



Étude de veille sur l'offre actuelle de PAC THT Ouverture sur les technologies alternatives

Rémi MATRAY (CETIAT)



Rappel du contexte

Étude PEP

Décarbonation des procédés thermiques

Rappel du contexte

Étude PEP (2020) – CETIAT & CETIM

- **Le potentiel des pompes à chaleur haute température**
 - Potentiel d'électrification des procédés thermiques pour des températures jusqu'à 80°C-100°C maximum
 - Séchage
 - Cuisson
 - Cas d'étude : pasteurisateur
- **Combustible substituable estimé : ADEME (CEREN)**
 - 9,2 TWh
 - Essentiellement en remplacement de vecteur vapeur
 - Procédés $T < 100^{\circ}\text{C}$
- **Qu'en est il des procédés $> 100^{\circ}\text{C}$?**
 - Offre actuelle disponible ?
 - Évolutions technologiques ?
 - Technologies alternatives à la compression de vapeur ?

PAC THT : veille

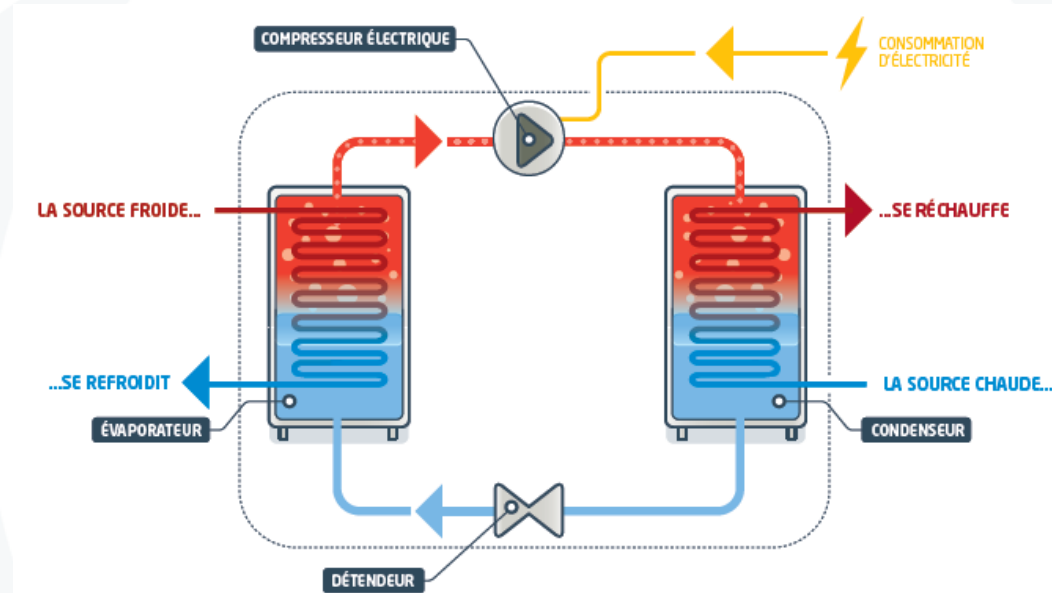
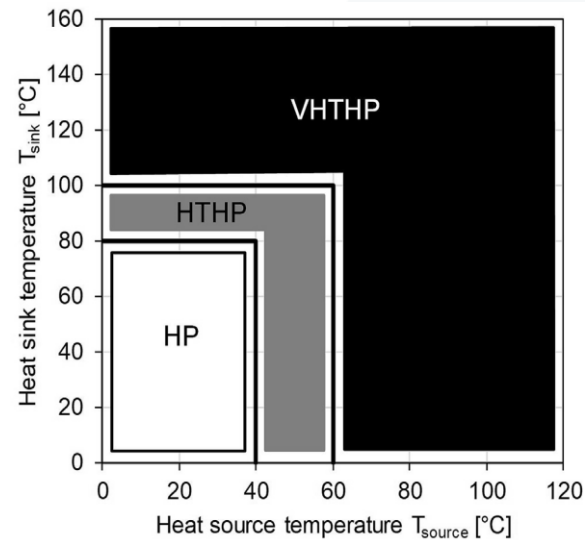
Compression de vapeur : technologie « classique »

