

Pompes à chaleur domestiques, de réseau ou industrielles

30 ans d'expérience
(toujours d'actualité)

Prof D. Favrat



Derrick sur île de glace

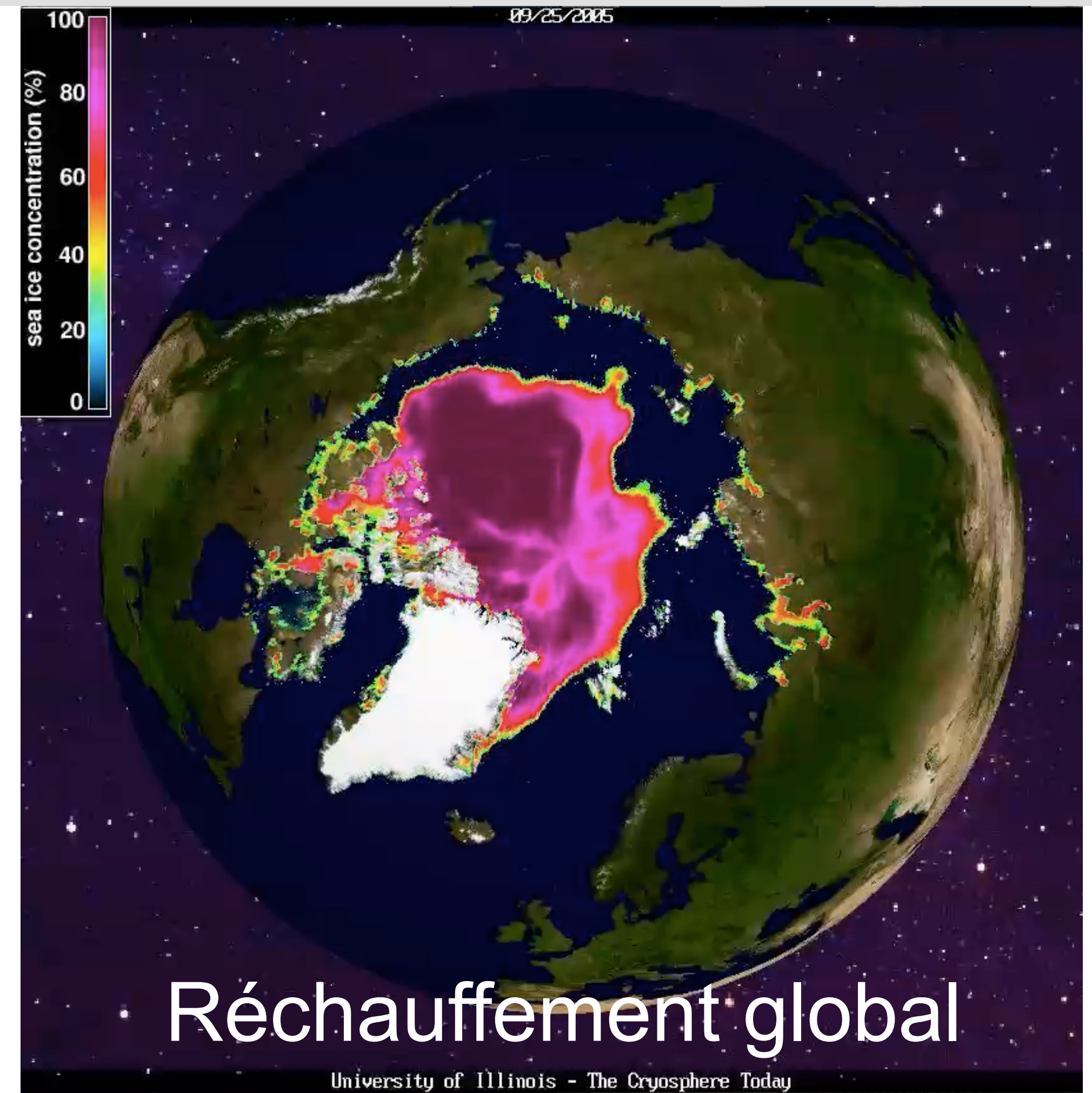
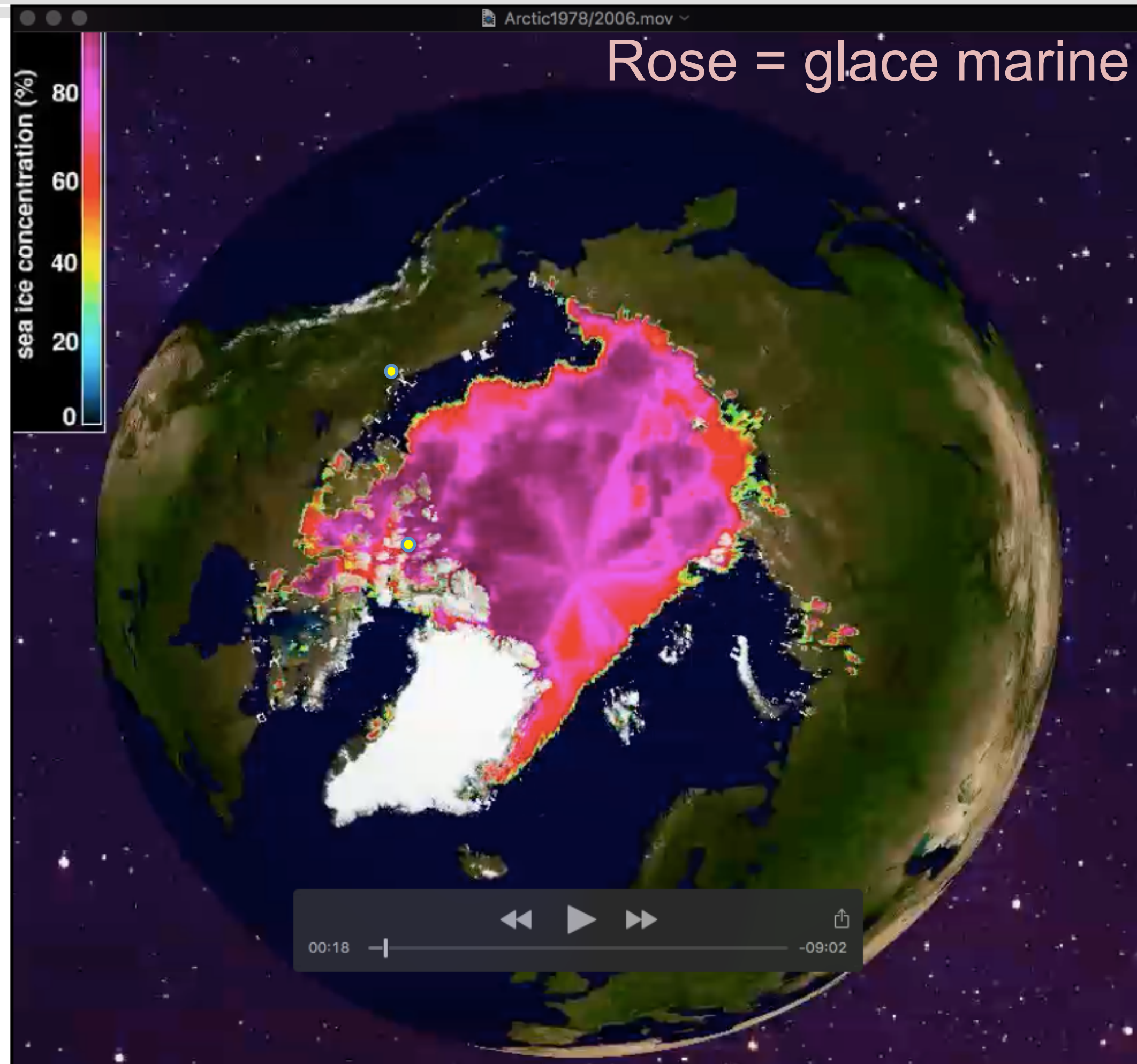


Tant d'efforts, de dégâts potentiels:
→ économie et renouvelables

Sables
bitumineux

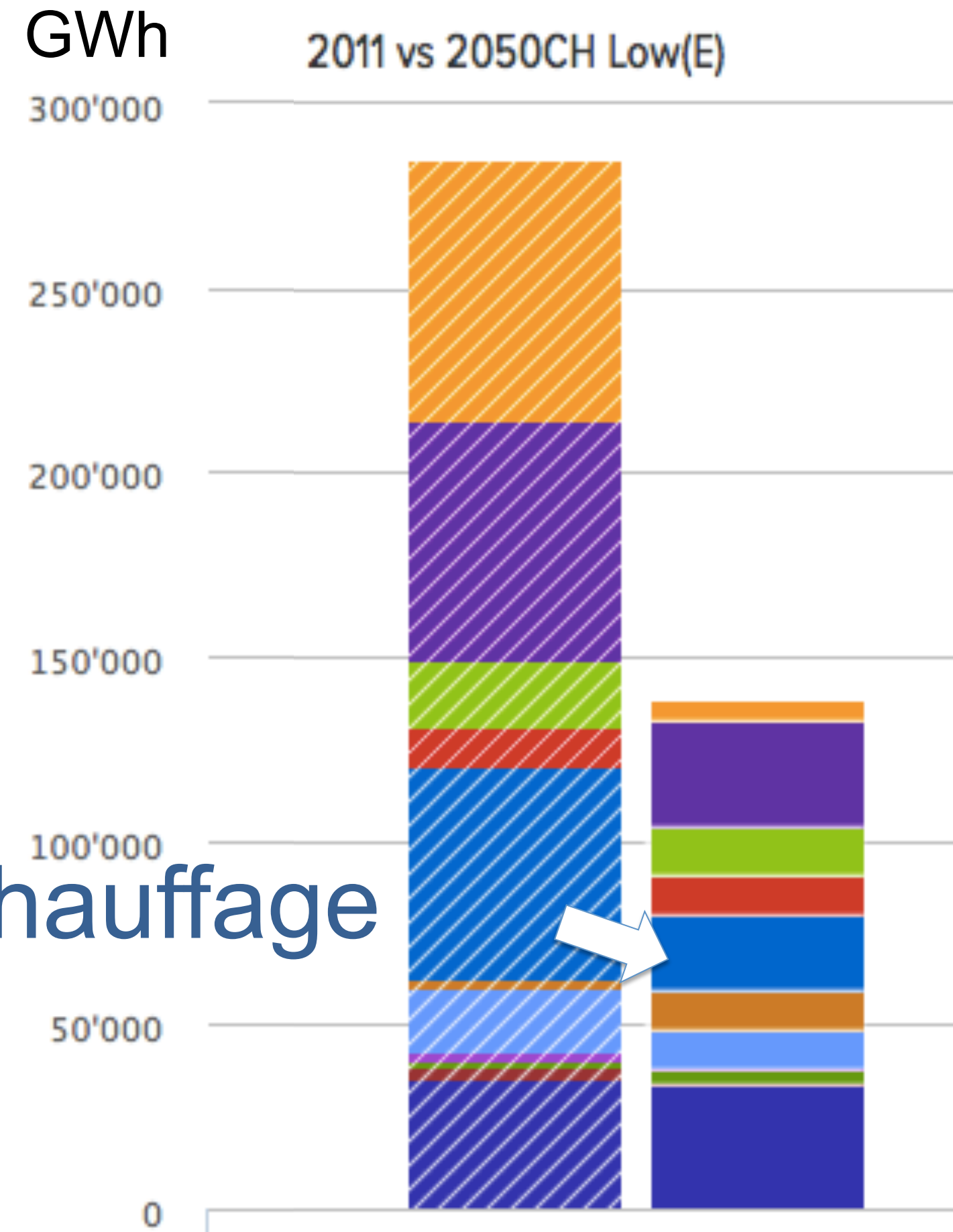


Glace arctique fin septembre 1979 et 2015



<http://calculator.energyscope.ch>

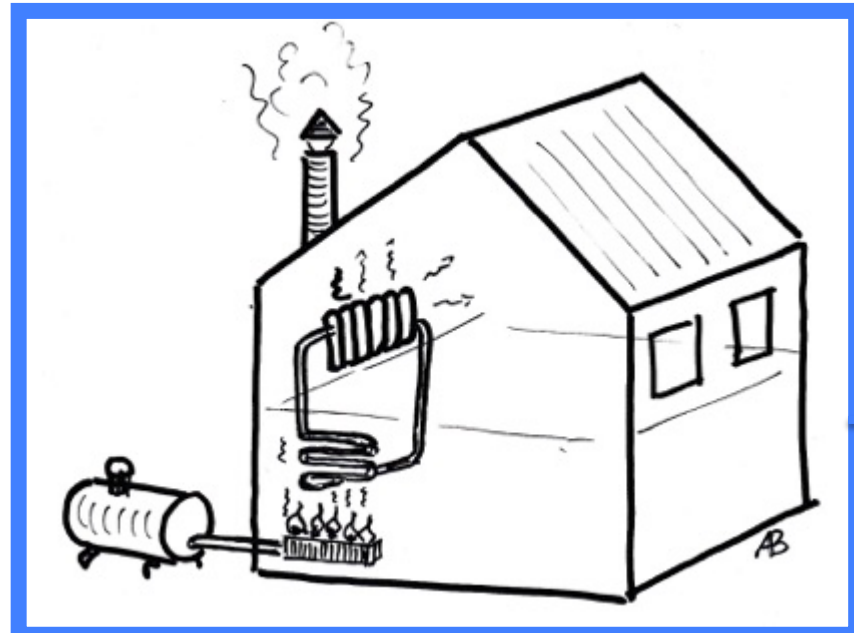
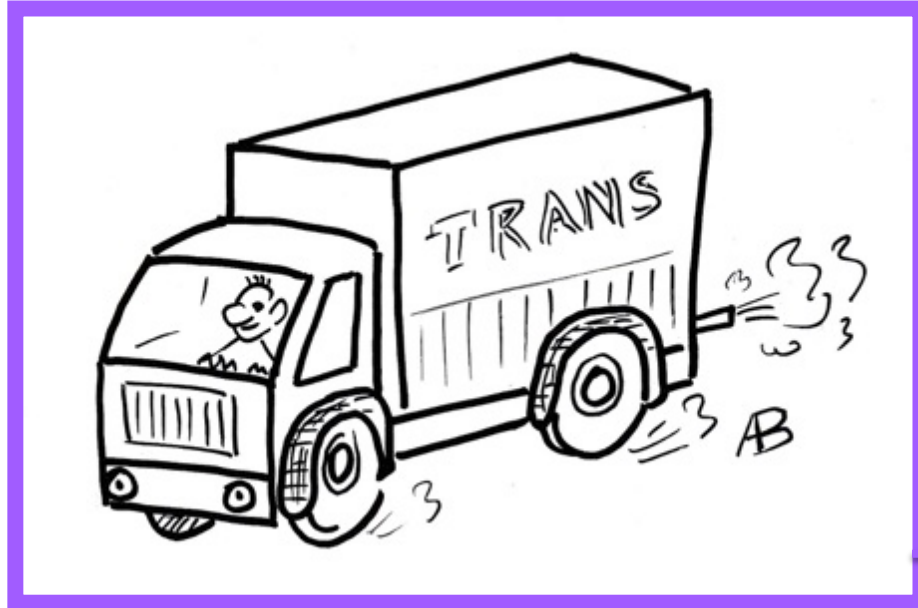
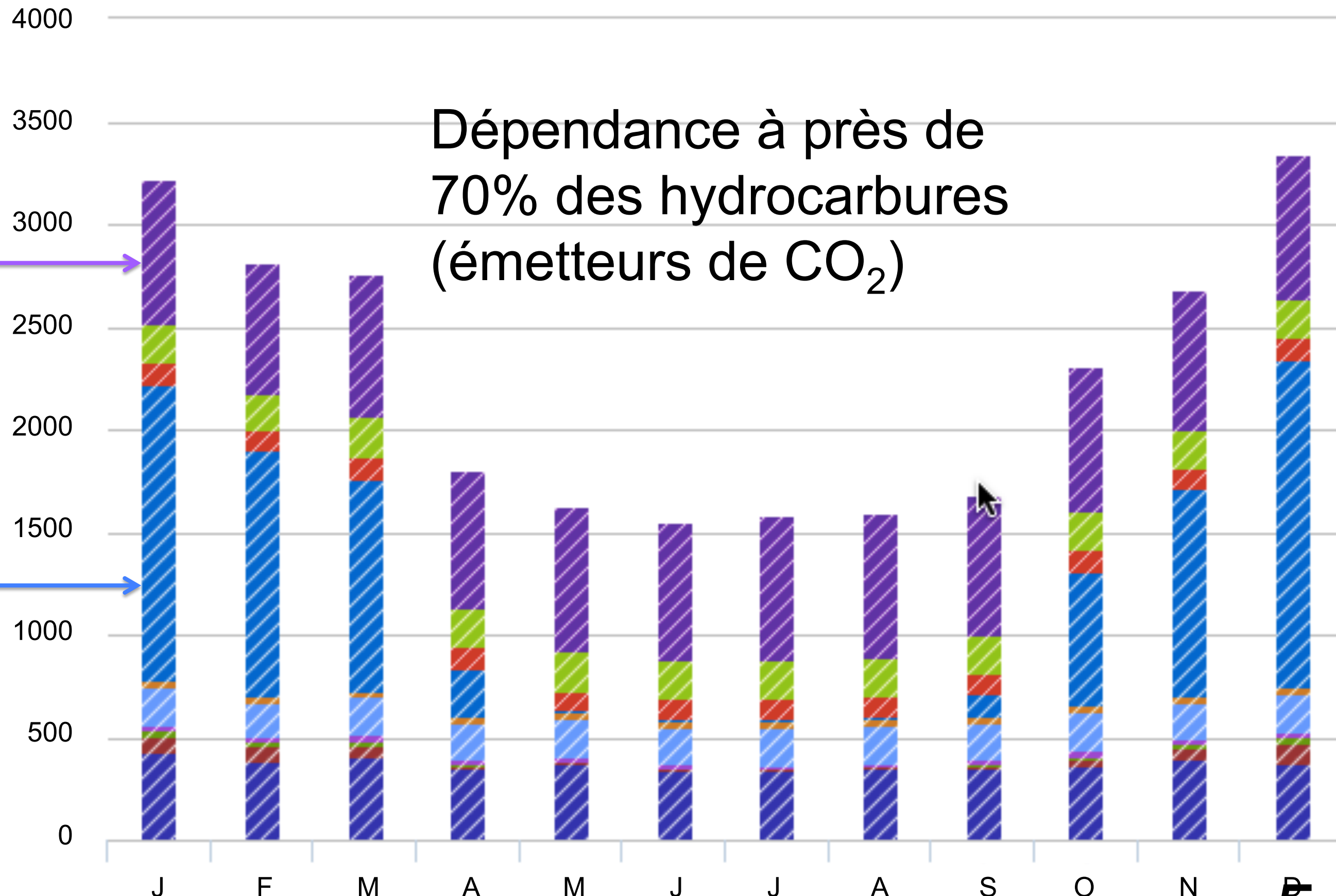
Combustibles pour le chauffage



Fort caractère saisonnier de la demande d'énergie finale en Suisse (cas 2011)

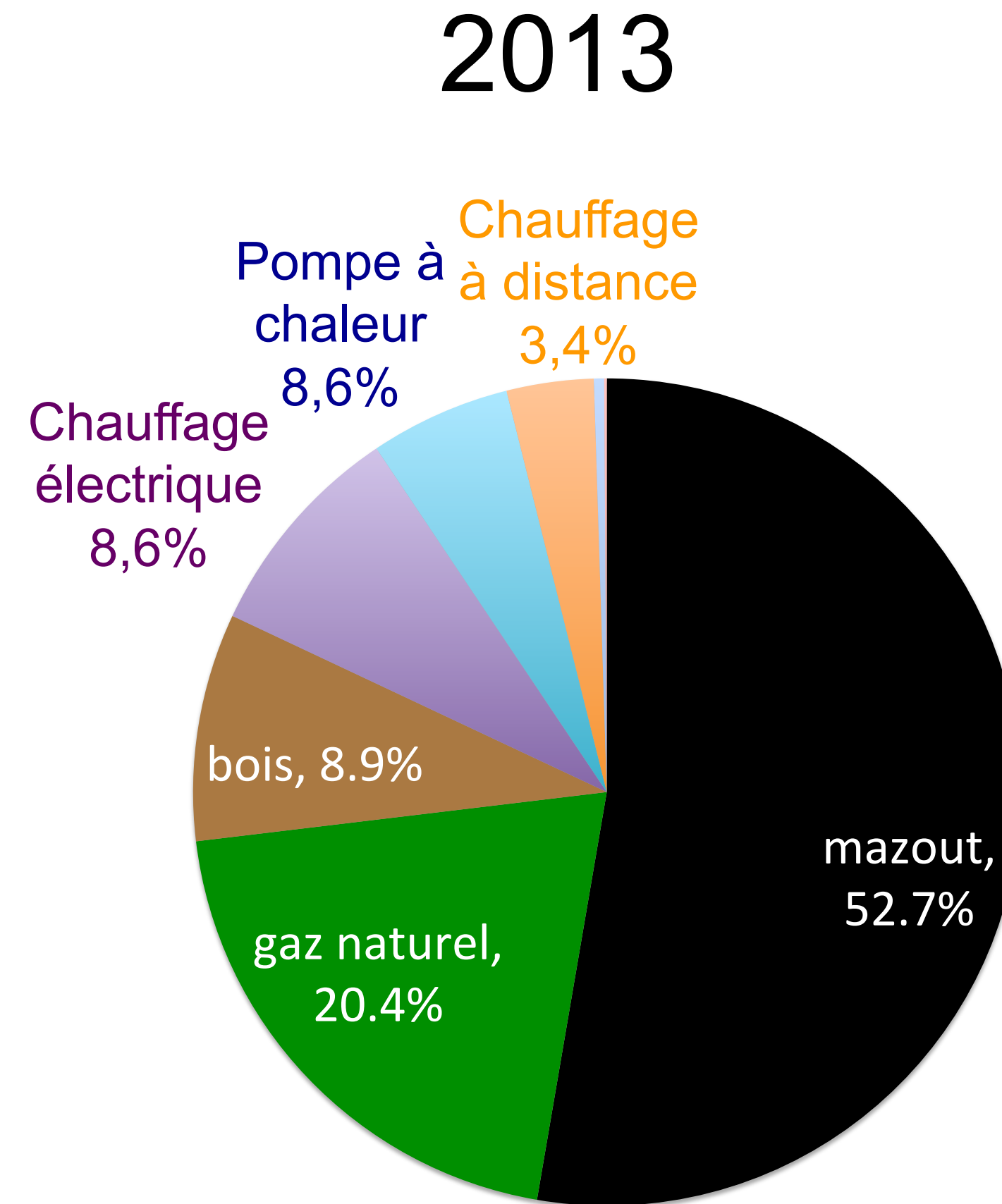
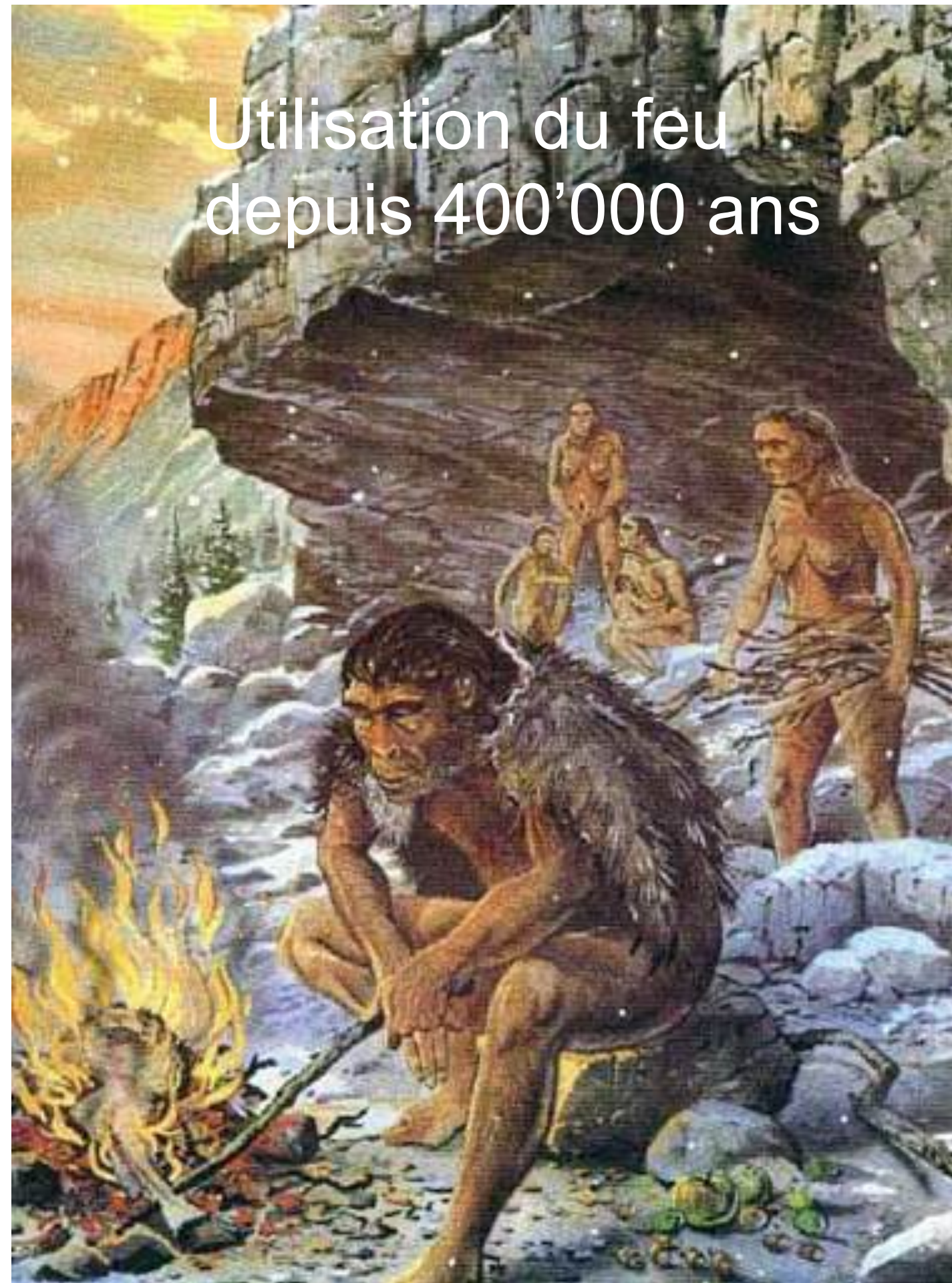
www.energyscope.ch (cours 2)

kWh/habitant

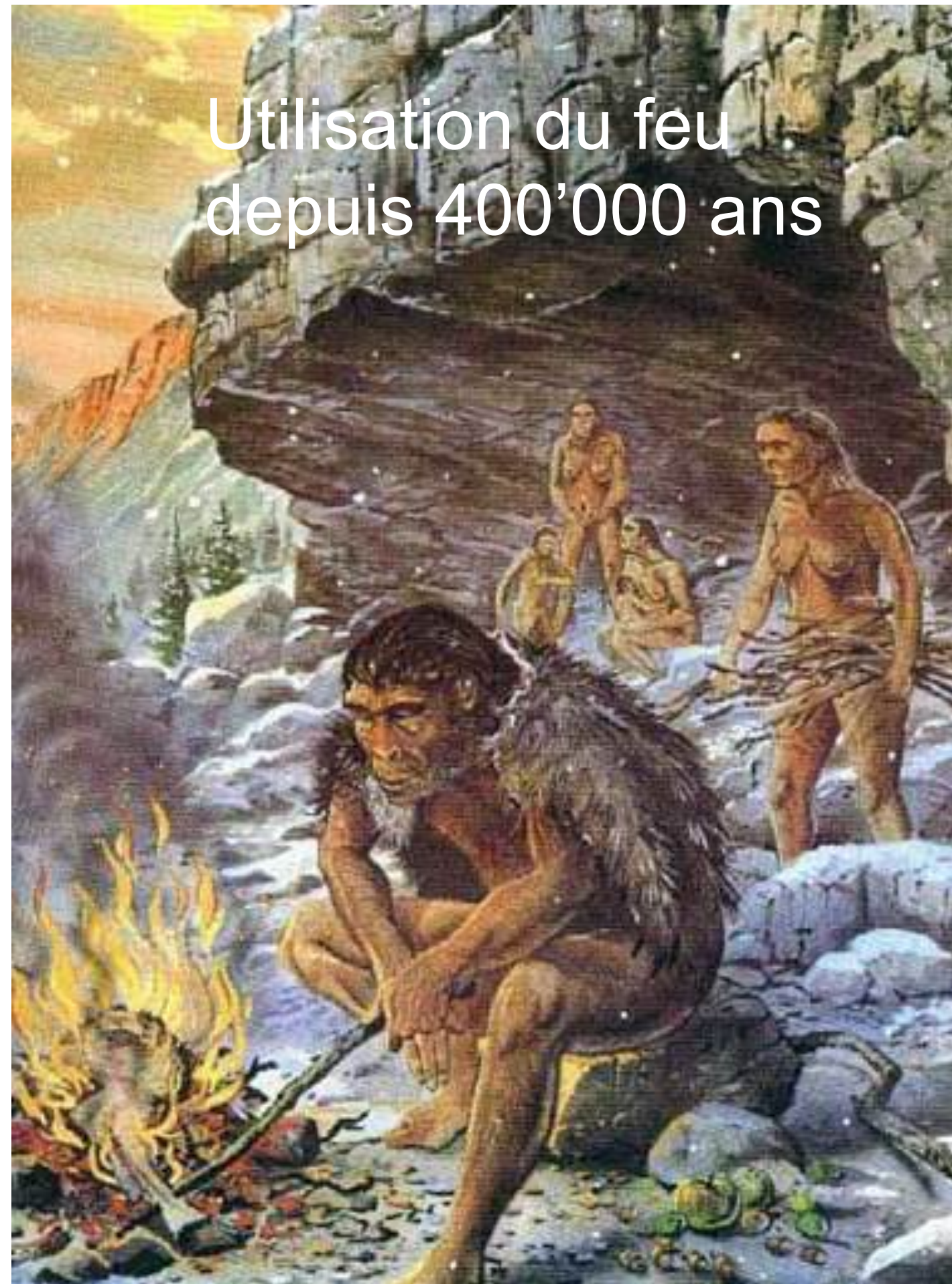


- Transport
- Industrie (th.)
- Eau chaude (th.)
- Chauffage (th.)
- Transport (él.)
- Industrie (él.)
- Eau chaude (él.)
- Pompe à chaleur (él.)
- Chauffage (él.)
- Autre (él.)

