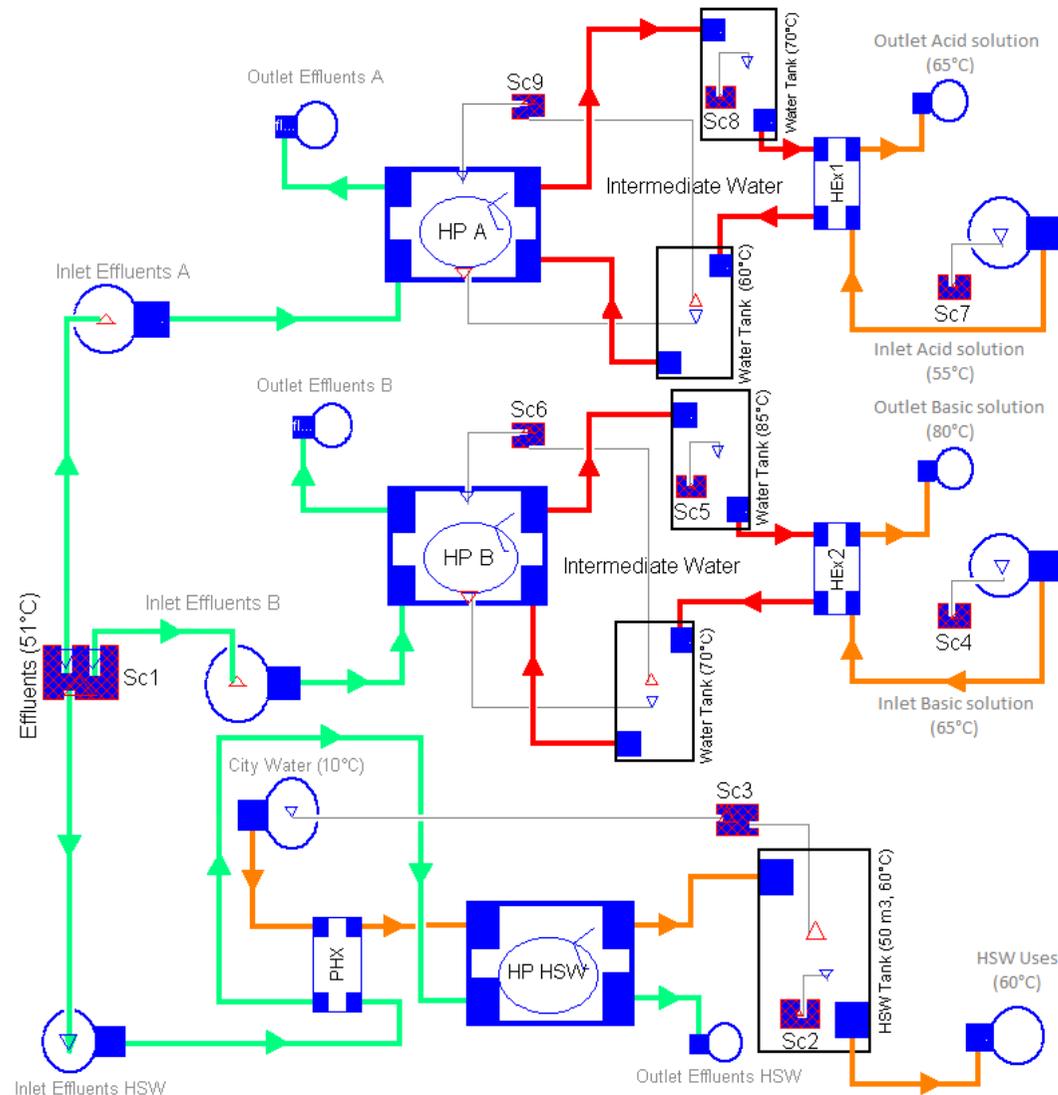


Charge (kg)	<u>Air chaud</u> <u>Te-Ts (°C)</u>	W.elec (W)	Débit (g/s)
6.50	60-110	7254	114
7.01	60-111	7324	112
7.52	60-112	7257	105
8.03	59-115	7518	103
Point Nominal	60-120	7895	110

