CES
MINES ParisTech

Les méthodes et technologies de valorisation de la chaleur

Maroun NEMER

Le 7 novembre 2017.

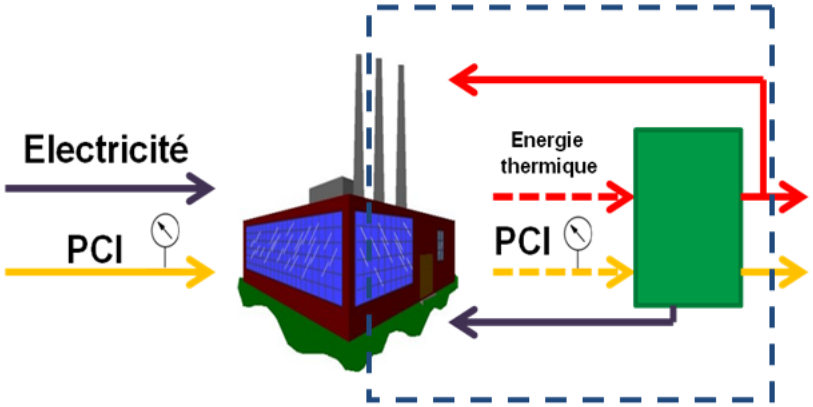
Centre Efficacité énergétique des Systèmes (CES) .
Mines ParisTech

Introduction

- **La chaleur est une énergie à 5 dimensions (T, t, x, y, z)**

- **L' énergie « fatale » désigne toute quantité d'exergie détruite (généralement par rejet dans l'environnement) afin de permettre le fonctionnement d'un processus**

