

Pompes à chaleur produisant la vapeur, une solution industrielle faisable

Gheorghe Mihalache, ing., Ph.D
Directeur d'ingénierie
ATIS ÉNERGIE



Pompes à chaleur produisant la vapeur, une solution industrielle faisable

Sujets de la présentation

Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

Pompes à chaleur utilisant réfrigérant

Pompes à chaleur utilisant réfrigérant + recompression mécanique

Évaporateur + recompression mécanique

Applications

Utilisation rejets thermiques 75°C / 10MW pour produire la vapeur 9 bar ($T_s=180^\circ\text{C}$)

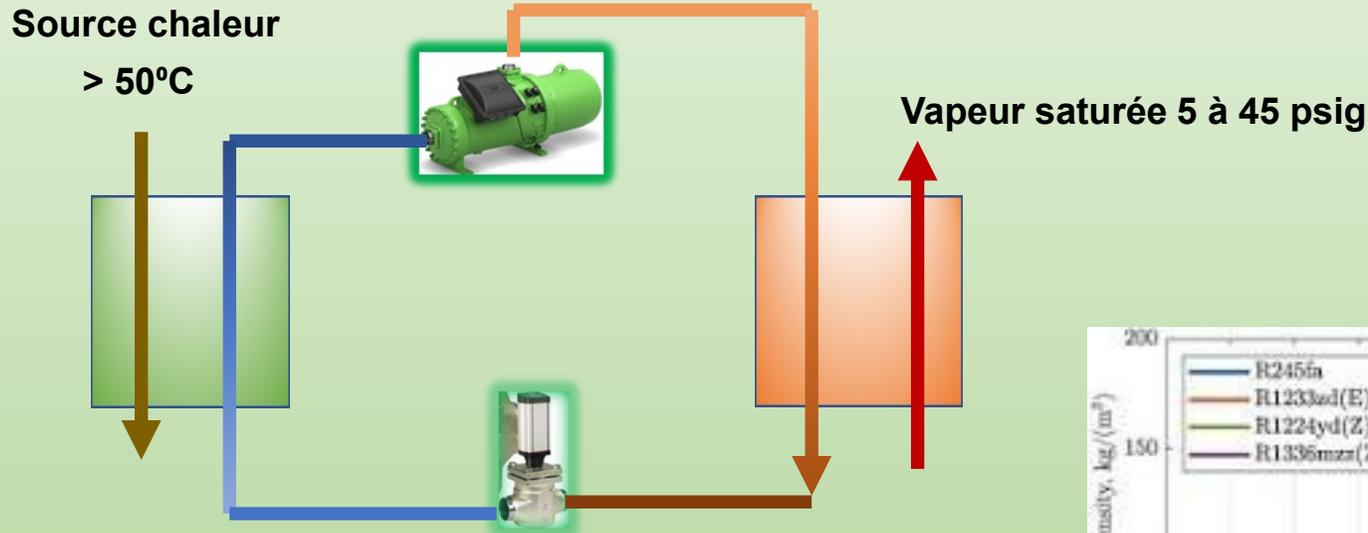
Chauffer les bâtiments avec l'eau à 0,1°C

Chauffer / refroidir Montréal avec le fleuve

Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

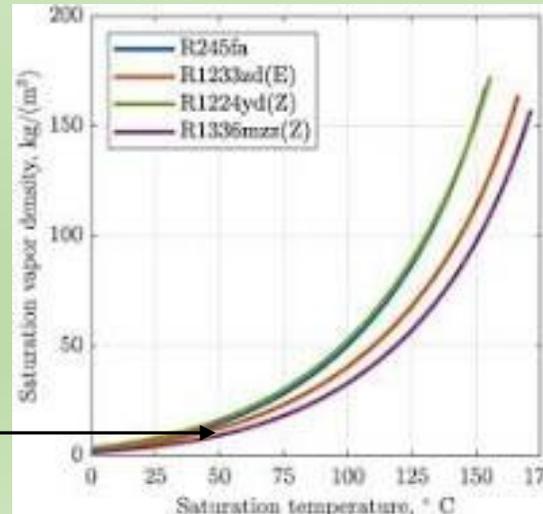
Pompes à chaleur utilisant réfrigérant

Évaporateur 50/40°C (source chaleur)
 Condenseur 110/120°C (max.vap sat 14psig)
COPh ~2,5



Faible densité succion	R1233ze(E)	A1	GWP 5	Tmax. cond 125°C
	R1336mzz(Z)	A1	GWP 9	Tmax cond 160°C
	R245fa	B1	GWP 1030	Tmax cond 135°C

8 à 20 kg/m³



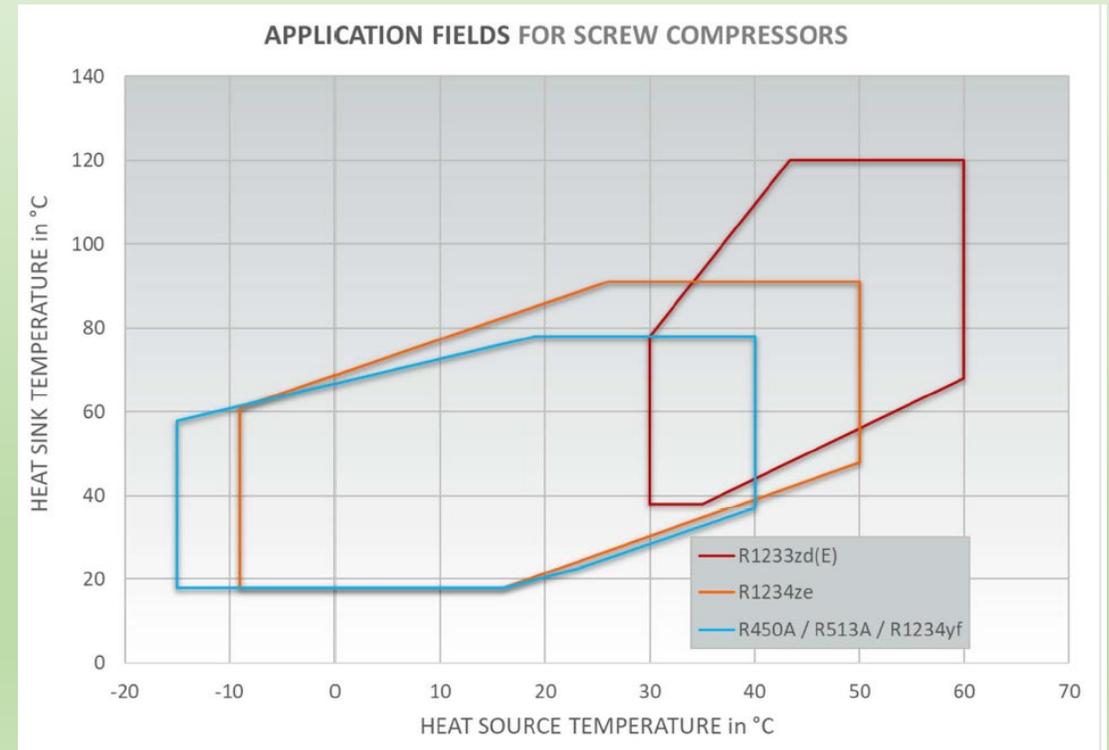
Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

