



**oe'22 SYMPOSIUM**  
Optimisation Energétique  
2022

6 septembre 2022

Yverdon-les-Bains, Aula site de Cheseaux

# (re)compression mécanique de vapeur et ses applications

Intervenants : Frédéric Bless & Pierre Kummenacher

Société : OST & HEIG-VD



2 022 commentaires

☰ **TRIER PAR**



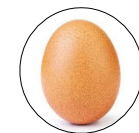
Ajoutez un commentaire...

---



**poule** Il y a 5 jours

**First !!!**

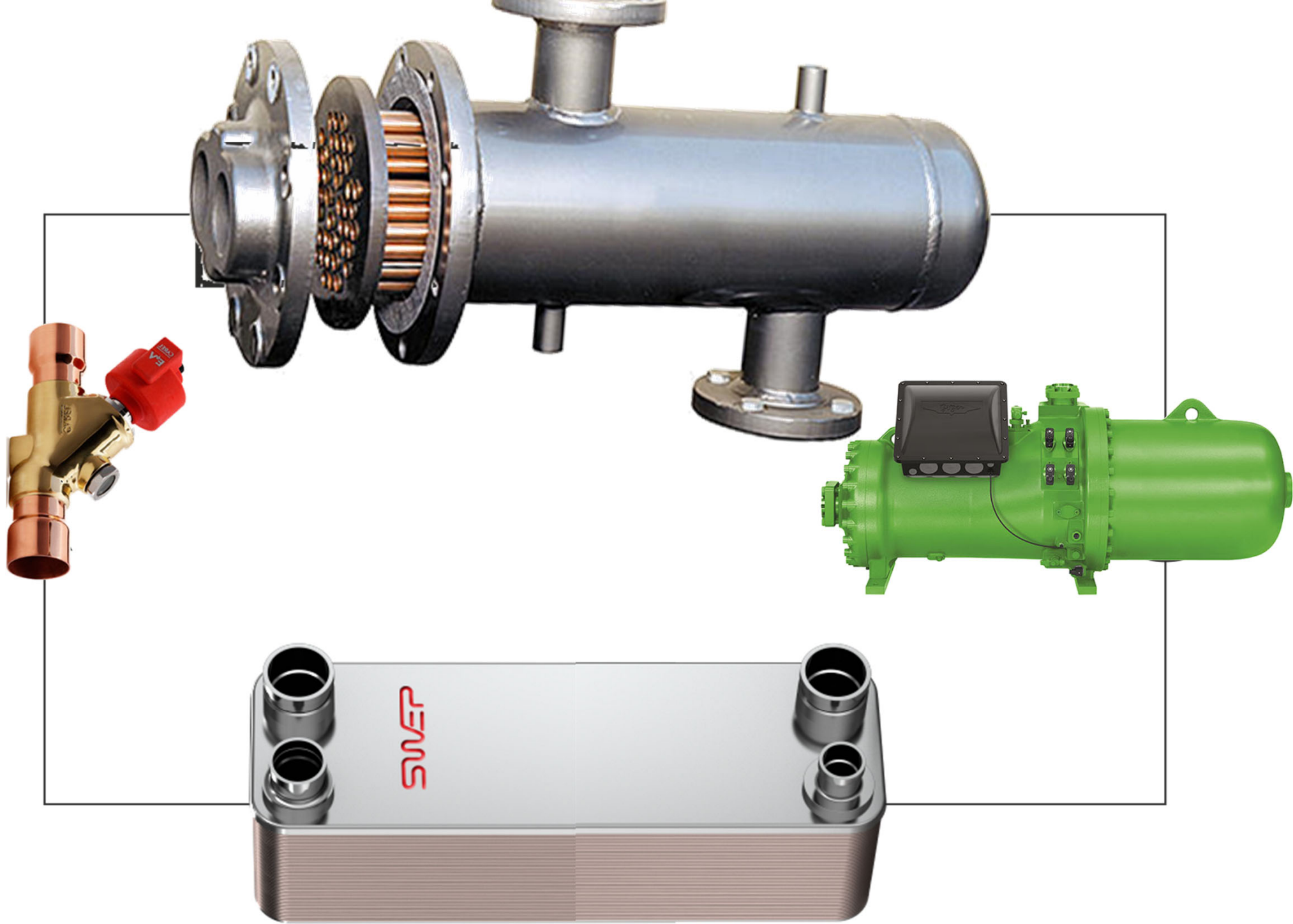


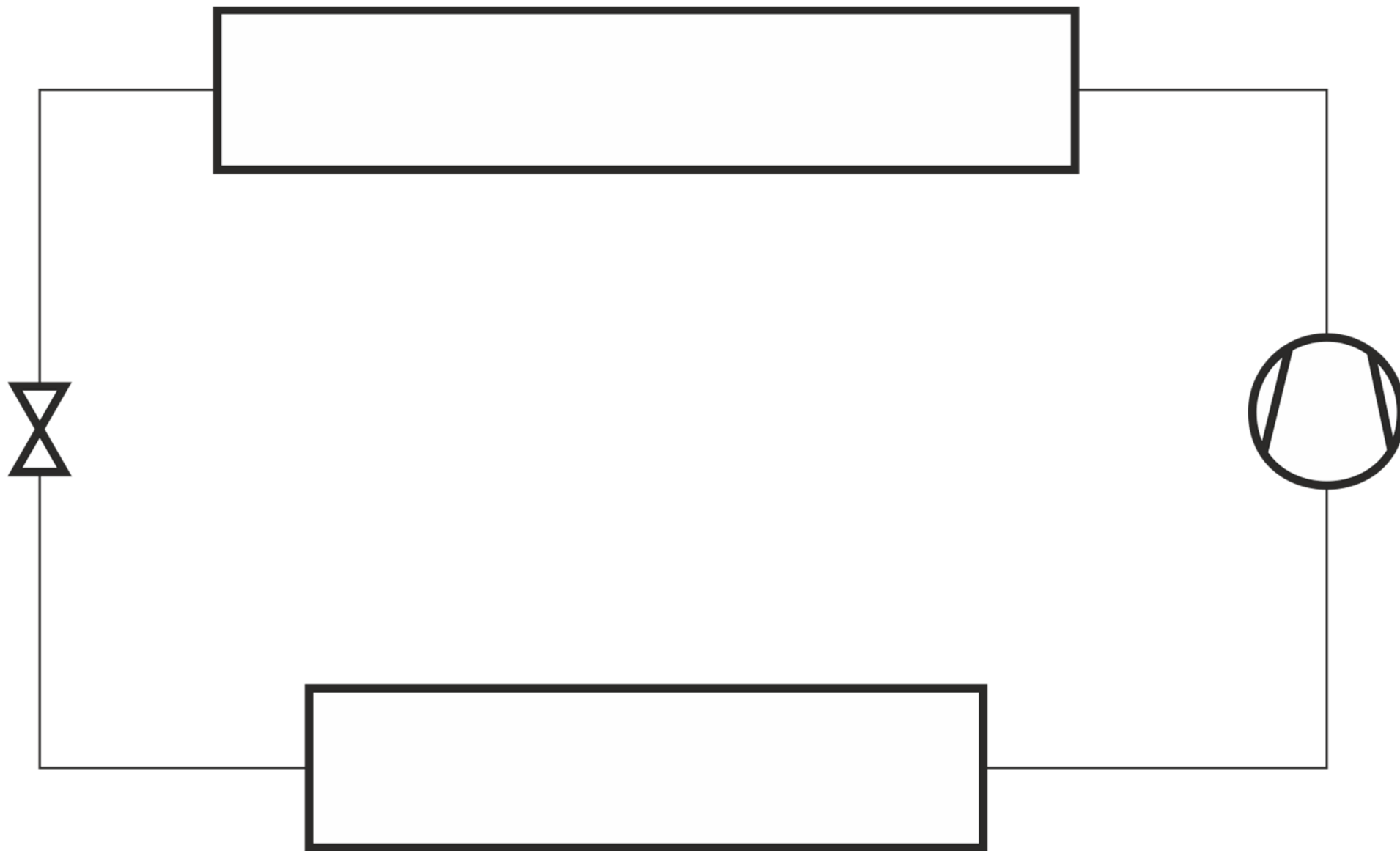
**oeuf** Il y a 5 jours

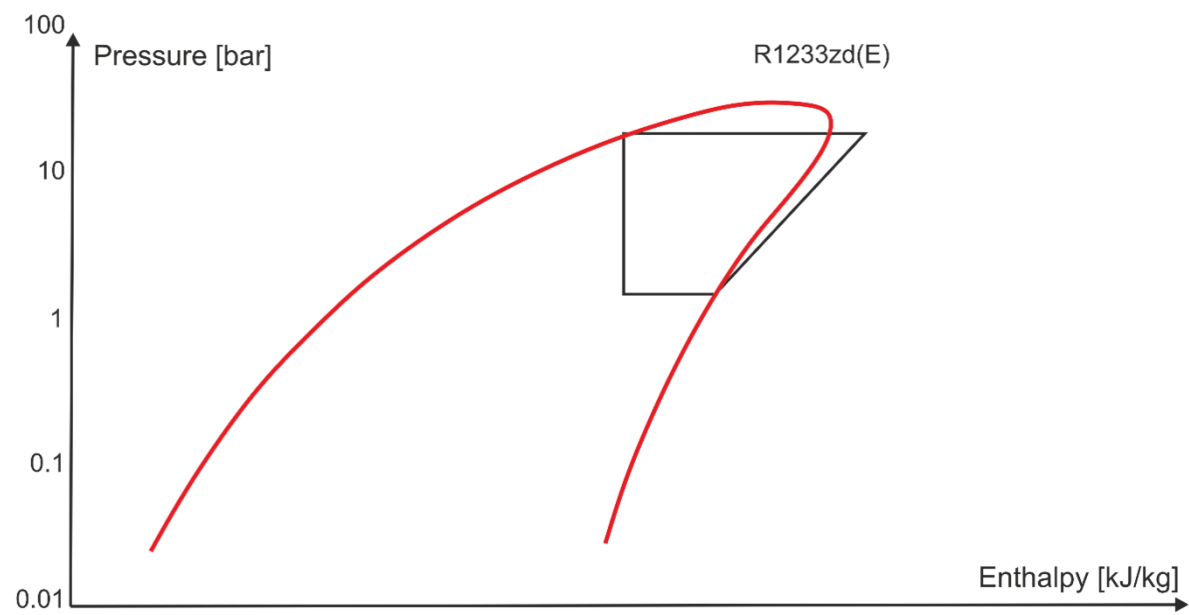
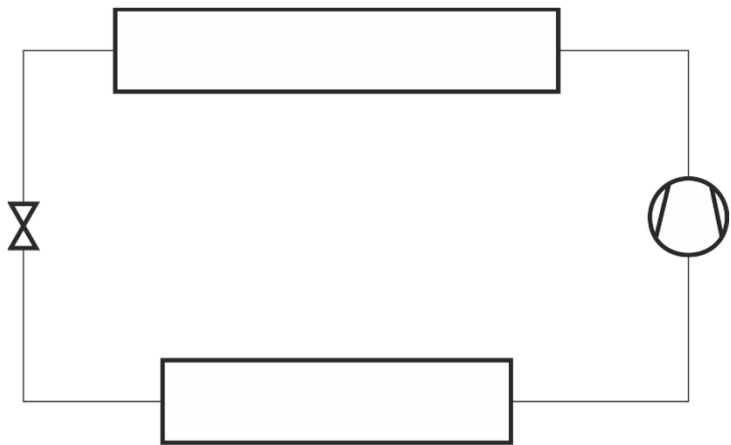
**first ...**