Observations & nuances

Axes de développement

Préambule

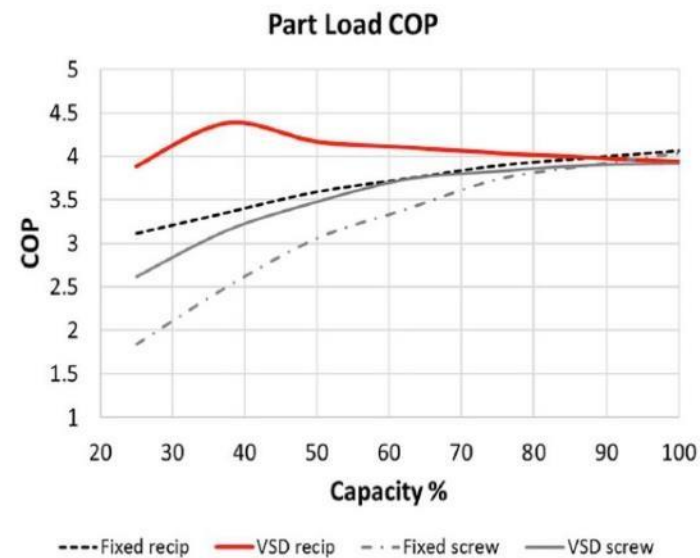
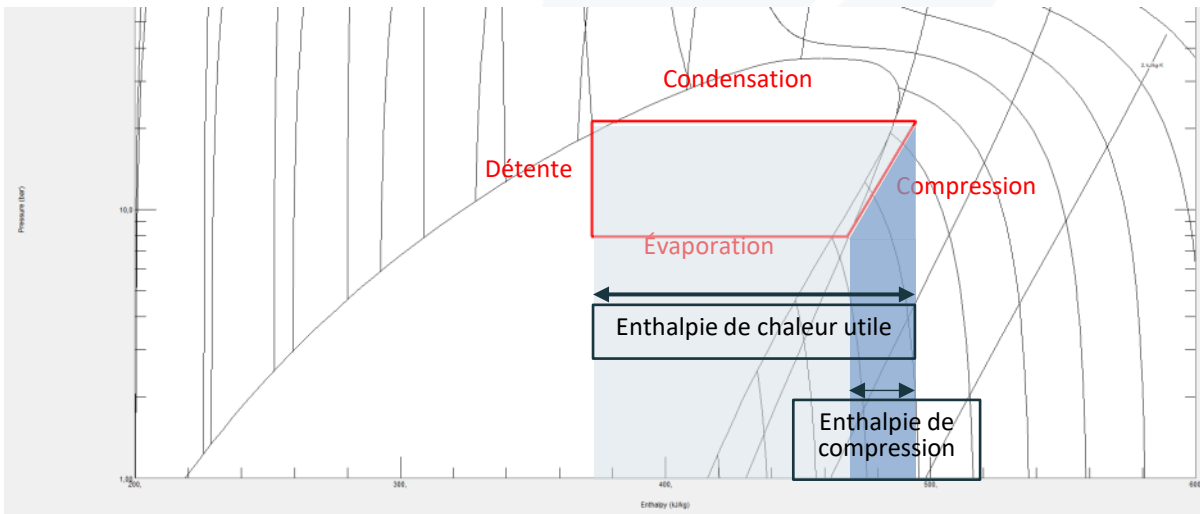
Technologie, « THT »



- Technologie « classique » de la compression de vapeur
- Très Haute Température : Température utile > 100°C
- Scope industrie: Puissance > 500 kW

Préambule

Notions de COP

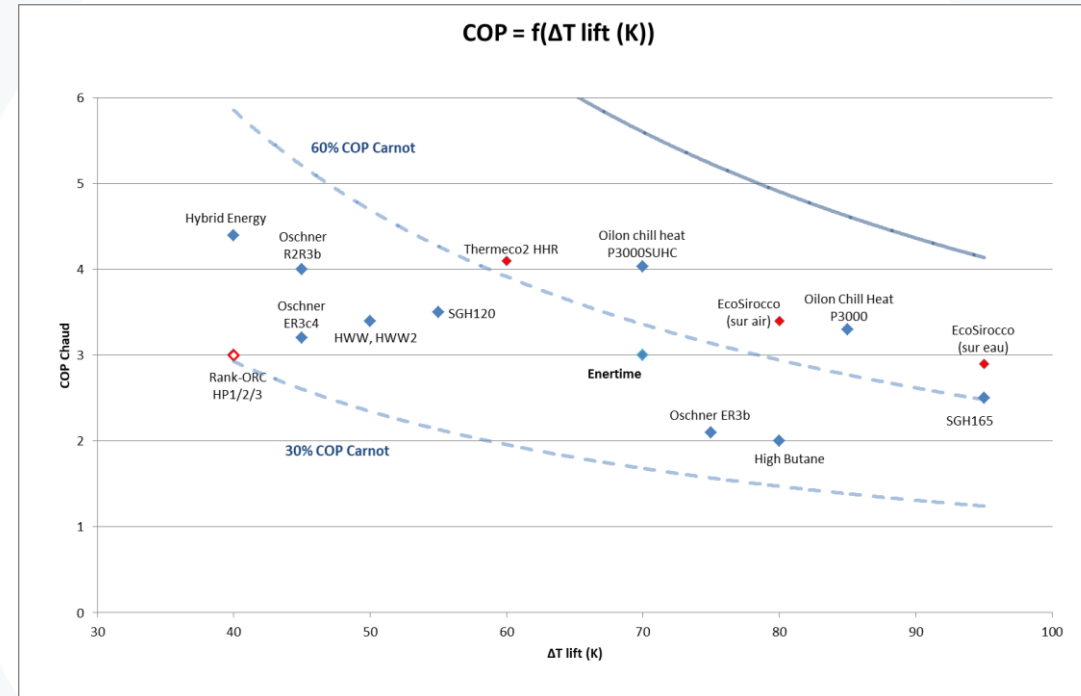


- COP : rapport chaleur / électricité
- COP annoncés : au régime nominal

Préambule

Notions de COP (2)

$$COP_{carnot,chaud} = \frac{(T_{heat\ sink,^{\circ}C} + 273.15)}{(T_{heat\ sink,^{\circ}C} - T_{heat\ source,^{\circ}C})} = \frac{T_{heat\ sink,K}}{\Delta T_{lift,K}}$$



- COP = f(lift)
- COP réel < COP Carnot
- Généralement : 30% Carnot < COP réels < 60% Carnot

Synthèse de l'offre actuelle (1/2)