Pompes à chaleur utilisant réfrigérant

Exemple

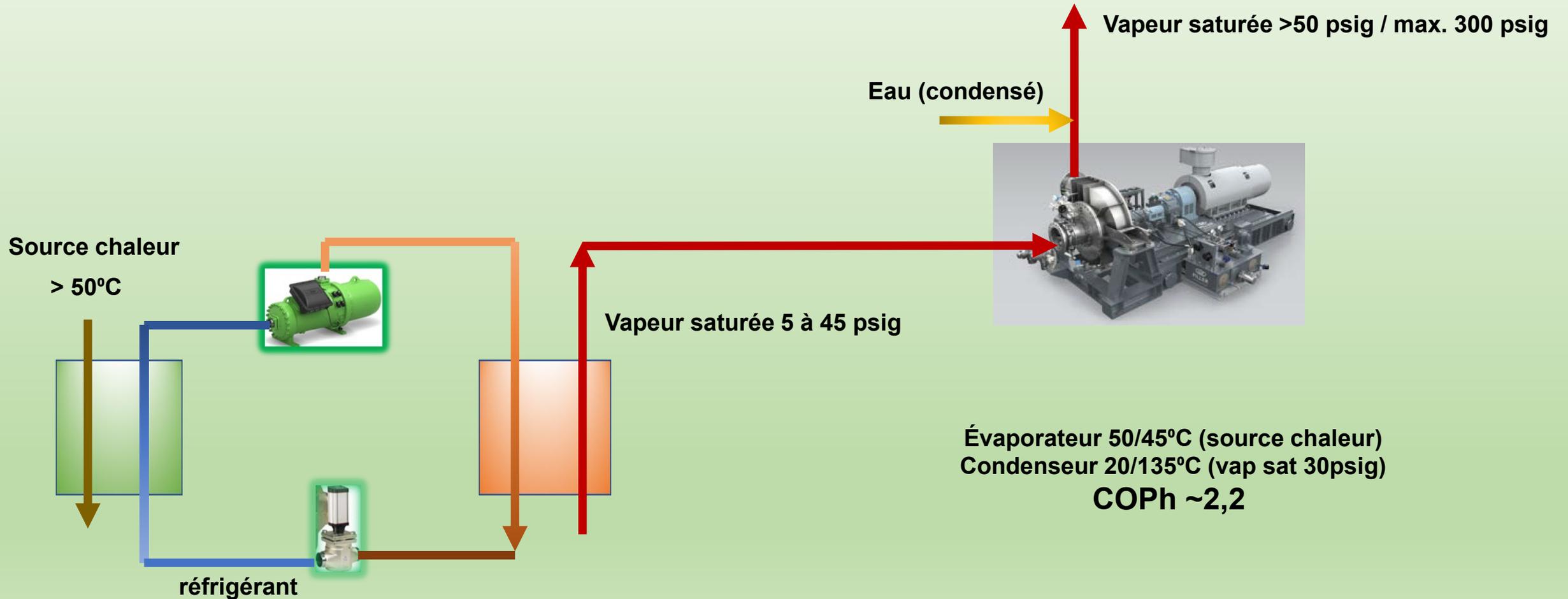


Combitherm GbmH série HWW, compresseur Bitzer



Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

Pompes à chaleur utilisant réfrigérant + recompression mécanique

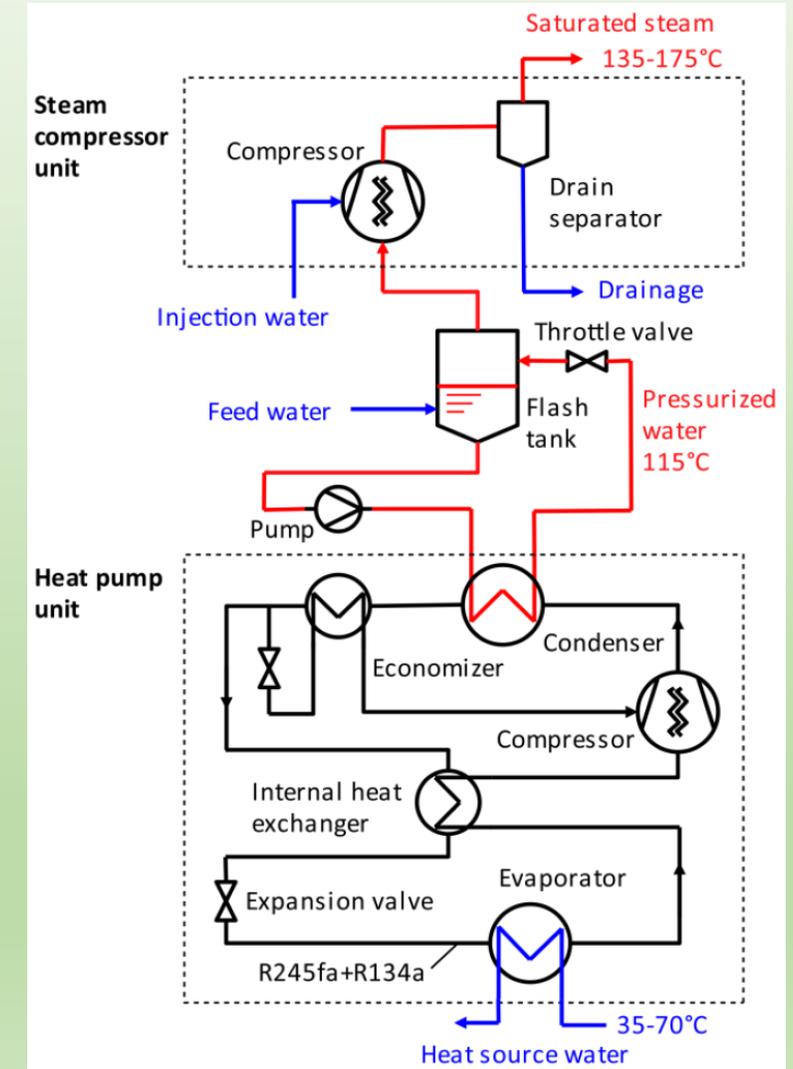


Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

Pompes à chaleur utilisant réfrigérant + recompression mécanique

Exemple

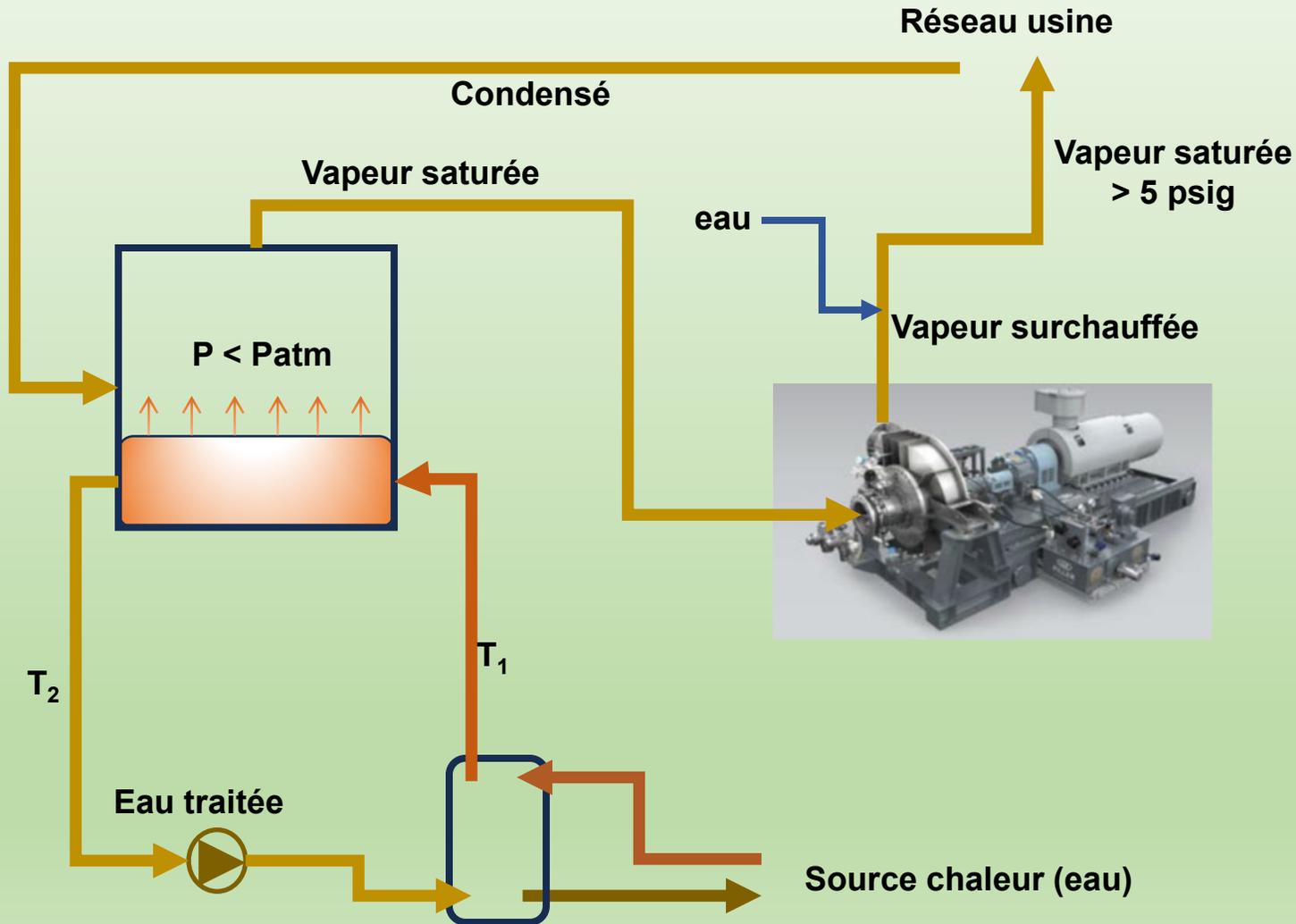
Steam Grow Heat Pump / SGH165 KOBELCO Compressors Corporation