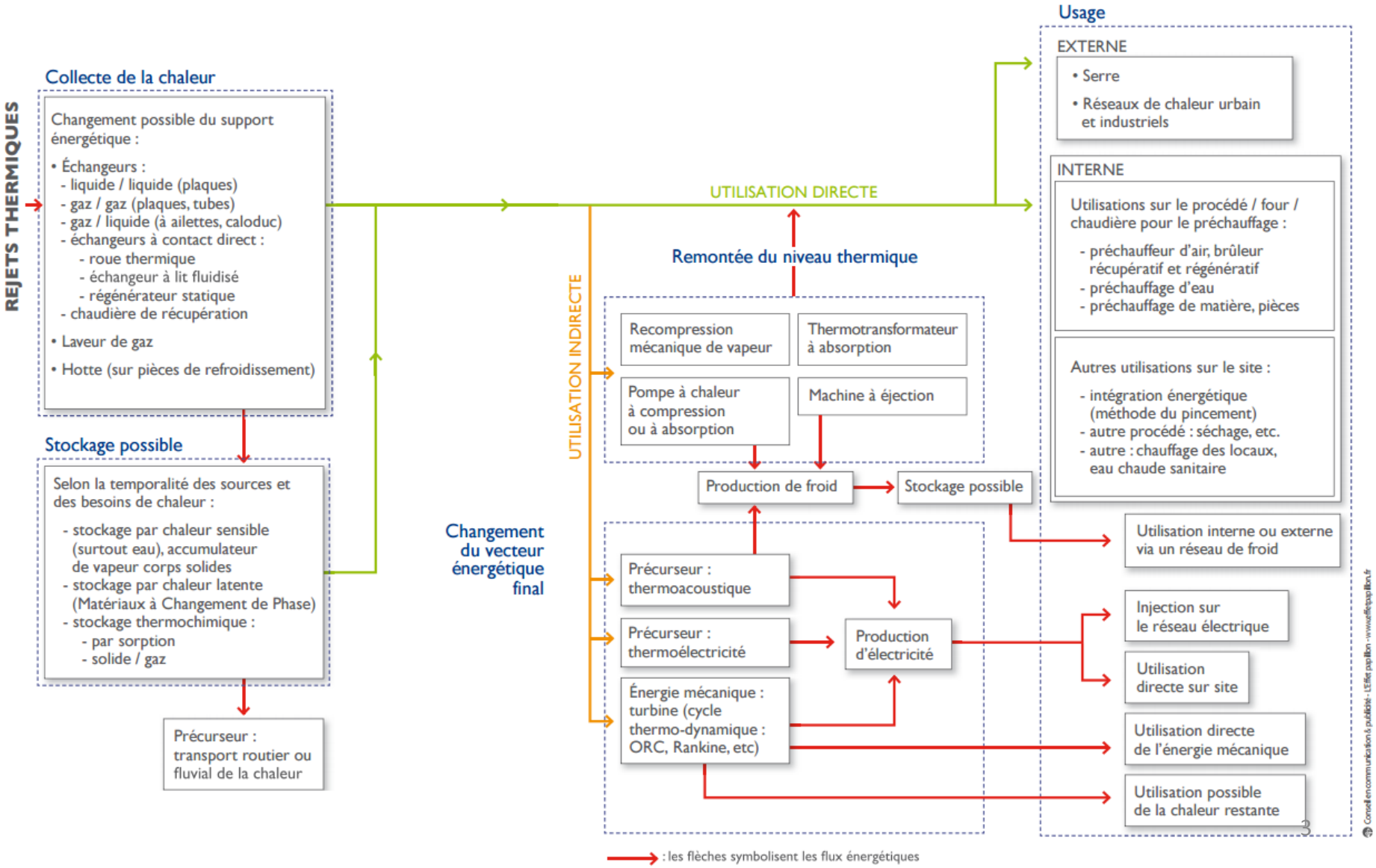
- **Les technologies de valorisation de la chaleur permettent d'une façon générique :**
  - D'échanger de la chaleur (problématique d'intégration dans les procédés)
  - De transformer la chaleur en une forme utile d'énergie (convertir)
    - Pompage de chaleur
    - Conversion en froid
    - Conversion en électricité
  - De stocker et transporter