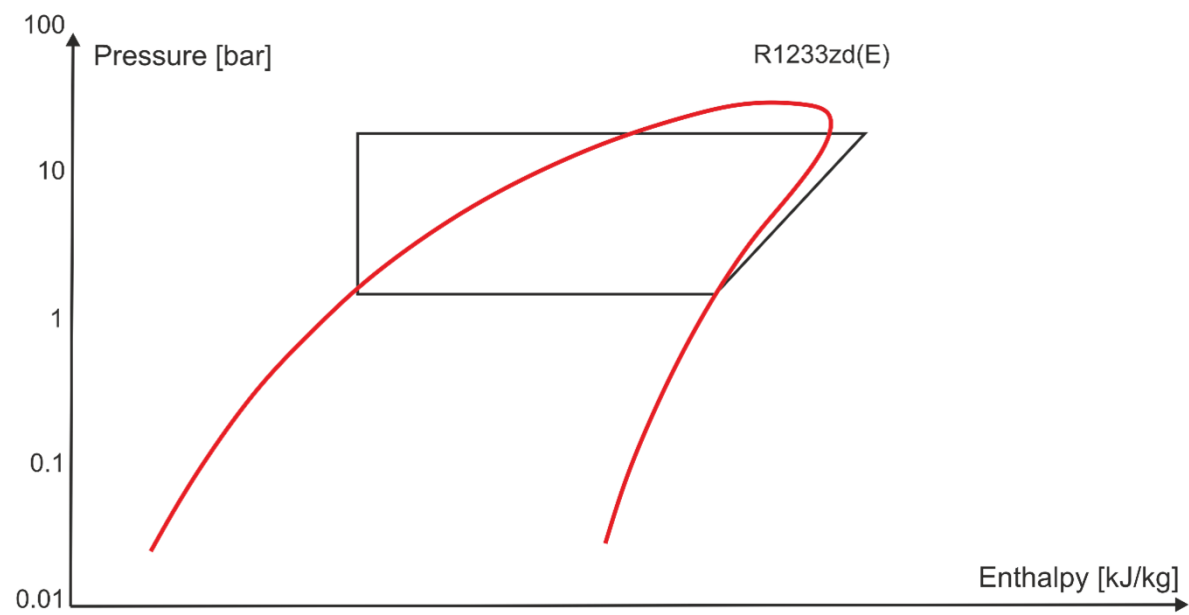
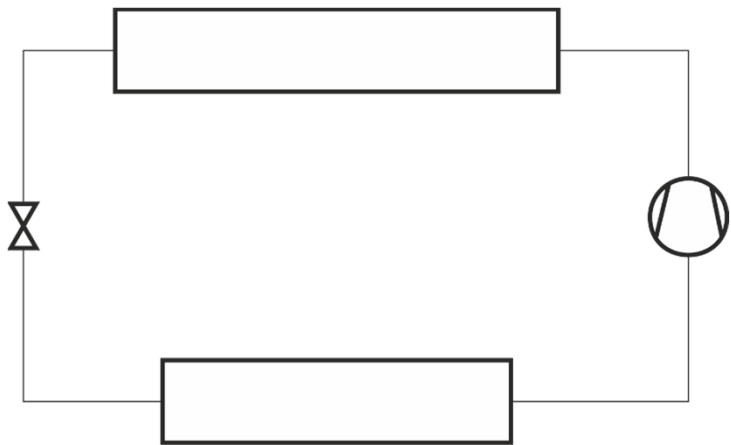






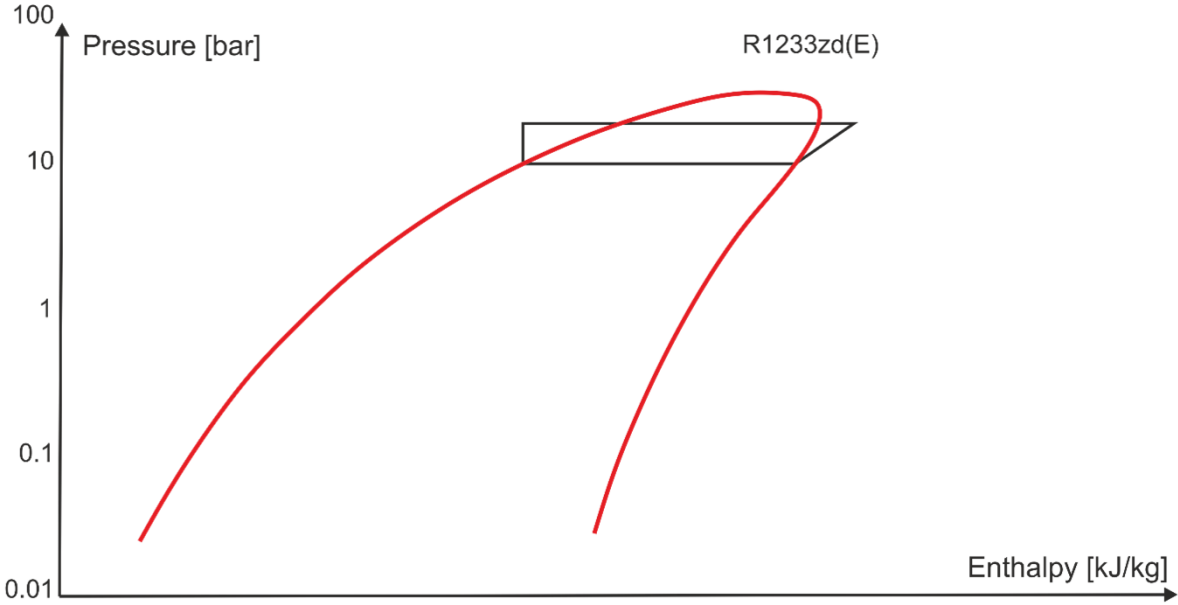
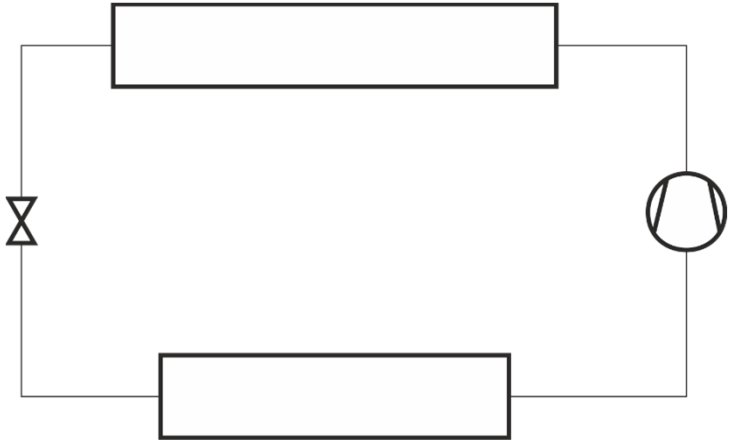




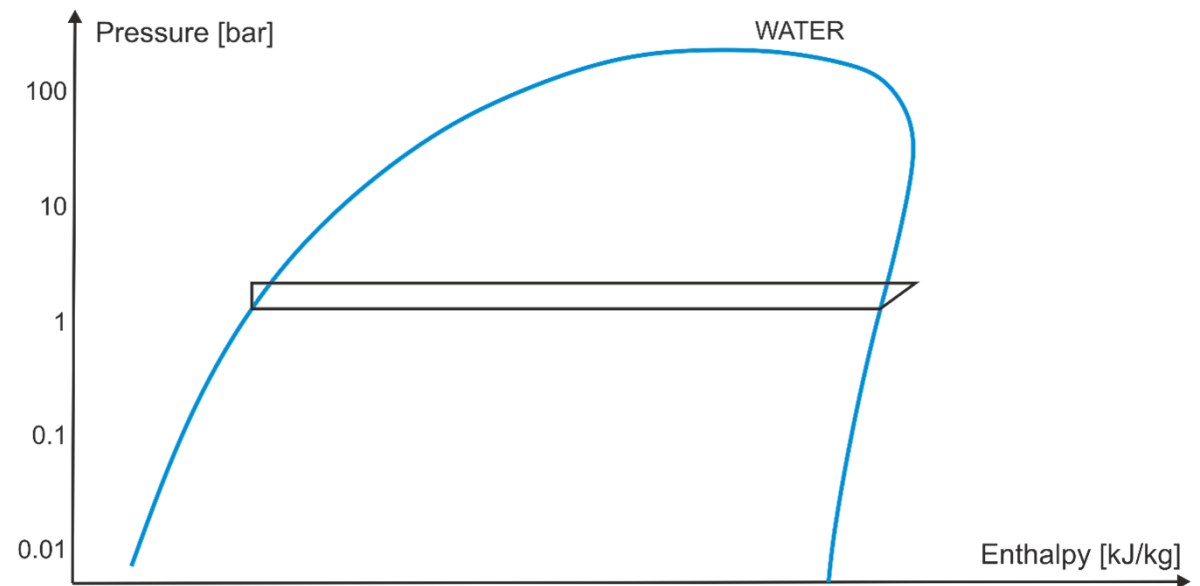
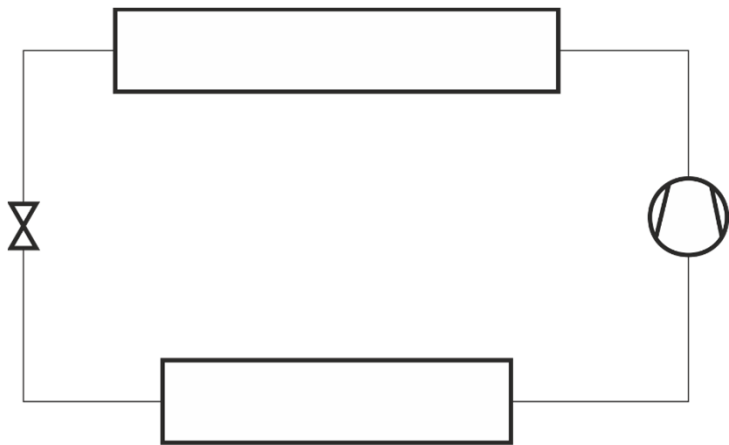