$T_{\text{source,in}}$ [°C]	$T_{\text{source,out}}$ [°C]	$T_{\text{sink,in}}$ [°C]	$T_{\text{sink,out}}$ [°C]	$\text{COP}_{\text{heating}}$ [-]
70	65	20	165	2.5
70	65	20	135	3.0
50	45	20	165	1.9
50	45	20	135	2.2

Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

Évaporateur + recompression mécanique



$$h_{vap} \approx 2200 \text{ kJ/kg}$$

$$C_p = 4,18 \text{ kJ/kg}$$

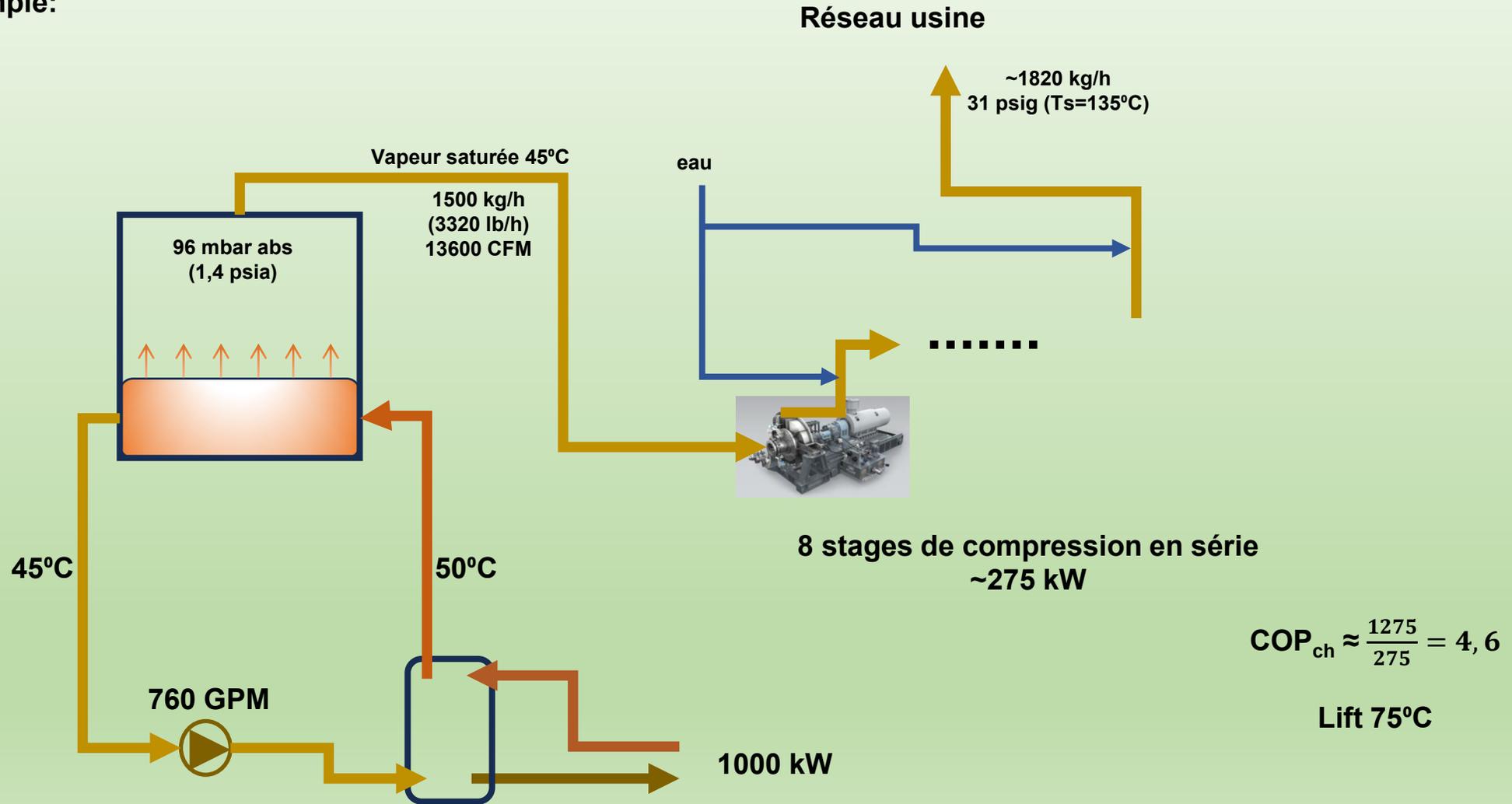
$$\frac{\dot{Q}_{m \text{ eau}}}{\dot{Q}_{m \text{ vap}}} = \frac{2200}{4,18 \times \Delta T} \approx \frac{526 \text{ kg eau}}{\Delta T \text{ kg vap}}$$

Exemple:
 Produire 10000 lb/h vapeur en évaporateur
 avec $\Delta T_{eau} = 5^\circ\text{C}$, débit eau = 2100 GPM

Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

Évaporateur + recompression mécanique

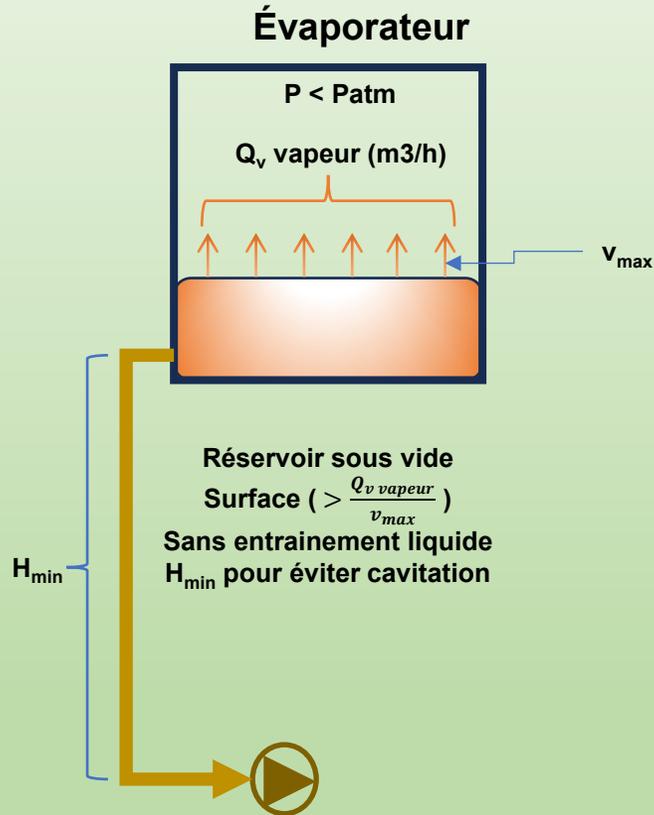
Exemple:



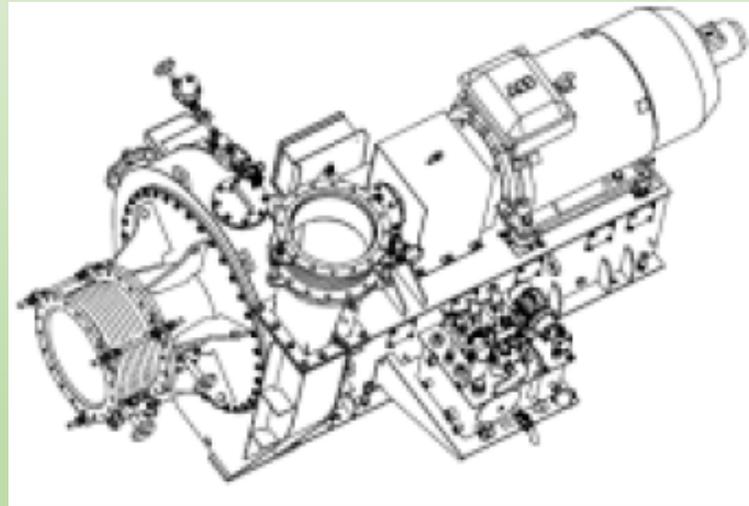
Principes de production vapeur avec sources de potentiel thermique réduit

Évaporateur + recompression mécanique

Éléments de design



Turbo Compresseur



Réaliser le vide nécessaire

Standard max vide 50±60 mbar abs
(correspond à un min. de 35°C)

Un stage de compression
 $T_{rsat} - T_{asat}$ a entre 9 et max.20°C

Vitesse rotation
4000 à 15000 rpm

De série:
Temp max 215°C
Débit massique max. 57000 kg/h
Débit volumique
max. 32 m³/s (68100 CFM)

Applications

Utilisation rejets thermiques 75°C / 10MW pour produire la vapeur 9 bar (Ts=180 °C)

Situation existante

Usine 1

Four électrique pour produire des alliages métalliques

Production vapeur 24 bar, surchauffées 380°C,
à partir de gazez chaudes du four

Envoie la production vapeur de 30 t/h vers Usine 2

Refroidissement des éléments du four par l'eau

Débit eau refroidissement 4000 GPM avec $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$

La chaleur de l'eau de refroidissement envoyée à l'atmosphère

Usine 2

Réseau vapeur usine, 13 bar, saturées

Besoin vapeur 777

Utilisation gaz naturel

Grand émetteur de GES

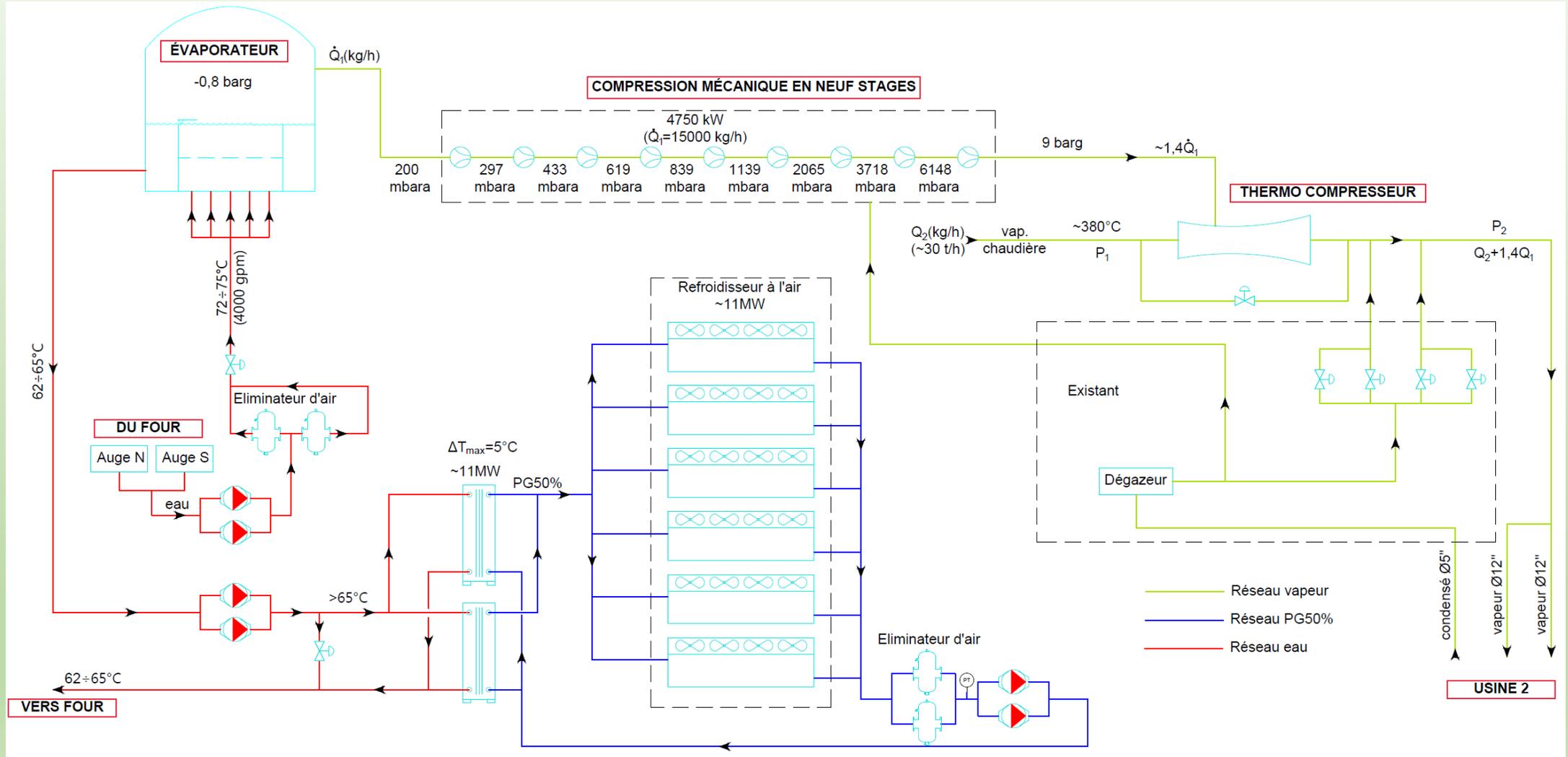
Proposition

Valorisation des rejets thermiques de l'eau de refroidissement four (~10 MW)

Production vapeur et augmenter le débit massique envoyé vers Usine 2

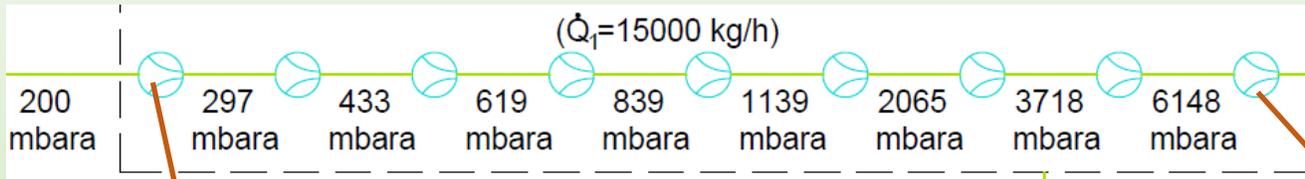
Utilisation rejets thermiques 75°C / 10MW pour produire la vapeur 9 bar (Ts=180 °C)