Systèmes de réduction et valorisation des énergies fatales incluant
- Récupération (échangeurs)
- Transformateurs
- Réseaux
- Stockages

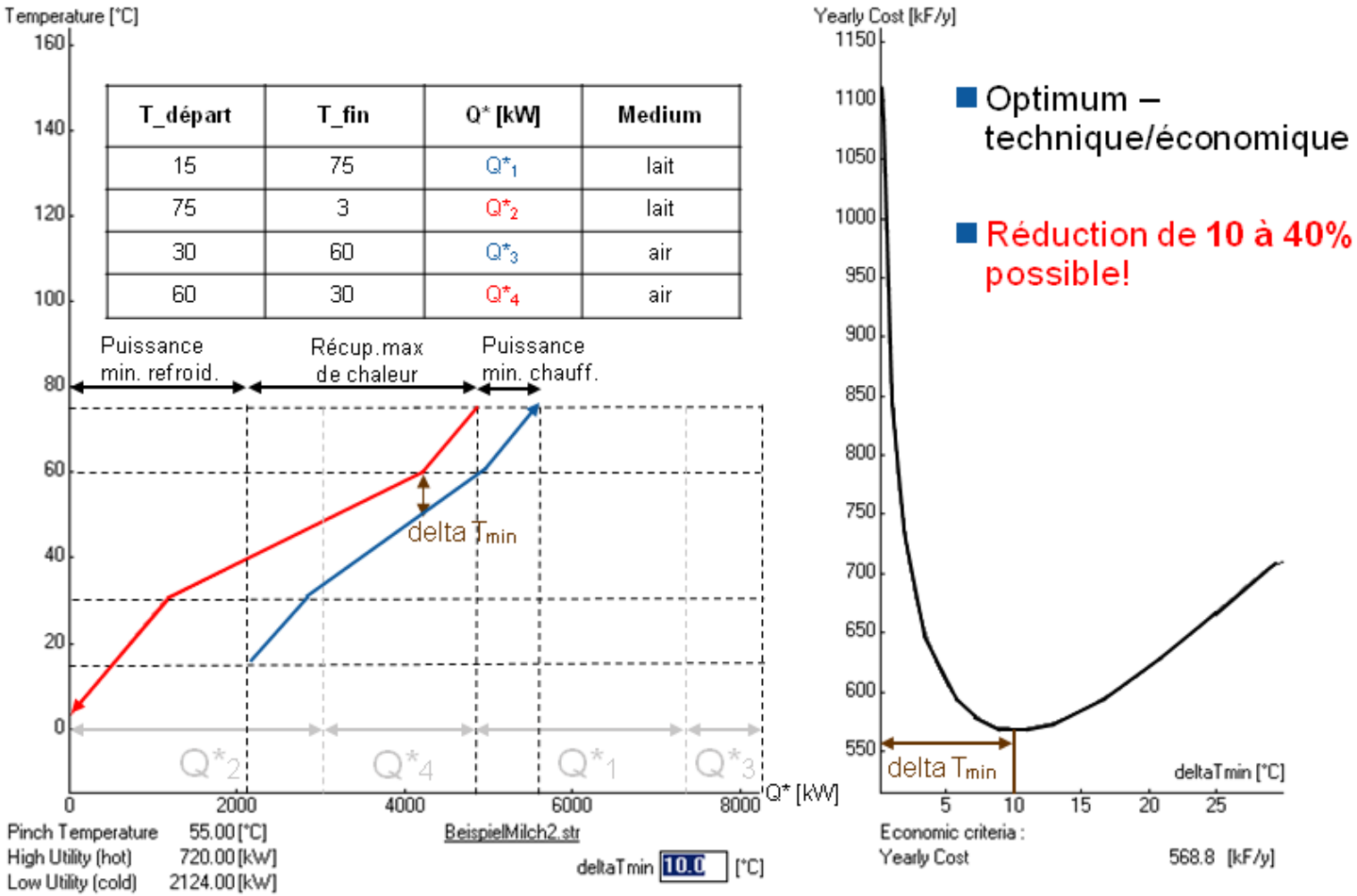
Les solutions technologiques

La chaîne de la valorisation de la chaleur, source ADEME.