# Le choix du réfrigérant est très important pour une PAC industrielle



L'eau (R718) est un réfrigérant idéal en terme de  $T_{\text{critique}}$ , sécurité, ODP, GWP



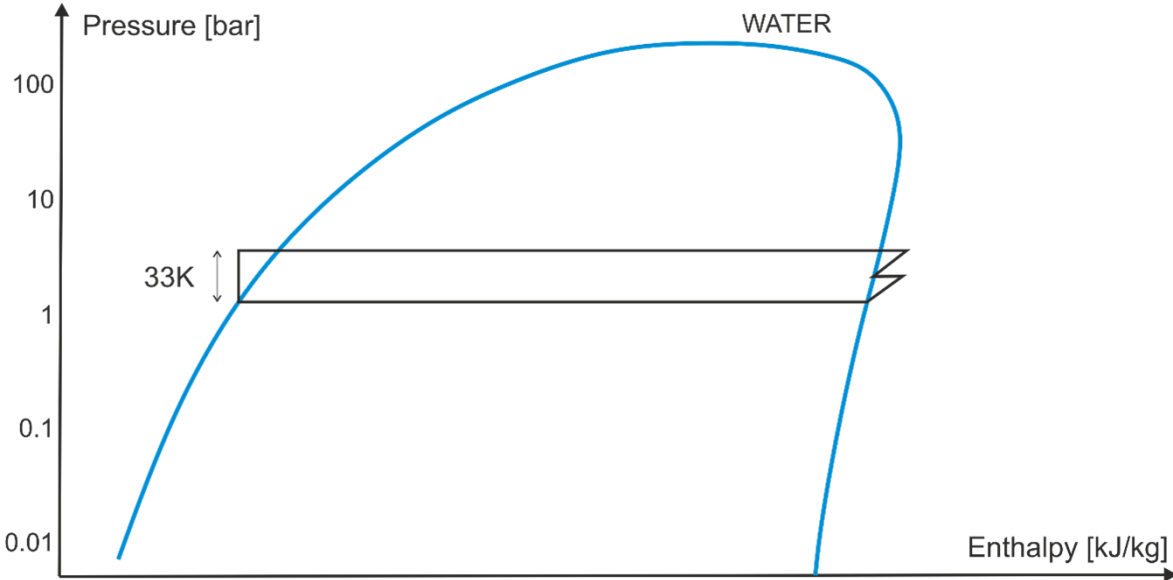
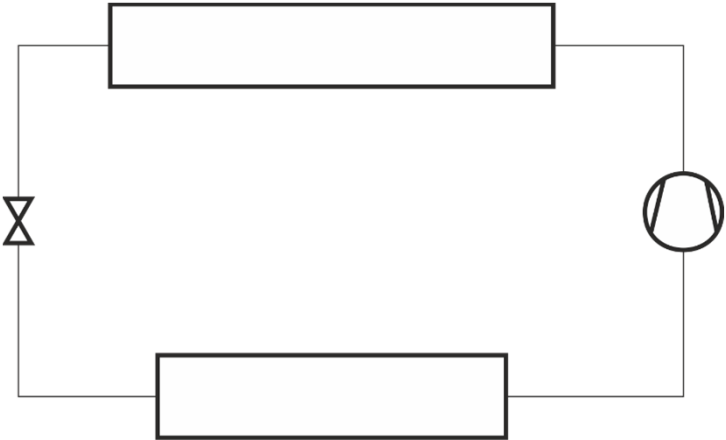
Malheureusement, R718 a *une capacité thermique volumique basse*

⇒ rapports de pression élevés dans le compresseur

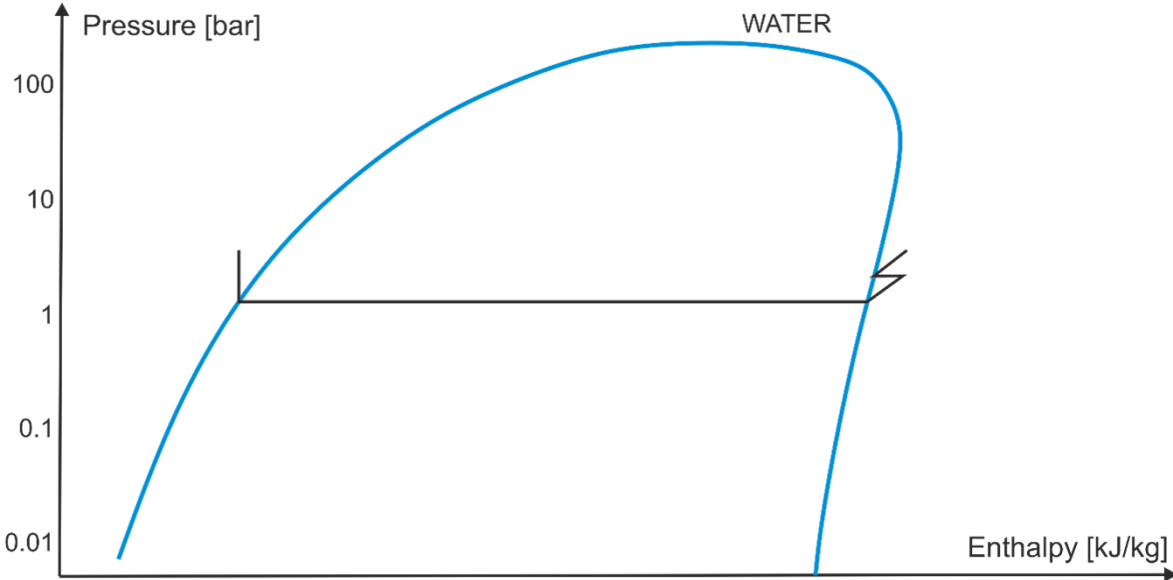
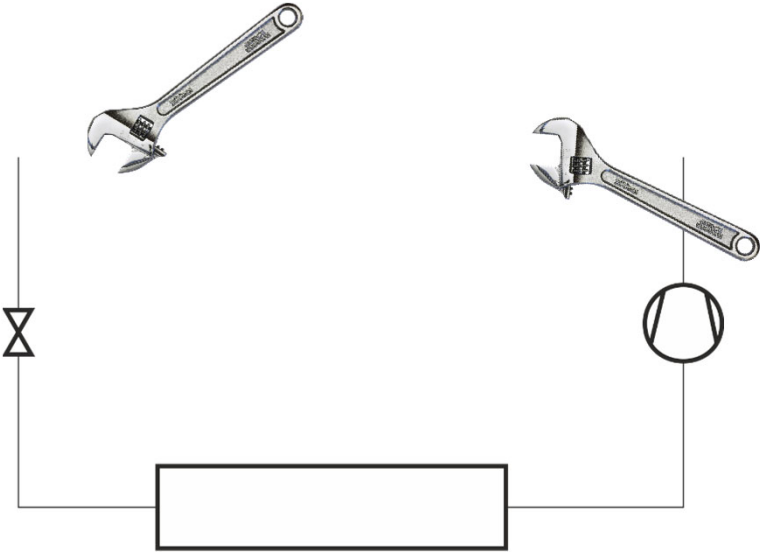
⇒ températures de sortie du compresseur élevées

⇒ compresseurs plus grands

L'eau (R718) est un réfrigérant idéal en terme de  $T_{critique}$ , sécurité, ODP, GWP



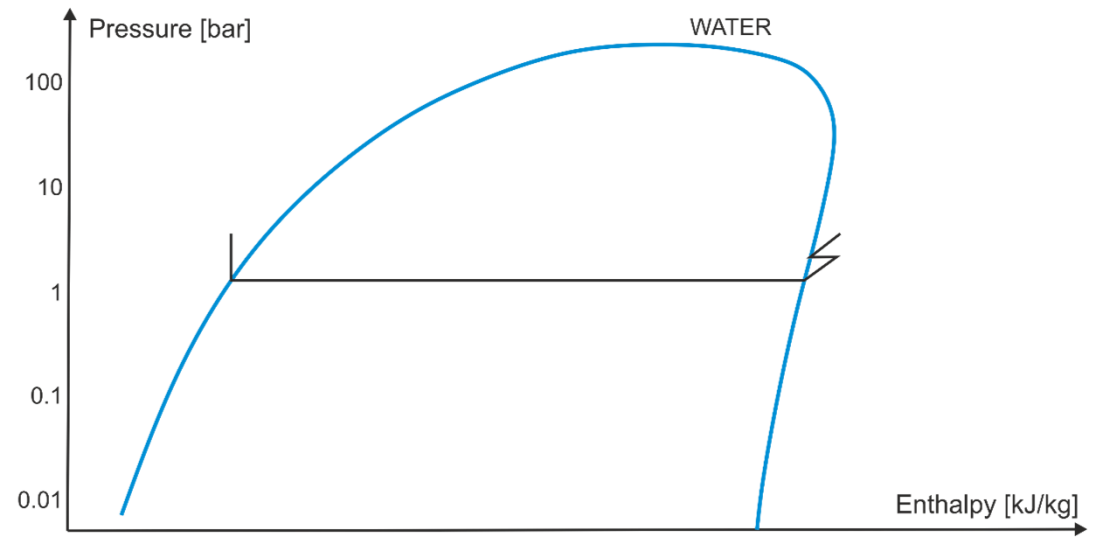
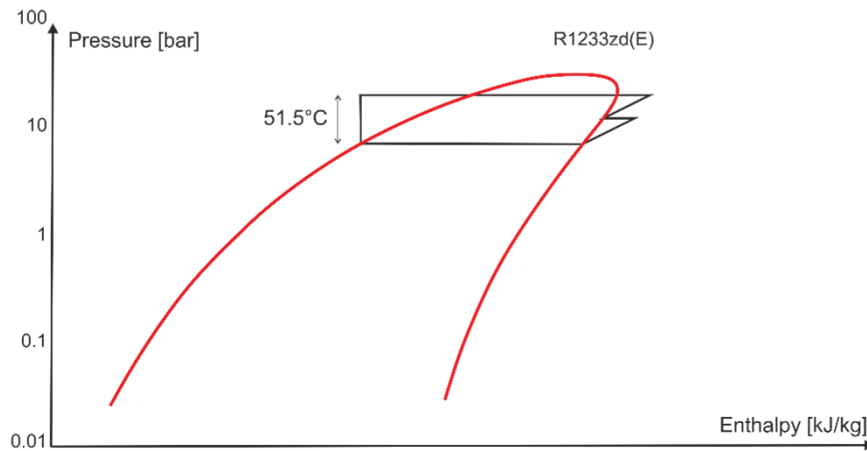
L'eau (R718) est un réfrigérant idéal si la vapeur est le produit désiré