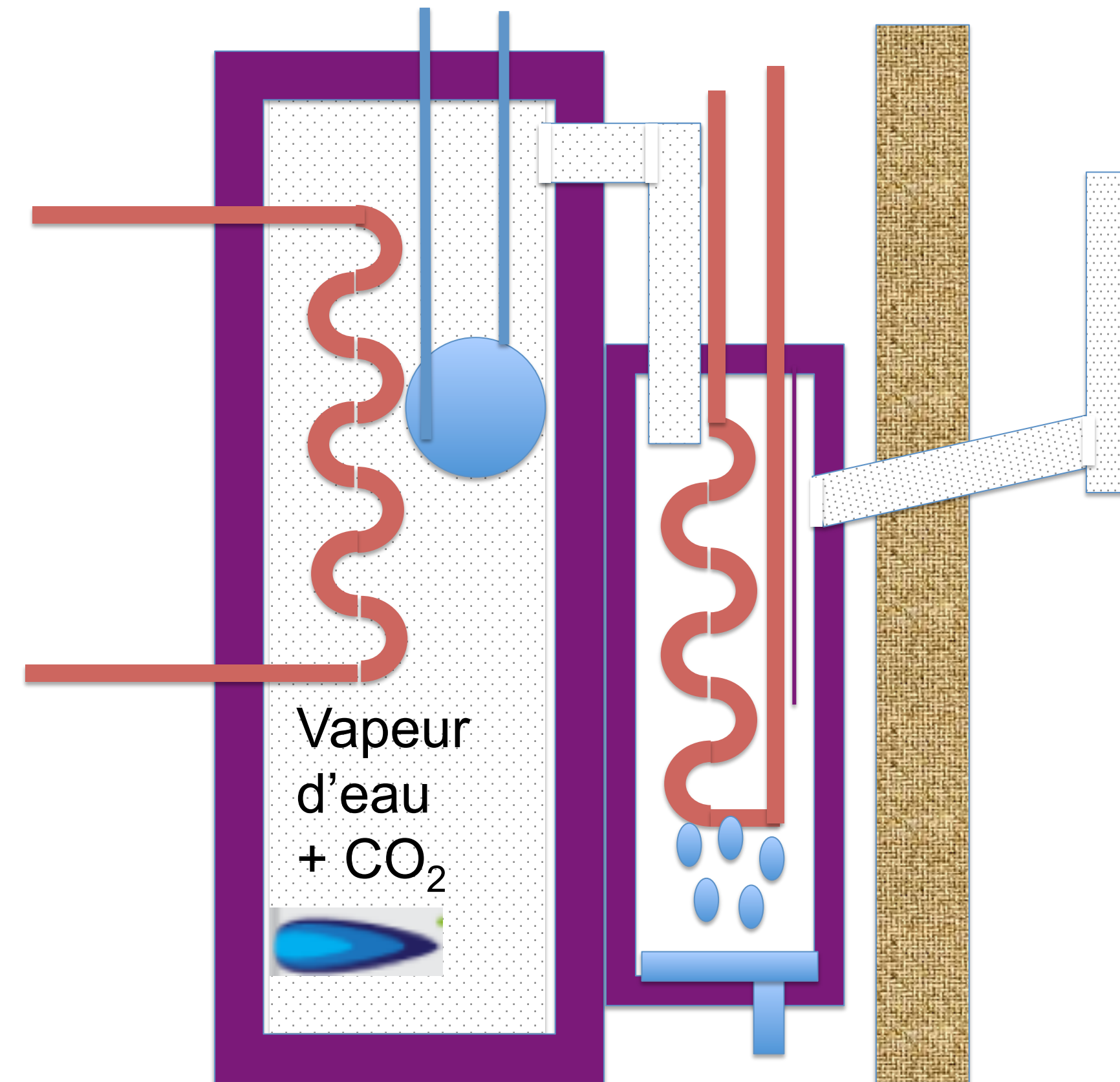
Chauffer en brûlant un combustible



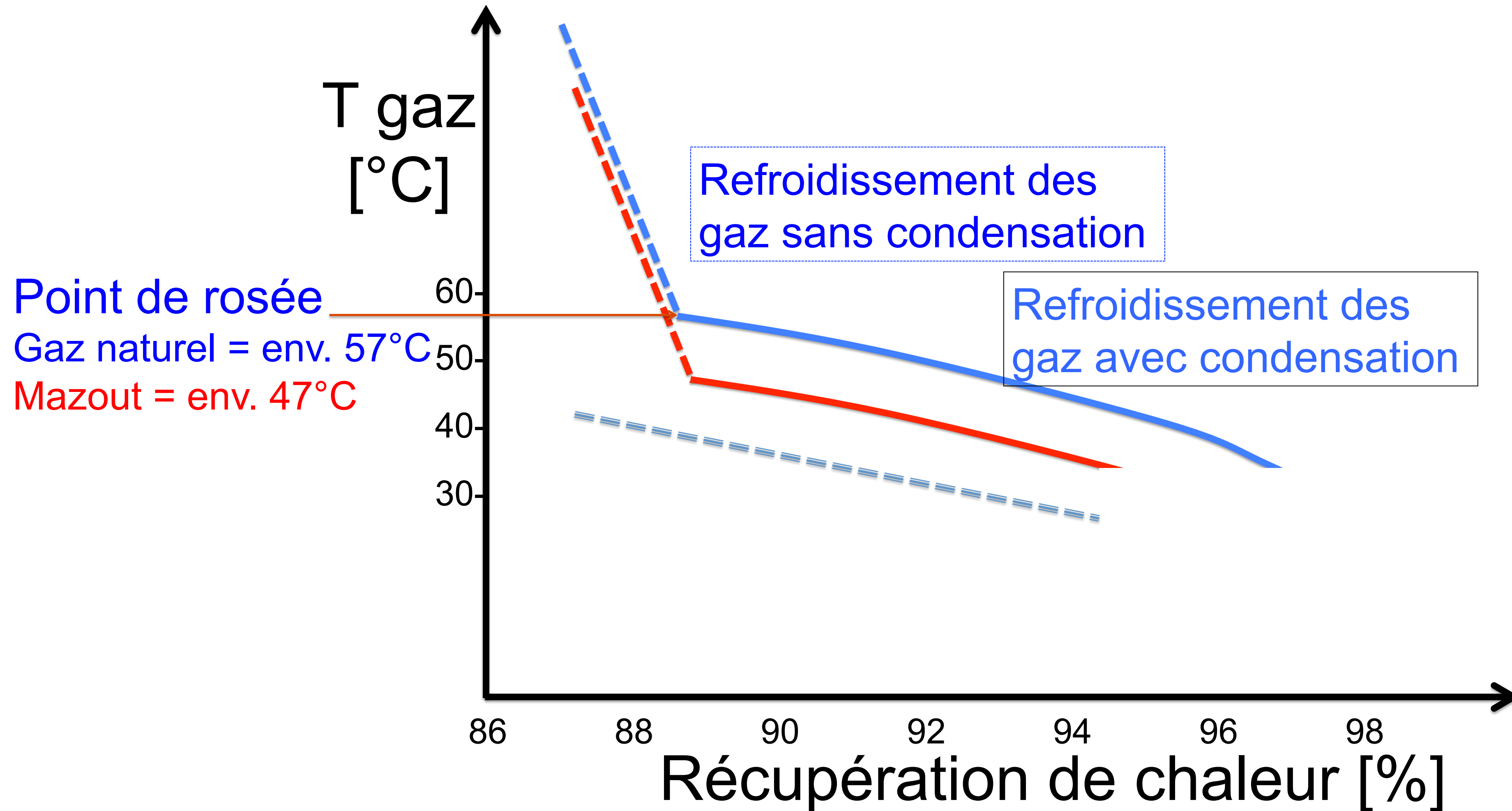
Un léger progrès: les chaudières à condensation



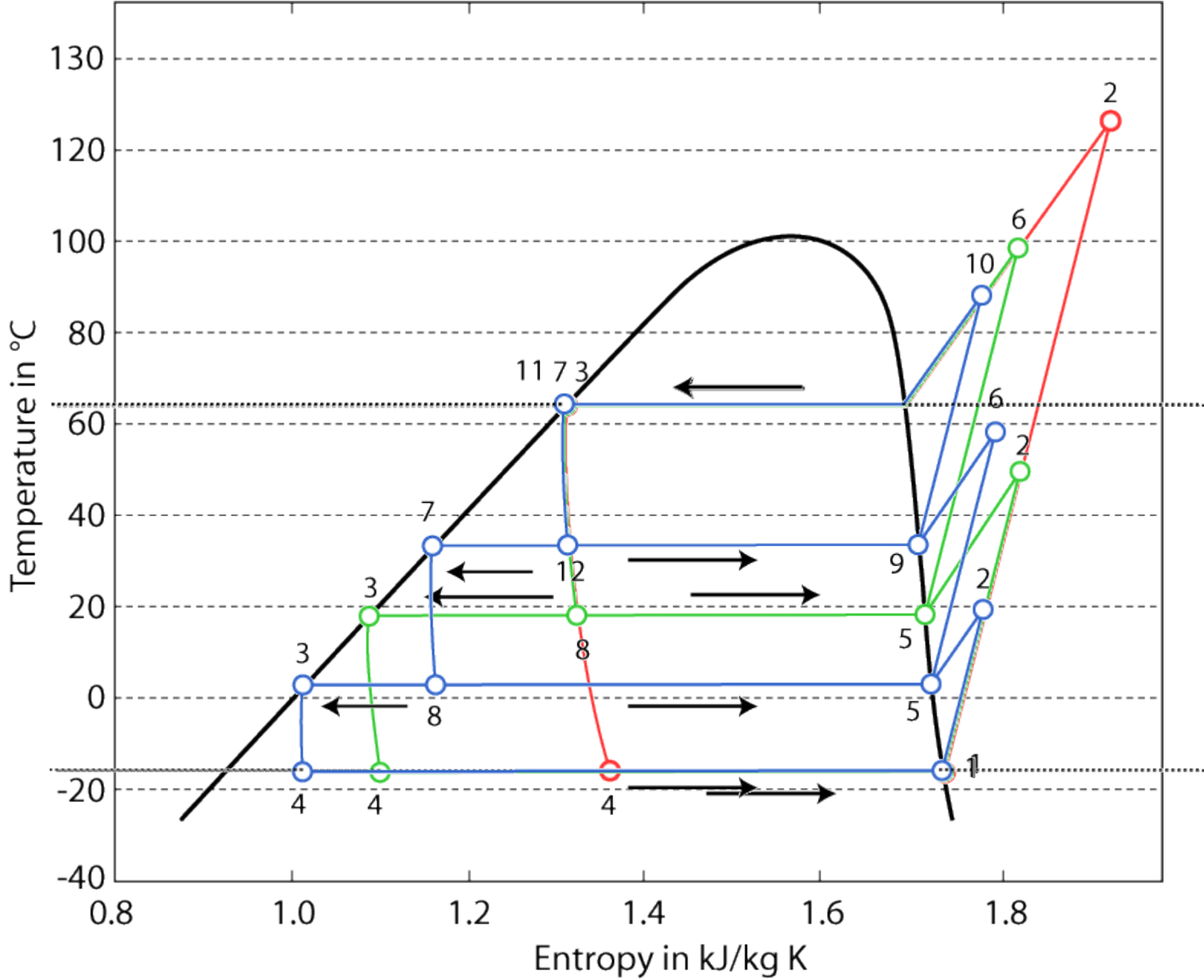
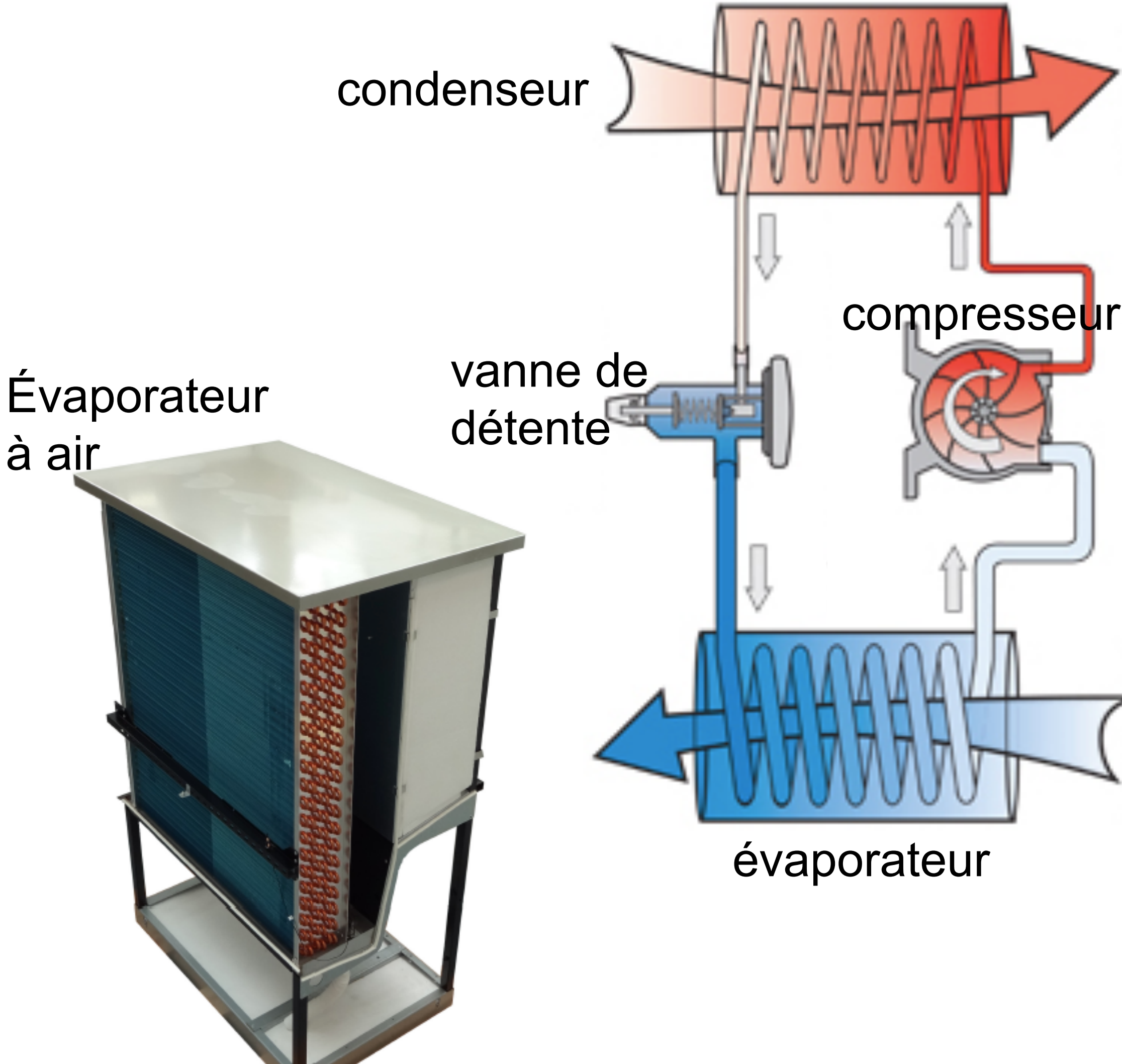
Chaudière à condensation