Intégration des solutions

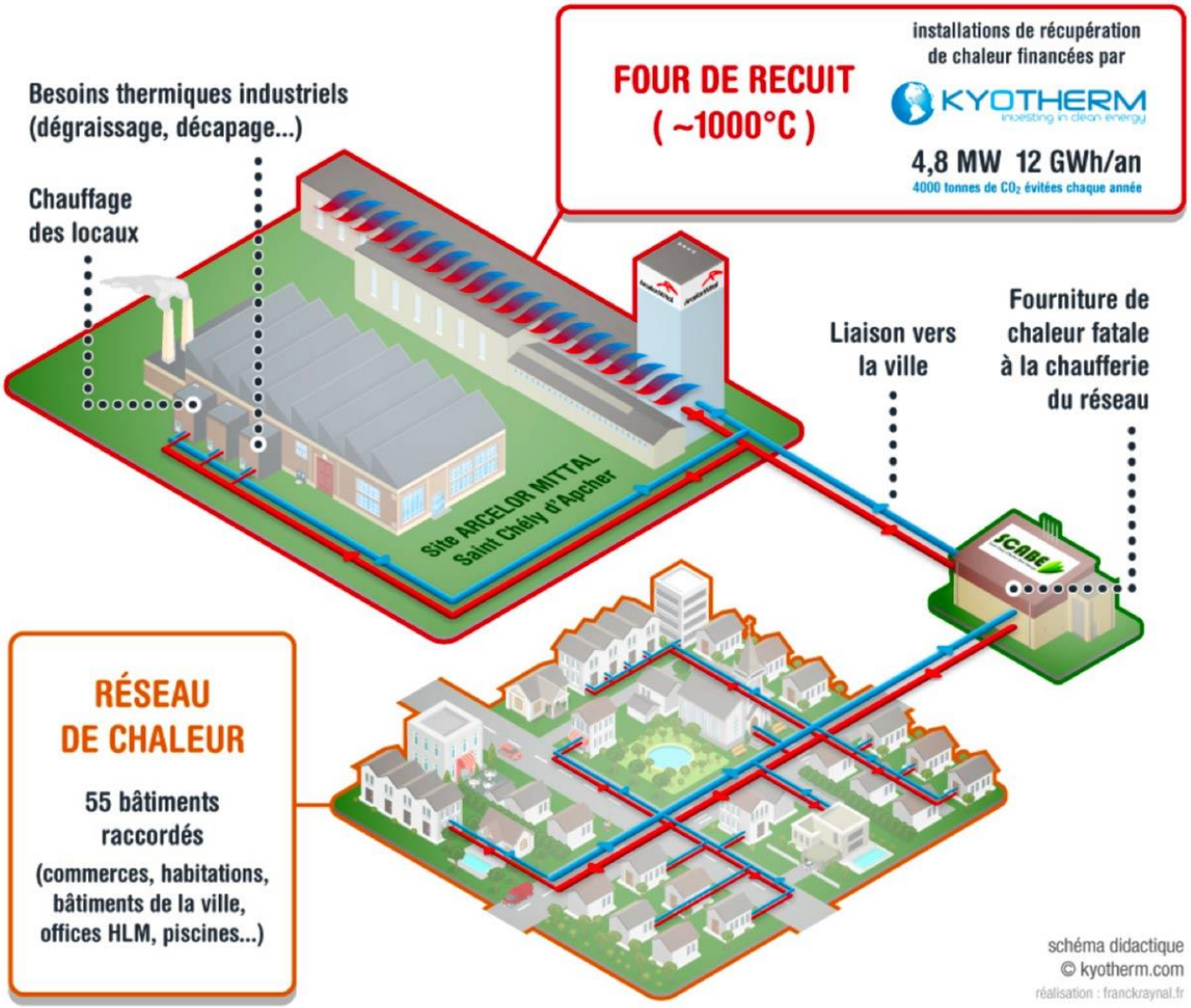
- **L'optimisation technico-économique permet de définir le niveau d'intégration qui présente une rentabilité économique**



T_départ	T_fin	Q* [kW]	Medium
15	75	Q^*_1	lait
75	3	Q^*_2	lait
30	60	Q^*_3	air
60	30	Q^*_4	air

Intégration des solutions

- **L'optimisation technico-économique permet de définir le niveau d'intégration qui présente une rentabilité économique**



Intégration des solutions

- **L'optimisation technico-économique permet de définir le niveau d'intégration qui présente une rentabilité économique**

International Tech Park, Bangalore

A joint venture comprising Singapore's Information Technology Park, Tata Industries and the Karnataka State Government has developed an integrated, self-contained complex of multi-storied offices, residential and recreational facilities supporting over 130 companies with 20 000 employees.

During the planning stages, the concept of heat recovery and cooling was developed and all of the generator sets were equipped with waste heat recovery systems. Heat was recovered from a new 7.4 MW high-temperature water-cooling system, and designed to generate chilled water using VACs.

The total peak power demand for the facilities is 54 MW, with a total system efficiency of 67%.

The success of this project has led another IT park developer in Chennai to use waste heat recovery for cooling.

Les échangeurs de chaleur

- **Les échangeurs sur gaz et liquide**
  - **Les échangeurs à contact direct et les échangeurs à contact indirect**
  - **Problématique de corrosion à prendre en compte**
  - **La compacité et le coût sont des critères déterminants**
  - **Un grand nombre de solutions existe en fonction du fluide et du niveau de température**

- **Les échangeurs sur solide**
  - **Produit solide actuellement refroidi sans valorisation thermique (Brames d'acier, tuiles, clinker, boîtes de conserve)**
  - **Les solutions sont spécifiques à chaque situation**