Fabricant	Nationalité	Produit	Fluide frigorigène	T°C utile max	Puissance chaud	Type de compresseur	Base COP $T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{Lift})$	COP chaud
Enertime	France	PAC motocompresseur hermétique	R1233zdE	120°C	2 à 5 MW	centrifuge mono ou bi-étage	30/100 (70) (eau chaude surchauffée) $\Delta T_{Liftmax} = 85K$	3
		PAC motocompresseur séparé	R1233zdE	120°C	4 à 10 MW			
Kobe Steel (KobelcoSteam Grow Heat Pump)	Japon	SGH 165	R134a/R245fa	165°C	70 - 660 kW	Double vis	70/165 (95)	2,5
		SGH 120	R245fa	120°C	70 - 370 kW		65/120 (55)	3,5
Ochsner	Autriche	IWWDS R2R3b	R134a & ÖKO1 (R245fa)	130°C	170 - 1500 kW (twin unit)	Vis	45/90 (45)	4,0
		IWWDS ER3c4 / ISWDS ER3c4	ÖKO1	125°C			80/125 (45)	3,2
		IWWDS ER3b	ÖKO1 (R245fa)	130°C	120 - 400 kW		55/130 (75)	2,1
Hybrid Energy	Norvège	Hybrid Heat Pump	R717 (NH3) / H2O	120°C	800 kW - 20 MW	Piston	70/110 (40)	4,2 - 4,6
Mayekawa (Mycom)	Japon	Eco Sirocco	R744 (CO2) transcritique	120°C	55 - 115 kW	Vis	25/100 air (80)	3,4
							25/120 eau (95)	2,9

Synthèse de l'offre actuelle (2/2)

Fabricant	Nationalité	Produit	Fluide frigorigène	T°C utile max	Puissance chaud	Type de compresseur	Base COP $T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{Lift})$	COP chaud
ENGIE (ex-DürrThermea)	Allemagne	Thermeco2 HHR	R744 (CO2) transcritique	110°C	45 - 1200 kW	Piston (jusqu'à 6 en parallèle)	20/80 (60)	3,9 - 4,3
Combitherm	Allemagne	HWW, HWW2	R245fa / R1233zd(E)	100°C	146 à 1194 kW (R25fa) & 127 à 1040 kW (R1233zd(E))	Vis	50/100 (50)	3,4
			R245fa	120°C	12 à 200 kW	Piston	-	-
Oilon	Finlande	gamme Chill Heat P60 à P450	R134a, R245fa	115°C	30 - 1000 kW, voire plus si plusieurs machines en parallèle	Piston (jusqu'à 6 en parallèle)	modèle P3000 30/115 (85) 412 kW utile	3,3
							P3000 SUHC 30/100 (70) 697 kW utile	4,0
Frigopol (& AIT)	Autriche	High Butane 2,0	R600 (Butane)	130°C	50 kW	Piston	50/130 (80)	2,0
Rank-ORC	Espagne	HP1	R718 (eau)	140°C	60 à 120 kW	3	100/140 (40)	3,0
		HP2	R718 (eau)	140°C	120 à 240 kW		100/140 (40)	3,0
		HP3	R718 (eau)	140°C	250 à 500 kW		100/140 (40)	3,0

Commentaires

Coûts & REX

- **ENERTIME** : intervention C. HUGUET à suivre
- **Kobe Steel**
 - Pas disponibles en Europe
- **Oschner**
 - R245fa
 - 130°C maxi
- **Rank-ORC**
 - Fluide : eau
 - Coûts spécifique : 300 €/kW thermique utile

Fabricant	Références	Coûts
Oschner	De nombreuses références pour des applications à 90°C, peu au-dessus.	ER3b : environ 200€/kW thermique pour un régime 55/130 (75), COP = 2.1 ER3c4 : environ 210 €/kW thermique pour un régime 80/125 (45), COP = 3.2

Commentaires

Coûts & REX

- **Mayekawa**

- Modèle Sirocco non disponible en Europe (non CE)
- Puissances modestes (applications éventuelles en décentralisé)

- **Engie (Dürr Thermea)**

- CO2 transcritique
- 110°C maxi

- **Combitherm**

- Jusqu'à 1200 kW (vis)
- R1233zd(E)

- **Hybrid Energy**

- Distribuée par Engie Solutions
- PAC hybride (absorption)
- Cas d'étude demandé (rapport)

Fabricant	Références
<u>Engie (Ex : DürrTherma)</u>	Zurich (Suisse) REX en abattoir (puissance 800 kW) ou 3 PAC thermeco2 HHR 260 assurent la production d'eau chaude à 90°C.

Fabricant	Références	Coûts pour un cas d'étude demandé
Hybrid Energy	Compagnie des Fromages & RichesMonts à Vire (14) Une seconde est en cours d'installation chez un industriel de l'agro-alimentaire	Pour le cas d'étude précité : 1.4 M€ (soit env 850 €/kWth)

Commentaires

Coûts & REX

- **Oilon**
 - 115°C maxi
 - R245fa
 - Coûts :200 à 300 €/kW thermique
- **Frigopol**
 - Fluide : R600a (HC)
 - Puissance limitée : 50 kW

Fabricant	Références	Coûts pour des cas d'étude demandés
Oilon	De très nombreuses références à travers le monde pour des applications en T°C allant de 65 à 85°C, mais peu au-dessus	Oilon 300 D, 412 kW, régime thermique 50/115°C (condenseur, eau surchauffée) pour 50/30°C (évaporateur) COP : 3.3 coût machine 280 €/kW thermique utile soit environ 115 k€
		Oilon P300D SU SH, 697 kW, régime thermique 50/100°C (condenseur, eau surchauffée) pour 50/30°C (évaporateur) COP : 4.03 coût machine de 170 €/kW thermique utile soit environ 118 k€
		Deux PAC Oilon P300D SU SH en parallèle, 1396 kW, régime thermique 50/100°C (condenseur, eau surchauffée) pour 50/30°C (évaporateur) COP : 4.19 coût machine de 170 €/kW thermique utile soit environ 237 k€ pour l'ensemble