Une PAC à circuit ouvert est plus efficace qu'une PAC à haute température

Aucune perte dans l'échangeur de chaleur

Refroidissement par injection d'eau diminue les pertes des compresseurs

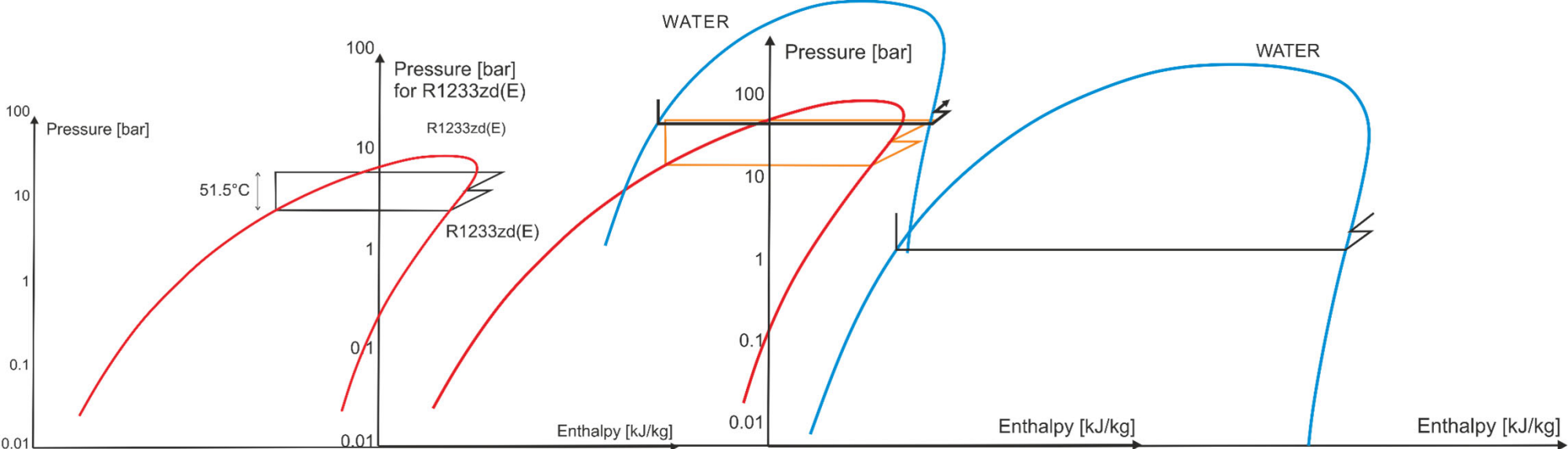


Difficulté d'aspirer de la vapeur à température basse.

Besoin de multiples compresseurs pour un grand saut en température

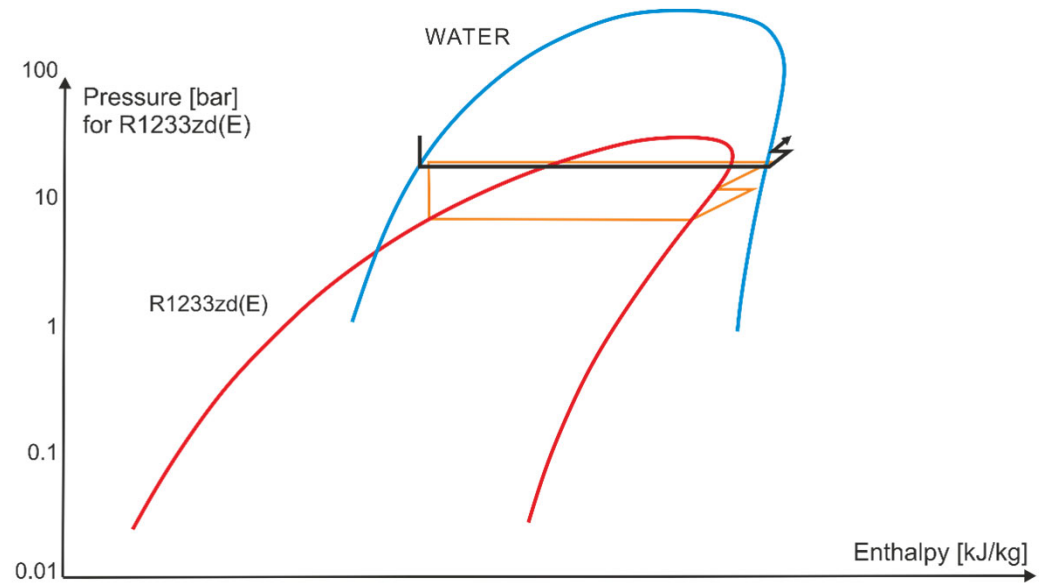
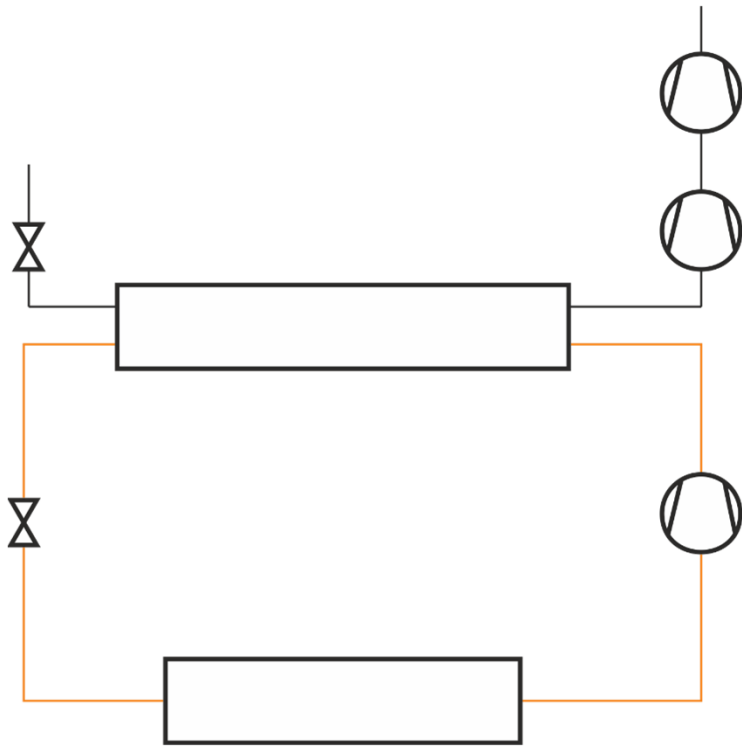
Il arrive que la meilleure solution est une combinaison des deux systèmes

Efficace



Il arrive que la meilleure solution est une combinaison des deux systèmes

Efficace

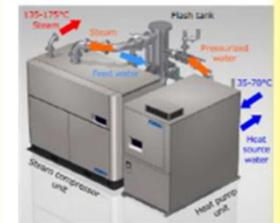
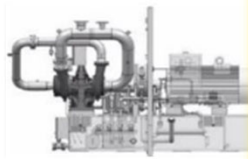
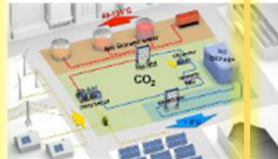


Complexe, pas encore sur le marché



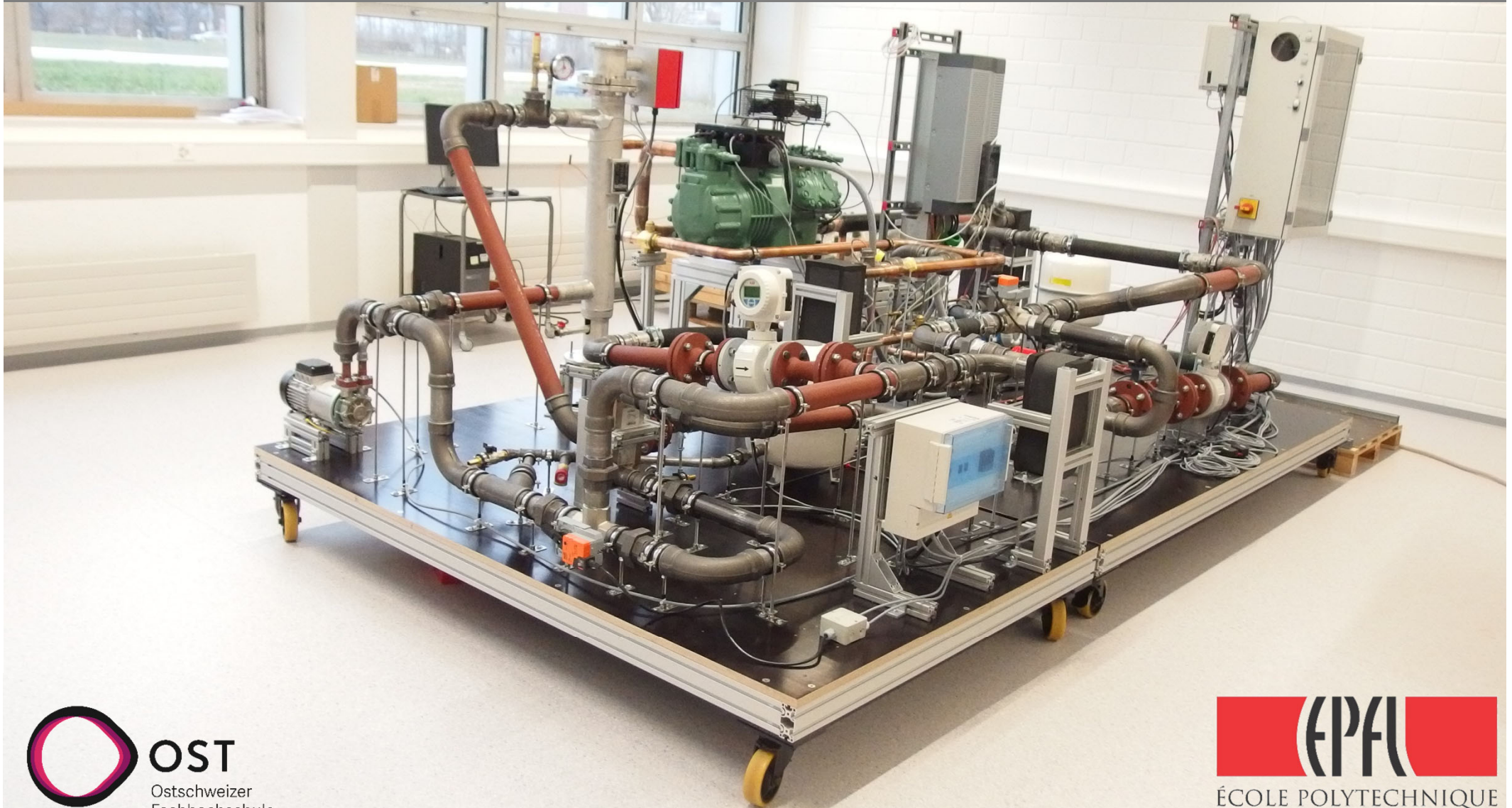
# Les pompes à chaleur générant de la vapeur sont déjà sur le marché