Les échangeurs sur gaz chauds

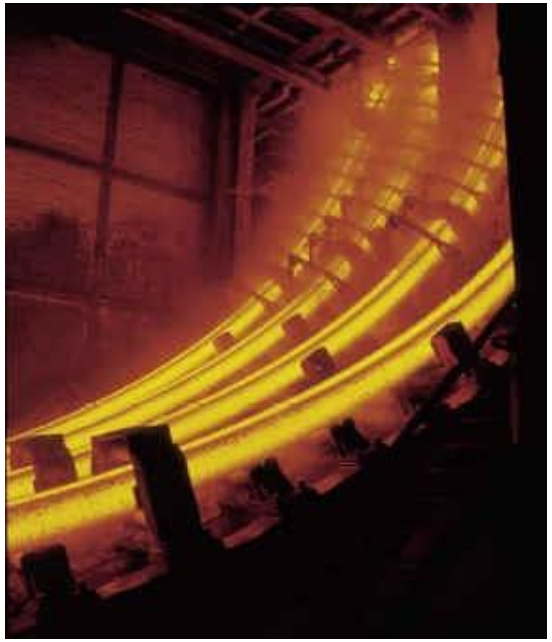
- **Compacité, coûts, résistance mécanique, vieillissement, cyclage thermique.**

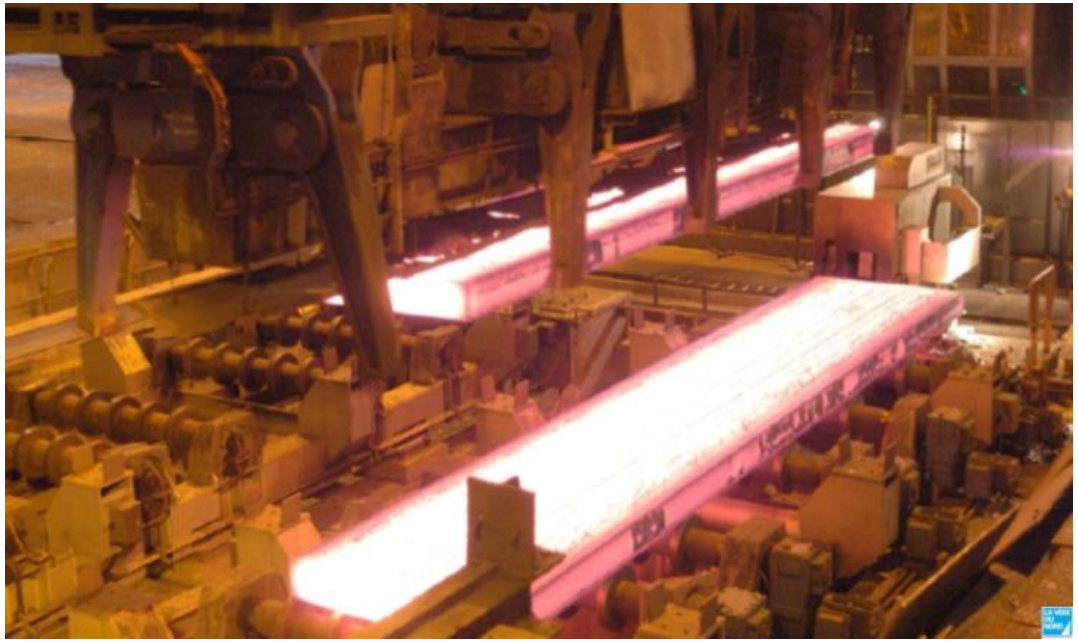
Echangeur de préchauffage d'air sur fumées de fours à gaz

Les échangeurs sur solides

- **Exemple récupération sur des produits solides de la coulée continue**

- La Coulée continue
  - Distribution vers plusieurs brins
  - Vitesse du brin d'acier 1.5-1.7 m/min
  - Rouleaux refroidis à l'eau
  - La poudre est versée pour éviter l'accrochage de l'acier