Évolutions : les fluides frigorigènes

Actuellement employés, pros & cons

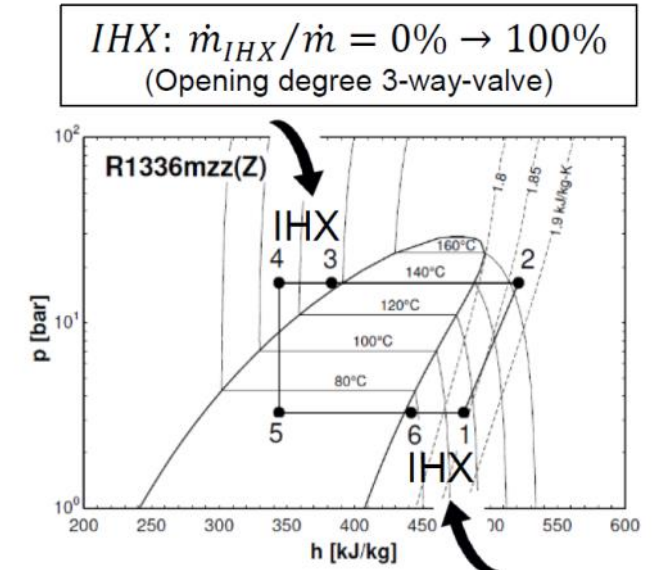
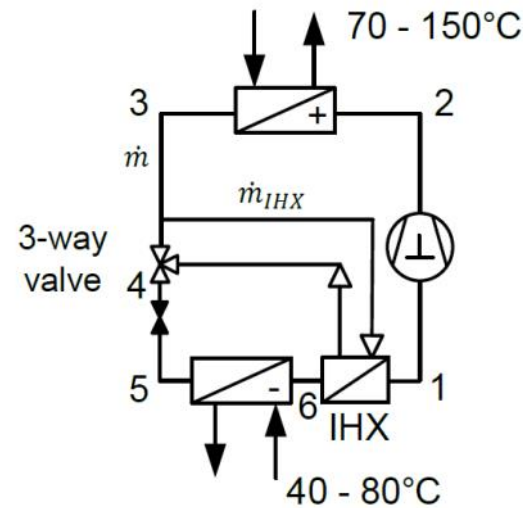
- Qu'est ce qu'un « bon » fluide pour la THT ?
 - ✓ haute densité énergétique (en kJ/mol),
 - ✓ température critique élevée et pression critique faible (supérieure à 150°C, inférieure à 30 bar [3]),
 - ✓ ratio de pressions HP/BP faible (de façon à limiter le travail de compression à fournir au niveau du compresseur),
 - ✓ bonne miscibilité et stabilité du mélange fluide – huile

type	Réfrigérant	T°C critique °C	Pression critique bar	GWP 100 ans	classe
HFC	R134a	101,1	40,6	1300	A1
	R245fa	154	36,5	858	B1
naturels	R717 (ammoniac)	132,3	113,3	0	B2L
	R718 (eau)	373,9	220,6	0	A1
	R744 (CO2)	31,1	73	1	A1
HC	R600 (butane)	152	38	4	A3
HCFO	R1233zd(E)	166	36,2	1	A1
	R1224yd(Z)	155	33,3	1	A1
HFO	R1336mzz(Z)	171	29	2	A1

Évolutions : Les fluides frigorigènes

Travaux de recherche (AIT & NTB – C. Arpagaus)

- Essais prototypes HCFO & HFO, Au régime 60/110 (50)
 - R1233zd(E) : COP = 3.1
 - R1224yd(Z) : COP = 3.2
 - R1336mzz(Z) : COP = 3.0
- Intégration d'un échangeur interne de chaleur (IHX)
 - Augmentation de surchauffe & sous refroidissement
 - Gains COP de 15 à 47%
- Pour $T > 150^{\circ}\text{C}$
 - R1233zd(E) & R1336mz(Z)



Sollicitation adhérent : EDF (DE CARLAN Florence)

Projets soutenus par EDF

• Cinq projets

• PACO :

- Fluide : eau
- Tmax = 130°C, 615 kWth
- COP > 5
- Université de Lyon

• PAC R245fa

- Tmax = 123°C, 600 kWth
- COP = 4
- Johnson Controls

• ALTERECO

- R245fa
- 105°C, 100kW
- Clauger

• TRANSPAC (proto 30 kW):

- R1234ze transcritique
- Applications séchages
- 140°C max (air)
- COP = 3,7
- R32 transcritique
- 117°C max (air)
- COP = 3,7

• Projet EU BAMBOO

- R1336mz(Z)
- Génération vapeur
- PAC VHE



Maquette de 30 kW th

T buées	82°C
Humidité	50%
T entrée air sec	90°C
T sortie air sec	140°C
Working Fluid	R1234ze
Average COP	3,72

T buées	50°C
Humidité	100%
T entrée air sec	59°C
T sortie air sec	117°C
Working Fluid	R32
Average COP	3,70

PAC THT : technologies alternatives

Transformateur de chaleur à absorption

Pompe à chaleur thermochimique

Pompe à chaleur Stirling

Transformateur de chaleur à absorption

Présentation adhérent Thermax (JJ. Lebatard)



Thermax Heat pumps:

Heat Pump : type II or heat transformers

- Heat Source (80 - 120°C):
 - Process condensate / hot water
 - Geothermal water
 - Steam condensate from steam turbine
- Heating Output:
 - Dry Saturated Steam (1.0 – 4.0 bar.g)
 - Hot water (110 – 155 °C)
- Heating Capacity : 0.5 – 10 MW
- Heating COP : 0.3 – 0.46