Friotherm (CH)	Turboden (IT)	MAN Energy Solutions (CH)	Mitsubishi MHPS (DE)	Siemens (DE)	Ochsner (AT)	Kobelco (JP)
FRIOTHERM Heat Pump	LHP30 LHP150	ETES	D-GWP	Large-scale	IWWDSS R2R3b IWWHS ER3b TWIN	SGH 120/165
R1233zd(E) + R718 (Water)	R601 + R718 (n-Pentane + Water)	R744 (CO <sub>2</sub> )	R600a + R718 (Iso-Butane + Water)	HFOs	Öko (R245fa) R1233zd(E) (HFOs)	R245fa + R718
<b>25 MW</b>	<b>2.7 MW</b> <b>14.4 MW</b>	<b>5 to 100 MW</b>	<b>4.3 MW</b>	<b>4 to 70 MW</b>	<b>Up to 750 kW</b> <b>TWIN 2.4 MW</b>	<b>Up to 624 kW</b> <b>Cascade 2.5 MW</b>
137 °C	115 °C	150 °C	174 °C	150 °C	130 °C	165 °C

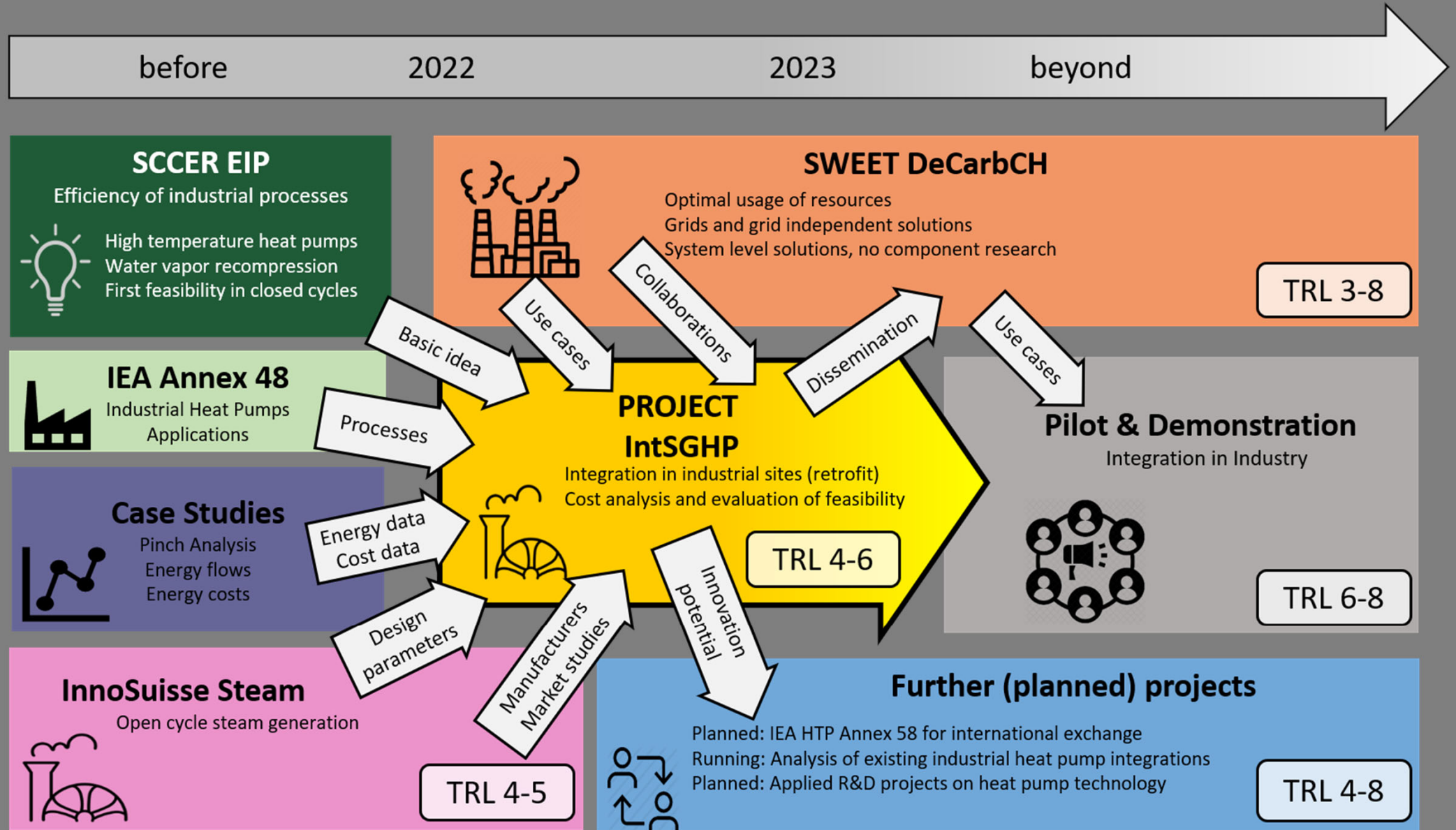




# InnoSuisse: génération de vapeur utilisant une PAC combinée Avec une puissance modérée d'environ 100 kW



# IntSGHP: Integration of Steam Generating Heat Pump (retrofit)



# Compression mécanique de vapeur

## Partie 2:

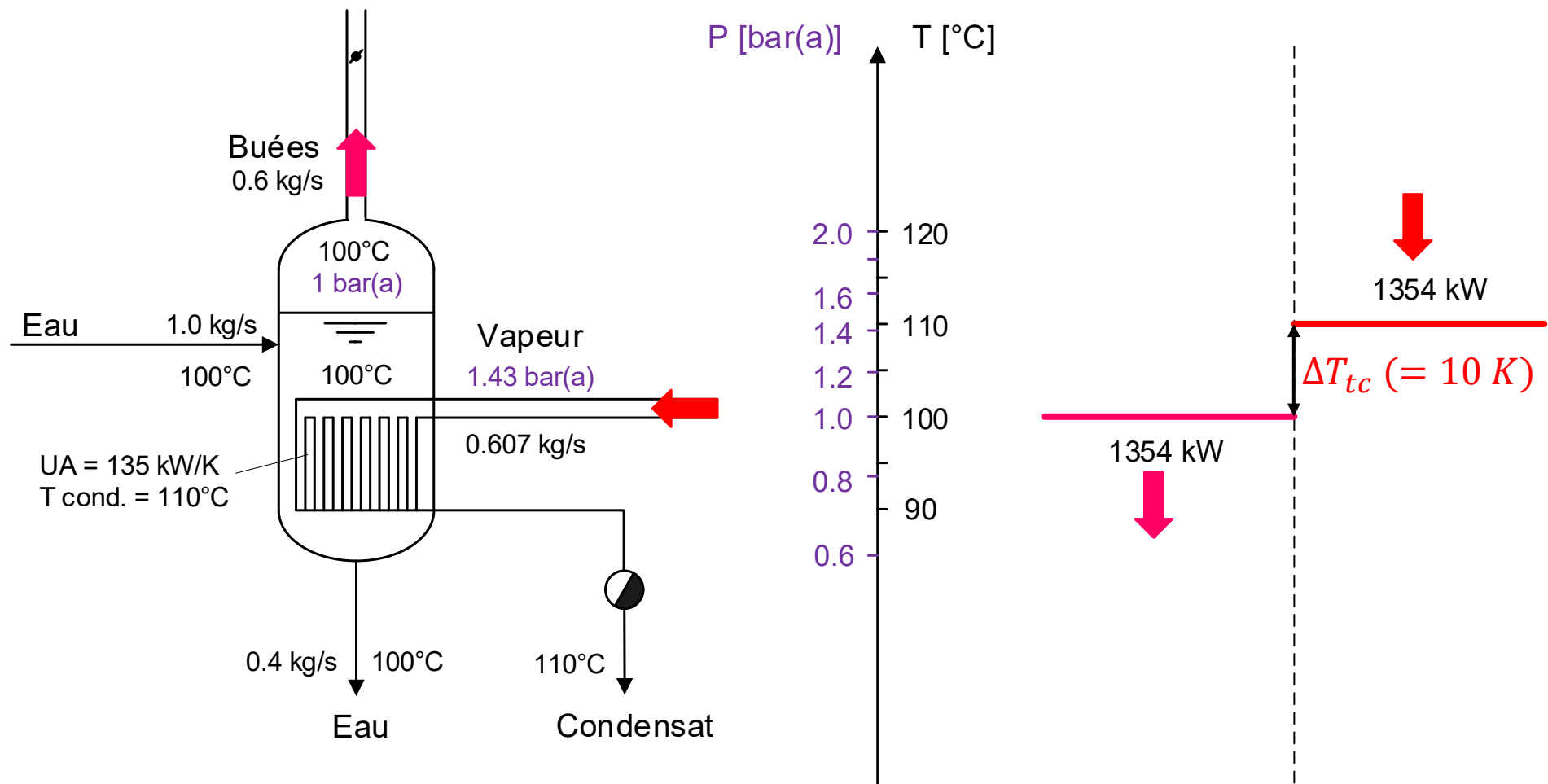
### Applications dans les procédés industriels

## Evaporation d'eau (ou autres solvants)

- Procédé intensif en énergie (min. 1 kg vapeur / kg eau évaporée)
- L'évaporation intervient dans de nombreux procédés:
  - Concentration de lait (avant séchage par atomisation)
  - Concentration de jus de fruit
  - Cuisson du moût (production de la bière)
  - Concentration de solution (extrait de café, etc.)
  - Production de papier
  - Production de sel, de sucre
  - Distillation d'eau de mer
  - Concentration d'effluents
  - Procédés chimiques (distillation, séchage, ...)
  - ...