Chaudière à condensation: entre gaz et mazout

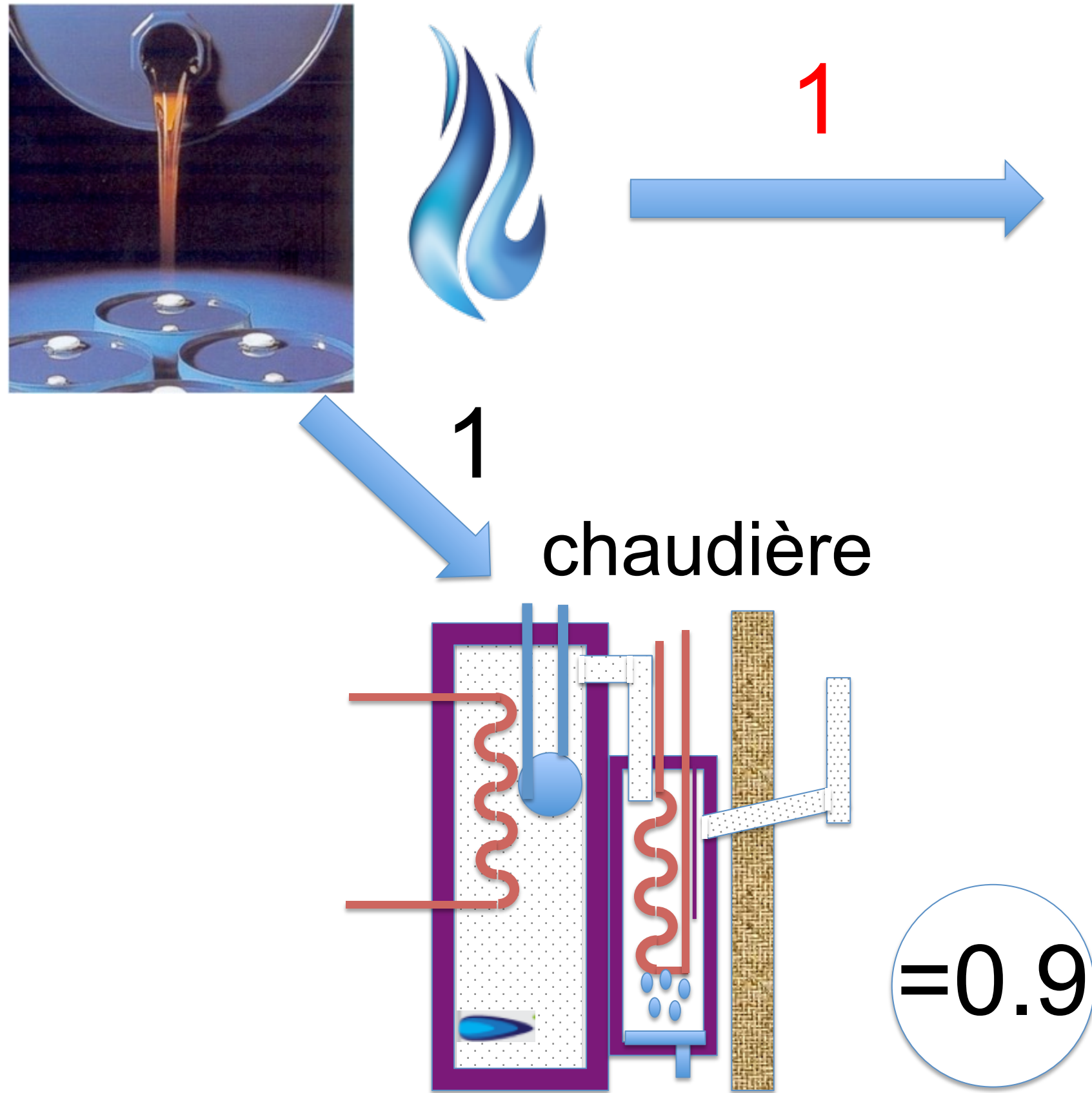


Principe de la pompe à chaleur

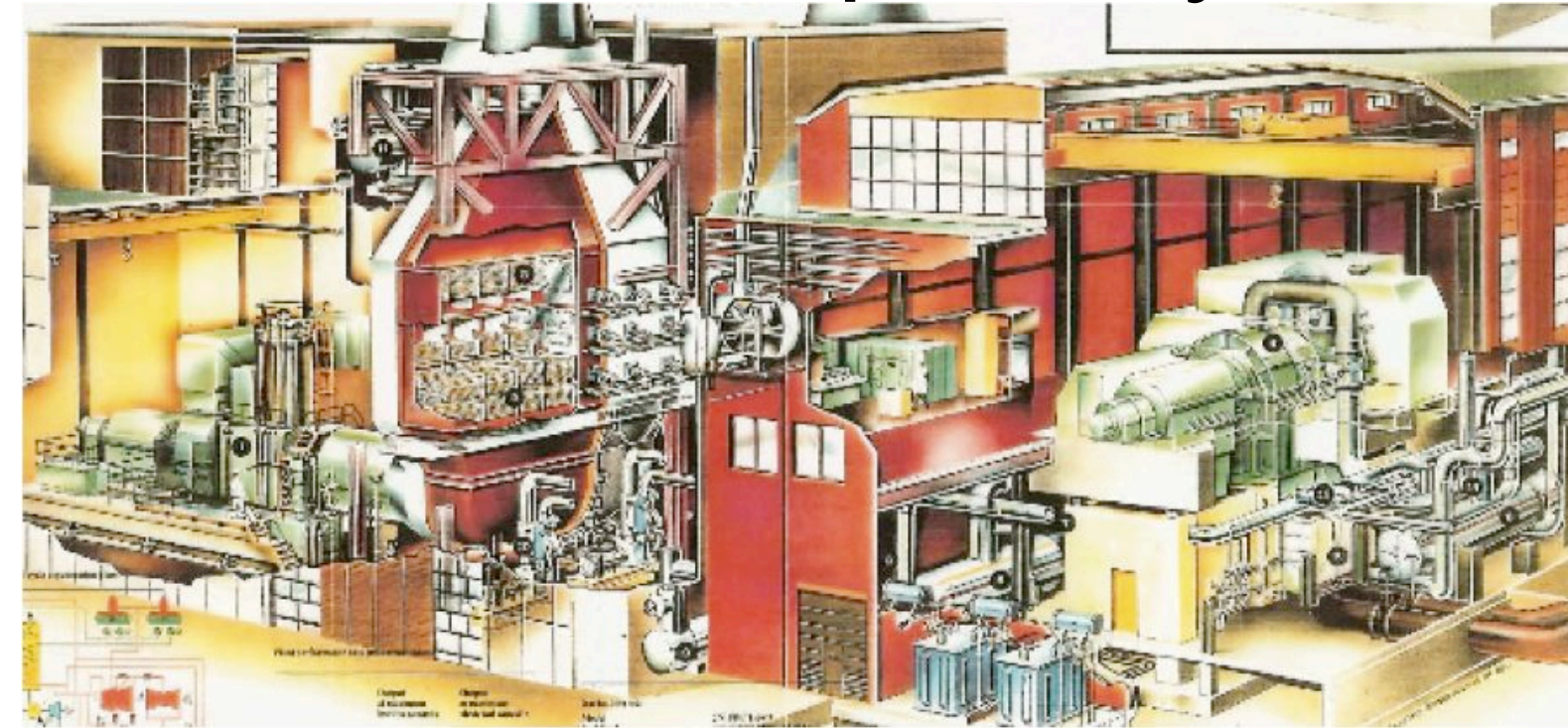


Centrale électrique et pompe à chaleur

Mazout ou gaz naturel

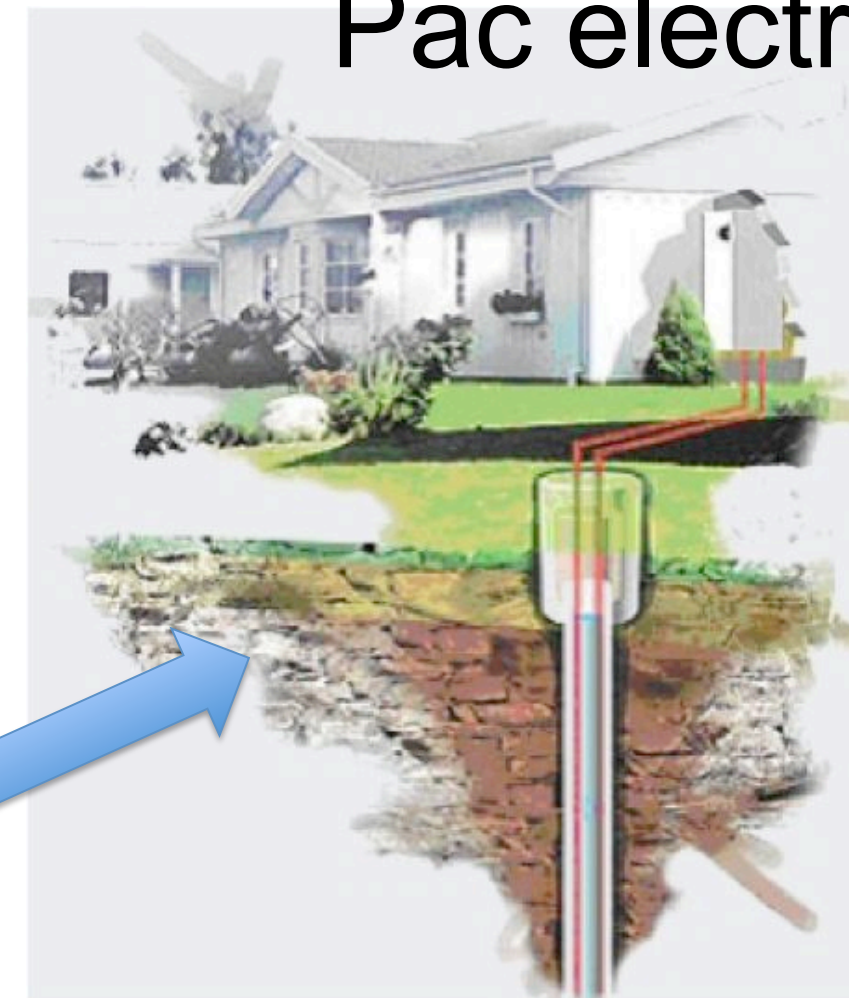


Centrale électrique à cycle combiné



0.6

Pac électrique



= 0.6 + 1.4

= 2

Pile à combustible et pompe à chaleur

Gaz naturel ou synthétique

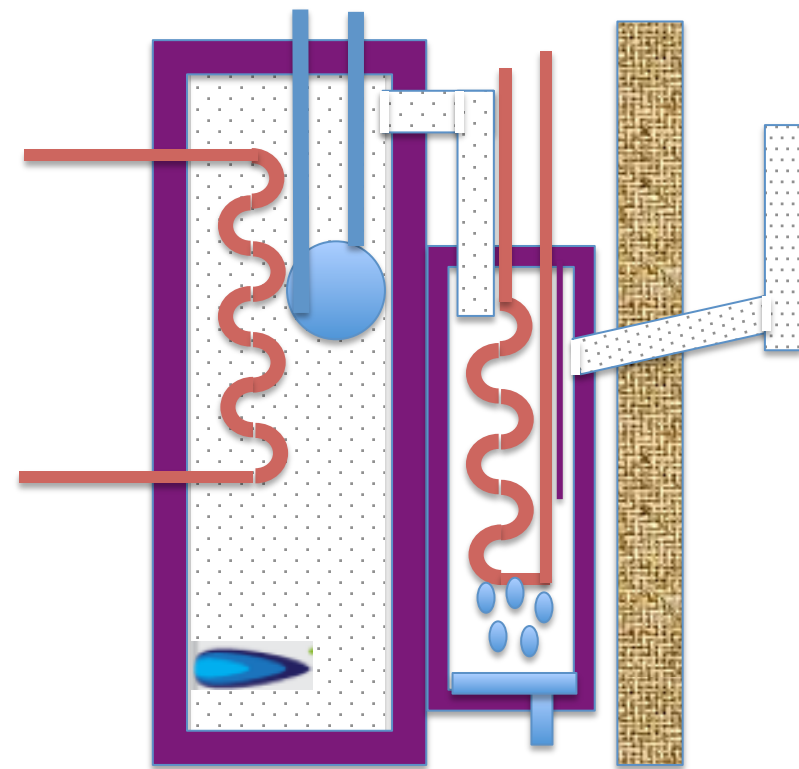


1

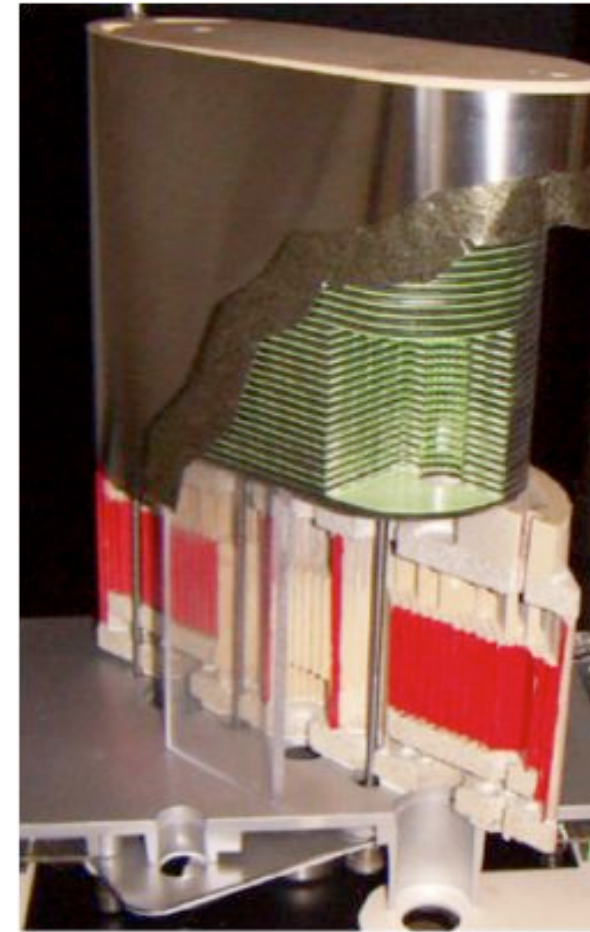


1

chaudière

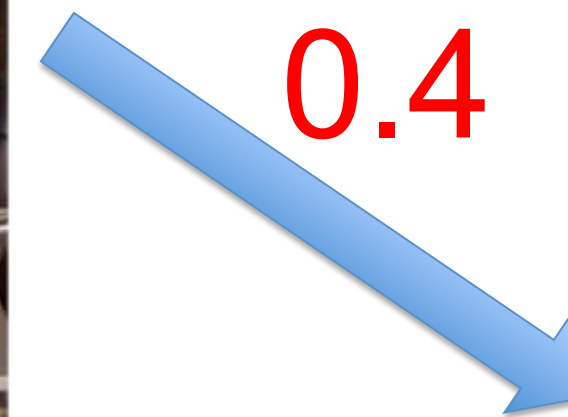


=0.9

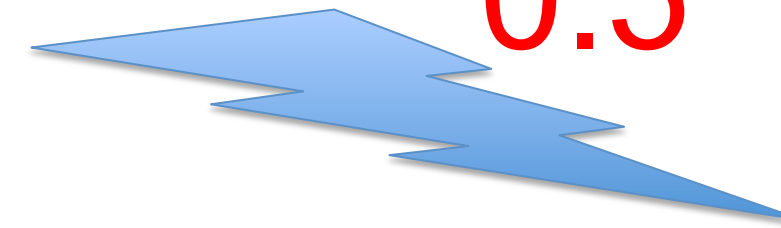


Cogénération à
pile à combustible

0.4



0.5

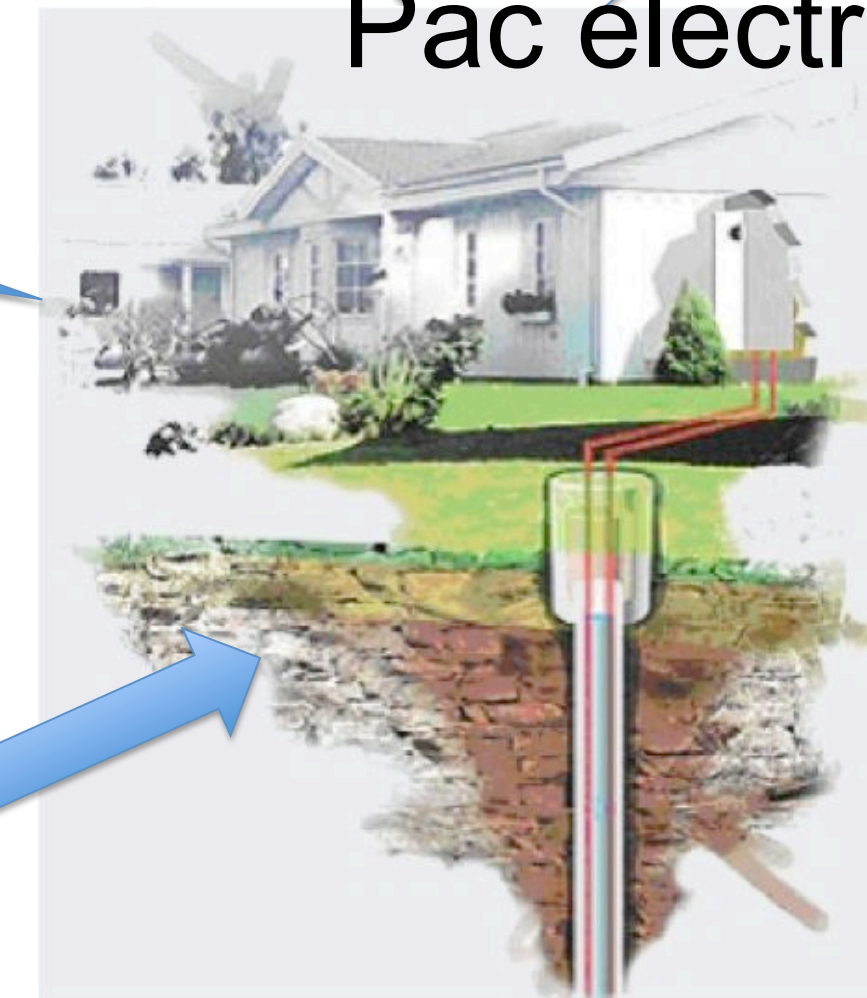


1.1



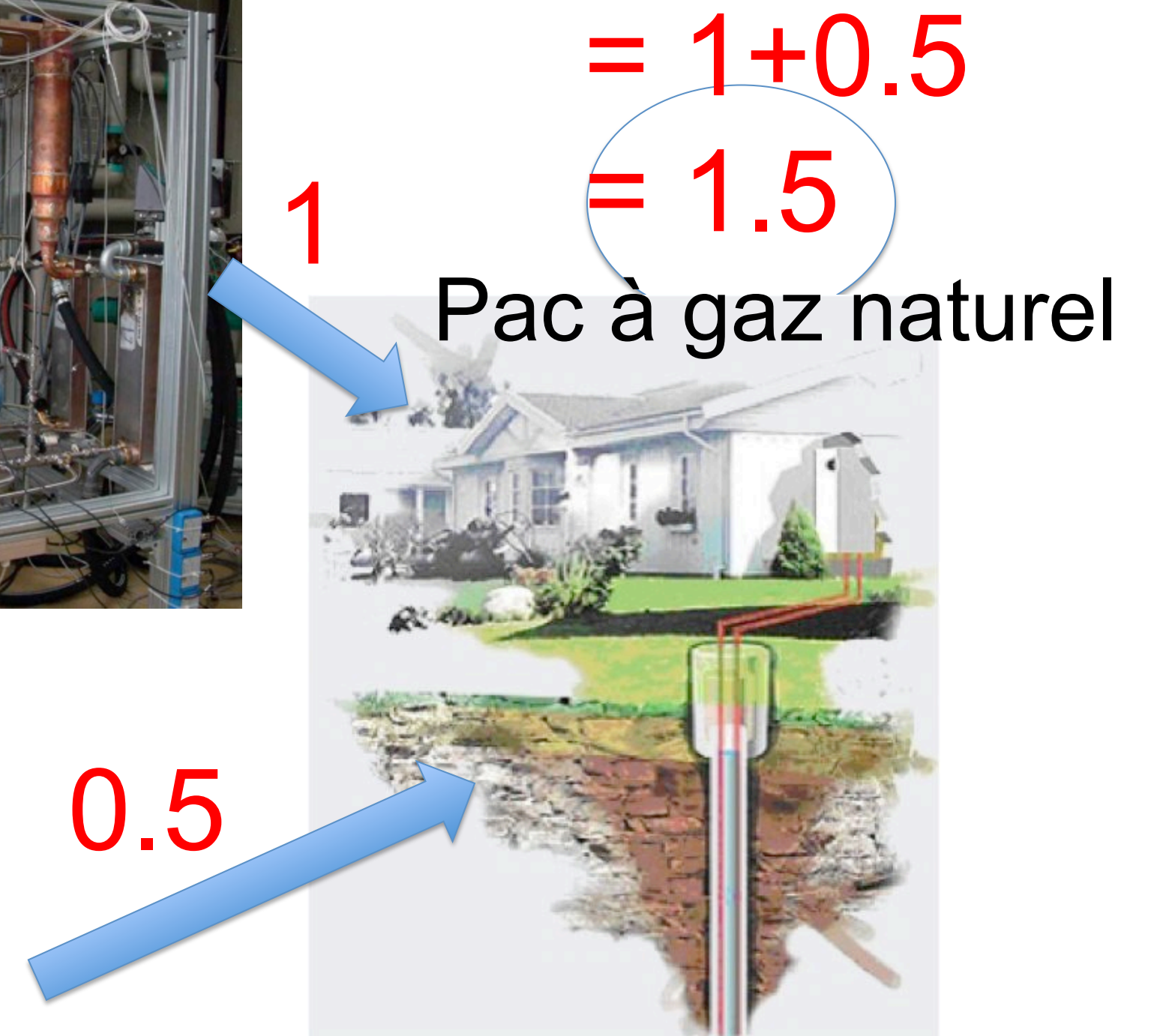
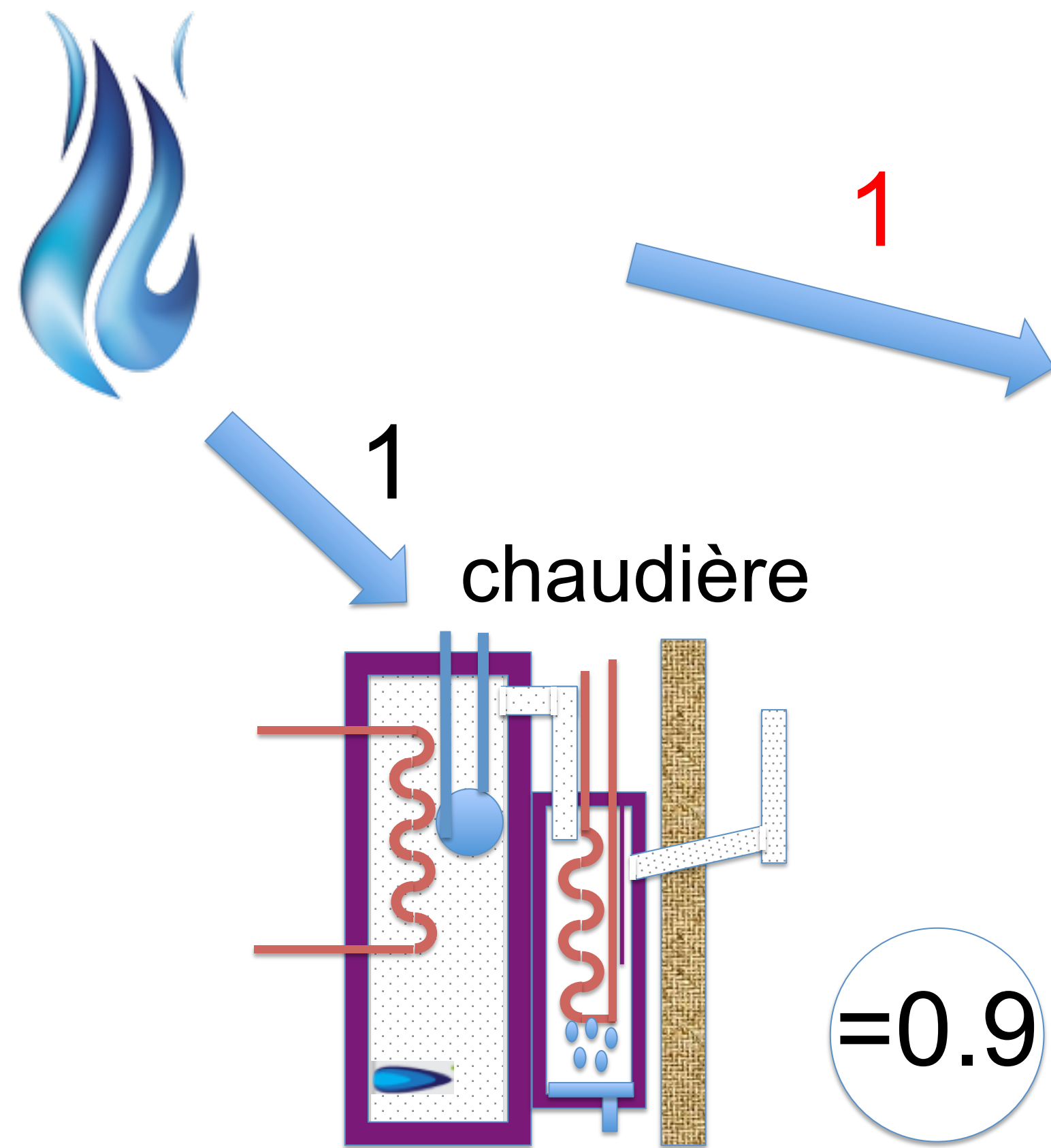
= 0.4 + 0.5 + 1.1
= 2

Pac électrique

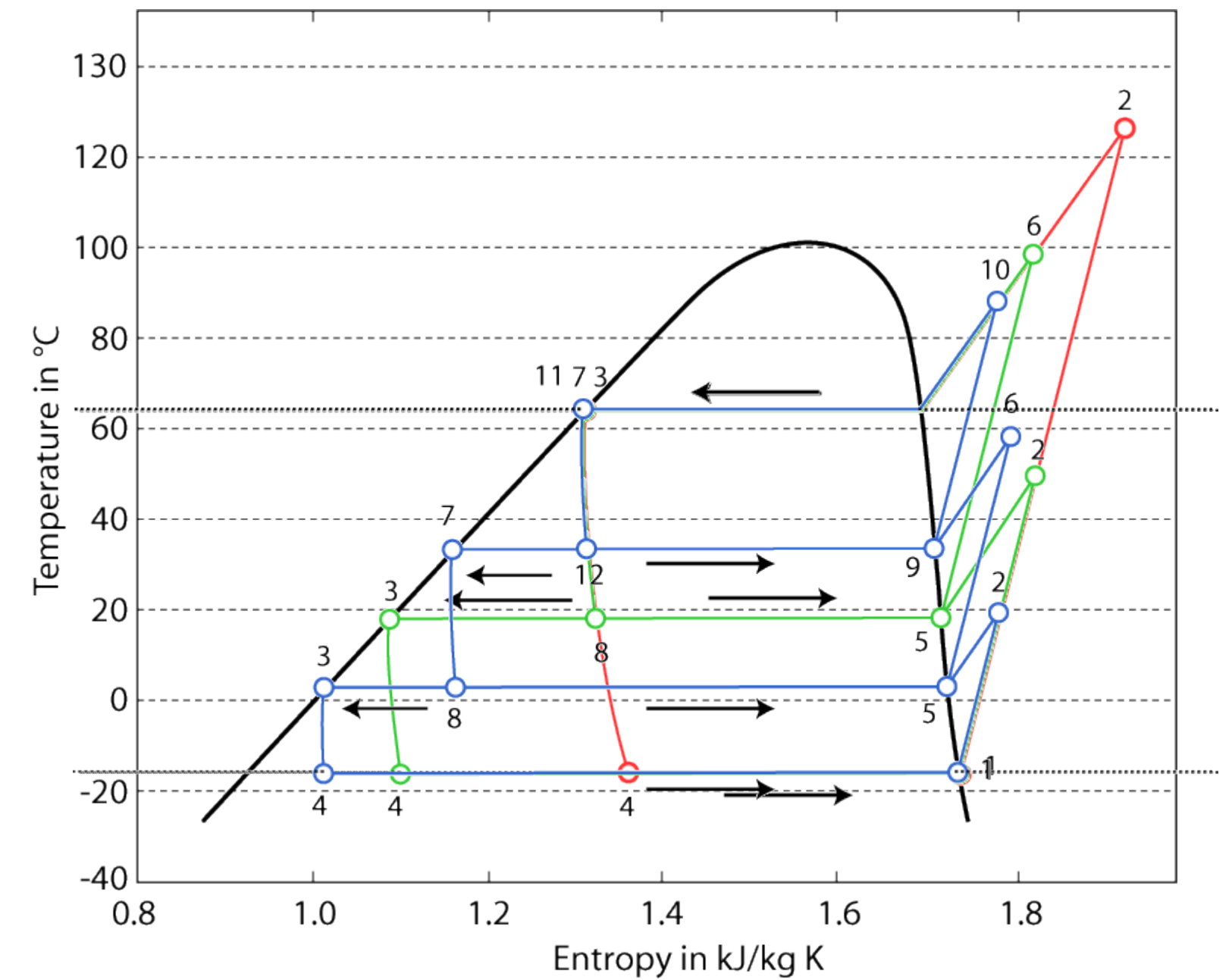
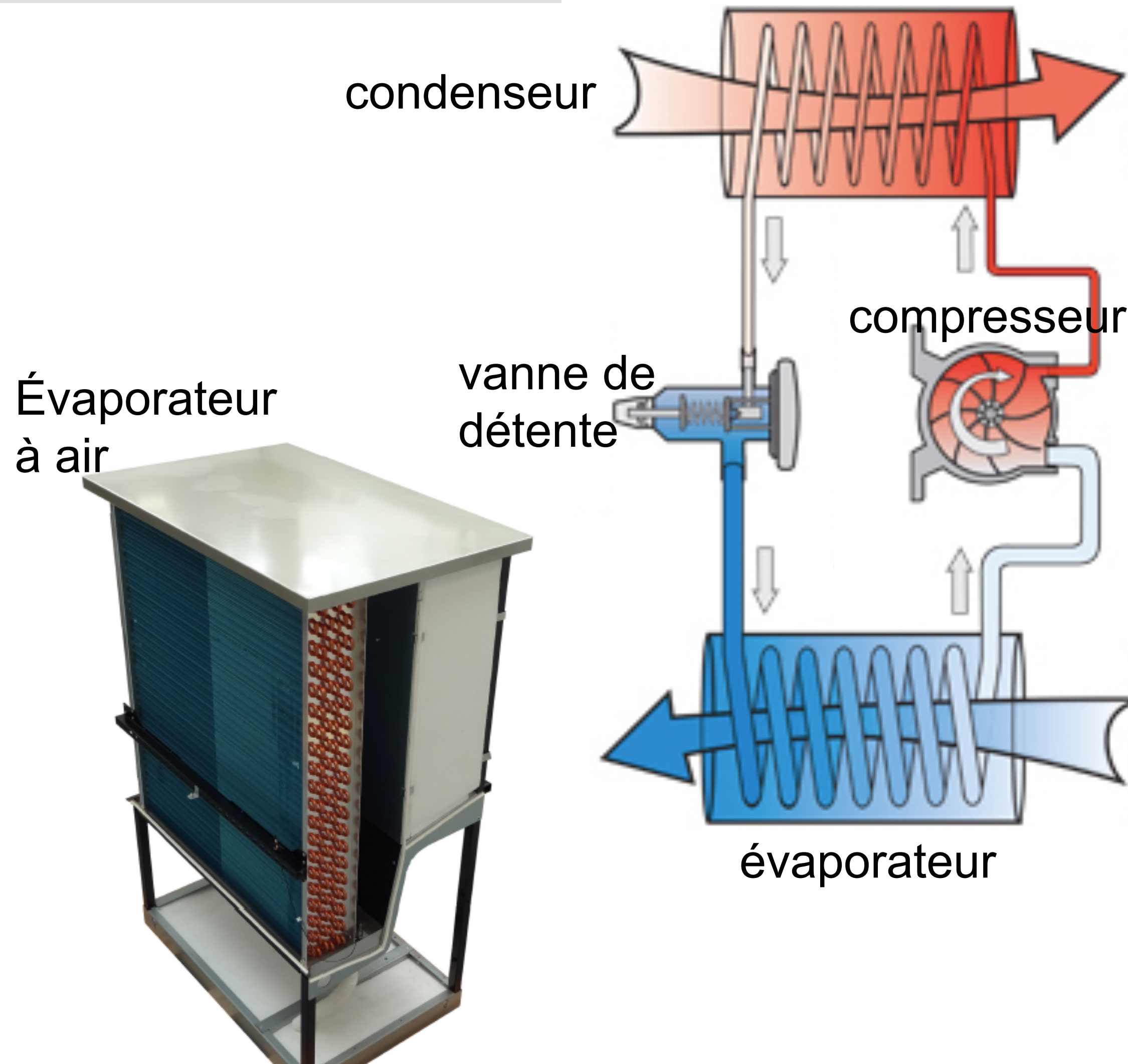


pompe à chaleur à gaz

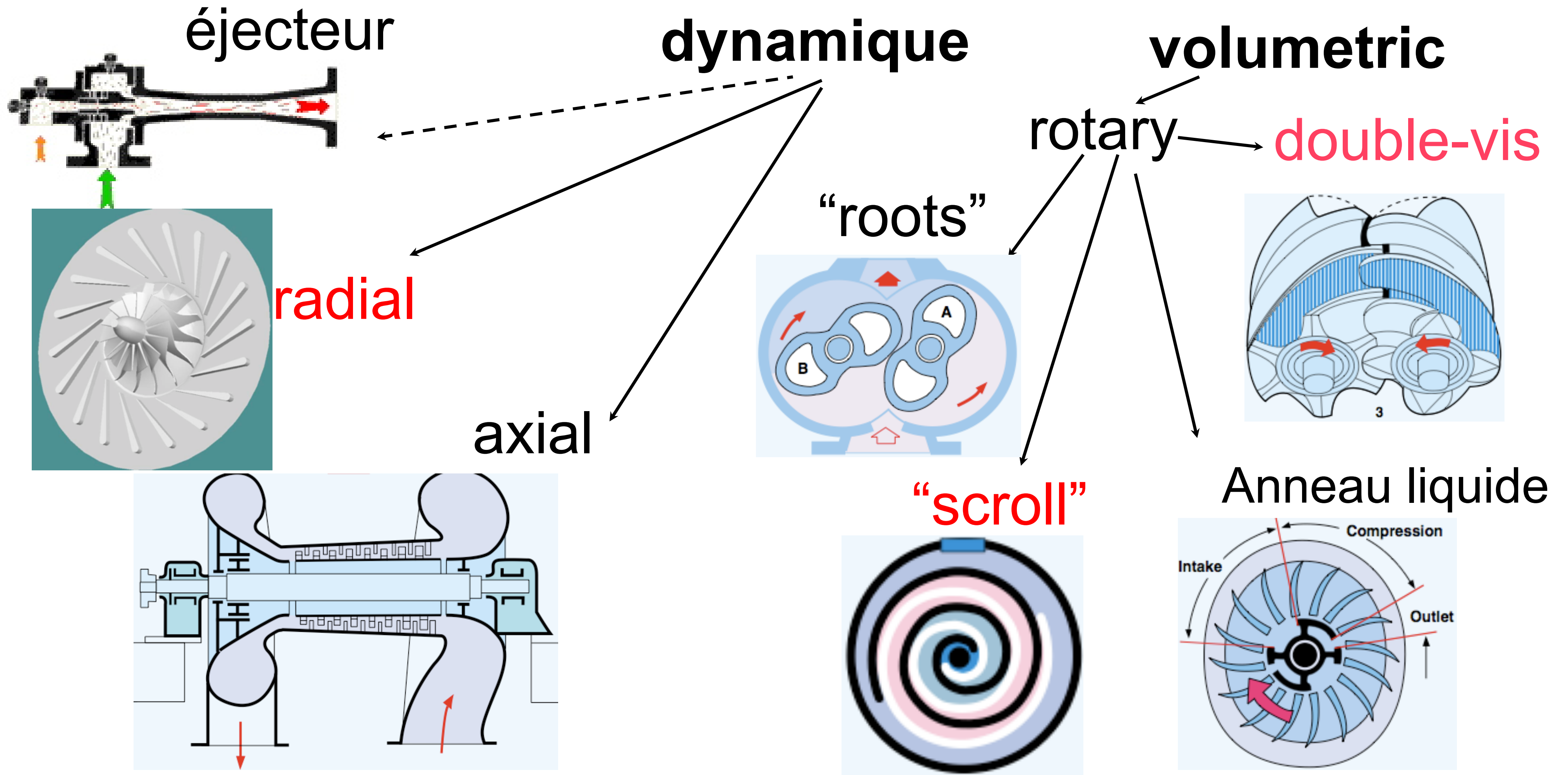
Gaz naturel ou synthétique



Principe de la pompe à chaleur



Principaux types de compresseurs



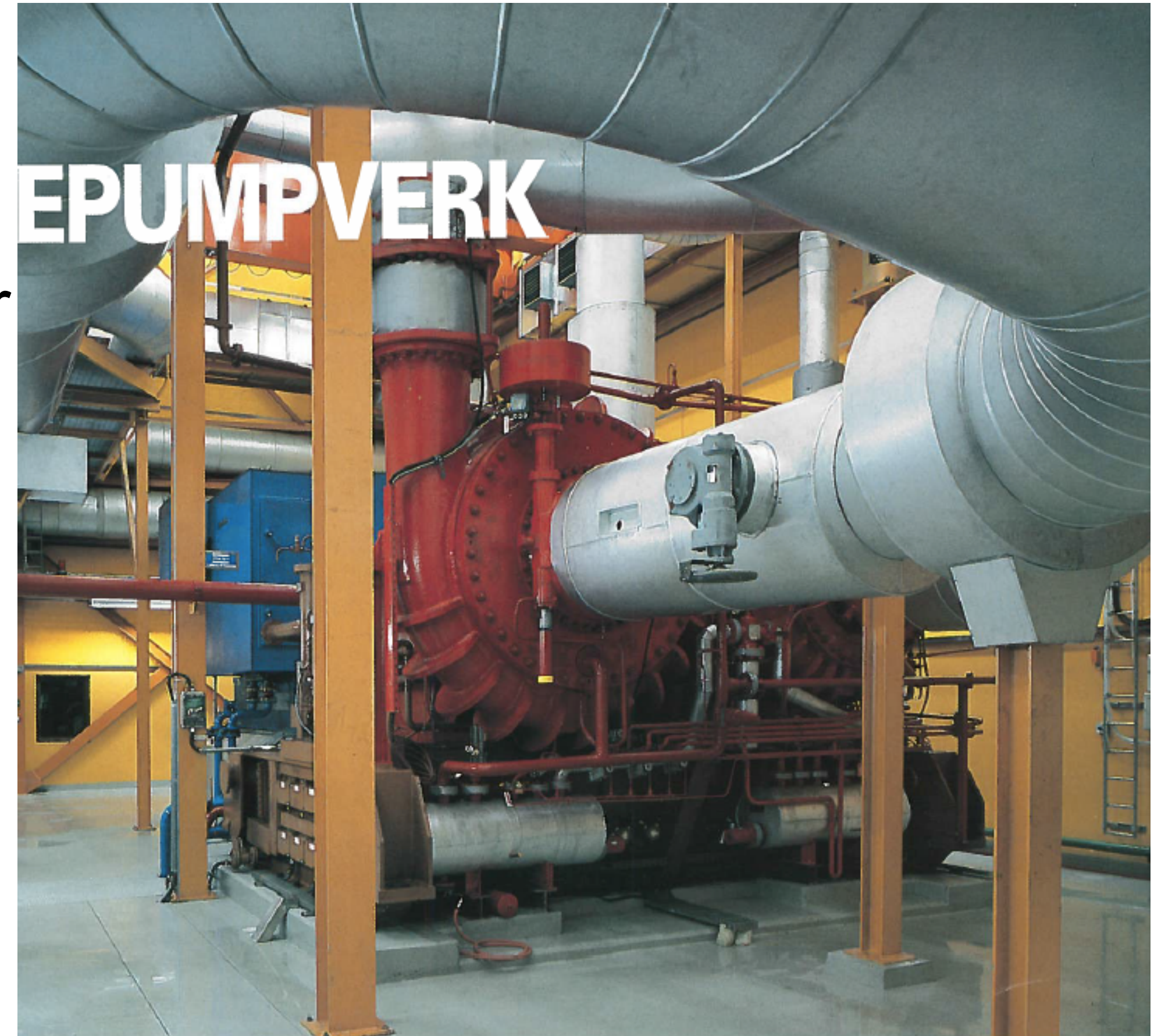
Grosses PAC de réseau: exemple Suède (réseau 60-90°C)