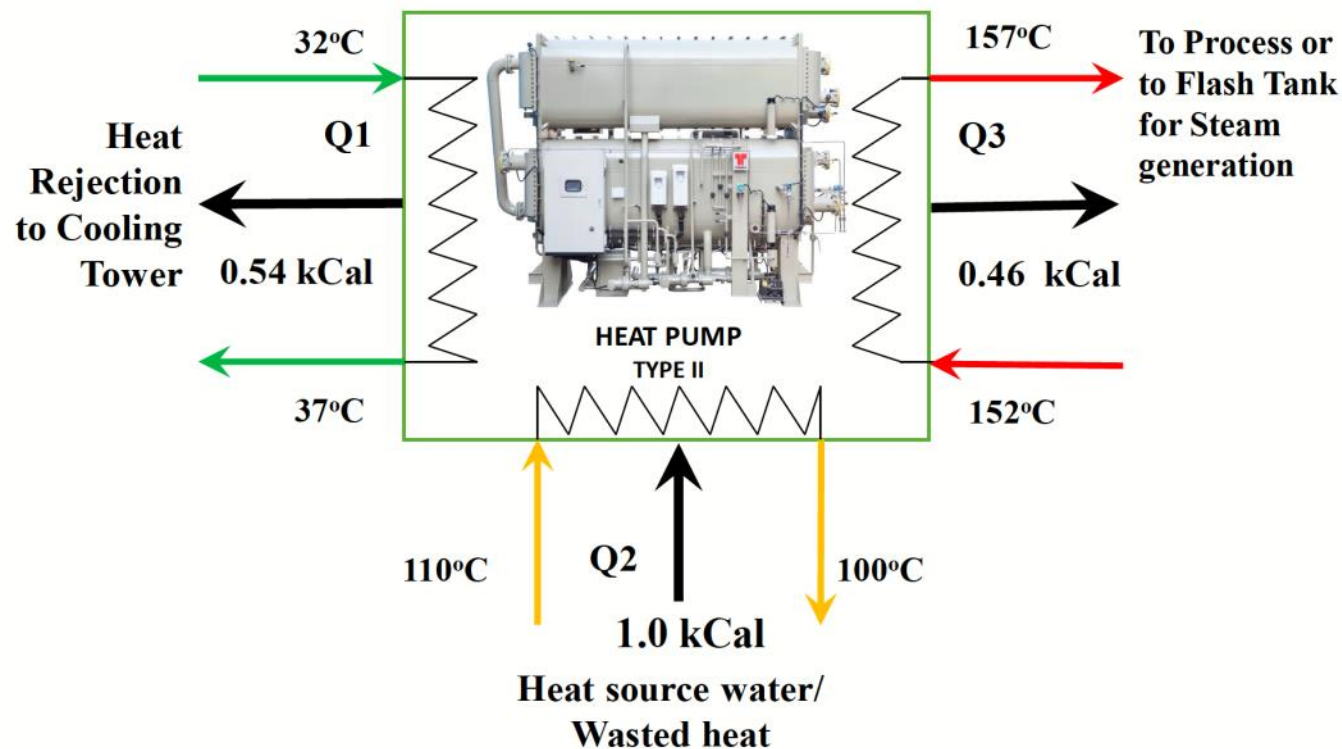
Transformateur de chaleur à absorption

Présentation adhérent Thermax (JJ. Lebatard)



Thermax Heat pumps:

Heat Pump : type II or heat transformers – energy balance



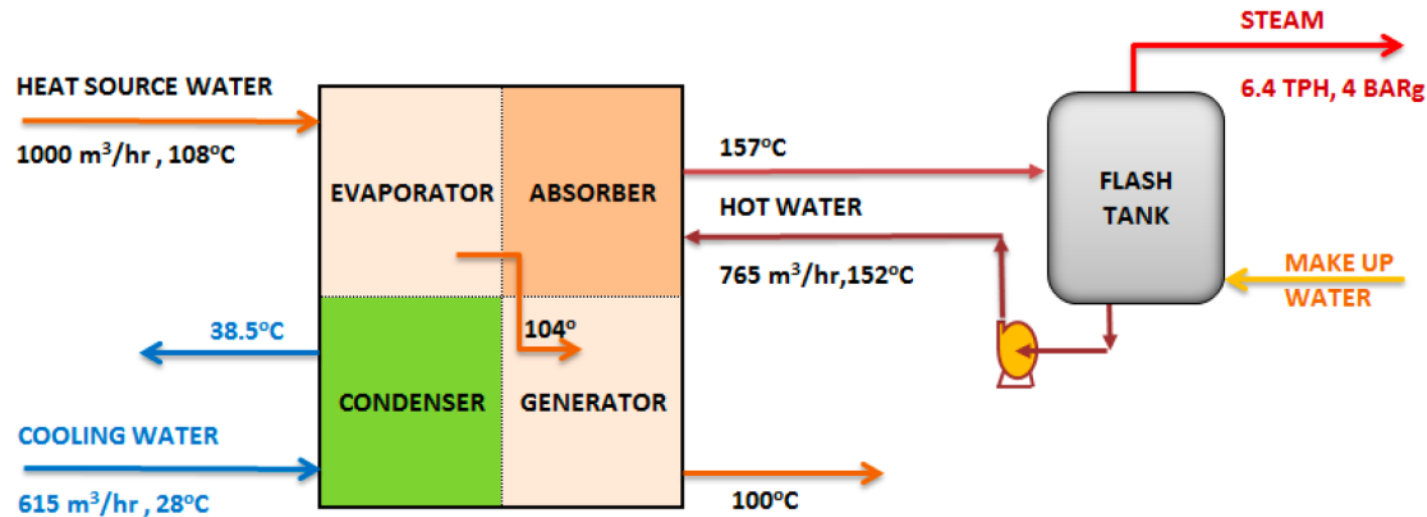
Transformateur de chaleur à absorption

Présentation adhérent Thermax (JJ. Lebatard)