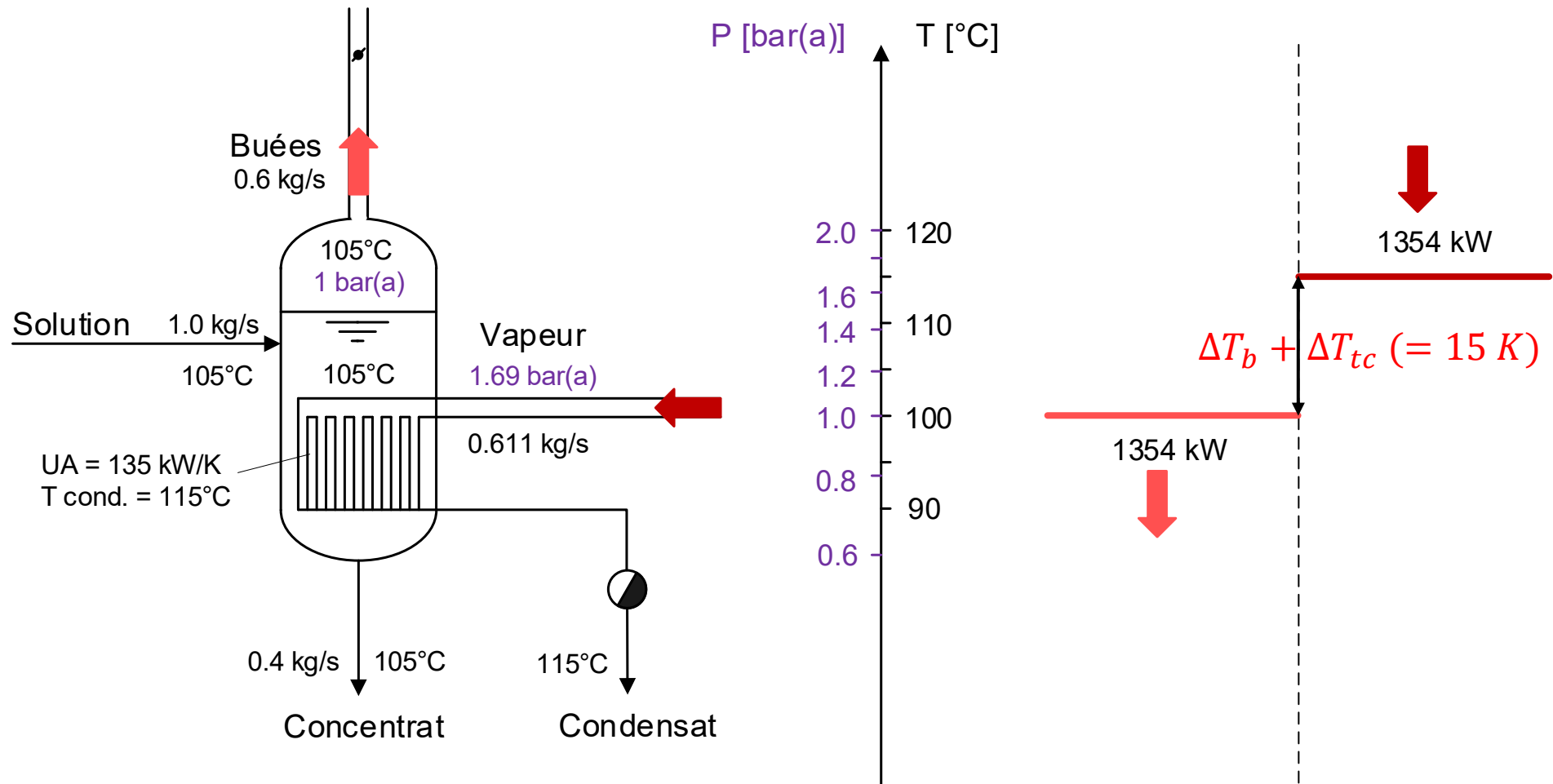
# Principe de la CMV appliquée en évaporation

# Evaporation de l'eau



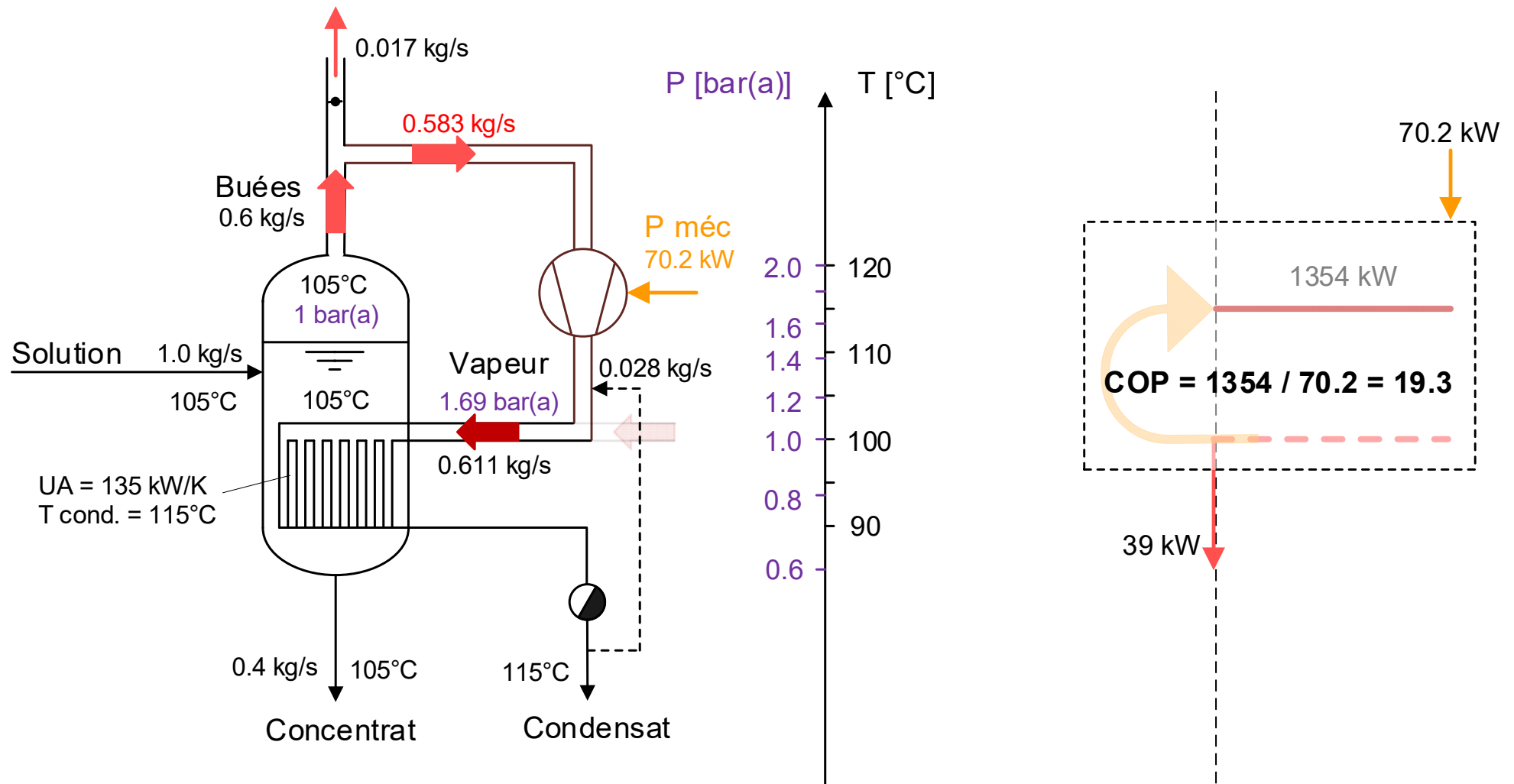
Toute la chaleur d'évaporation fournie se retrouve dans les buées ... mais la condensation de ces buées se produit, au mieux, à la température de saturation (ici 100°C), soit à une température trop basse pour auto-entretenir l'évaporation. La différence de température  $\Delta T_{tc}$  est nécessaire au transfert de chaleur et dépend du dimensionnement de l'équipement de transfert de chaleur

# Evaporation d'une solution



Lorsque il s'agit de concentrer une solution, le «gap de température» s'accroît encore d'une valeur  $\Delta T_b$  (retard à l'ébullition ou *boiling point elevation*), qui dépend de la solution, et varie avec sa concentration et la température. Pour revaloriser la chaleur des buées, il faut en augmenter la T condensation de  $\Delta T_b + \Delta T_{tc}$ , dont augmenter la pression de 1 bar(a) à 1.69bar(a)

# Evaporation d'une solution avec CMV



La compression des buées permet leur revalorisation en substitution de la vapeur de chauffage. Considérant un rendement isentropique du turbocompresseur de 0.8 et pour les conditions indiquées, la puissance mécanique requise n'est que de 70 kW, soit un COP de 19 !