Un des projets: Assistance scientifique à la construction des 2 plus grosses pompes à chaleur du monde:

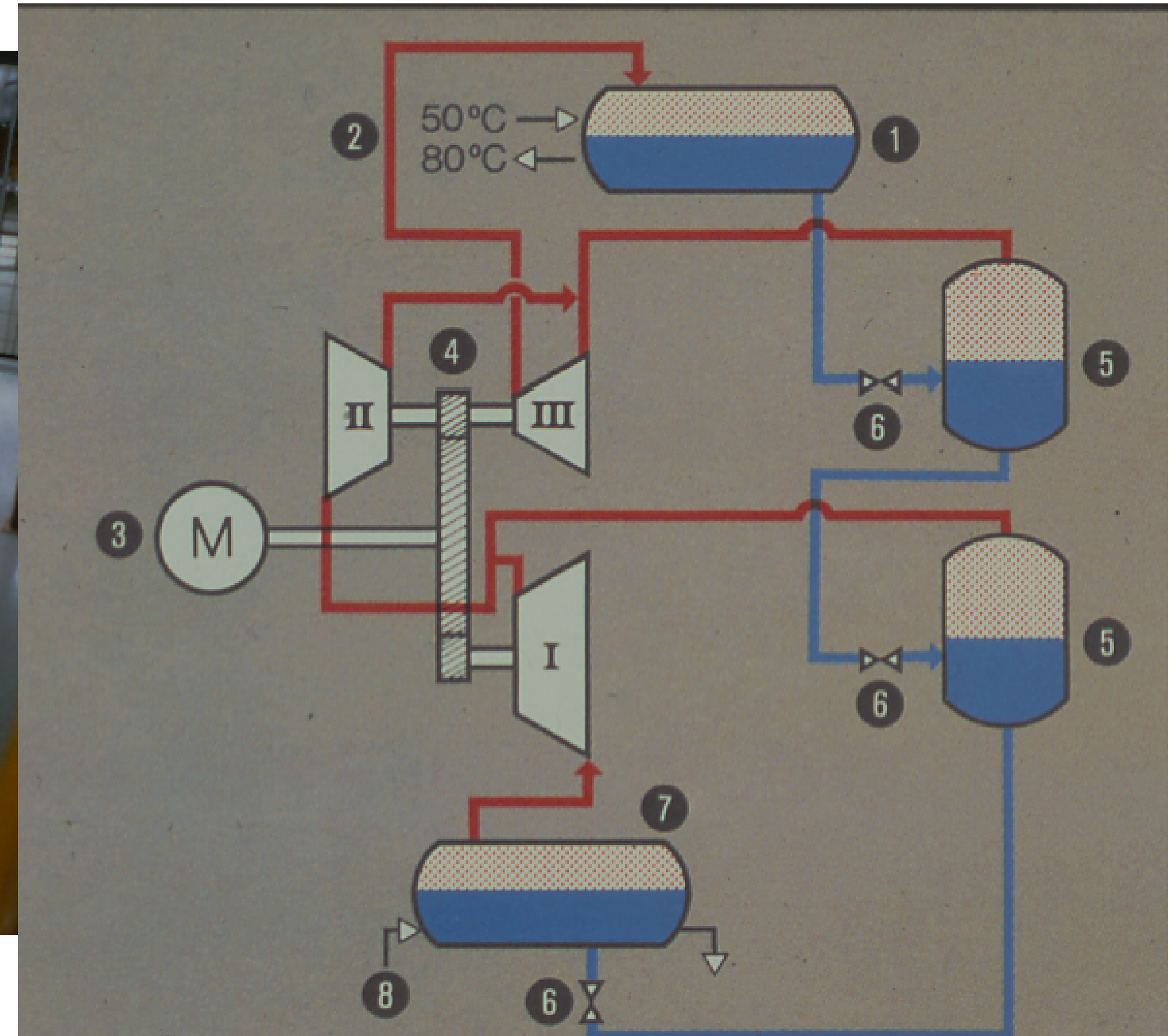
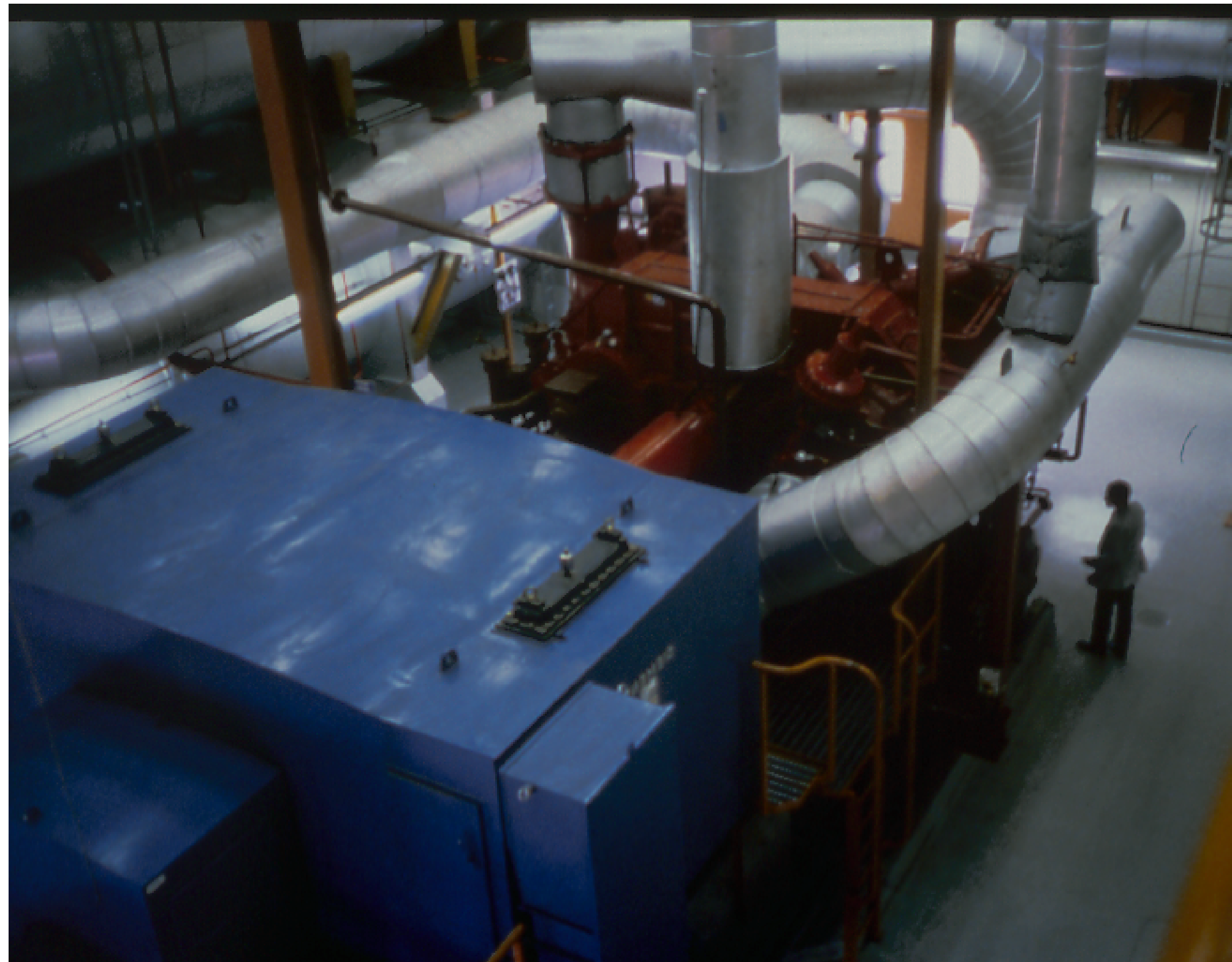
Goteborg 2x45 MWth

3 étages de compresseurs radiaux

Objectif: chauffer en revalorisant l'énergie des eaux d'égoût épurées ou de l'eau de mer



Cycle de la plus grosse au monde

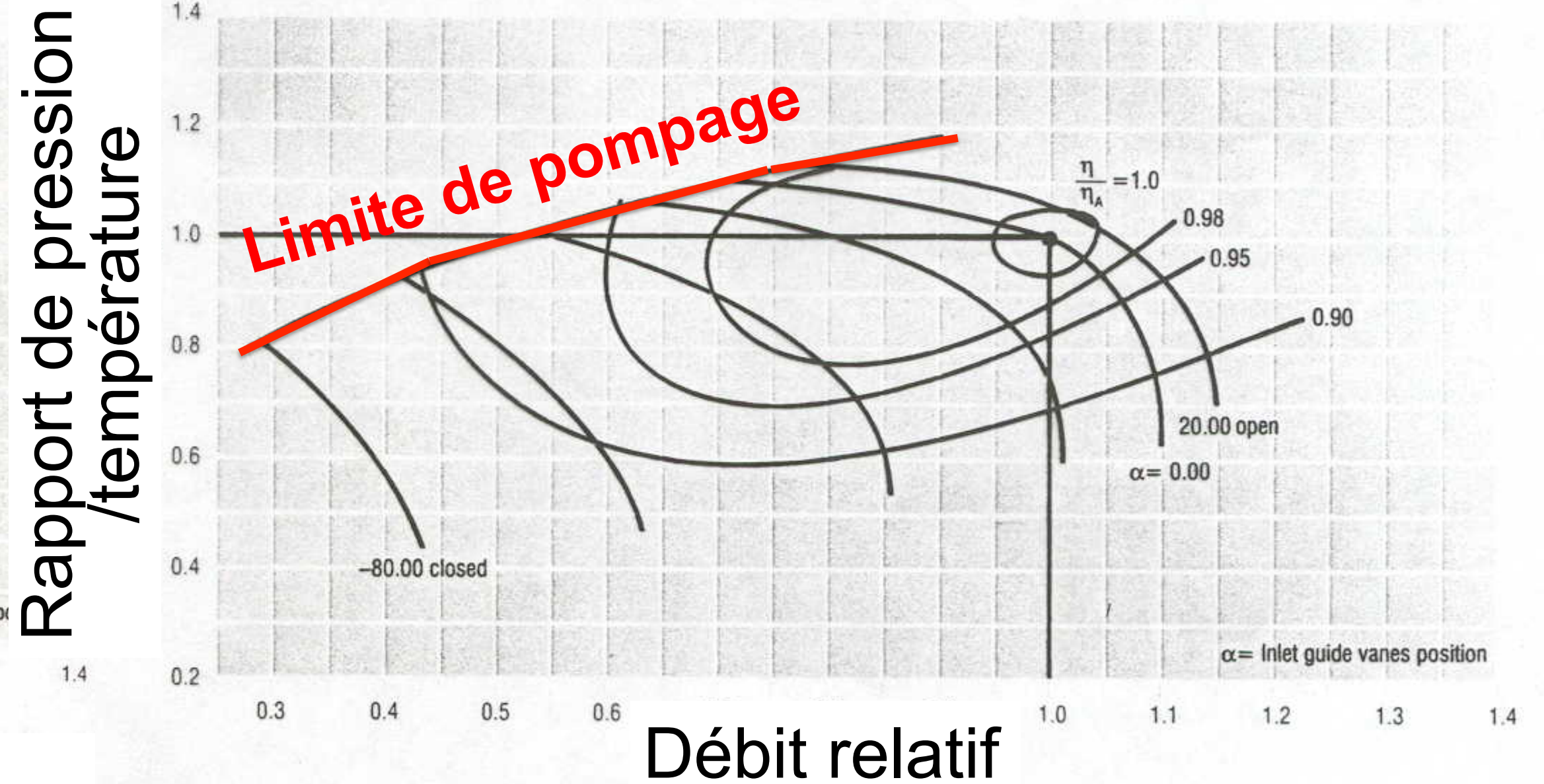
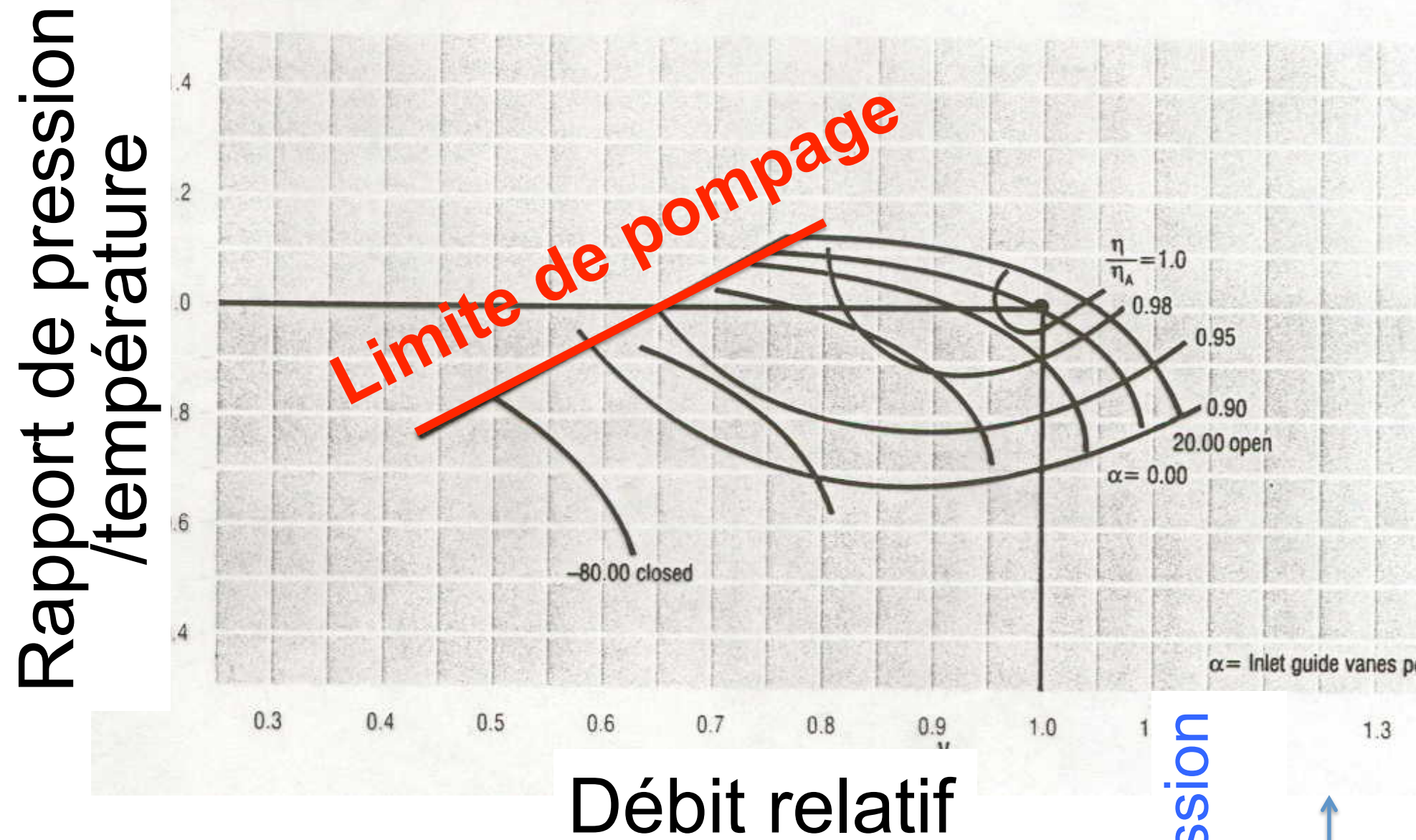


Importance des caractéristiques de compresseurs

Compresseur dynamique

Réglage par aubes directrices
à l'entrée du premier étage

Réglage par aubes directrices
à l'entrée de tous les étages



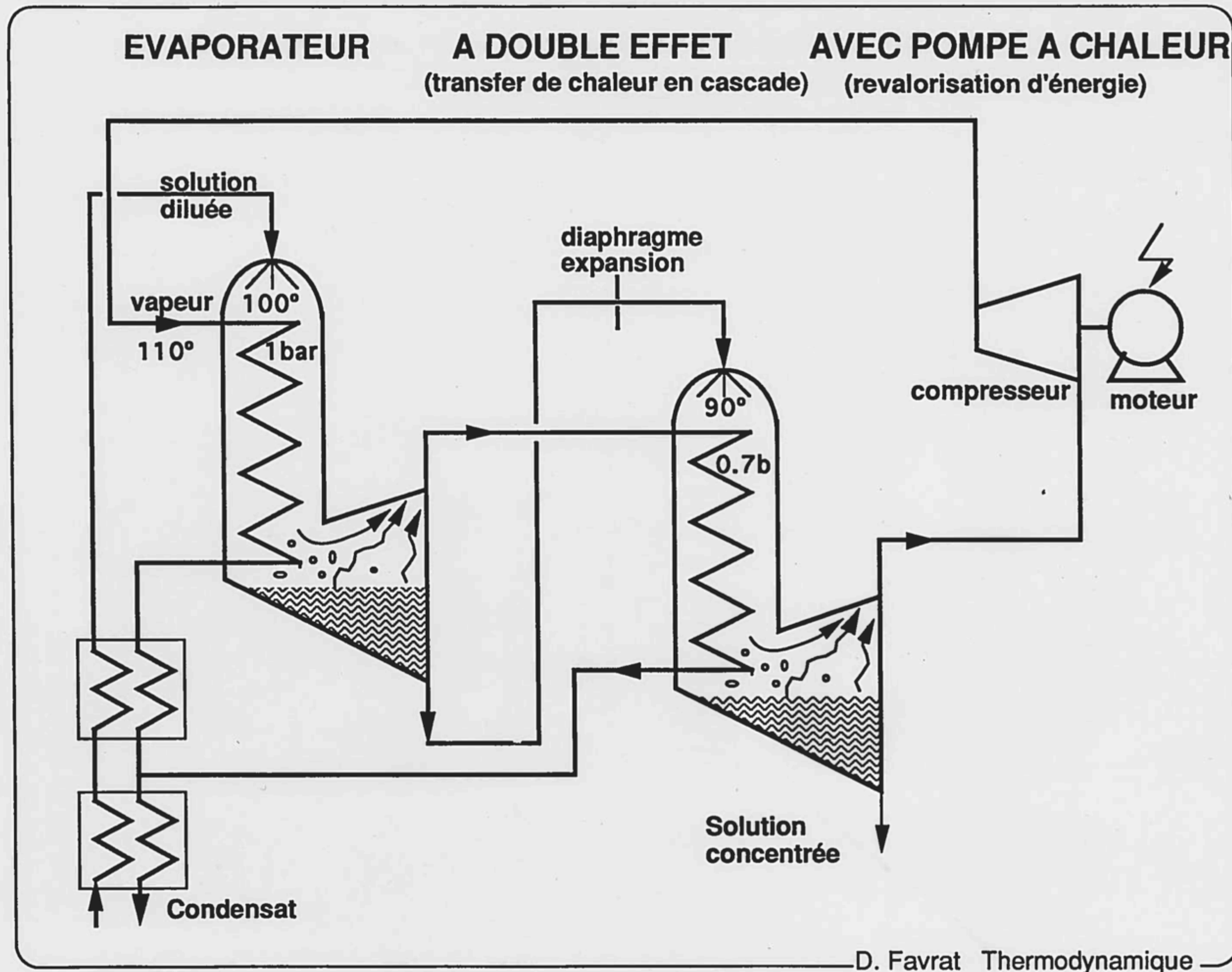
Pas de limite de pompage

Réglage de compresseur
volumétrique à double-vis ou scroll

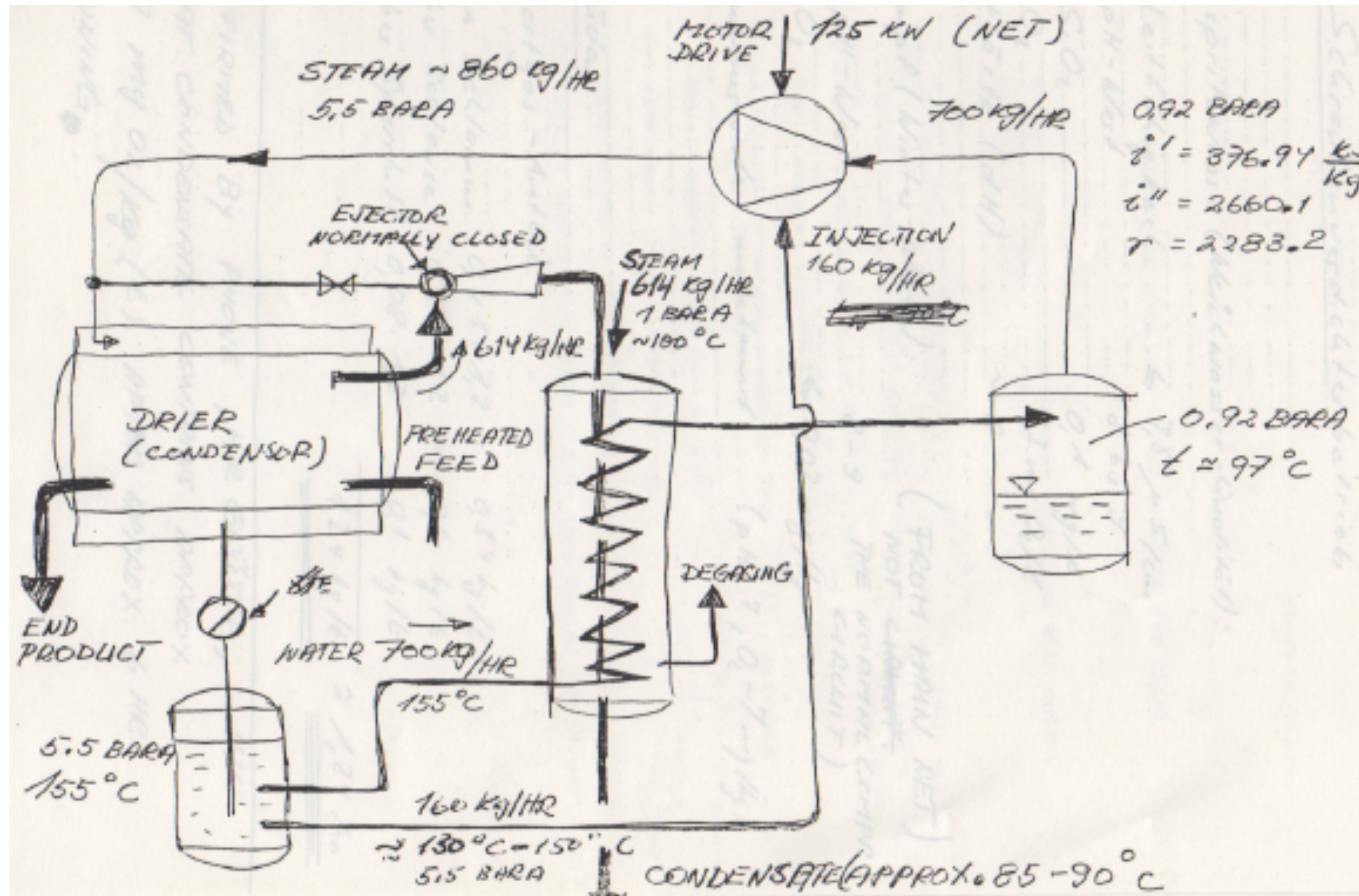
Rapport de pression
/température

Débit relatif

PAC à cycle ouvert: Recompression mécanique de vapeur



PAC ouverte pour le séchage de boues d'épuration



Problème initial:

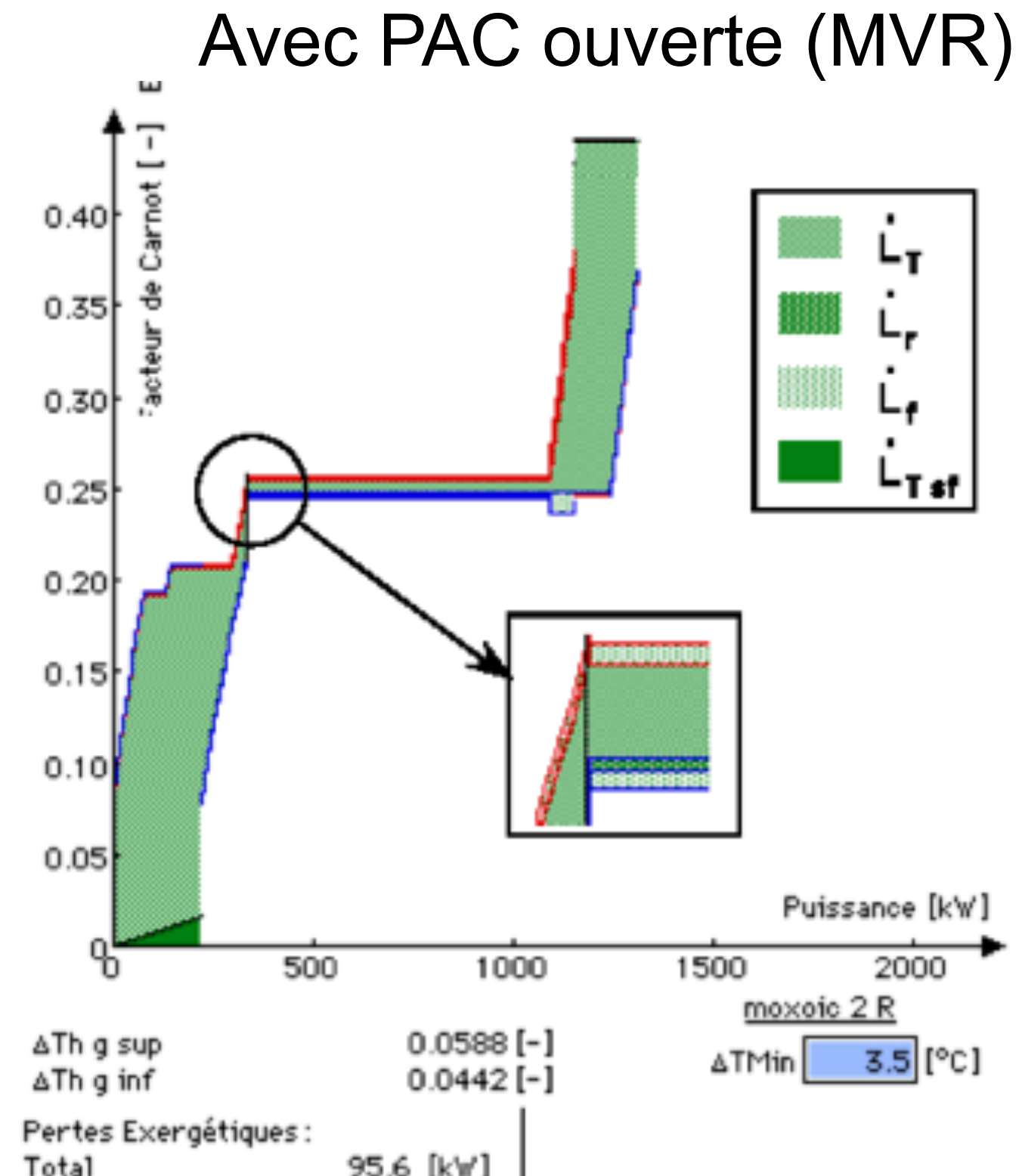
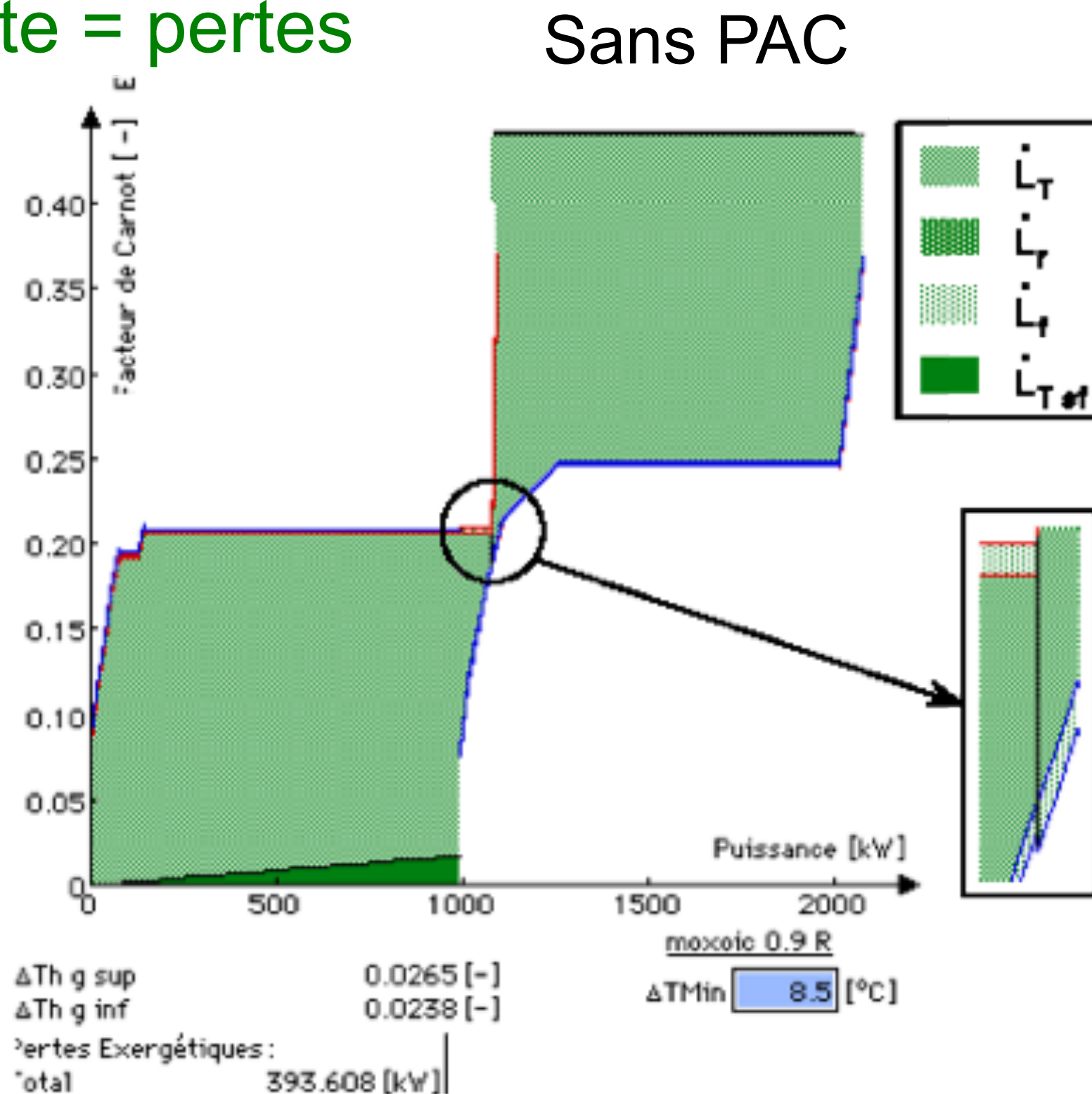
- Trop de pertes thermiques

Solution:

- Vanne en sortie de compresseur
- (possible car compresseur volumétrique)
- Moins efficace mais ça marche (plus difficile avec compresseur dynamique)

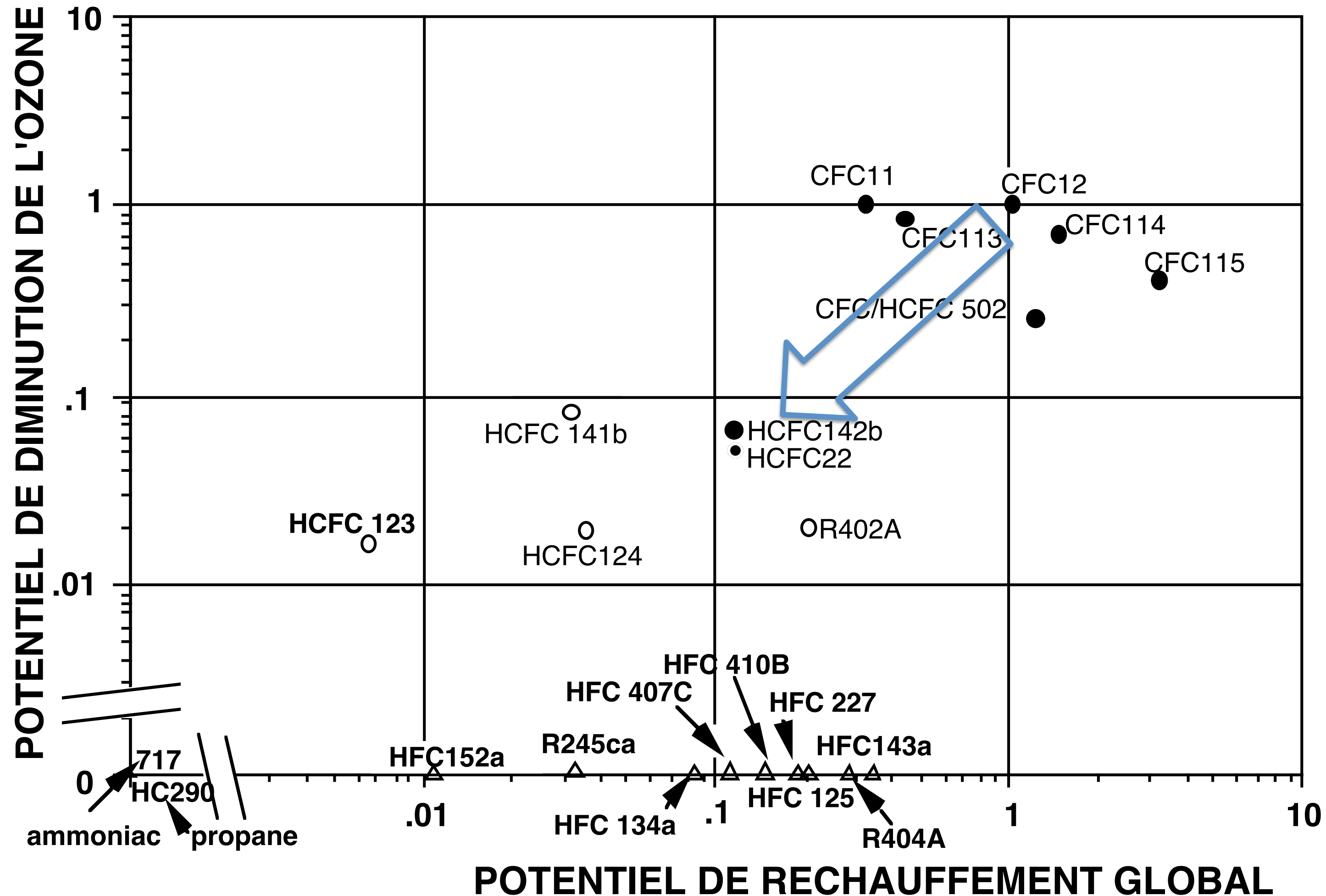
Pompe à chaleur industrielle ouverte: Recompression mécanique de vapeur dans un procédé typique de distillation

Zone verte = pertes



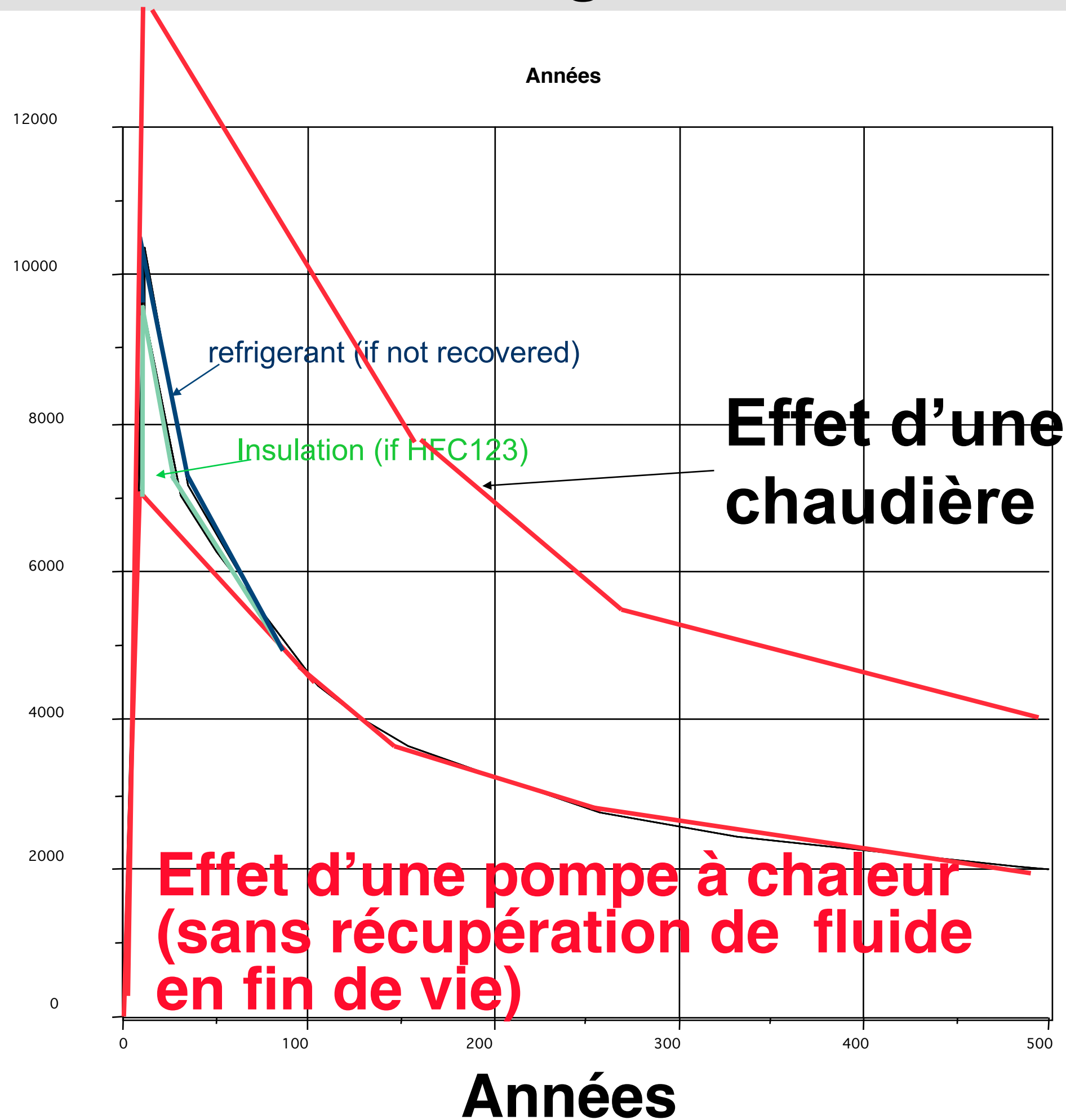
Principe: Température de condensation dépend de la pression, donc en augmentant la pression de la vapeur on peut redonner la chaleur latente aux flux entrants (faire passer le palier rouge au-dessus du bleu)

Aspects environnementaux des fluides frigorigènes



Comparaison des effets environnementaux sur le réchauffement pour un même service de chauffage

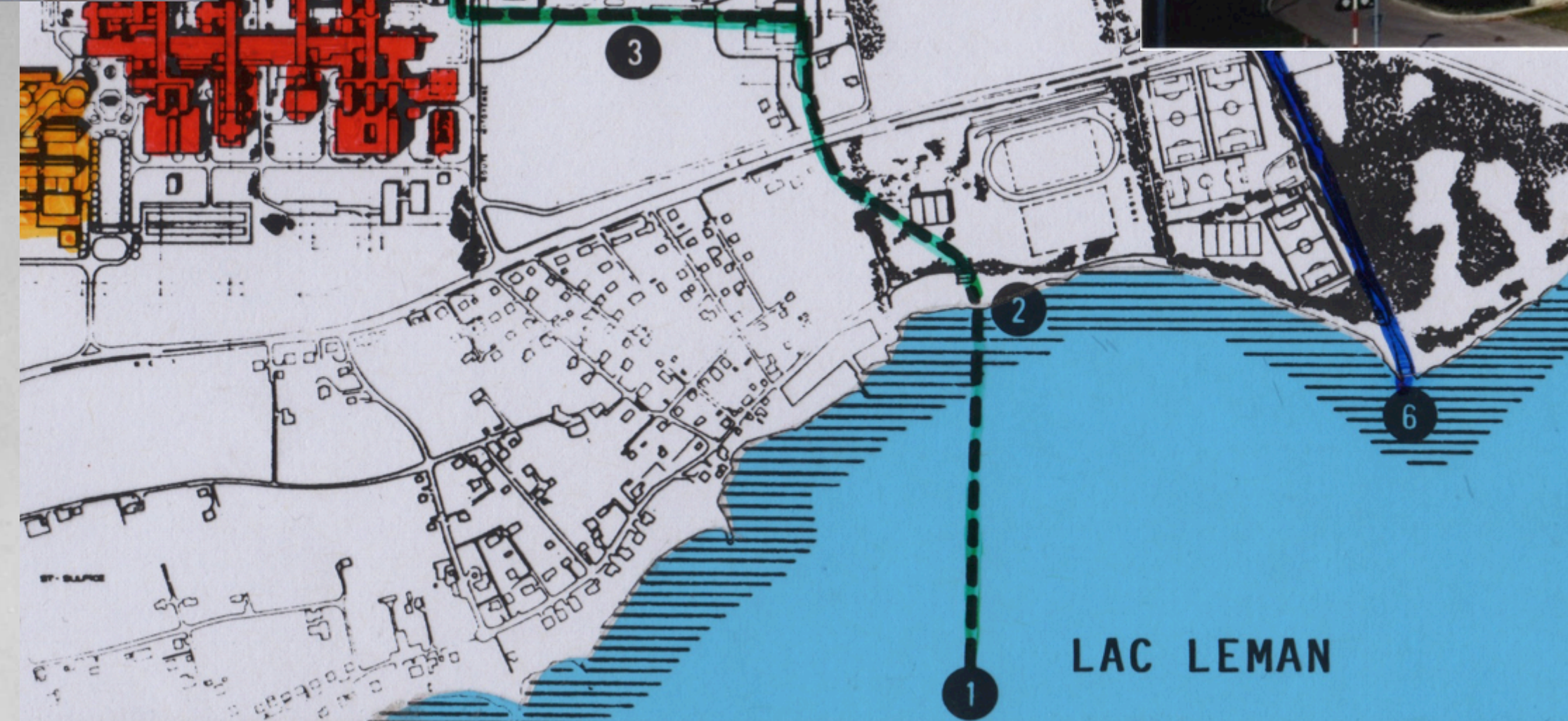
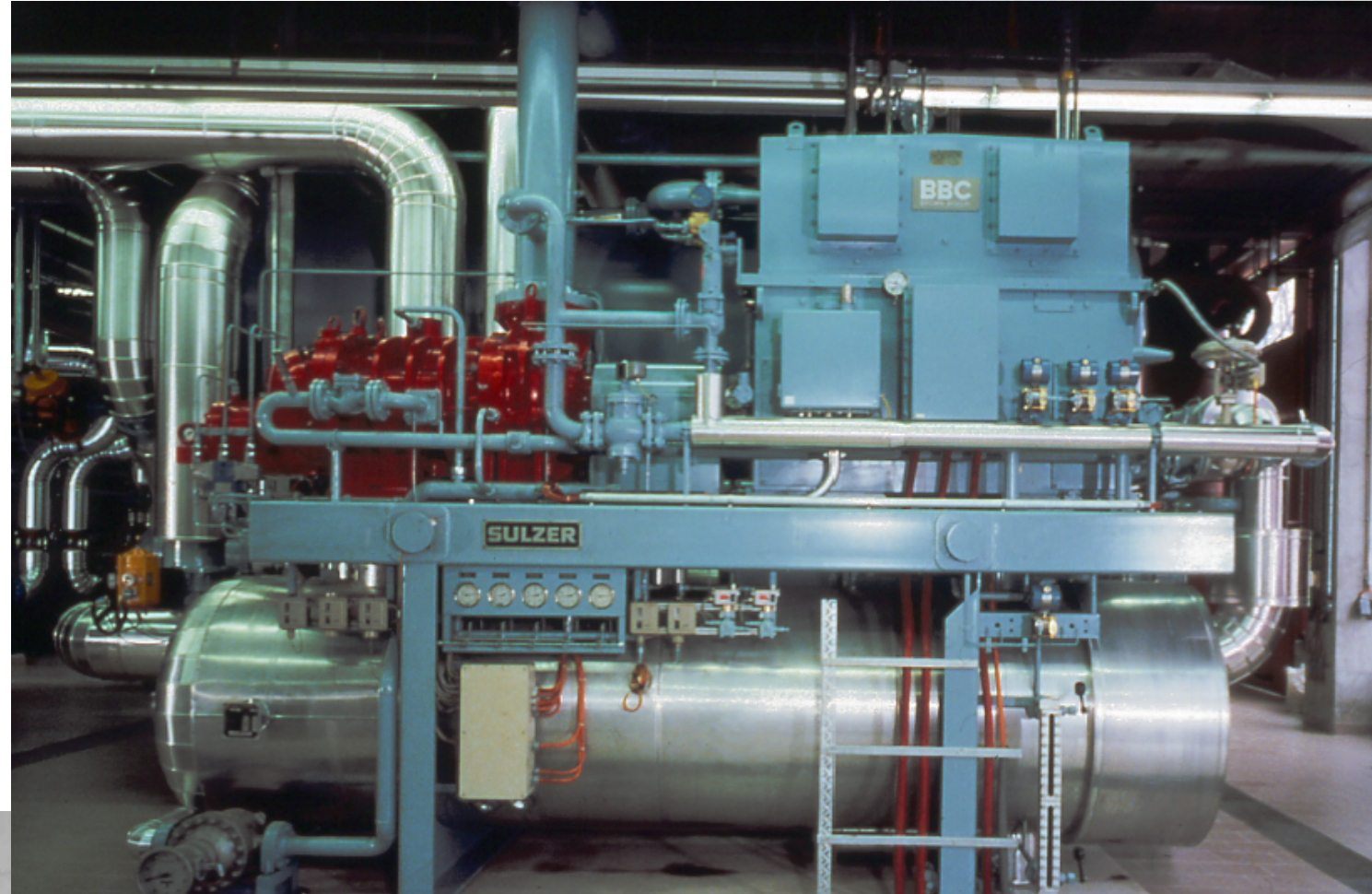
Impact réchauffement global
(TEWI)



Effet environnemental des PAC est bien plus faible que celui des chaudières.

Pourtant fluides frigorigènes toujours sous attaque!!

PAC de réseau urbain sur lac (1987, NH₃, 2x 3.7 MW_{th})



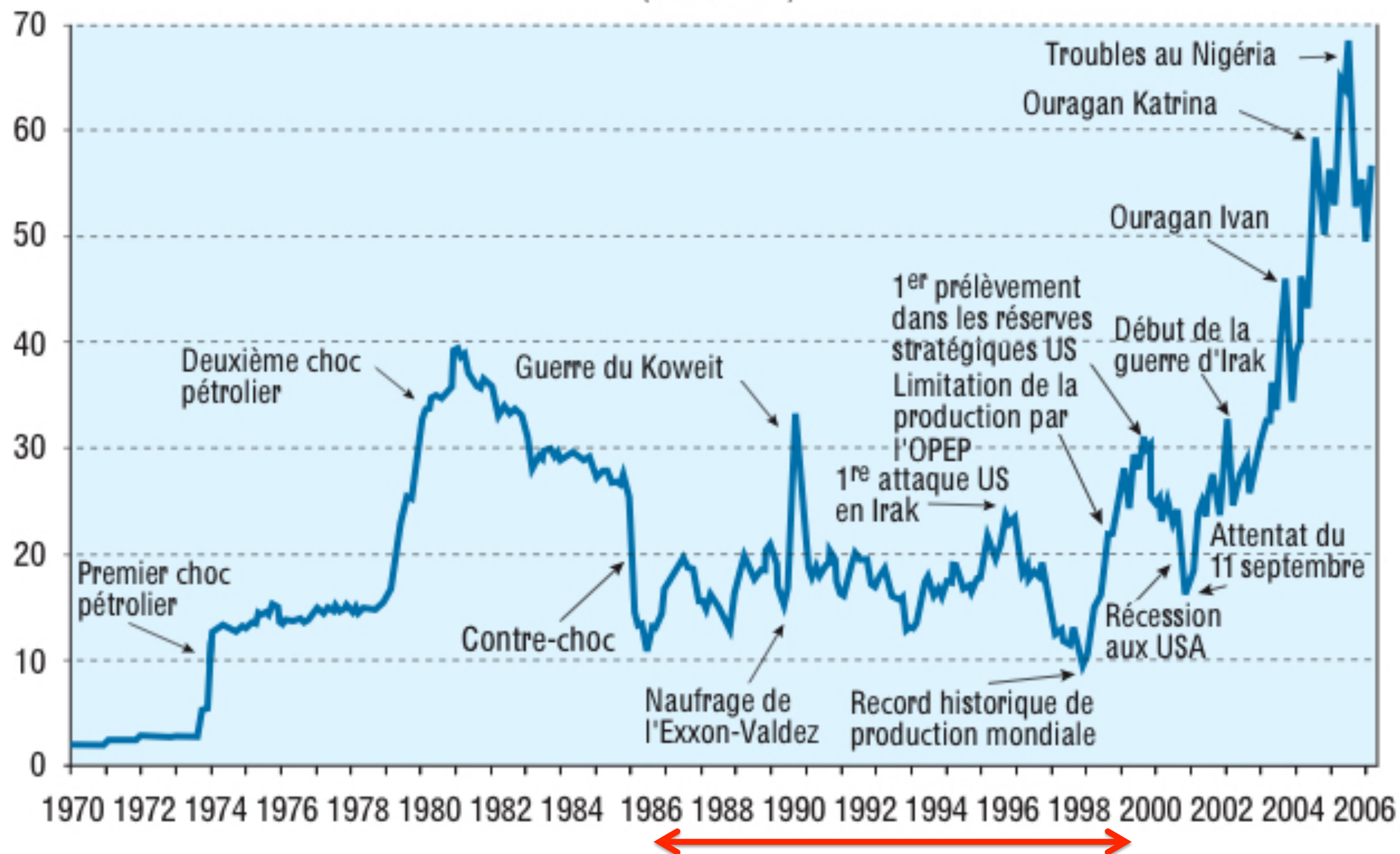
Pompe à chaleur et chauffage à distance



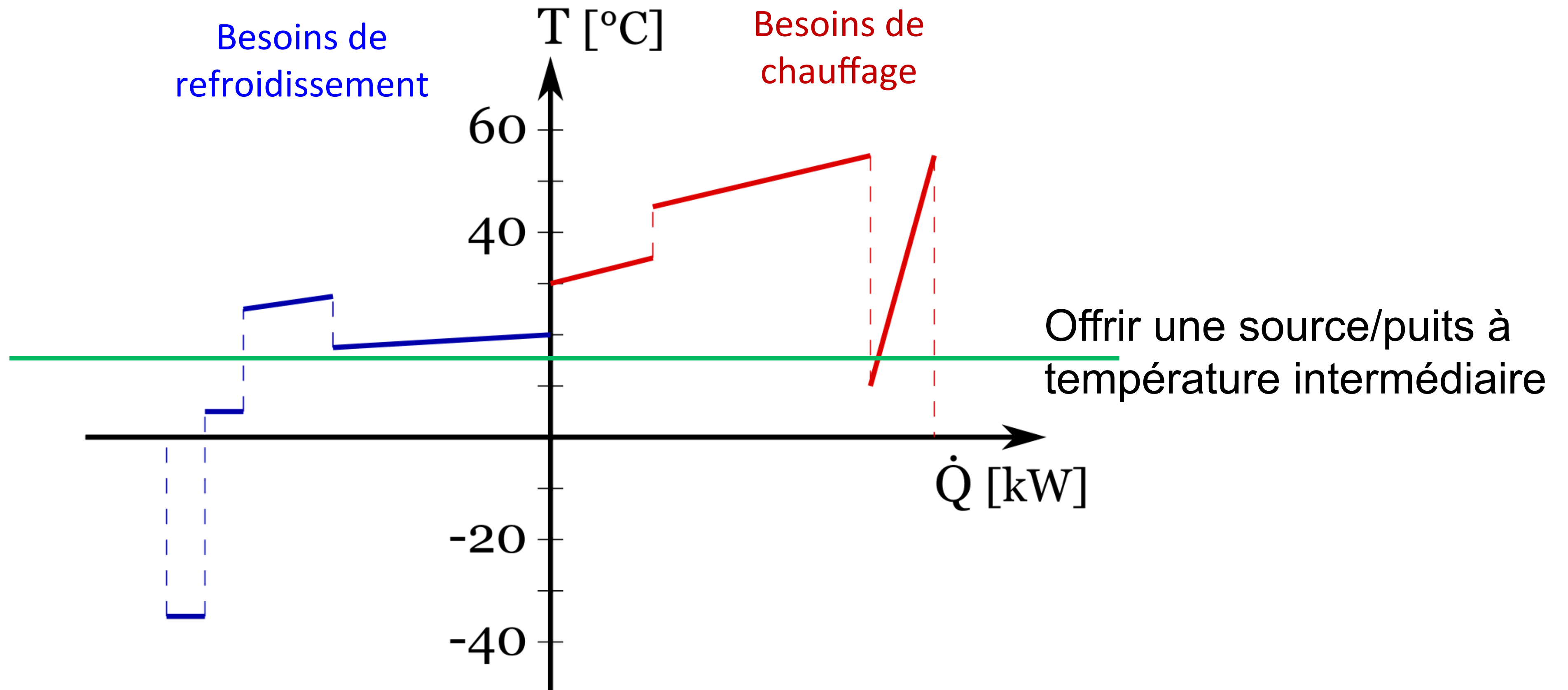
Un arrêt brutal: la chute du prix du pétrole