Cases studies:

Heat pump type 2



Transformateur de chaleur à absorption

Présentation adhérent Thermax (JJ. Lebatard)



Case studies:

Heat Pump Type 2: Engine Jacket Water Heat Recovery

Heat transformer at **Baronia Pasta, Flumeri (AV), Naples, Italy**

- Heat source from Engine Jacket water @ 93 °C
- Hot water is used in drying process of pasta Making @ 135 °C



- Medium (waste) heat source inlet temp = 93°C
- Medium (waste) heat source outlet temp = 75°C
- Medium (waste) heat source flow rate = 127 m³/hr
- Hot water inlet temp = 125°C
- Hot water outlet temp = 135°C
- Hot water flow rate = 108.6 m³/hr
- Cooling water inlet temperature = 24 °C



Transformateur de chaleur à absorption

Présentation adhérent Thermax (JJ. Lebatard)



Thermax Heat pumps:

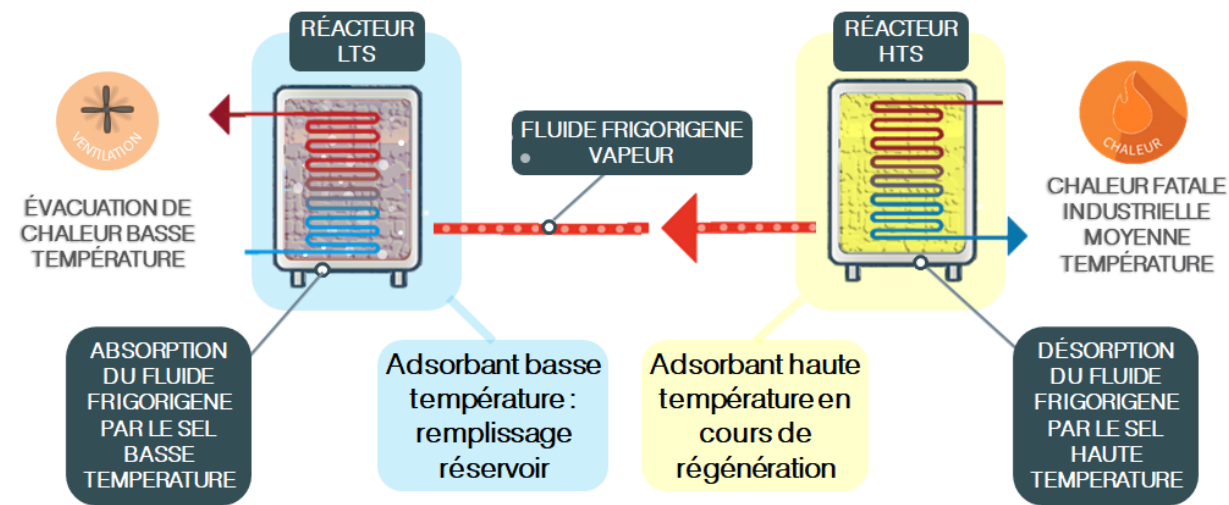
Heat Pump : type I and type II comparison

HEAT PUMP TYPE I		HEAT PUMP TYPE II	
a.	Low grade heat is added to medium grade heat utilizing high grade heat source	a.	Medium grade heat is added to high grade heat utilizing medium grade heat source
b.	Heating COP ~ 1.7	b.	Heating COP ~ 0.48
c.	Typical temperature profiles of Utilities: Heat source in Eva : 40°C - 35°C Heat source in Gen : 180°C - 160°C Output Hot water : 60°C - 90°C	c.	Typical temperature profiles of Utilities: Heat source in Eva : 110°C - 80°C Heat source in Gen : 110°C - 80°C Cooling water in Con : 15°C - 36°C Output Hot water : 130°C - 160°C
d.	Typical conditions in the Heat pump Evaporating Temp : 30°C Pressure in Eva & Abs : 32 mmHg LiBr Temp Leaving Abs : 63°C Condensing Temp : 93°C Pressure in Con & Gen : 590 mmHg	d.	Typical conditions in the Heat pump Evaporating Temp : 95°C Pressure in Eva & Abs : 635 mmHg LiBr Temp Leaving Abs : 153°C Condensing Temp : 40°C Pressure in Con & Gen : 55 mmHg

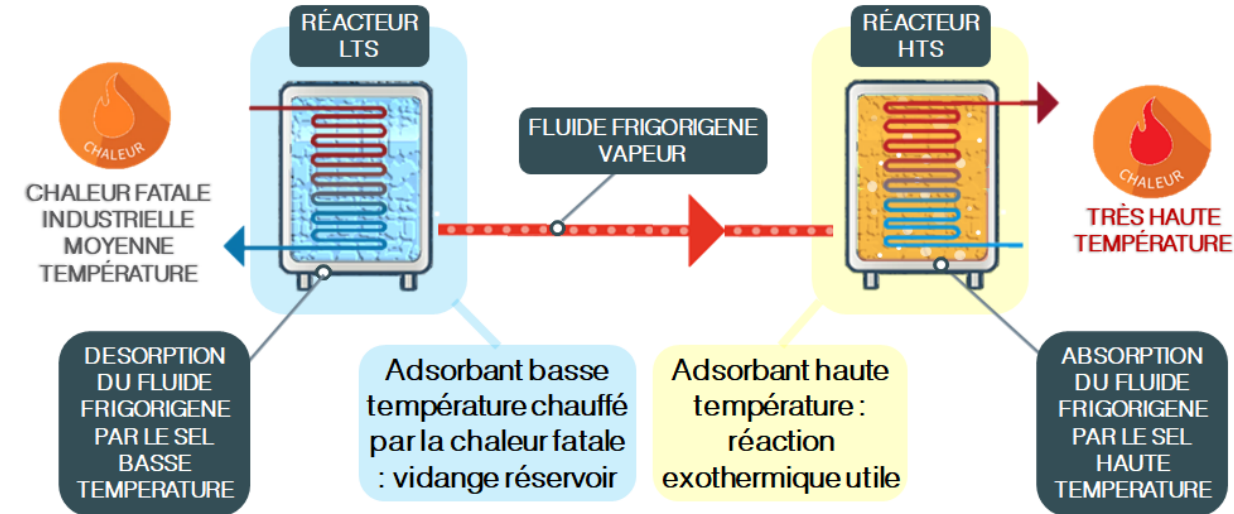
PAC thermochimique (CHP)