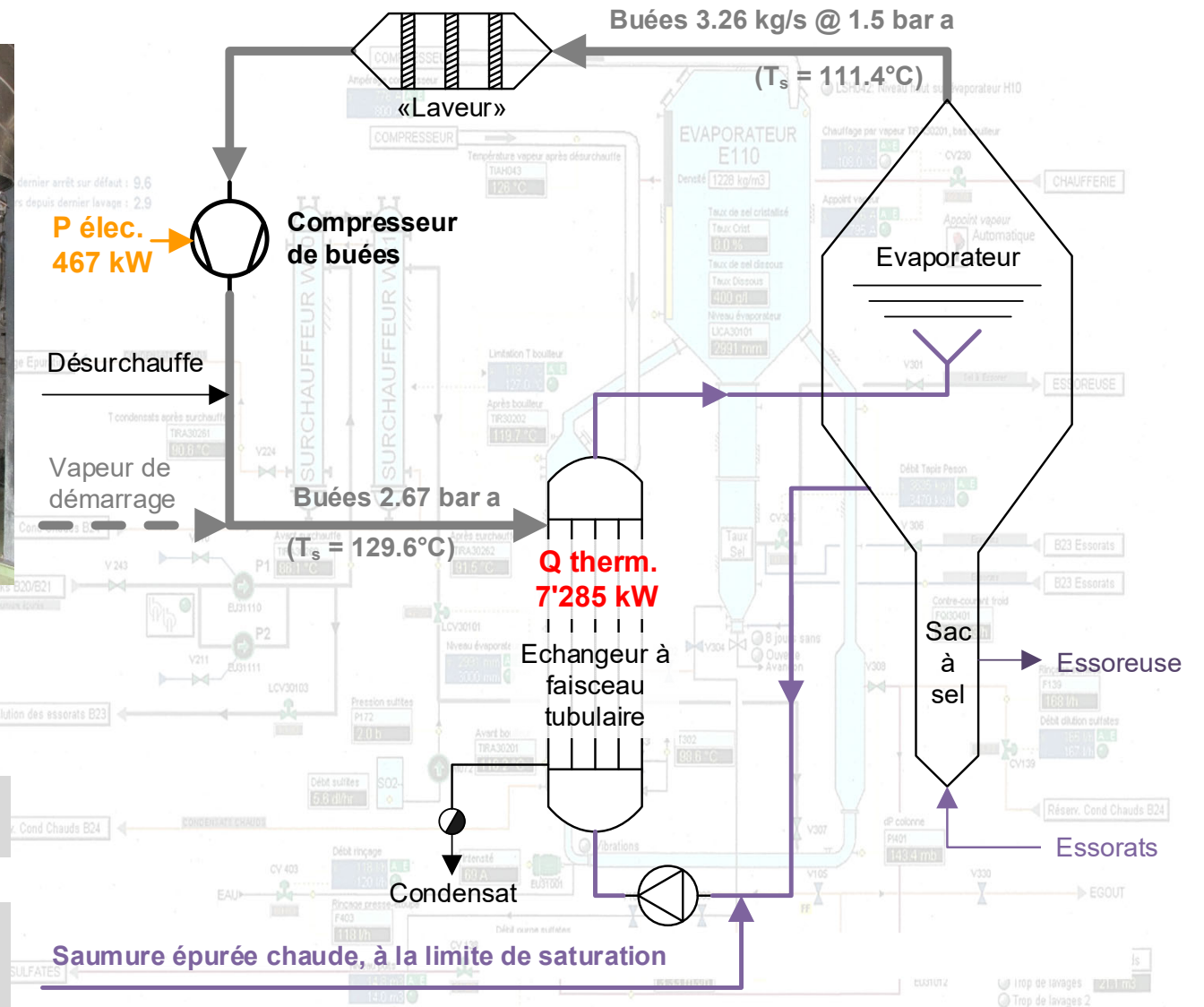


Deux exemples pratiques typiques:

Production du sel  
Concentration de lait

# Saline de Bex – production de sel (1/2)

Principe: concentration par évaporation de la saumure saturée pour provoquer la précipitation / cristallisation du sel



CMV mise en service en 1996  
(Sulzer Turbo, n = 27'900 tr/min)

$$\Delta T_s = 18.2 K$$

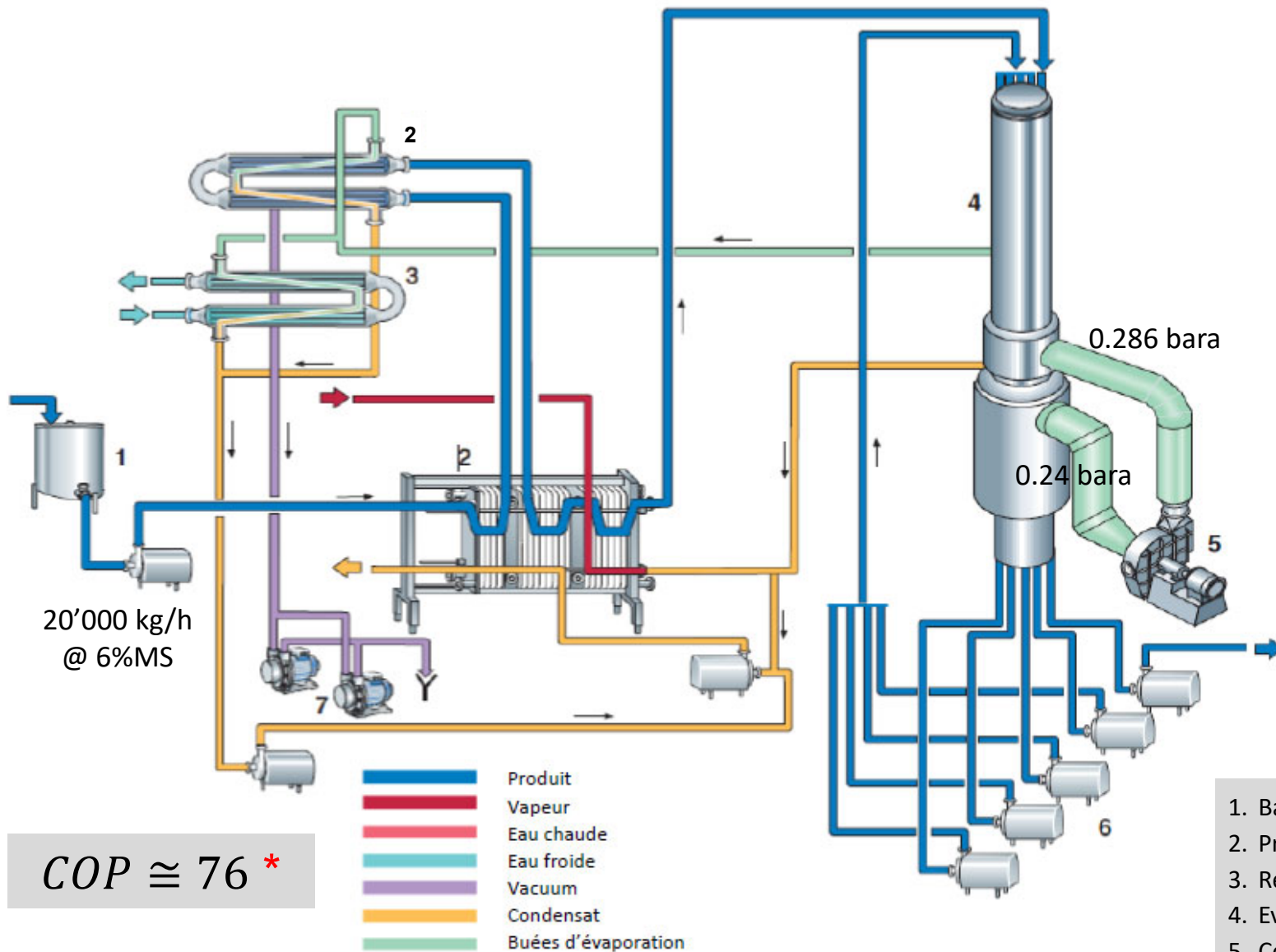
$$COP = \frac{Q_{therm}}{P_{élec}} \cong 15.6$$

## Saline de Bex – production de sel (2/2)

Points importants pour la fiabilité et maintien des performances, confirmés par les retours d'expérience:

- «Lavage» des buées avant aspiration, et séparateur de gouttelettes:
  - prévenir dégâts au compresseur (érosion de la roue)
  - maintenir coefficient de transfert élevé de l'échangeur
- Épuration de la saumure:
  - Limiter encrassement et bouchage des tubes de l'échangeur (=> éviter dégradation des performances et de franchir la limite de pompage)
- Taux d'utilisation: 99.4% (hors maintenance)
- Monitoring des paramètres représentatifs !
- Procédure de détection et gestion des dispositifs anti-pompage (peut notamment apparaître lorsque que l'échangeur s'encrasse)
- Procédure de démarrage avec passage rapide des vitesses (fréquences) critiques

# Crema – concentration de lait / petit-lait / ... / avant séchage (1/2)



3'750 kg/h @ 32%MS

1. Bac de lancement
2. Préchauffage produit à concentrer
3. Refroidisseur de buées
4. Evaporateur tubul. à film tombant
5. Compresseur de buées
6. Pompes de circulation du produit
7. Pompes à vide