Évolution du prix du pétrole
1970-2006 en dollars courants

(Source: EIA)

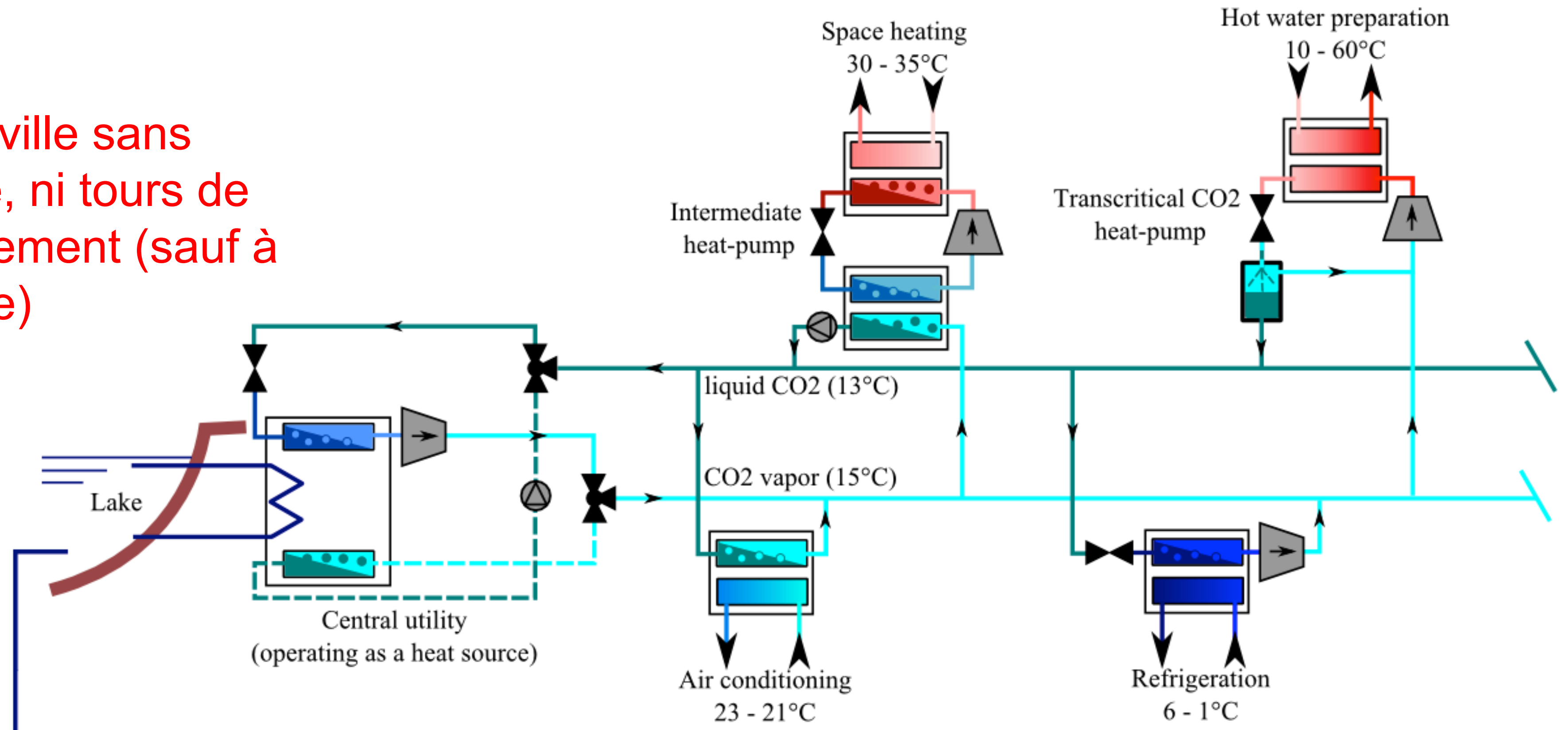


Les réseaux urbains avancés pour permettre la synergie entre utilisateurs



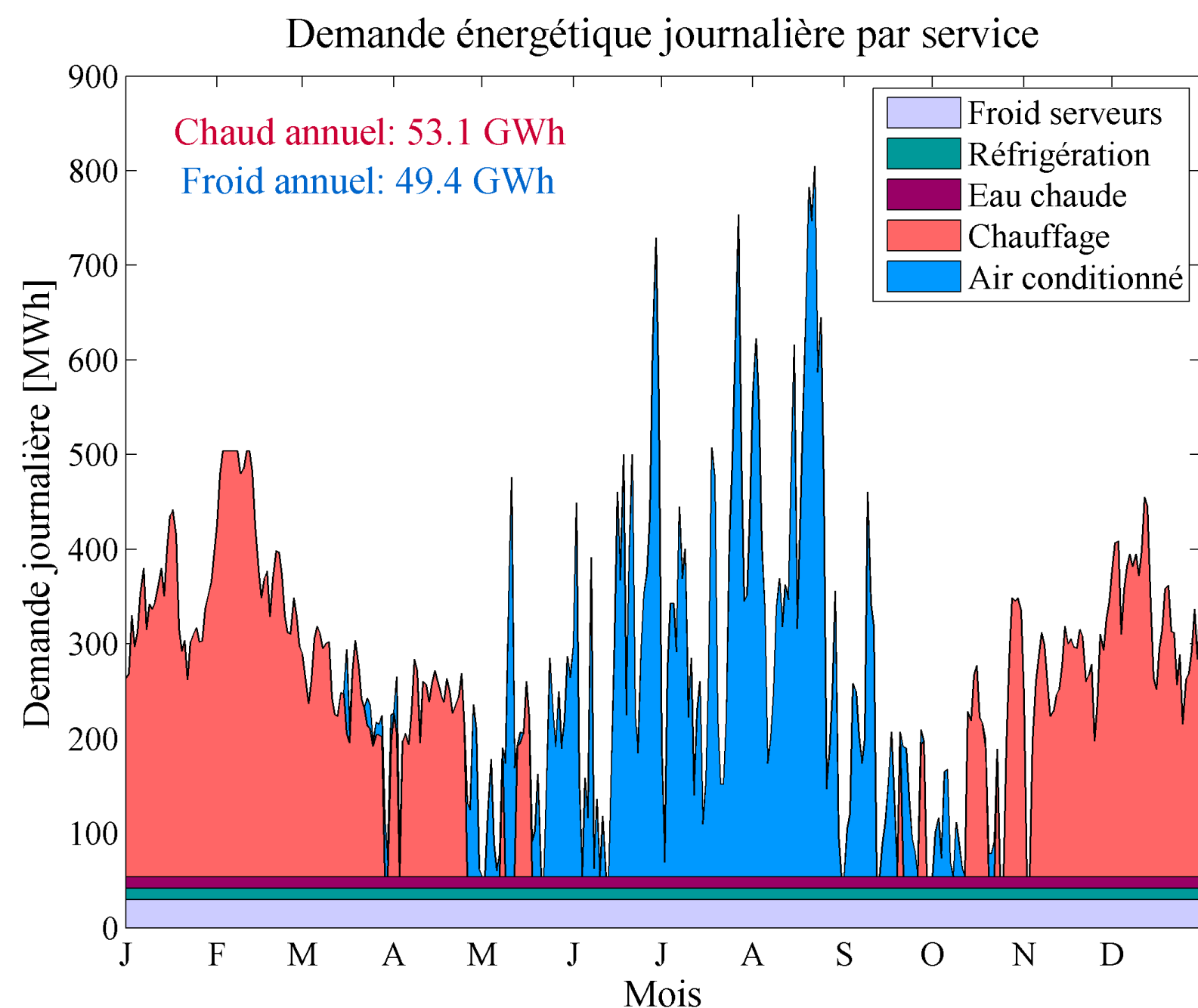
Le CO₂ comme fluide de transfert en chauffage et refroidissement urbain (brevet LENI-EPFL)

Vers une ville sans cheminée, ni tours de refroidissement (sauf à la centrale)

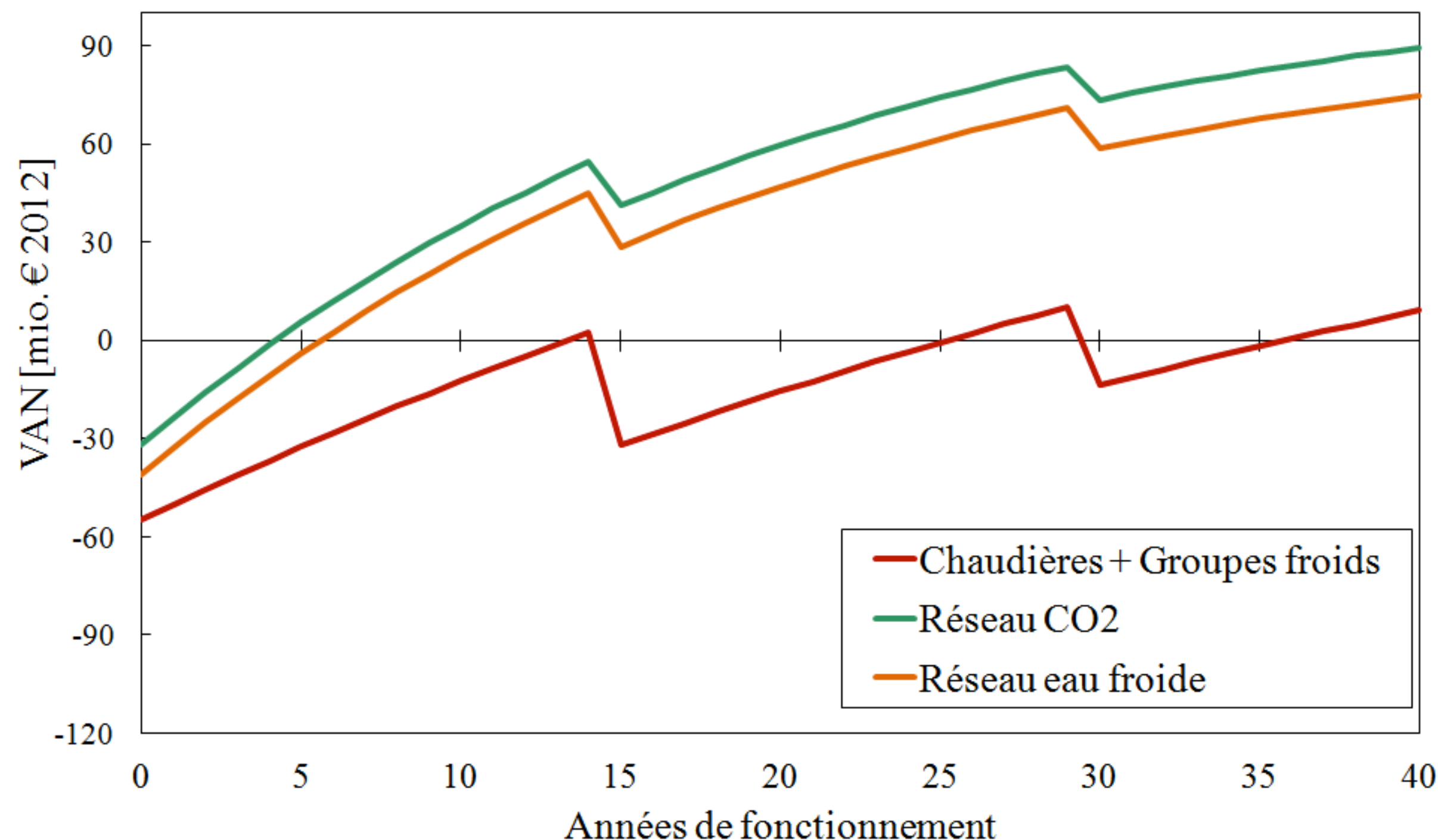


Thèses Weber (2008)
et Henchoz (2016)

Le CO₂ comme fluide de transfert en chauffage et refroidissement urbain (brevet LENI-EPFL)



Evolution temporelle de la valeur actuelle nette



Sur le quartier des rues basses à Genève, on pourrait économiser 80% de l'énergie finale et à meilleurs coûts que le système actuel

Autre avantage: petits diamètres

Industrielles ou de réseau

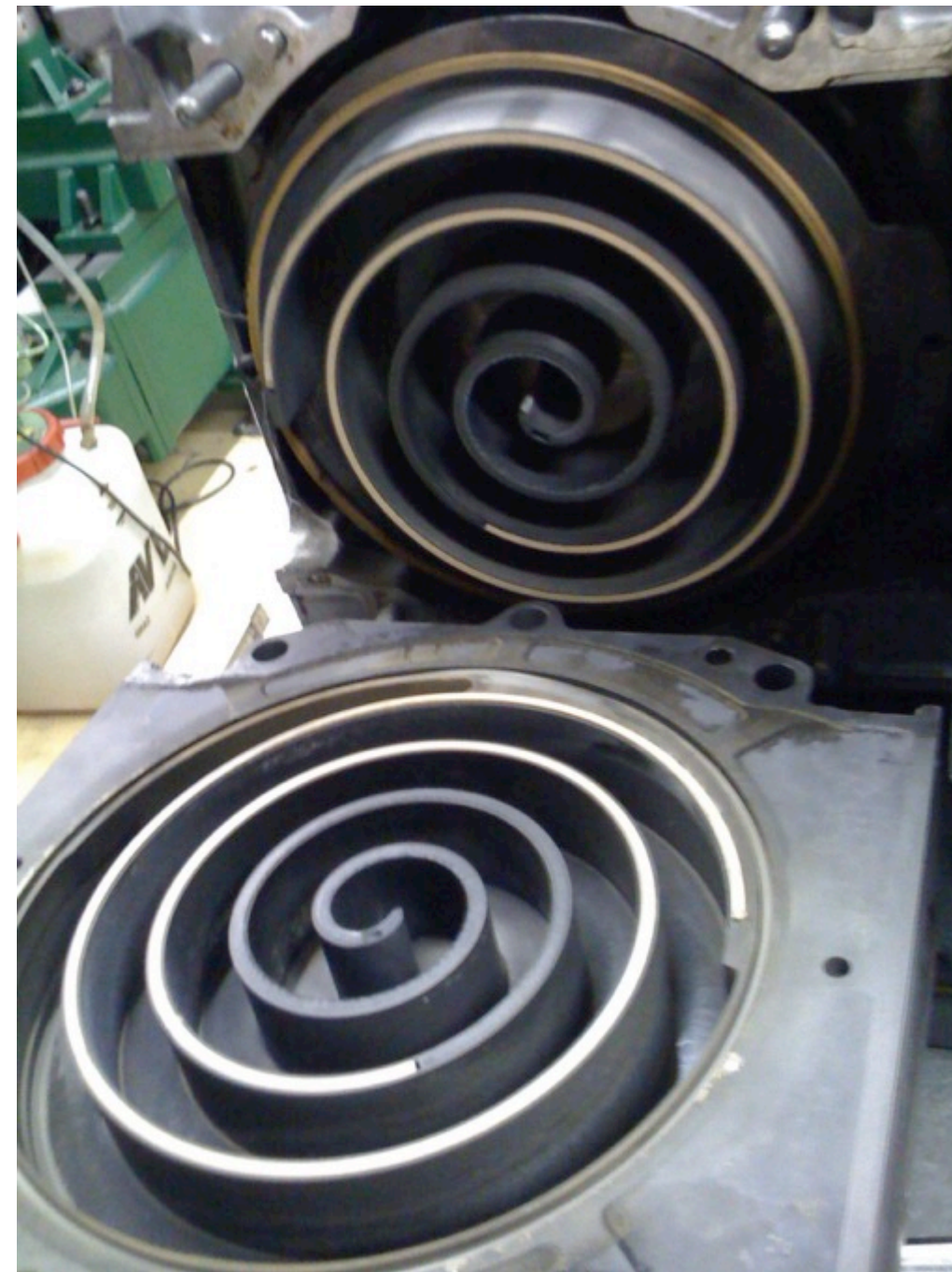
- Souvent **compresseurs dynamiques**
- Pas hermétiques ou semi-hermétique
- Souvent sans huile en contact avec le fluide (**oil-free**)
- Vitesse constante
- **Cycles multi-étagés** possibles

Domestiques

- Volumétriques
- Hermétiques
- Huile en contact avec le fluide
- Forte tendance vers les compresseurs rotatifs
- Tendance vers variation de vitesse
- Cycles mono-étagés prédominant

Revalorisation de la chaleur : les cycles de Rankine à fluide organique - PAC et ORC avec des machines scroll

- Les compresseurs scroll (1991-) et turbines scroll



Orbital

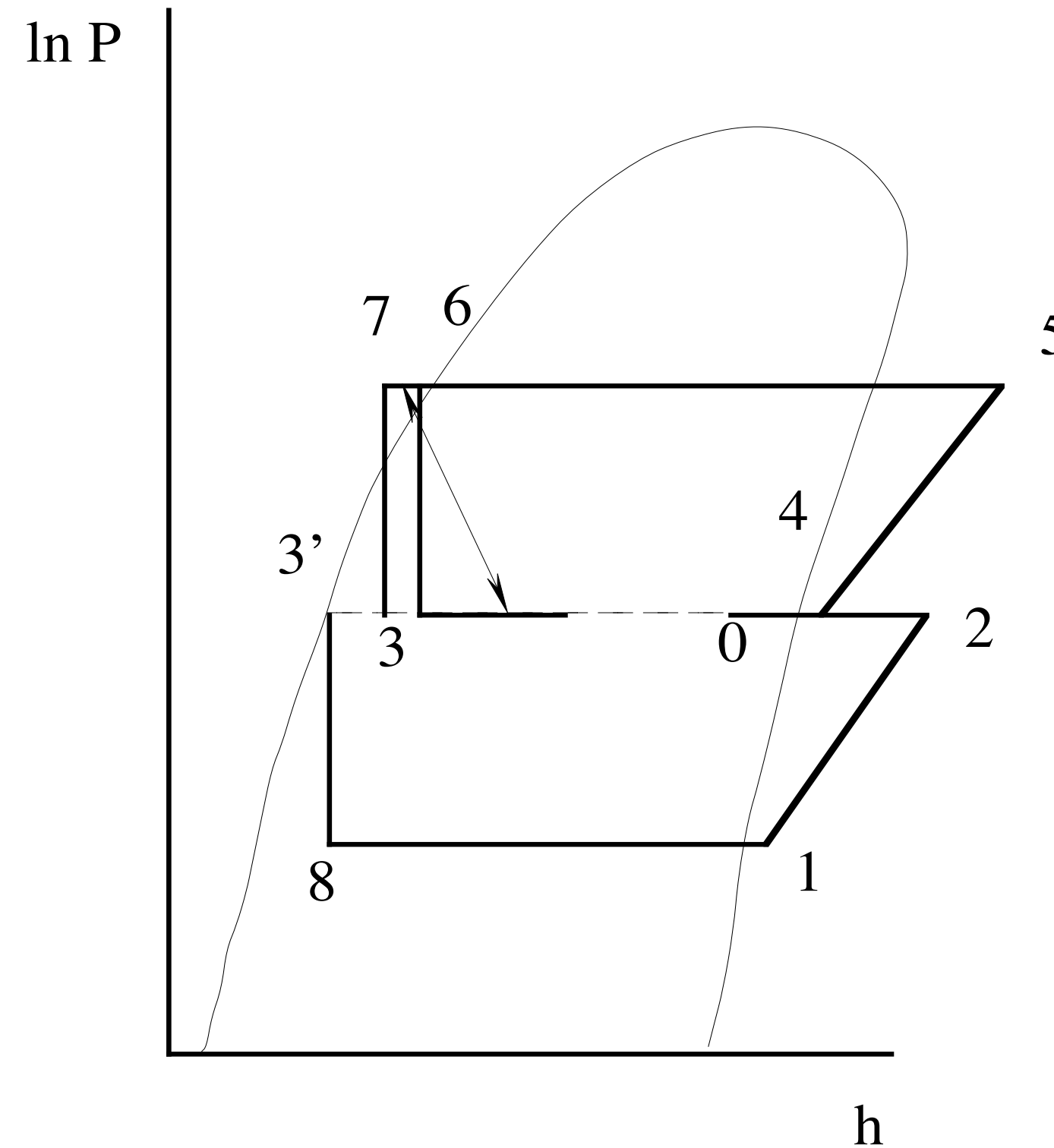
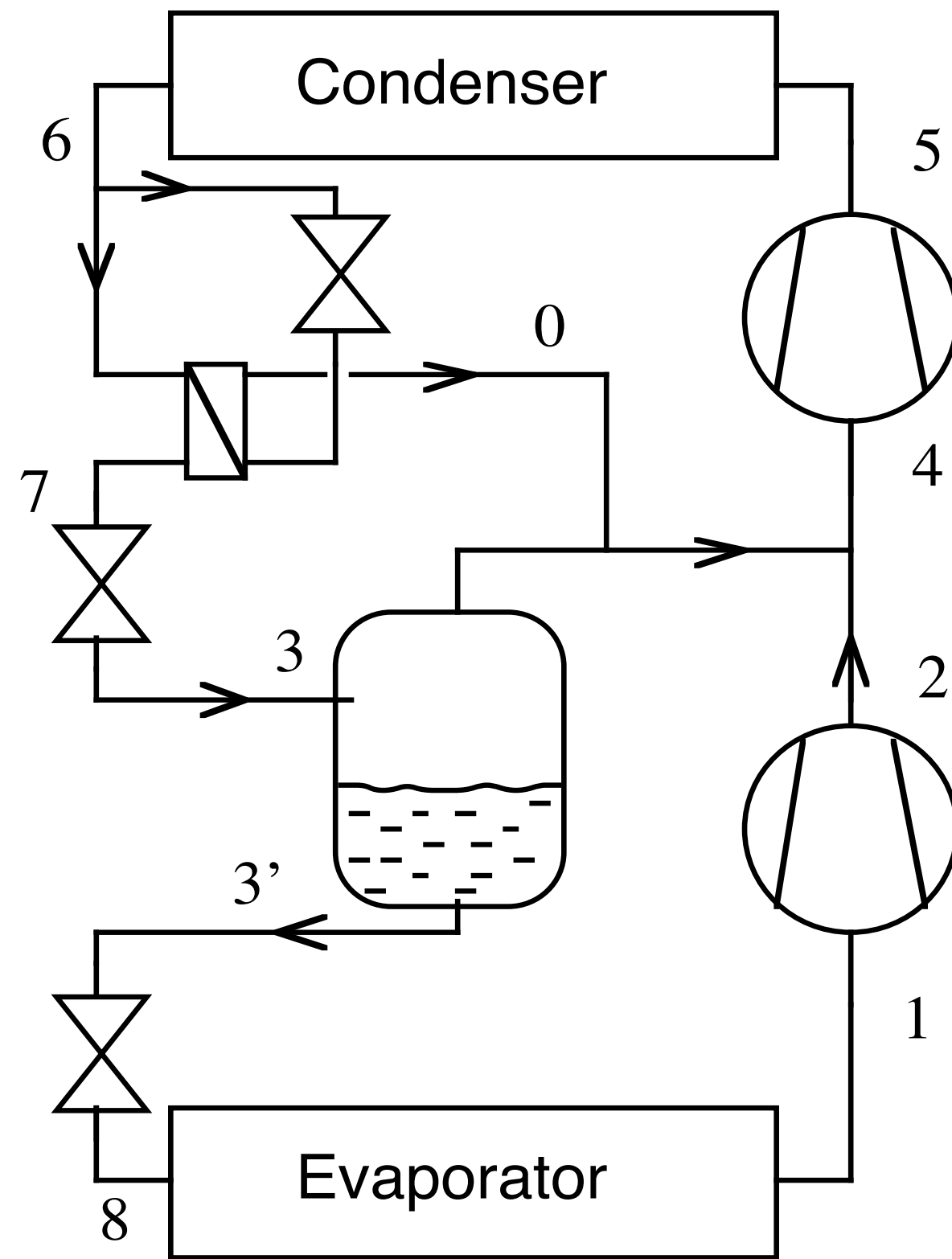


Corotating
(oil-free?)