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

Architecture de l'integration énergétique

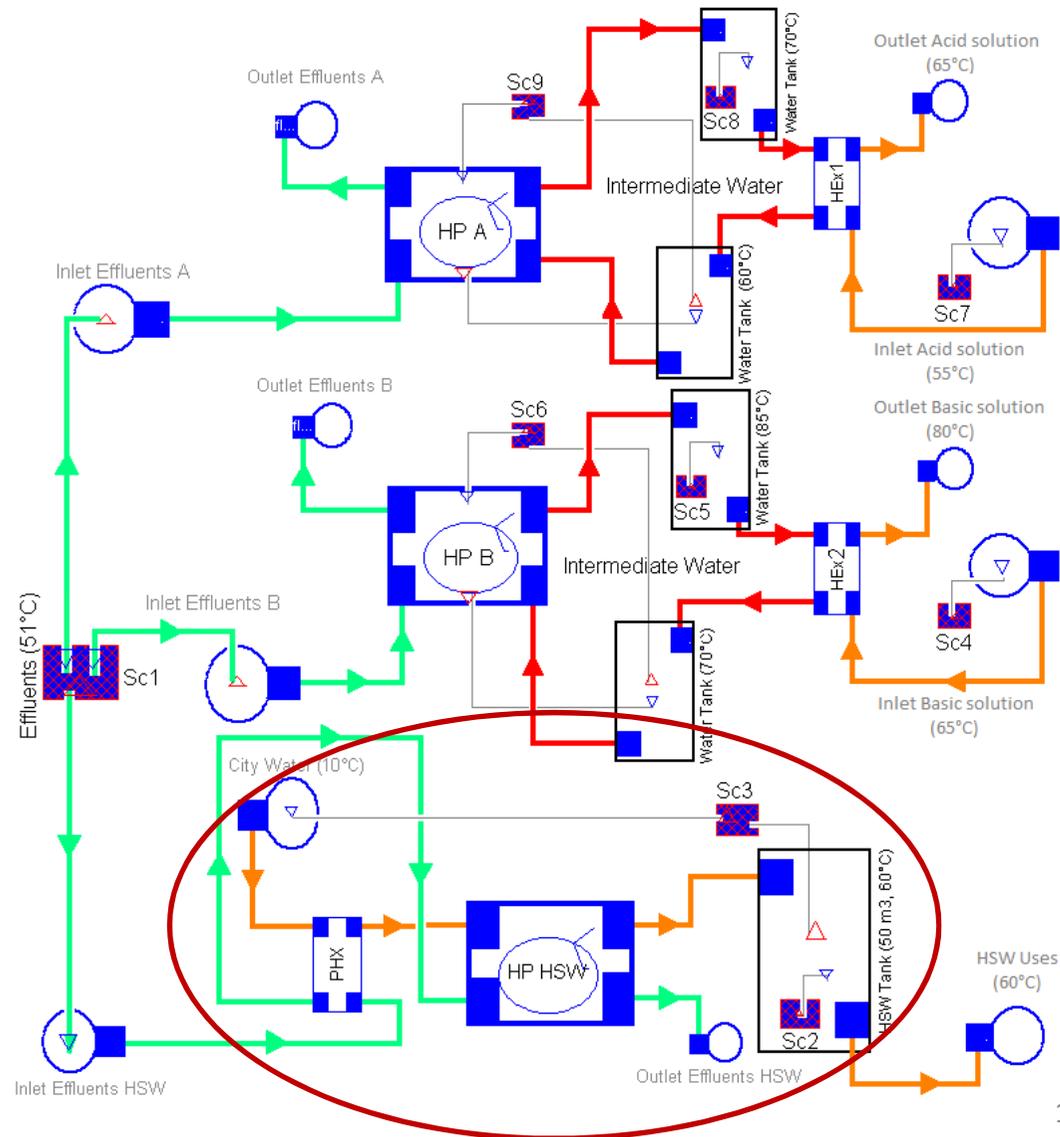
- Trois PAC et systèmes de stockage



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

Architecture de l'integration énergétique

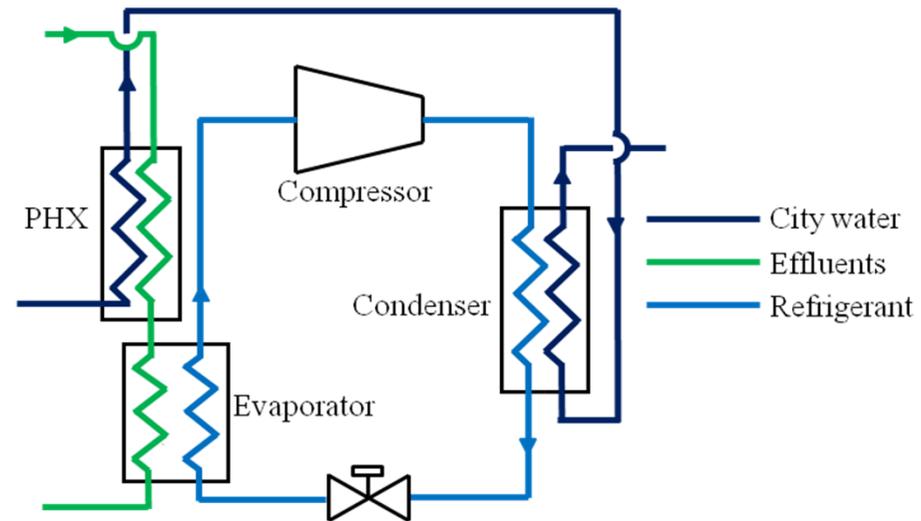
- Trois PAC et systèmes de stockage
- Préchauffage ECS en amont PAC