Schéma principe



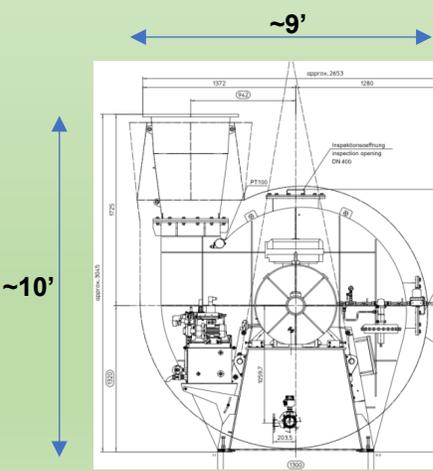
Utilisation rejets thermiques 75°C / 10MW pour produire la vapeur 9 bar (Ts=180 °C)

Turbo compresseurs

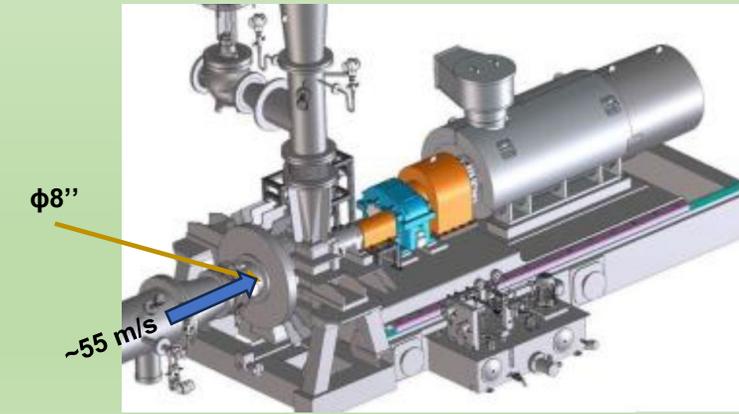
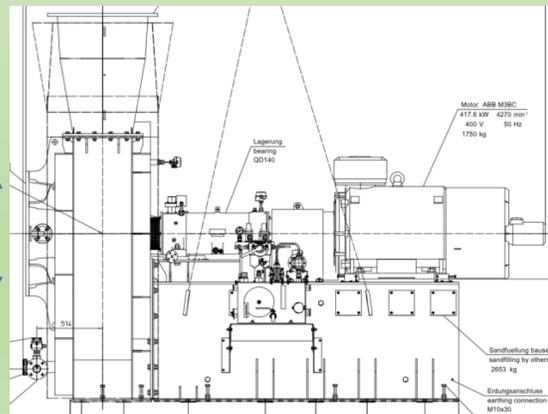


$v_{sp} = 7,65 \text{ m}^3/\text{kg}$
 $Q_m = 15\,000 \text{ kg/h}$
 $Q_v = 114\,750 \text{ m}^3/\text{h}$
 $P = 325 \text{ kW}$
 $n = 4200 \text{ rpm}$

$v_{sp} = 0,31 \text{ m}^3/\text{kg}$
 $Q_m = 20\,375 \text{ kg/h}$
 $Q_v = 6\,300 \text{ m}^3/\text{h}$
 $P = 860 \text{ kW}$
 $n = 14600 \text{ rpm}$



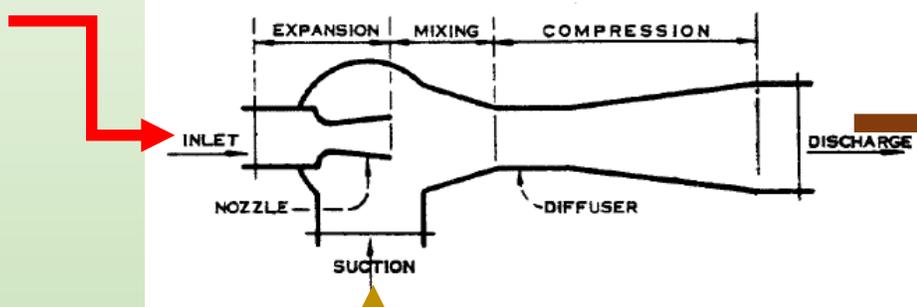
$\sim 63 \text{ m/s}$
 $\rightarrow \phi 26''$



Utilisation rejets thermiques 75°C / 10MW pour produire la vapeur 9 bar (Ts=180 °C)

Thermo compresseur

30 000 kg/h
450 psig
380°C (surchauffée)

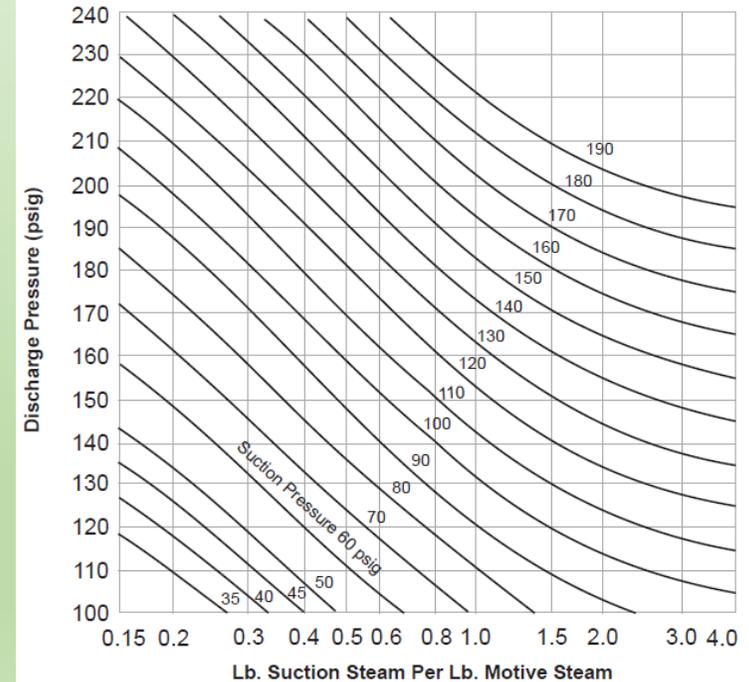


51 500 kg/h
200 psig
198°C (saturée)

21 500 kg/h
130 psig
180°C (saturée)



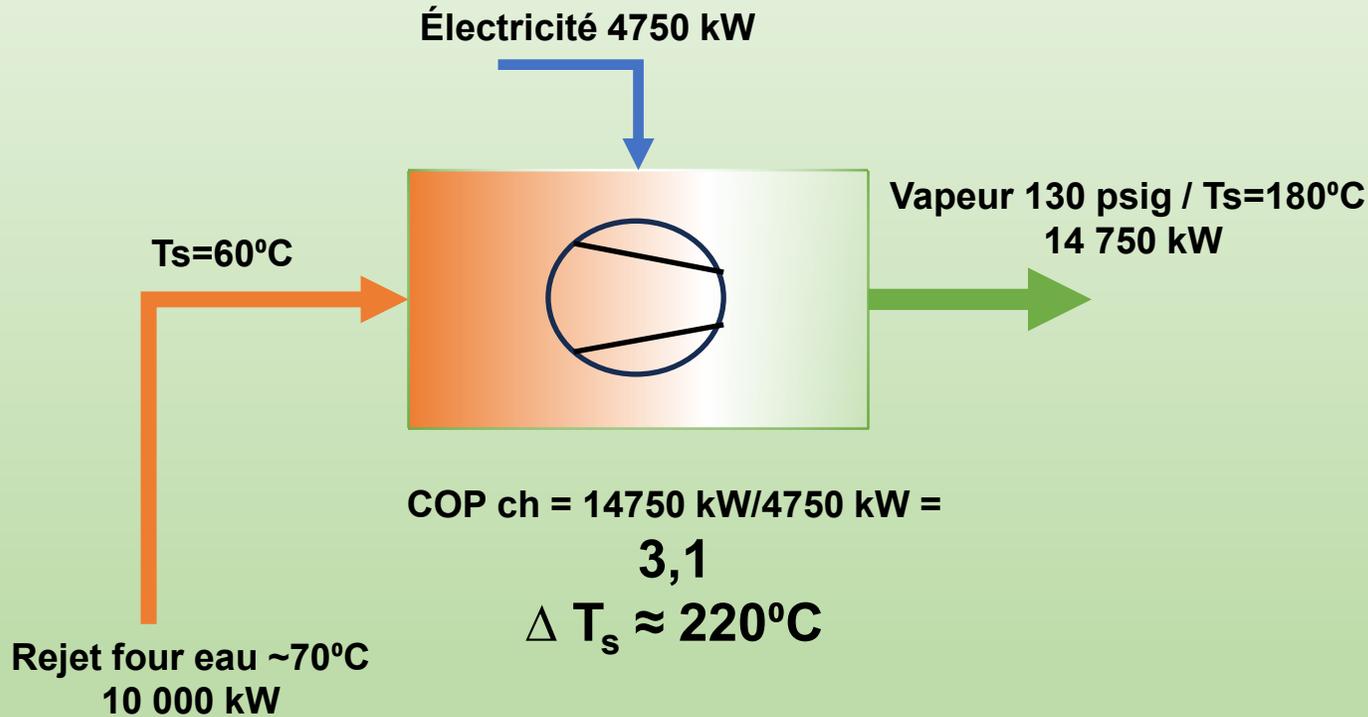
Chart J - Capacity Ratios of Steam Jet Thermocompressors
400 psig Operating Live Steam