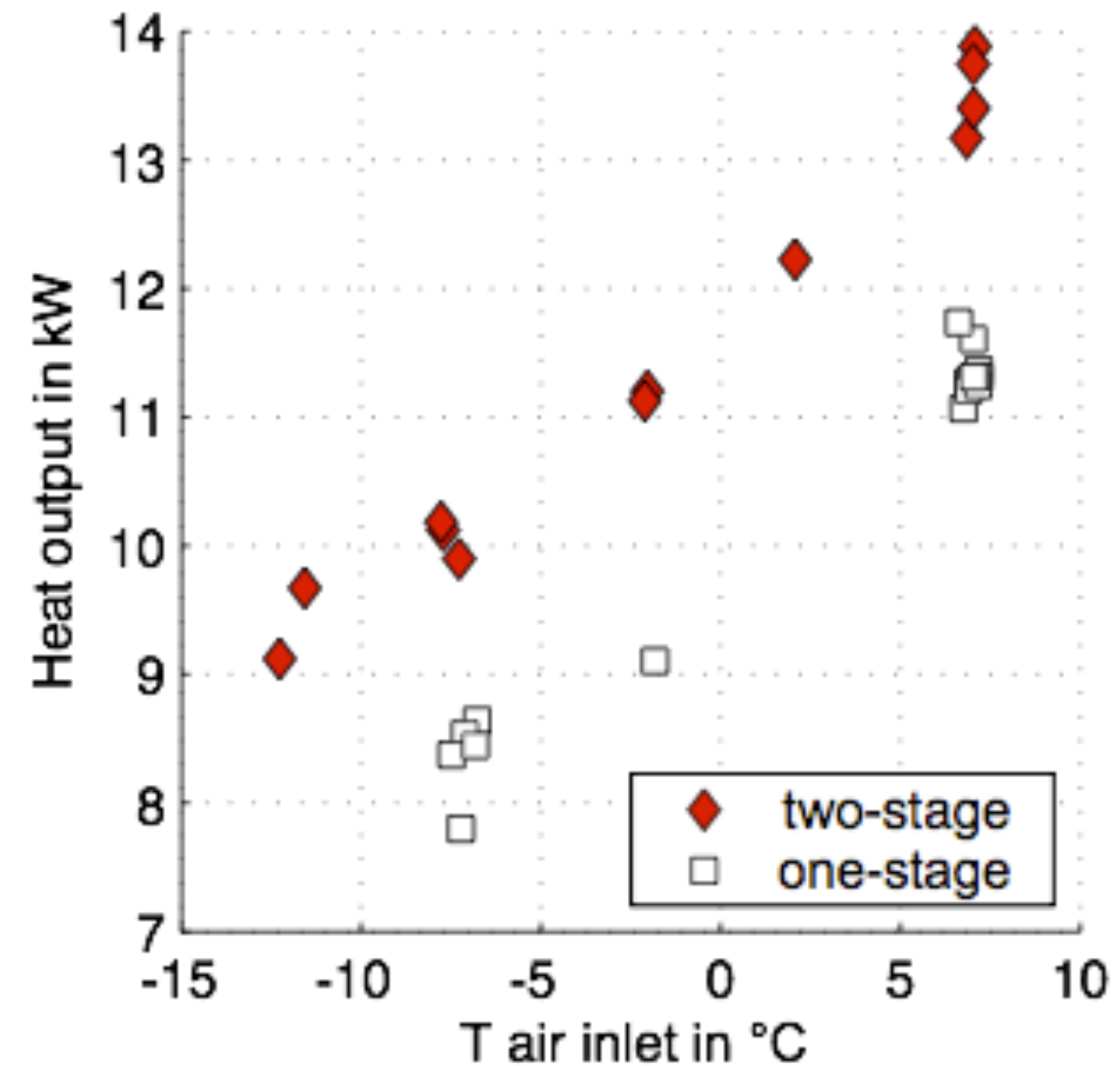
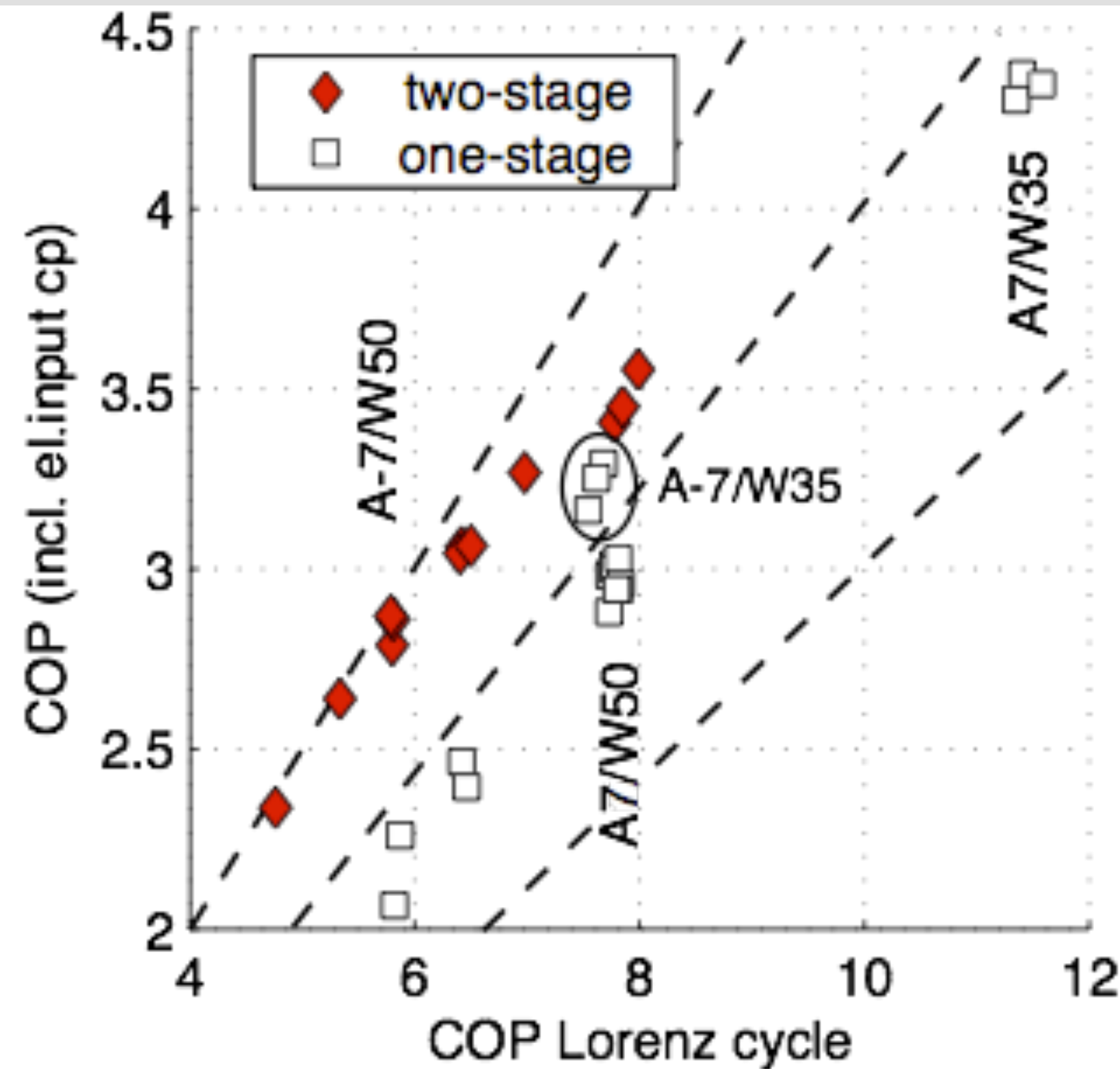
- Purdue 1992: premiers résultats de scroll compresseur en biphase (Afjei, Suter, Favrat)
- Purdue 1994: premiers résultats expérimentaux de turbine scroll (Zanelli-Favrat), thèse Kane (Eneftch)
- Linz IIR 2007: premiers résultats de PAC domestique biétagée (Favrat-Nidegger-Reymond-Courtin)
- Beijing 2002: premiers résultats de scroll compresseur avec injection intermédiaire de vapeur (Zehnder et al.)
- Guilin 2013: premiers résultats de corotating scroll (meilleur paper ECOS2013, Iglesias-Favrat)

Cycles biétagés avec huile



Problèmes: huile (déséquilibre et réduction de performances d'évaporateur

Comparaison entre cycles mono- et bi-étagés



- ★ Augmentation de COP +12%
- ★ Augmentation de puissance +24%

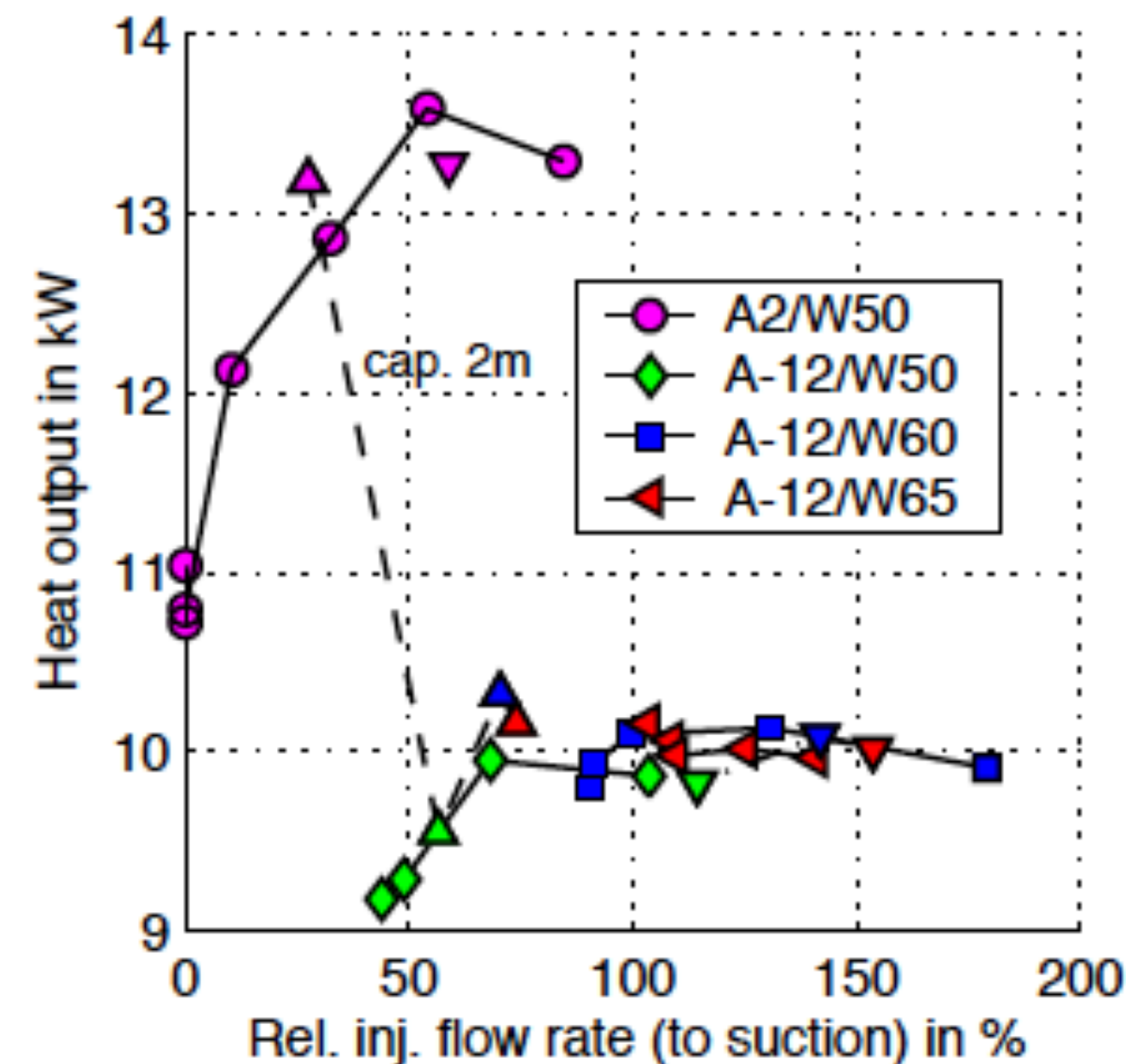
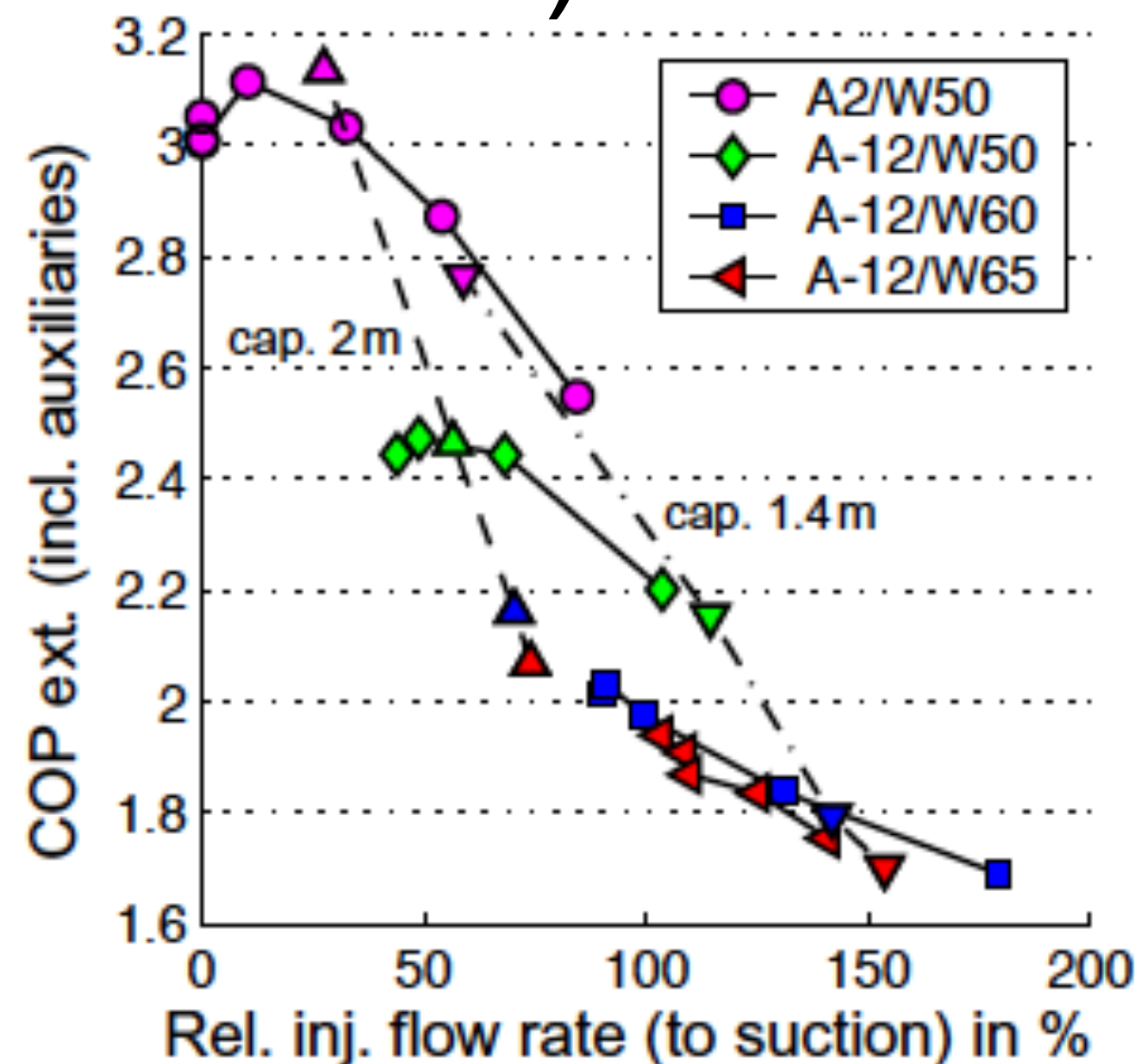
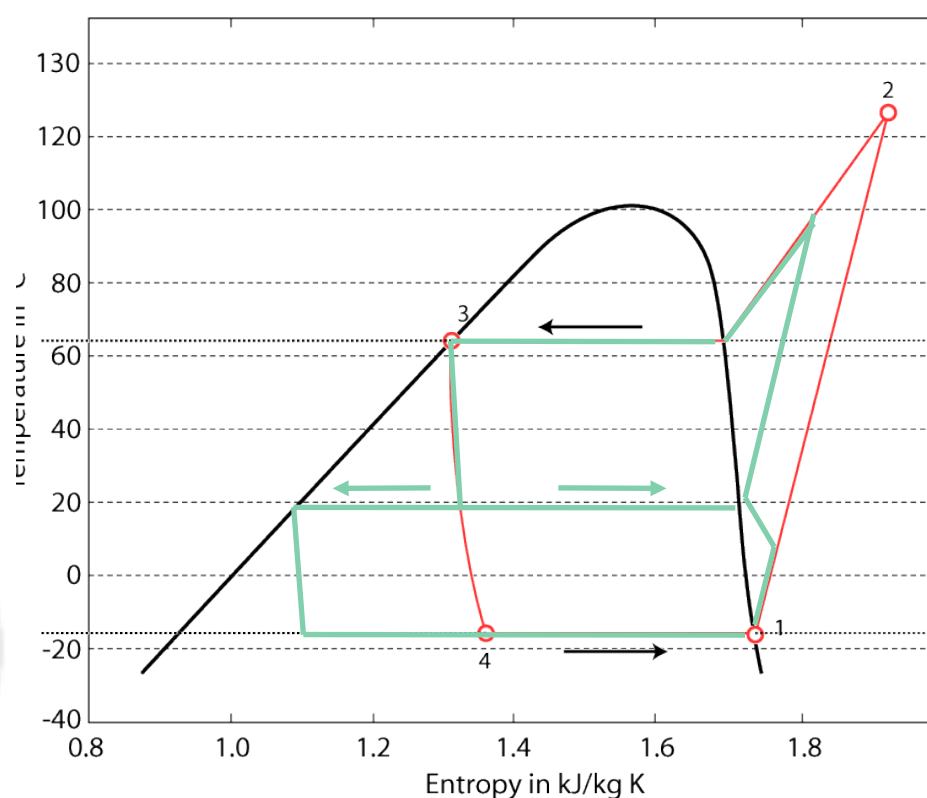
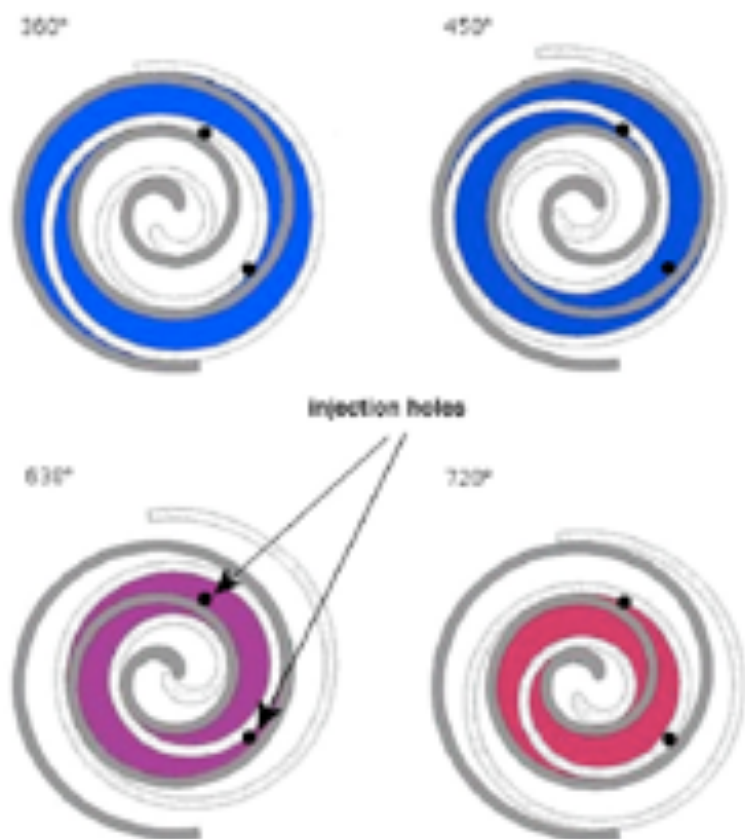
From thesis Zehnder (2004)

Cycle avec injection de vapeur intermédiaire

Ports
d'économiseur



Le cycle 2 étages du pauvre: simple étage de compression avec injection intermédiaire de vapeur (cycle à ports d'économiseur)



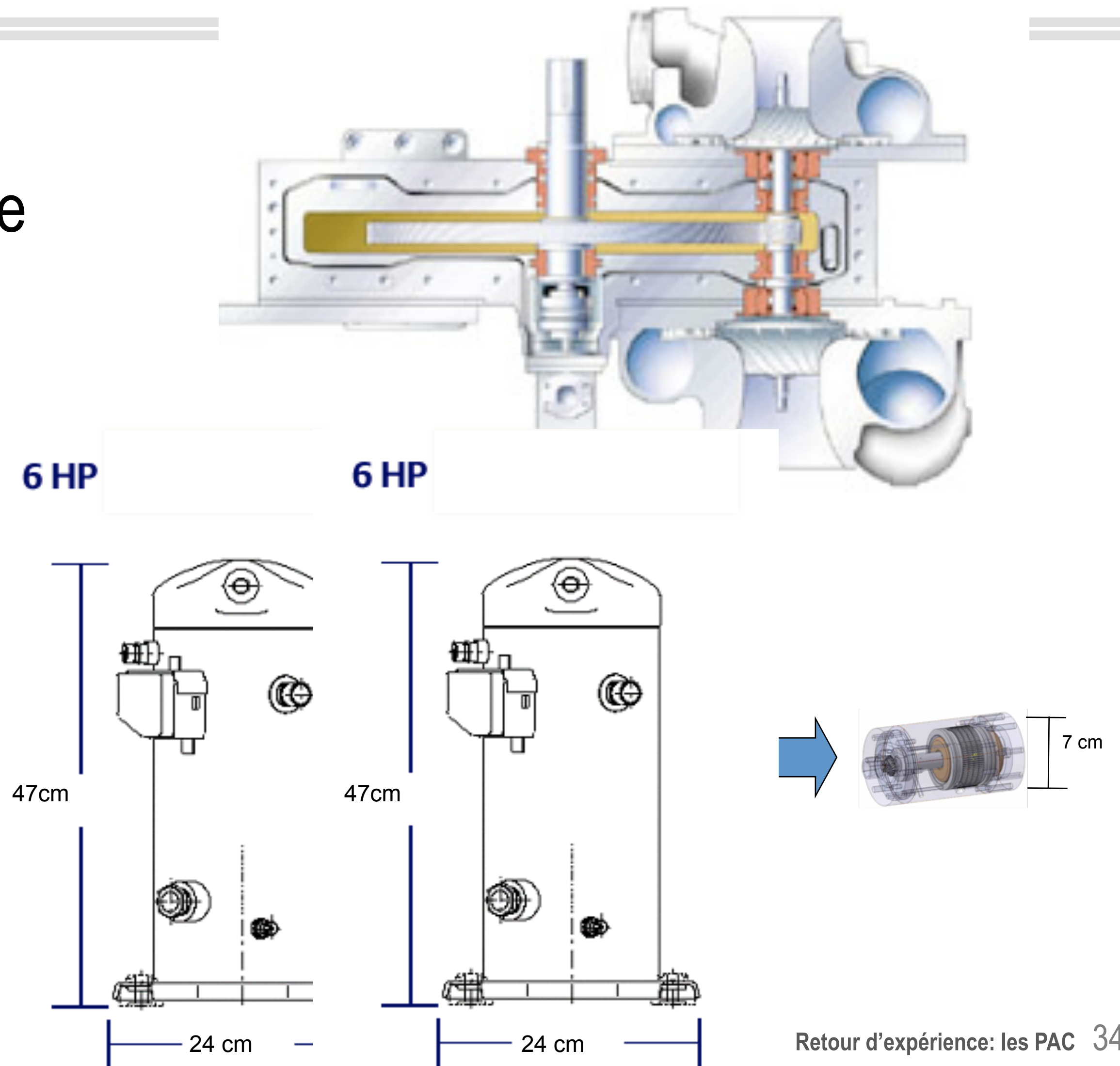
Compresseurs et turbines dynamiques sans huile et de petite puissance

Les rêves:

- Faisons des machines sans huile
- Eliminons l'engrenage
- Vitesse variable
- Faible maintenance

Exemple

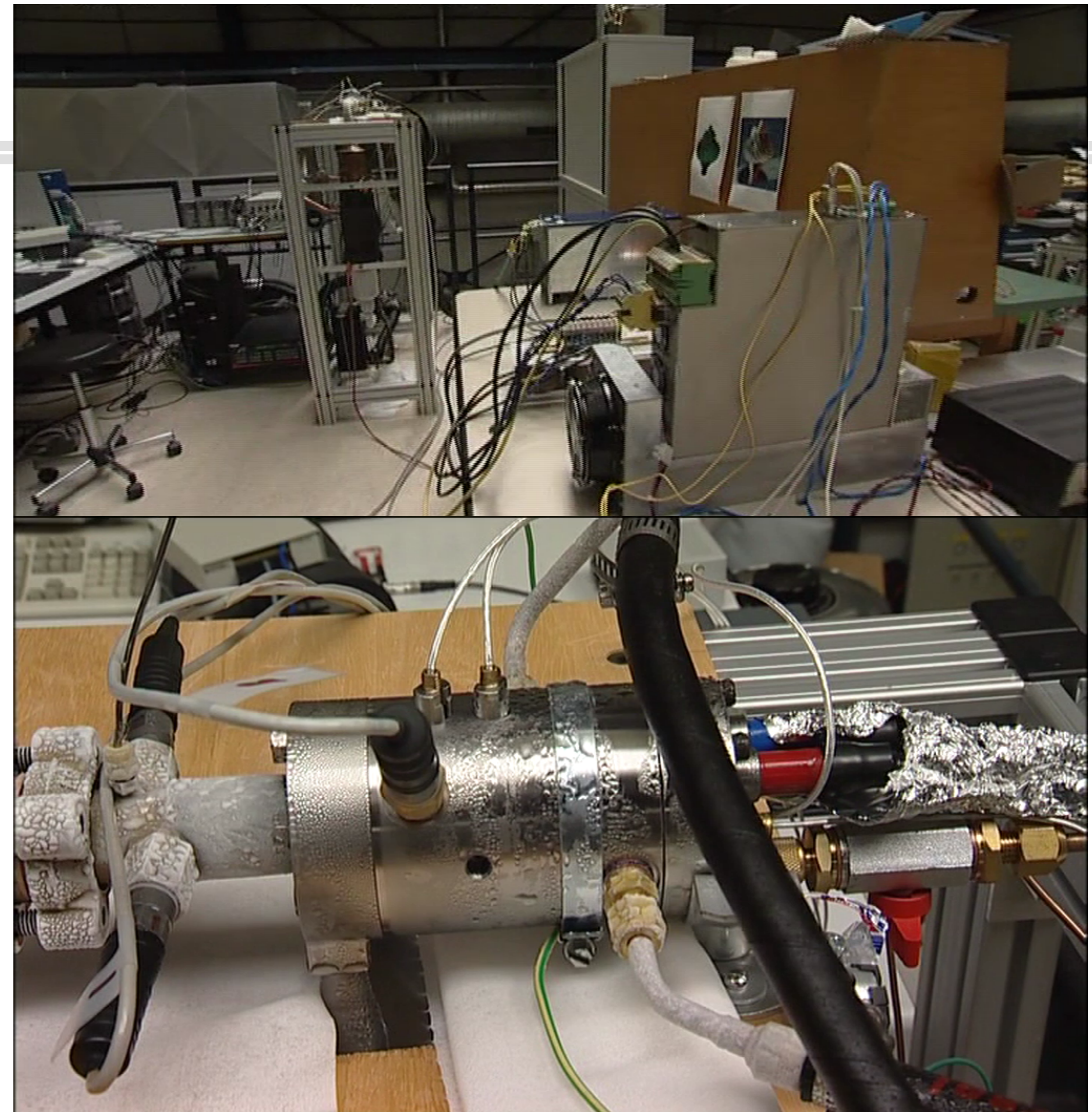
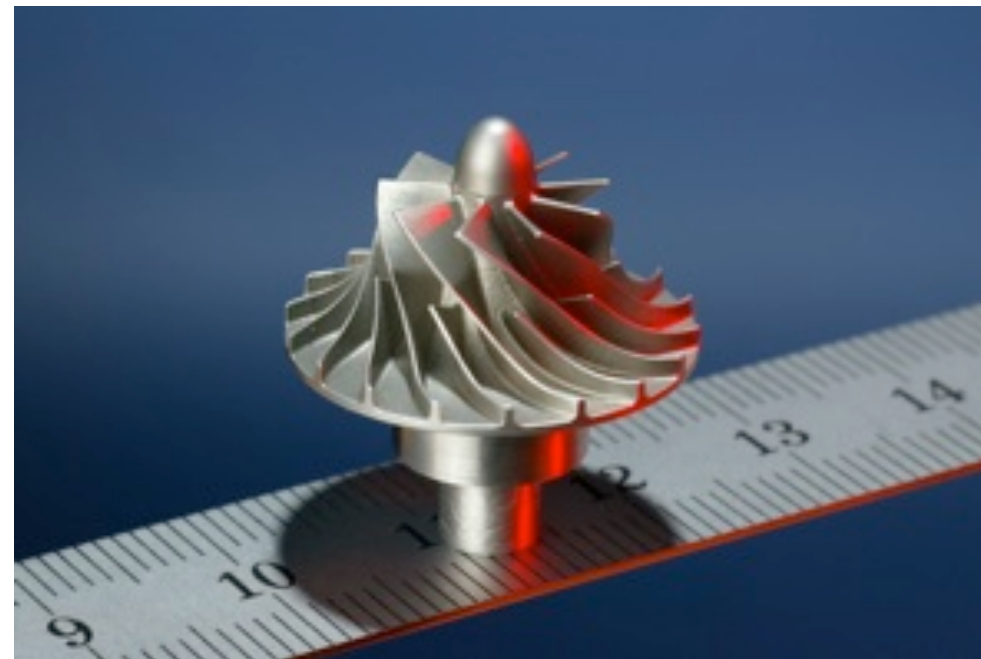
Compresseur de pompe à chaleur