$COP \cong 76$  \*

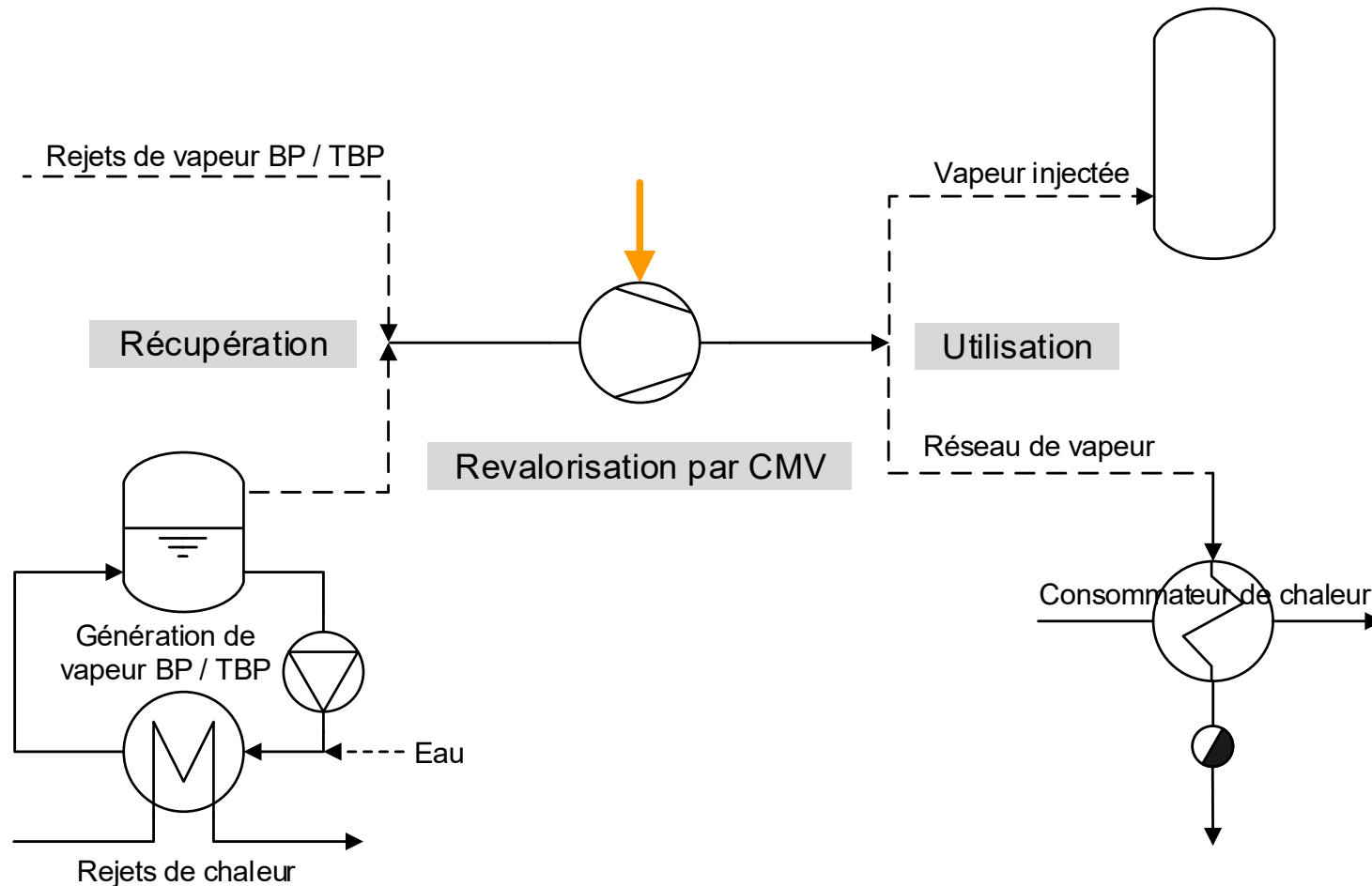
\* CMV seule

Source schéma: *Dairy Processing Handbook*, Tetra Pak

## Crema – concentration de lait / petit-lait / ... / avant séchage (2/2)

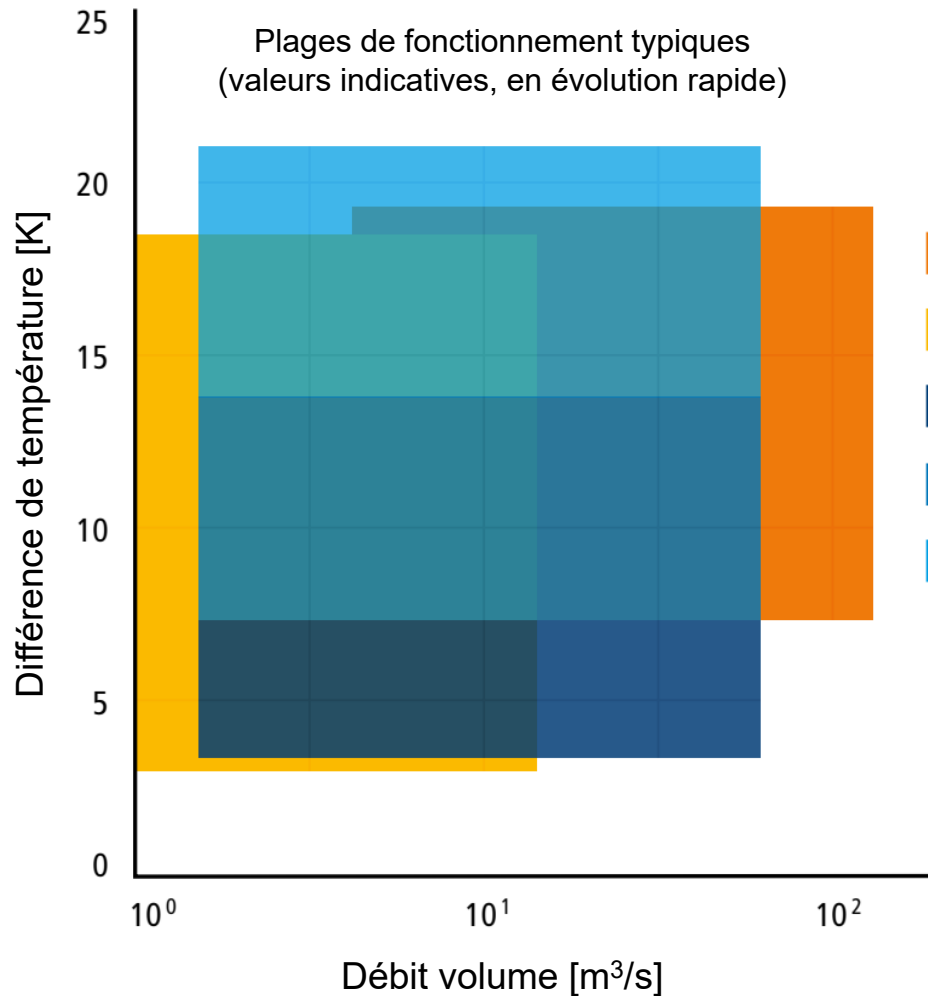
- Ventilateur centrifuge (au lieu de turbo-compresseur)
  - Pas de risque de pompage
  - Supporte aspiration de buées humides  $\Leftrightarrow$  compression sans surchauffe
- Fonctionnement sous-atmosphérique (exigence produit)
- Faible élévation de T (64 à 68°C) => COP très élevé, grâce à:
  - Faible retard à l'ébullition
  - Coefficient et surface de transfert très élevés de l'évaporateur
- Flexibilité d'exploitation: différents produits et conditions (lait entier, lait maigre, petit-lait, babeurre, lait condensé sucré, ...)
- Retour d'expérience après 35 ans (fonctionnement 20h/j)
  - CMV très fiable (moteur & VFC remplacés, ventilateur d'origine rééquilibré)
  - Quelques fuites au niveau des tubes de l'évaporateur, ressoudés
- 4 autres évaporateurs à CMV (1x 2005, 3x 2008) de plus grosse capacité

# Application en récupération / revalorisation de chaleur: principe



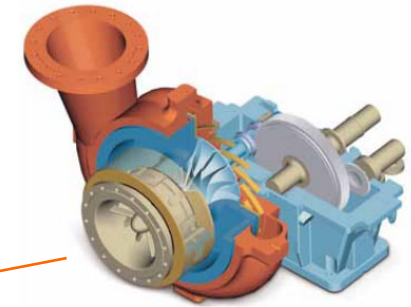
- Nombre croissant de solutions techniques et d'applications industrielles
- Par ex. usine Dow Chemical à Terneuzen (NL) : recompression (en 2 étages) de 12 to/h de vapeur de 4 bara à 13.5 bara ( $\Delta T_s = 50 K$ ) avec COP effectif 7.5 =  $0.8 \times \text{COP}_{\text{Carnot}}$  [Réf. 9]

# Types de compresseurs pour CMV et plages d'utilisation



Source: *Evaporation Technology Using MVR*, GEA

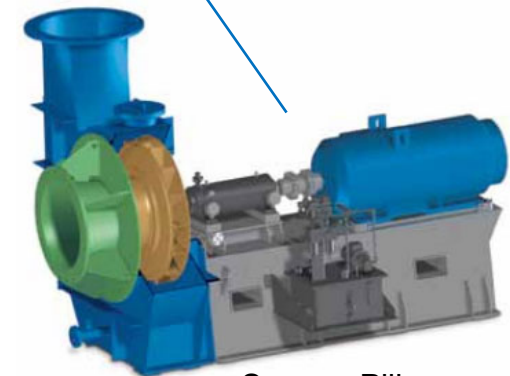
- Turbo-compresseur
- Soufflante rotative (Roots)
- Ventilateur centrifuge (1x)
- Ventilateur centrifuge (2x)
- Ventilateur centrifuge (3x)



Source: Atlas Copco



Source: Kaeser



Source: Piller

- Plusieurs types possibles pour une application donnée
- Limites des domaines de travail et types de compresseur en évolution rapide !

# Conclusions

- Technologie CMV bien établie depuis des décennies dans certains secteurs
- H<sub>2</sub>O: fluide naturel, grande plage de température de travail: de 50°C à 300°C
- Activité de développement des compresseurs (amélioration, nouveaux types, intégration, modularisation et conception sur mesure, ...)
- COP élevé: jusqu'à  $\approx 0.8 \times COP_{Carnot}$
- COP calculable avec T de saturation à l'aspiration et au refoulement, et rendement isentrope compresseur (cas simple à 1 étage de compression)
- Installation à planifier et exploiter soigneusement
  
- Application en concentration:
  - Nécessité de production de vapeur de démarrage
  - $\Delta T_b$  supplémentaire dû à l'élévation du point d'ébullition
  
- Potentiel encore inexploité en récupération/revalorisation de chaleur:
  - Analyse Pinch préalable recommandée: en général, seule une revalorisation «à travers» le pincement global est appropriée (utilisation au-dessus du pincement de la chaleur excédentaire récupérée en dessous du pincement)



# Références et liens

1. A. Gauthier, J. Huchon, J.-F. Reynaud, *La recompression mécanique de vapeur – Application à la concentration par évaporation, installations à forte capacité évaporatoire – séchage*, Les Cahiers de l'Ingénierie, numéro spécial réédition Mai 1987
2. A. Gauthier, J. Huchon, J.-F. Reynaud, *La recompression mécanique de vapeur – Concentration par évaporation (faible capacité évaporatoire) / Cristallisation par évaporation / Valorisation de rejets thermiques / Distillation – séchage*, Les Cahiers de l'Ingénierie, numéro spécial Novembre 1985
3. J.-F. Reynaud, *Compression mécanique de vapeur – Guide de recommandations pratiques pour la mise en œuvre et l'exploitation des installations*, Les Cahiers de l'Ingénierie, Septembre 1990
4. VDI-Berichte 442, *Brüdenverdichtung und ihre energiewirtschaftlichen Vorteile*, Tagung Basel 1982
5. VDI-Berichte 485 (?), *Brüdenverdichtung in der Lebensmittelindustrie*, 1988
6. [https://www.gea.com/it/binaries/mechanical-vapor-recompression-evaporation-distillation-gea\\_tcm39-34894.pdf](https://www.gea.com/it/binaries/mechanical-vapor-recompression-evaporation-distillation-gea_tcm39-34894.pdf) [consulté le 04.09.2022]
7. <https://www.piller.de/de/produkte-anwendungen/mvr-geblaese/> [consulté le 04.09.2022]
8. *Using Atlas Copco Engineered Turbochargers for MVR Application*, presentation Atlas Copco, December 2021
9. <https://www.hydrocarbonprocessing.com/magazine/2022/may-2022/special-focus-biofuels-alternative-fuels-and-green-petrochemicals/mvr-compressor-key-to-steam-energy-upgrade-at-terneuzen-polyolefin-plant> [consulté le 04.09.2022]
10. Exemples de MVR: <https://waermepumpe-izw.de/wp-content/uploads/2020/05/140508-IHPs-NL.pdf> [consulté le 04.09.2022]

A photograph of a red lighthouse with a white balcony and a red roof, situated on a rocky island in the middle of a blue ocean. The sky is clear and blue. The lighthouse has two windows and a small antenna on top.

**MERCI de votre attention !**

**«OUI, MAIS ...»?**