Utilisation rejets thermiques 75°C / 10MW pour produire la vapeur 9 bar (Ts=180 °C)

Performances

PAC vapeur

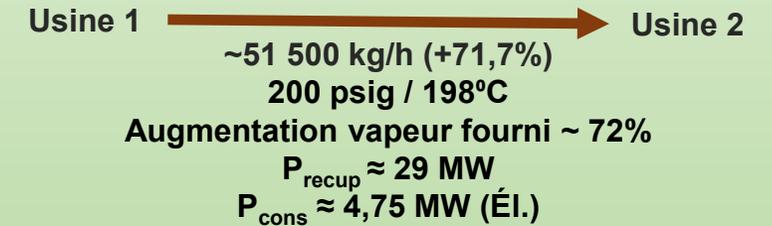


Projet

Actuellement



Projet

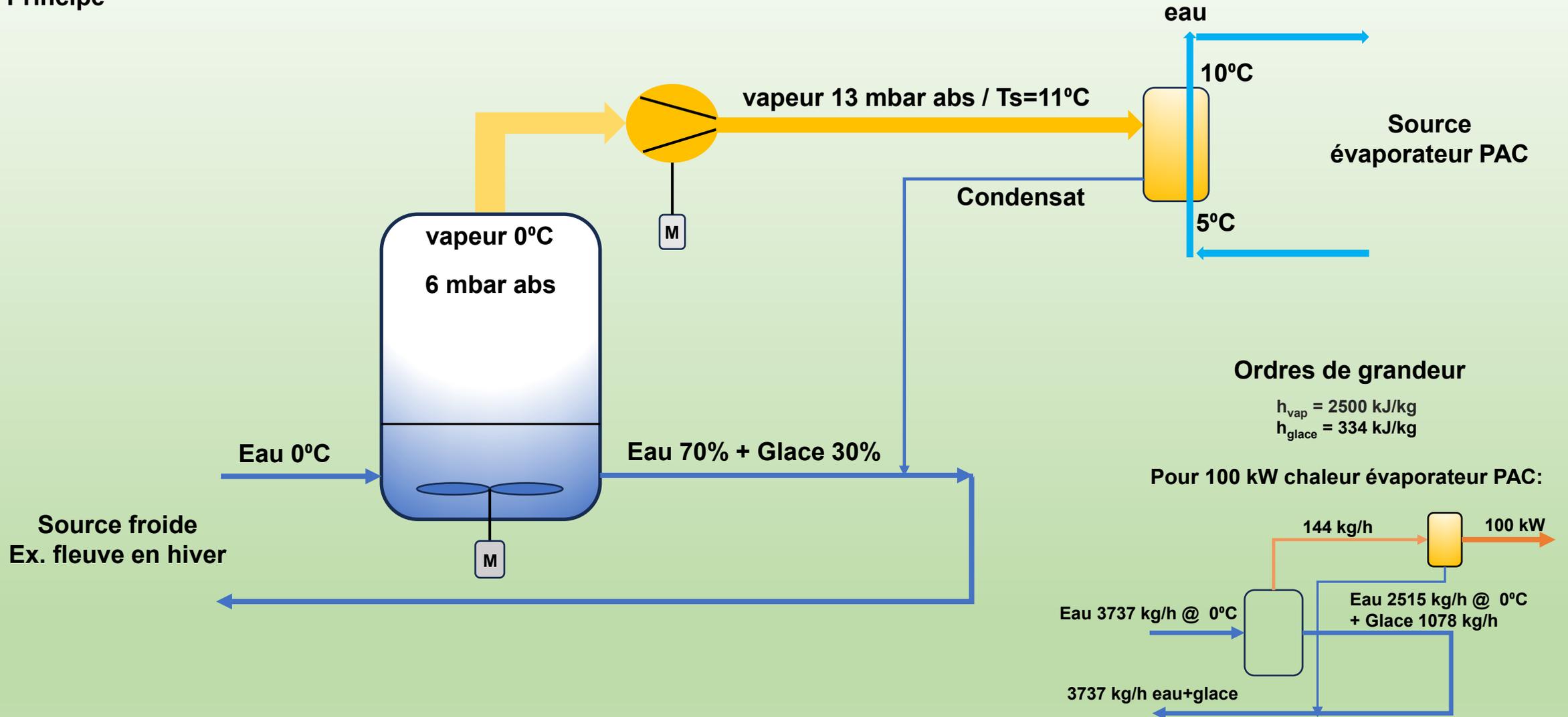


Économies GN et GES
340j/an, 24h/24h, 80% rend. chaudière

175 440 t vap. / an @ 0,647 kWh/kg vap
13 464 840 m³ GN / an
25 360 tCO₂e/an

Chauffer les bâtiments avec l'eau à 0,1°C

Principe

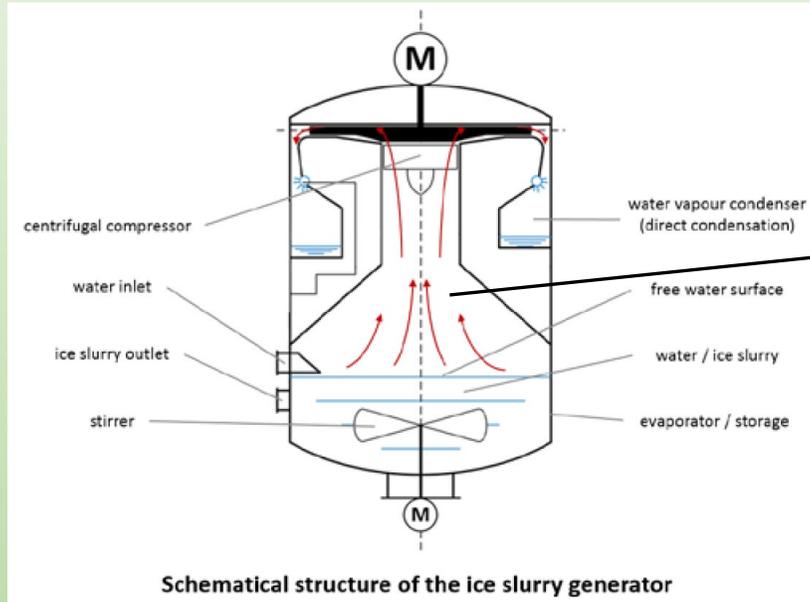
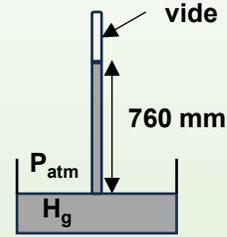