Micro compresseurs et turbines sans huile

La solution:

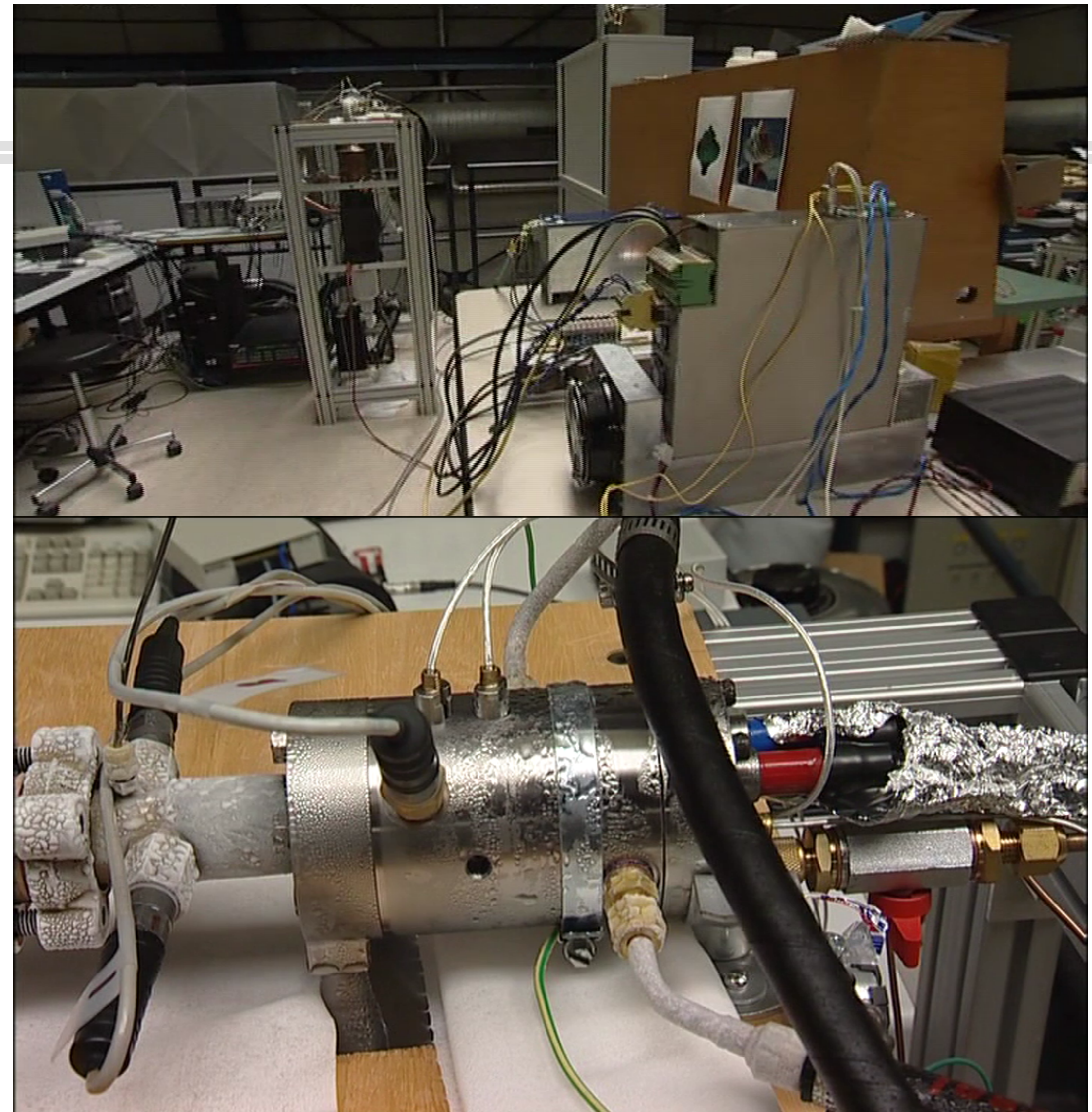
- La lévitation sur le fluide lui-même
 - Paliers à gaz
 - Exemple: compresseur de pompe à chaleur miniature
- Thèse Schiffmann (monoétagé, 2008)
Prix Swisselectric Research
- 3 kWel, 210000 tpm
- Thèse Carré (biétagé, 2015)
- Thèse Demierre (compresseur-turbine)



Micro compresseurs et turbines sans huile

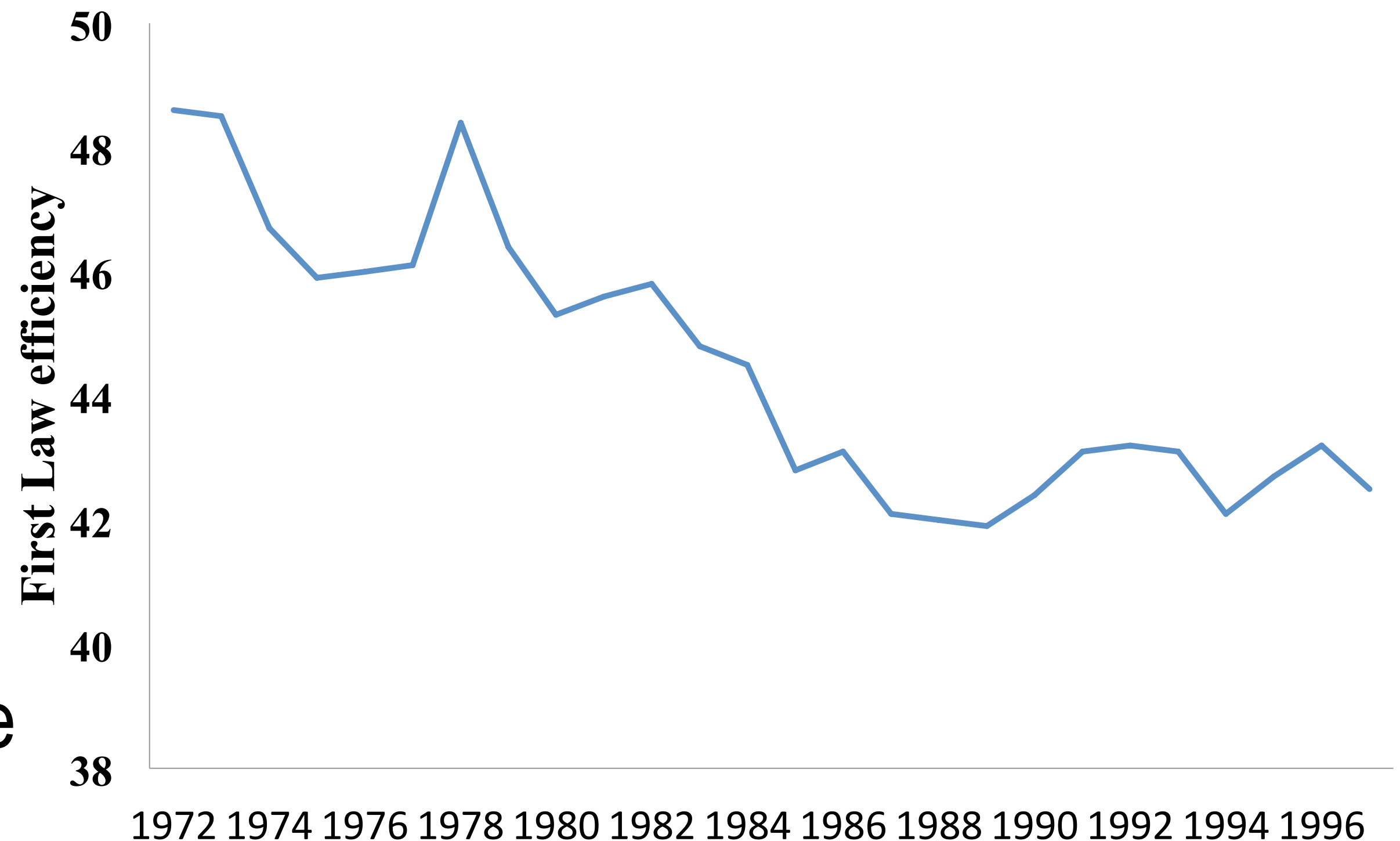
Difficultés:

- Jeux de quelques microns, donc matériaux à très faible dilatation
- Entraînement direct:
 - électronique de puissance à très haute vitesse
 - haute température côté turbine si Pac ORC-ORC (thermique)
- Pureté du fluide frigorigène (présence de liquide dans les paliers
- Éviter le pompage dans les phases transitoires



De meilleurs indicateurs d'efficacité sont nécessaires

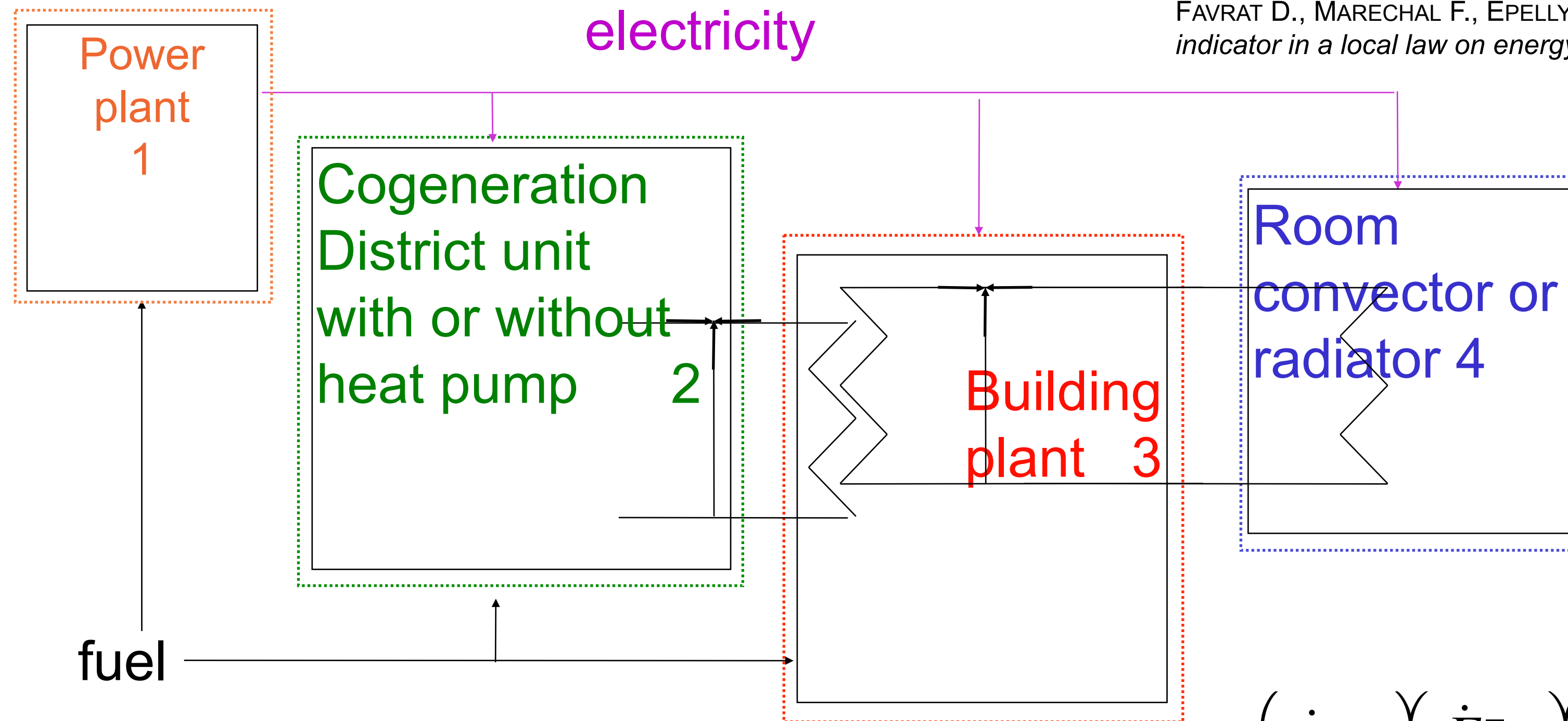
- Mention d'une efficacité (1er principe) dans les statistiques suisses
- Abandon en 97 car pente négative
- L'exergie impliquant le 2ème principe permettrait de résoudre ce dilemme mais toujours grande résistance



Données: Statistiques globales suisses de l'énergie, 1997

Exergy in a law: From local to global

FAVRAT D., MARECHAL F., EPELLO O. *The challenge of introducing an exergy indicator in a local law on energy.* *Energy*,33, No2, pp130-136 (2008)



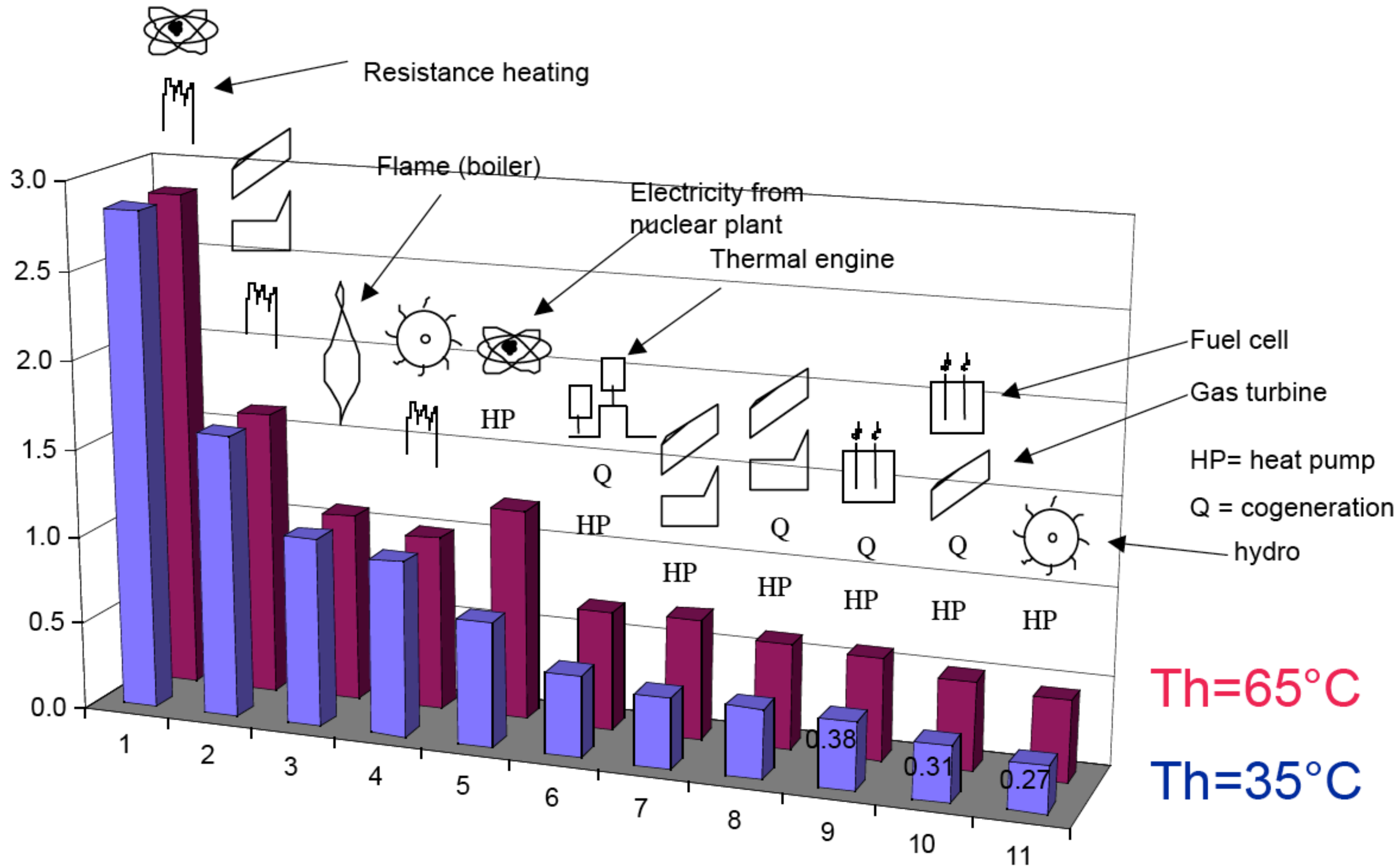
$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \quad \eta = \left(\frac{\dot{E}_{el,1}^-}{\dot{E}_{y,1}^+} \right) \left(\frac{\dot{E}_{y,2}^-}{\dot{E}_{el,2}^+} \right) \left(\frac{\dot{E}_{y,3}^-}{\dot{E}_{y,3}^+} \right) \left(\frac{\dot{E}_{q,4}^-}{\dot{E}_{y,4}^+} \right) = \frac{\dot{E}_{q,4}^-}{\dot{E}_{y,1}^+}$$

Example: Combined cycle power plant without cogeneration (1)+District heating heat pump (2) + DH heat exchanger in the building (3) +convector (4)

Comparaison de technologies de chauffage

	Power plant	Dist. plant	Building plant			Room convector			Overall exergy efficiency [%]		
			45°/35°	65°/55°	75°/65°	45°/35°	65°/55°	75°/65°	45°/35°	65°/55°	75°/65°
Supply/return temperatures			45°/35°	65°/55°	75°/65°	45°/35°	65°/55°	75°/65°	45°/35°	65°/55°	75°/65°
Direct electric heating (nuclear power)	0.32					0.07	0.07	0.07	2.2	2.2	2.2
Direct electric heating (combined cycle cogeneration)		0.55				0.07	0.07	0.07	3.7	3.7	3.7
Direct electric heating (hydro power)	0.88					0.07	0.07	0.07	6.0	6.0	6.0
District boiler		0.2	0.54	0.76	0.86	0.53	0.38	0.33	5.8	5.8	5.8
Building non-condensing boiler			0.11	0.16	0.18	0.53	0.38	0.33	6.1	6.1	6.1
Building condensing boiler			0.12			0.53			6.6		
District heat pump (nuclear power)	0.32	0.61	0.54	0.76	0.86	0.53	0.38	0.33	5.6	5.6	5.6
Domestic heat pump (nuclear power)	0.32		0.45	0.45	0.45	0.53	0.38	0.33	7.6	5.4	4.8
Domestic cogeneration engine and heat pump			0.22	0.25	0.26	0.53	0.38	0.33	11.8	9.4	8.7
District heat pump (combined cycle power)	0.54	0.61	0.54	0.76	0.86	0.53	0.38	0.33	9.4	9.4	9.4
Domestic heat pump (combined cycle power)	0.54		0.45	0.45	0.45	0.53	0.38	0.33	12.9	9.2	8.1
Domestic heat pump (cogeneration combined cycle power)		0.55	0.45	0.45	0.45	0.53	0.38	0.33	13.2	9.4	8.3
Cogeneration fuel cell and domestic heat pump			0.25	0.27	0.28	0.53	0.38	0.33	13.4	10.4	9.5
District heat pump (hydropower)	0.88	0.61	0.54	0.76	0.86	0.53	0.38	0.33	15.4	15.4	15.4
Domestic heat pump (hydropower)	0.88		0.45	0.45	0.45	0.53	0.38	0.33	21.2	15.1	13.3

Comparaison de technologies de chauffage



A quand une ballon à faible consommation grâce aux pompes à chaleur?

Xavier Pelet, D.Favrat

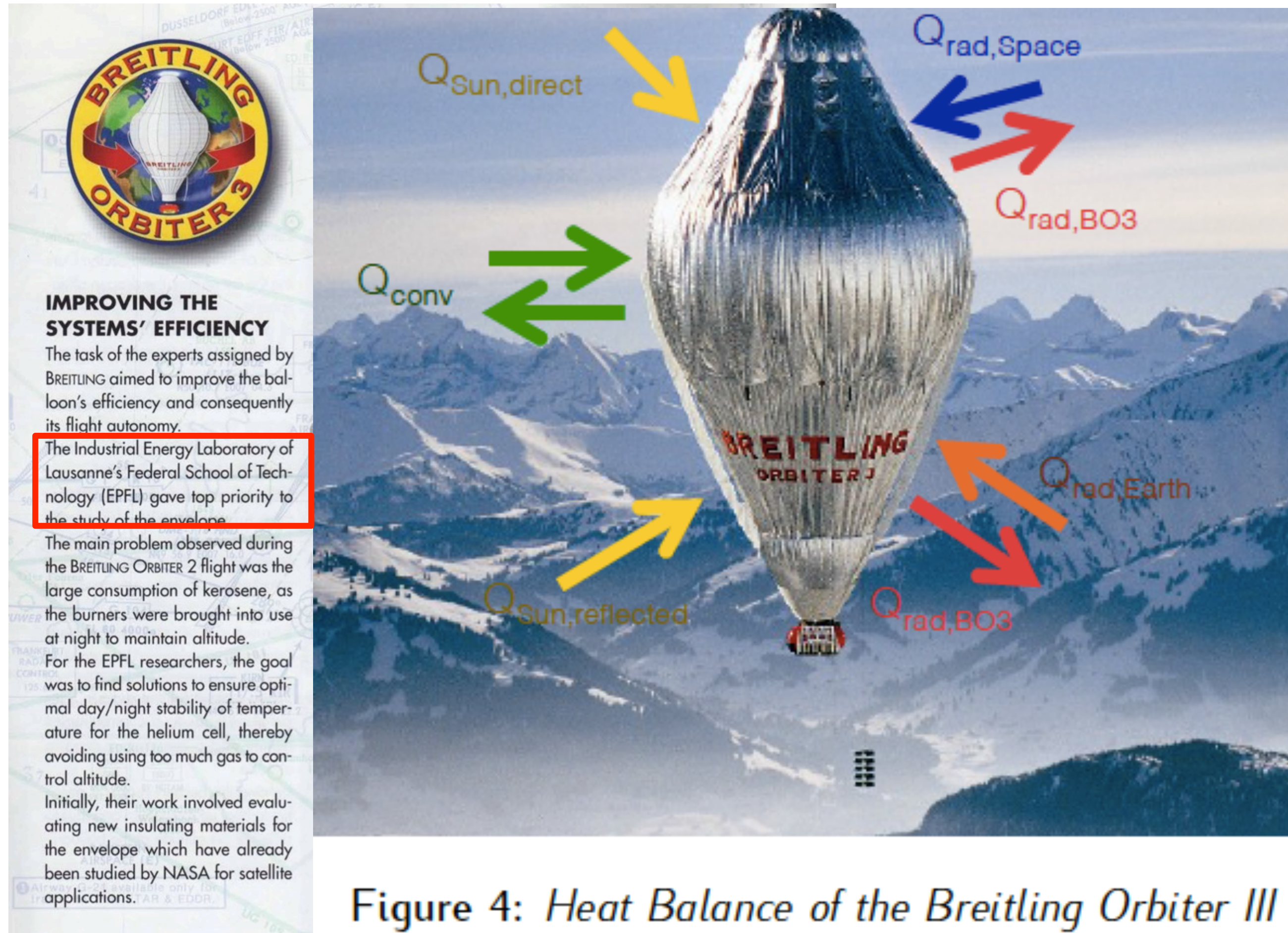
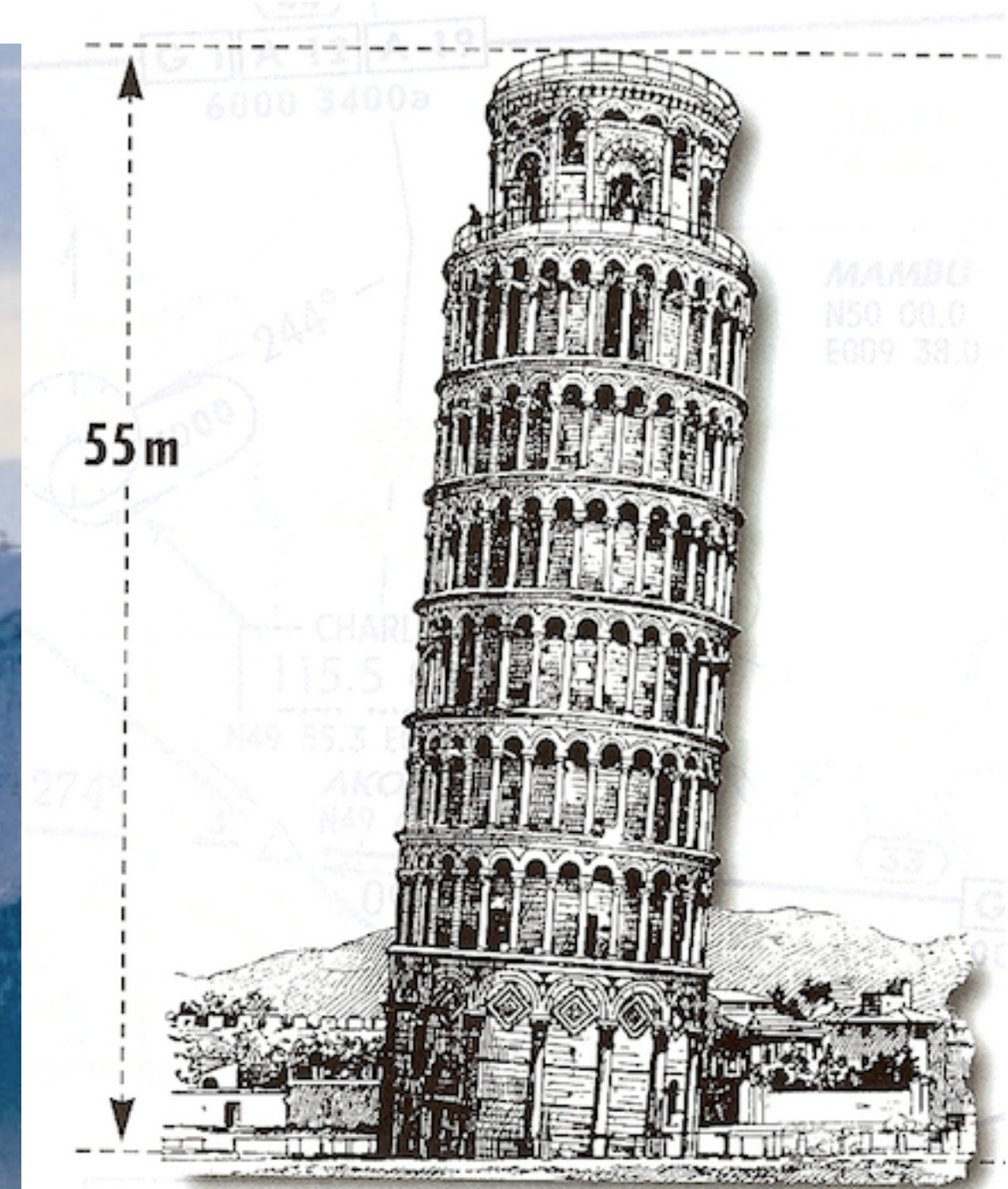


Figure 4: Heat Balance of the Breitling Orbiter III



Dec 98-Jan 99
Premier tour du
monde sans escale

- **Un rôle clef à jouer dans la lutte contre le réchauffement climatique**
- **Technologies déjà très avancées mais progrès significatifs encore possibles, notamment pour les PAC domestiques**
- **Un énorme potentiel de développement existe dans les systèmes urbains**
- **La question des fluides frigorigènes reste d'actualité car fluides naturels pas toujours favorables énergétiquement et en matière de sécurité**
- **L'introduction d'un indicateur exergétique devrait mieux montrer la voie dans le cadre des statistiques énergétiques**