Principe

Phase 1 : charge



Phase 2 : décharge



- Alternance des phases de charge (régénération système) et décharge (production de chaleur)
- Stockage de chaleur avec relèvement de $T^{\circ}\text{C}$: emploi de deux adsorbants solides
 - Sel HTS : pour la génération de chaleur par réaction exothermique d'adsorption
 - Sel LTS : sert de réservoir de chaleur et régénère l'HTS
 - Pas de compresseur thermique

PAC thermochimique (CHP)

Analyse

- Système au stade de CONCEPT (TRL < 5)
- Cas d'étude
 - source [7] : S. Spoelstra, W.G. Haije, J.W. Dijkstra : "Techno-economic feasibility of high-temperature high-lift chemical heat pumps for upgrading industrial waste heat", Energy Research Centre of the Netherlands, June 2002)

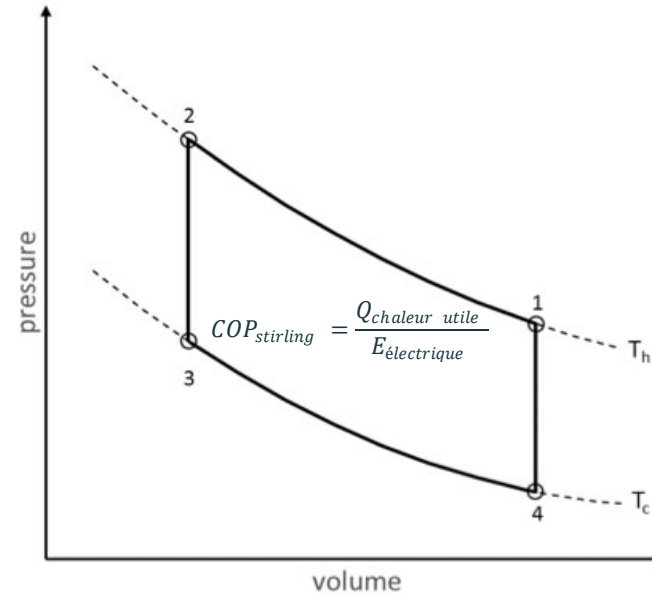
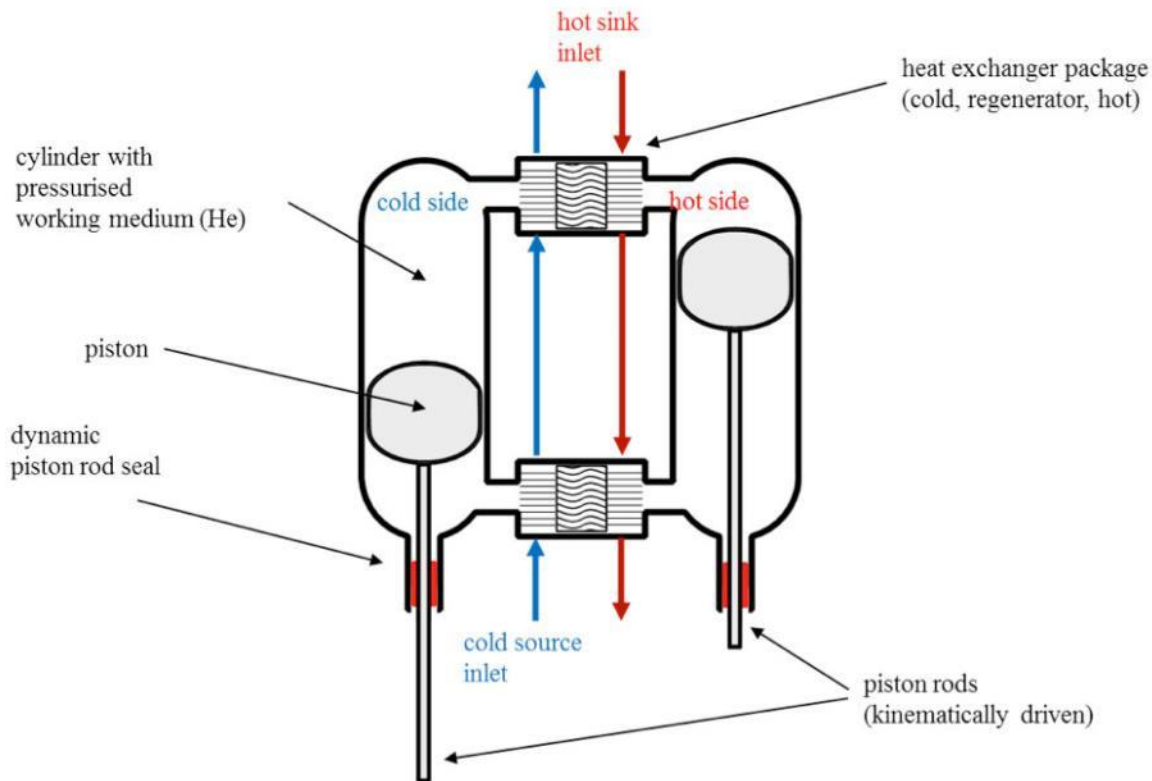
	Organe(s) concerné(s)	Température (°C)	Puissance (kW)
Chaleur fatale, T_M	Réacteur LTS (décharge) et HTS (charge)	140°C	5000
Chaleur basse température évacuée, T_L	Réacteur LTS (charge)	30°C	2892
Chaleur utile (pertes thermiques incluses), T_H	Réacteur HTS (décharge)	240°C	1740
Consommation d'énergie électrique	pompes	-	18