Chauffer les bâtiments avec l'eau à 0,1°C

Défis techniques

Le vide + le débit volumique

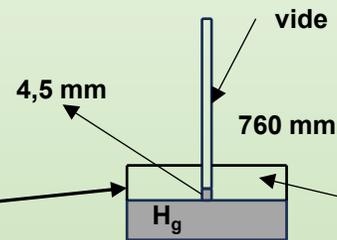
Expérience Torricelli
1643



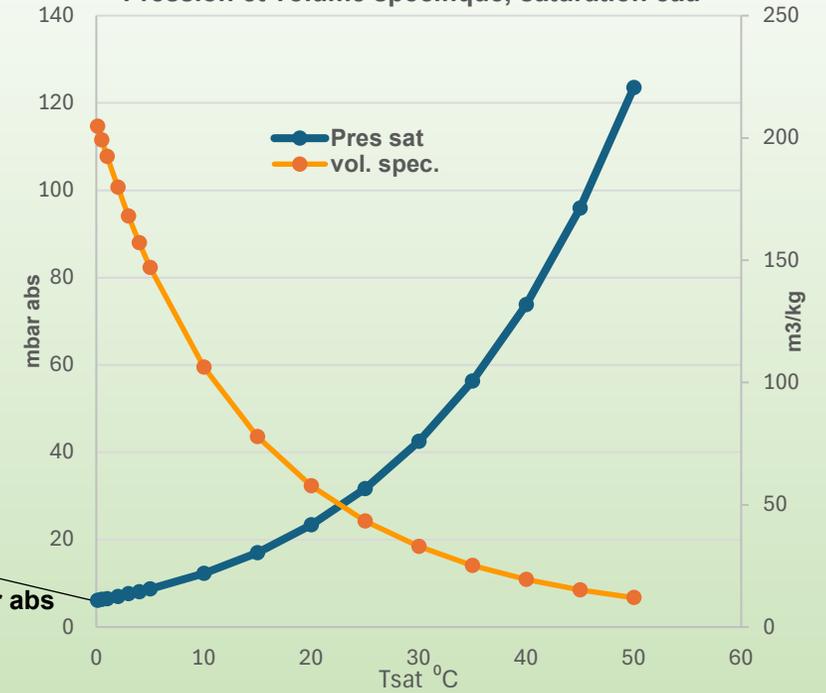
Schematical structure of the ice slurry generator

Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH;
European Heat Pump Summit 2021

Le minimum de vide réalisé par les turbocompresseurs de série 50 mbar abs (Ts=33°C)



Pression et volume spécifique, saturation eau



Puissance chauffage 1 MW

Vapeur 0°C : 204 m3/kg; 2500 kJ/kg=0,694 kWh/kg

Débit massique vapeur 1440 kg/h

Débit volumique vapeur:

294 768 m3/h

174 419 CFM

Puissance électrique compresseur ~ 75 kW

(ΔT_{sat} ≈ 10°C)

Chauffer les bâtiments avec l'eau à 0,1°C

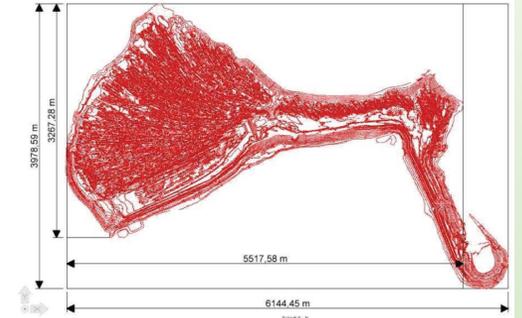
Application

Institute for Air Handling and Refrigeration Dresden, Allemagne



Lake Zwenkau

- ▶ 9,7 km² → largest lake in coal mining area south of Leipzig
- ▶ East – West: > 6,1 km
- ▶ North – South: ~4 km
- ▶ Max. Depth: 48 m
- ▶ Volume: 176 x Million Cubic metres



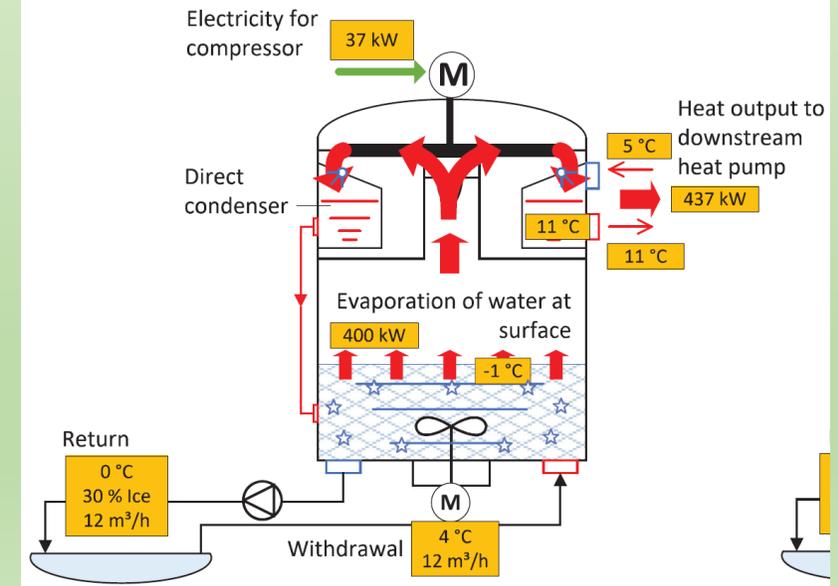
Von Wolkenkratzer - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=61294012>

17

Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH;
European Heat Pump Summit 2021



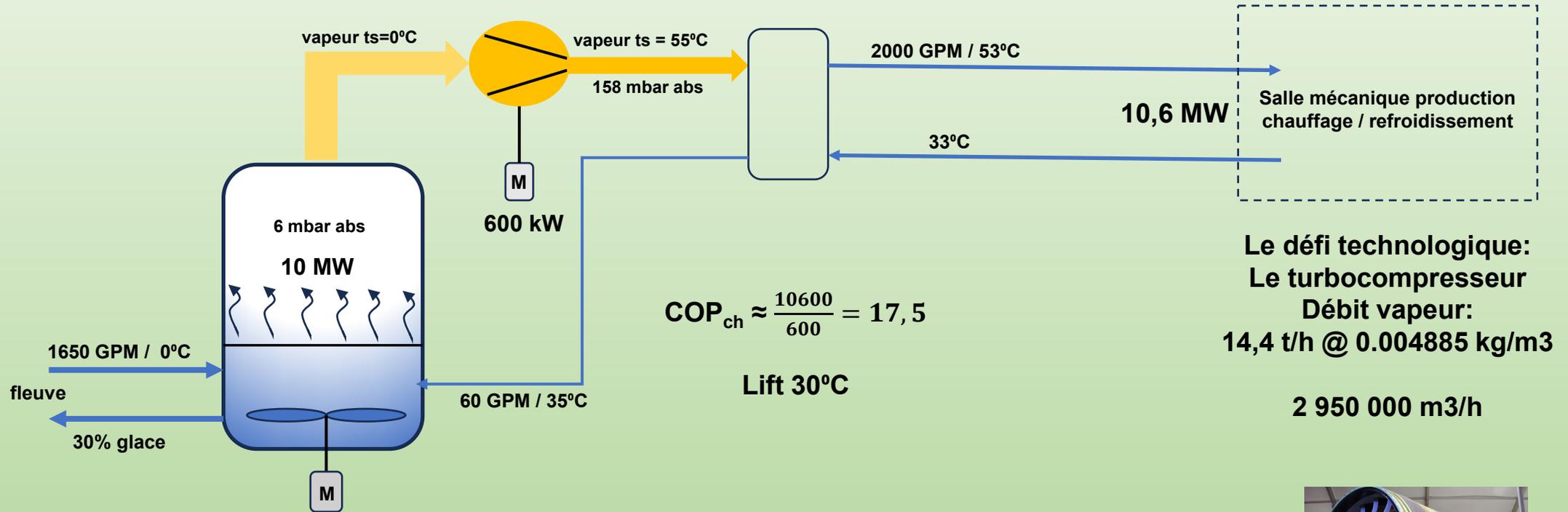
400 kW vacuum ice slurry generator



Chauffer / refroidir Montréal avec le fleuve

Module 10 MW

Hiver



$$\text{COP}_{\text{ch}} \approx \frac{10600}{600} = 17,5$$

Lift 30°C

Le défi technologique:
Le turbocompresseur
Débit vapeur:
14,4 t/h @ 0.004885 kg/m³
2 950 000 m³/h