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

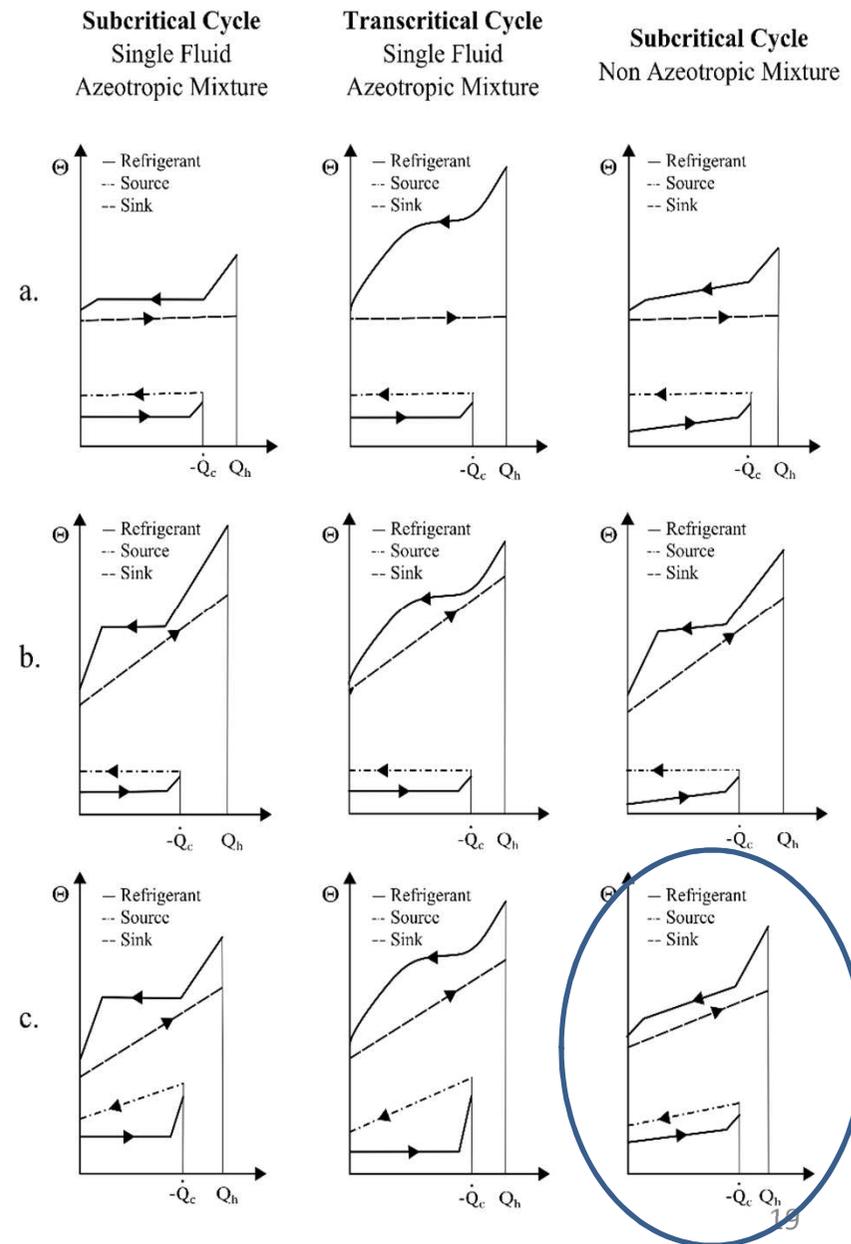


	PHX		Heat pump	
	Inlet T (° C)	Outlet T(° C)	Inlet T (° C)	Outlet T (° C)
Heat integration network	51	30	30	24
Hot water	10	46	46	60

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

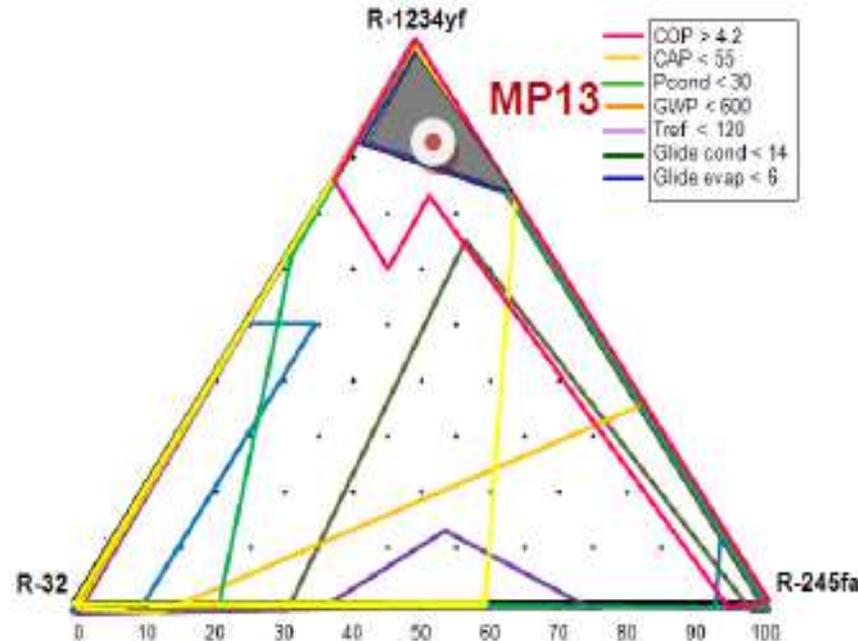


Exemple 2: Production ECS et NEP en laiterie (CES et BEL)

Conception du mélange

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

Symbol	Mm (g/mol)	T _{crit} (° C)	P _{crit} (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_{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 (m^3/h)	52	58	51	56.4	58.4	63.2	196
T_{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