item	Coût (k€)
CHP	507
Installation, raccordement	445
TOTAL CAPEX direct	952
CAPEX additionnels	153
CAPEX TOTAL	1105
Demarrage	55
Fond de roulement	111
INVESTISSEMENT TOTAL	1271

- **Commentaires CETIAT**
 - Efficacité : 35%, COP : 97 (notions ≠)
 - 730 €/kWth utile, TRI env. 3 ans
 - Prudence !

PAC Helium à moteur Stirling : Olvondo Technology

Principe



- **Fluide : He (R704)**
- **Pas de changement de phase**
- **4 phases / cycle**
 - Compression
 - Refroidissement
 - Détente
 - Chauffe

- Moteur Stirling « inversé » : pompe à chaleur
- Consommation d'électricité pour production de chaleur (et froid)
- Nécessite une source froide ou puiser des calories

PAC Helium à moteur Stirling : Olvondo Technology

REX & SWOT

Nationalité	Produit	Fluide frigorigène	T°C utile max	Puissance chaud	Type de compresseur	Base COP T_{LT}/T_{HT} (ΔT_{Lift})	COP
Norvège	SPP HighLift Heatpump (stirling cycle)	R704 (Helium) 20 à 25 Bar de pression de fluide	200°C	700 kW	Moteur Stirling	Cas 1 : vapeur 3 bar (144°C minimum) / refroidissement 10°C	Cas 1 : COP intégré (chaud + froid) = 2,7
						Cas 2 : vapeur 10 bar (180°C minimum) / source de chaleur à 90°C	Cas 2 : COP chaud = 2,2

	Usine pharmaceutique	Laiterie
Localisation	Göteborg (Suède)	Ålesund (Norvège)
Industriel	AstraZeneca	Tine
Chaleur fournie	Vapeur 8-10 Bar (175-184°C)	Vapeur 8-10 Bar (175-184°C)
Source froide	Eau TAR (25-35°C)	Réseau chaleur incinérateur (90-100°C)
Qté énergie fournie	20GWh/an	9.6 GWh
Économie d'énergie annuelle	9.4 GWh (335 k\$)	5 GWh (réduction de 30% des coûts énergétiques)
Économies additionnelles (liées au refroidissement de la source froide)	60 k\$	33 k\$
Détails de l'installation	3 PAC Highlift installée, 1 en cours d'installation	3 PAC Highlift installée
Autre	-	Réduction des émissions de CO2 du site de 66%

• PROS:

- Technologie prometteuse
- Multiplicité sources froides (10 à 100°C)
- Production combinée de chaleur & de froid
- Jusqu'à 200°C, 700 kW, COP très raisonnables
- Fluide naturel & non toxique

• CONS :

- Viabilité à long terme inconnue pour l'instant (durée de vie, exploitation, maintenance, dépannage)
- Pas de REX en France pour l'instant
- Technologie de niche : peu de personnel formé à son utilisation

Conclusions & perspectives

PAC THT à compression

Évolutions

Technologies alternatives

La PAC THT à compression

Conclusions de la veille & évolutions

✓ PAC THT = efficacité énergétique

- ✓ Valorisation de chaleur fatale, COP de env. 2 à 4 selon les niveaux thermiques

✓ PAC THT = décarbonation

- ✓ Consommation d'énergie électrique peu carbonée (FR)

✓ De nombreuses applications industrielles pressenties pour des $T > 100^{\circ}\text{C}$ et des puissances $P > 500 \text{ kW}$

✓ Une offre marché diversifiée

- ✓ Une dizaine de fabricants
- ✓ Technologies variées : compresseurs à vis, à pistons, centrifuges, fluides

La PAC THT à compression

Perspectives

- Démocratiser la technologie :
 - Projets de démonstrations
 - Projets collaboratifs
 - Fabricants à la recherche de sites industriels
- Intégrer les coûts carbone lors des choix de solutions pour la fourniture de chaleur industrielle
- Des évolutions attendues
 - Nouveaux fluides frigorigènes HCFO & HFO : jusqu'à 150°C avec GWP faible
 - Nombreux projets de R&D
- Horizon Europe

Les technologies alternatives

Conclusions de la veille

- **Transformateur de chaleur à absorption :**
 - technologie mature au catalogue d'au moins 2 fabricants, REX THERMAX
 - permet de valoriser jusqu'à 2 sources de chaleur fatale
 - chaleur jusqu'à env. 140°C
 - consomme très peu d'électricité (COP très élevé)
- **PAC thermochimique à adsorption :**
 - technologie au stade de concept
 - système de stockage de chaleur avec relève de température
 - Fonctionnement intermittent
- **La PAC à Hélium à moteur Stirling :**
 - Olvondo Technology
 - 2 démonstrateurs
 - permet d'effectuer des relèves de température importantes



ALLICE

ALLiance Industrielle
pour la Compétitivité
et l'Efficacité Énergétique

25, avenue des Arts
69100 Villeurbanne

+33 (0)4 72 44 49 11

contact@alliance-alice.com

www.alliance-alice.fr