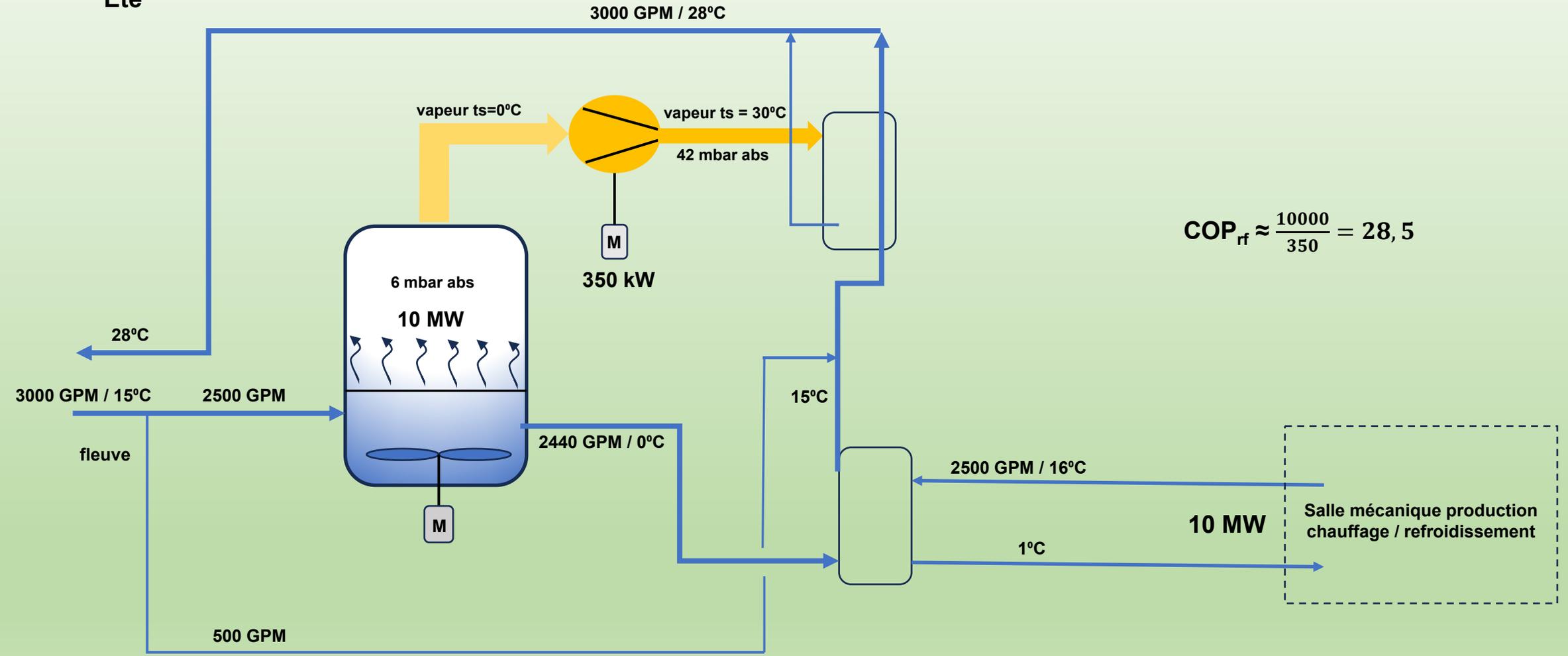
Le turbofan GE90 (le plus grand moteur, $\phi 3,3\text{m}$)
a un débit massique en croisière à 10,6 km altitude (densité air
0,364 kg/m³) de 576 kg/s ce qui est équivalent à un débit
volumique de 5 700 000 m³/h



Chauffer / refroidir Montréal avec le fleuve

Module 10 MW

Été



Chauffer / refroidir Montréal avec le fleuve

Économies

Refroidissement

0,07\$/ kWh ÉI.

COP1 refr = 3 (refroidisseurs réfrigérant)

Pour 10 MW refroidissement

Pompage fleuve ~ 70 kW

Pompage ville (2 km) ~ 350 kW

Turbo-compresseurs ~ 350 kW

COP2 refr = 13 (global)

200j/an, 24h/24h:

Refroidissement réfrigérant: 16 000 MWh/an

Refroidissement fleuve: 3700 MWh/an

Économie électricité: 12 300 MWh/an

Économie facture: 861 000 \$/an

Chauffage

0,07\$/ kWh ÉI.

COP1 ch = 2,1 (PAC Tsat -5 à 80 °C)

COP2 ch = 3 (PAC Tsat 30 à 80°C)

Pour 10,6 MW chauffage

Pompage fleuve ~ 50 kW

Pompage ville (2 km) ~ 300 kW

Turbo-compresseurs ~ 600 kW

COP2 ch fleuve = 11 (global)

165j/an, 24h/24h:

Chauffage PAC: 20 000 MWh/an

Chauffage fleuve + PAC: 17 800 MWh/an

Économie électricité: 2 200 MWh/an

Économie facture: 156 000 \$/an

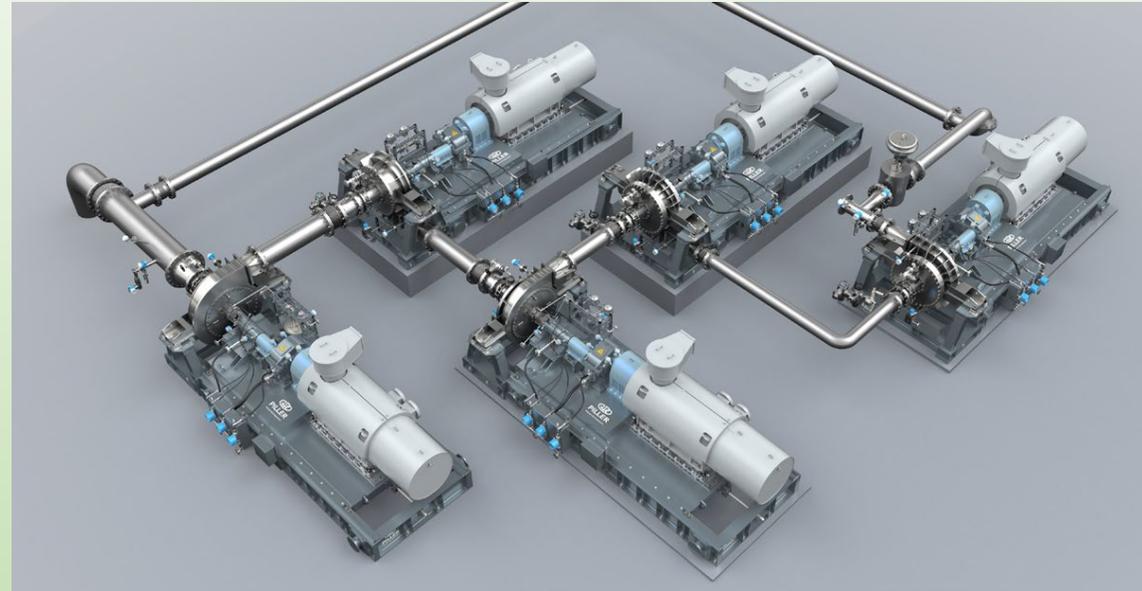
Économies module 10 MW

~600 kW (réduction puissance en hiver)

~ 14 500 MWh/an

~ 1 000 000 \$/an

Je vous remercie pour votre attention et ...



Je réponds avec plaisir à vos questions !

Titre du prochain
webinaire:

**Simulation
énergétique - Effort
d'harmonisation de
la pratique**

**Mardi le 18 février
2025**