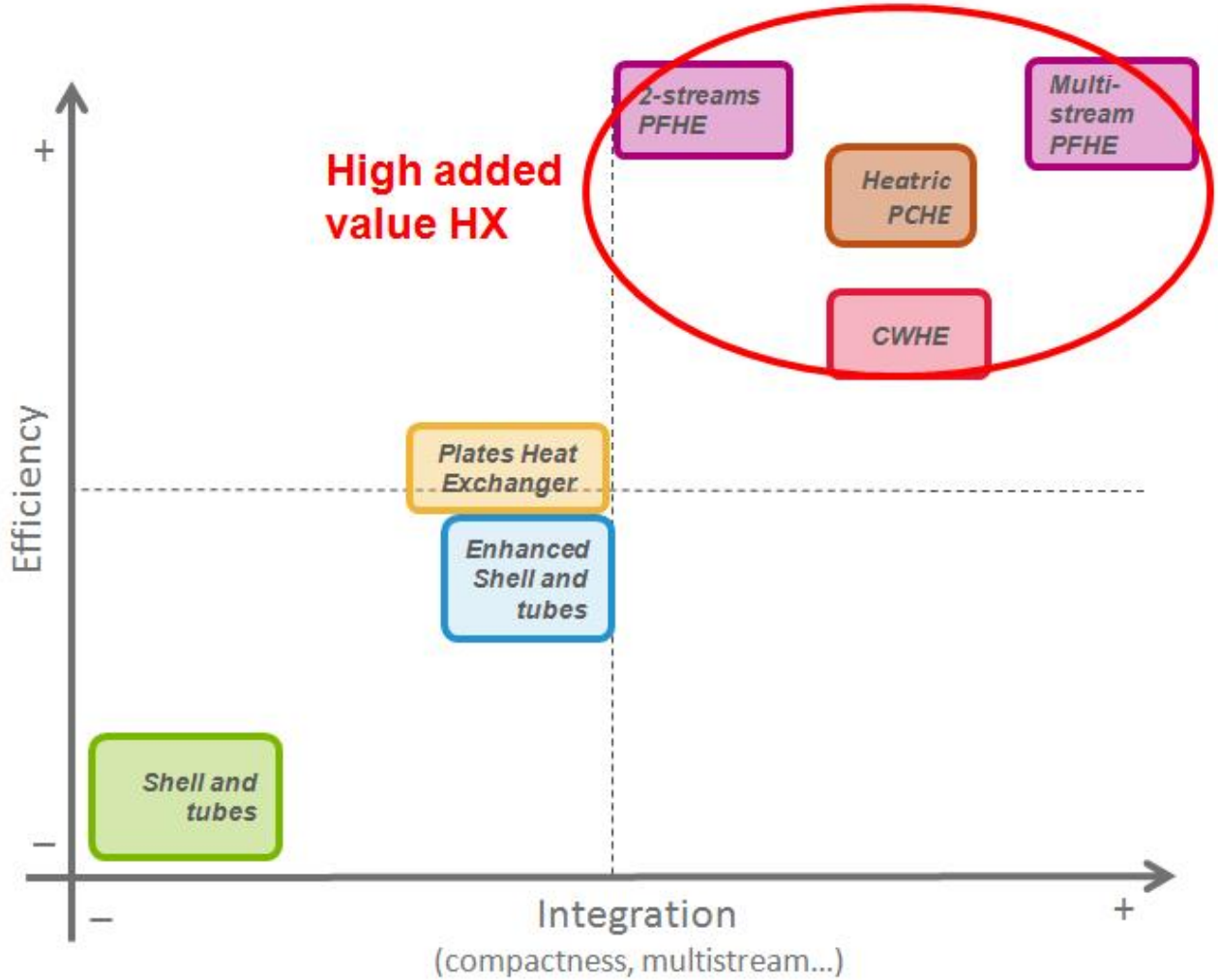




Développement de bouilleur à brame pour la récupération d'énergie contenue dans les brames d'acier

Récupération d'énergie sur liquides et gaz

- **Echangeurs compacts multi-fluides**

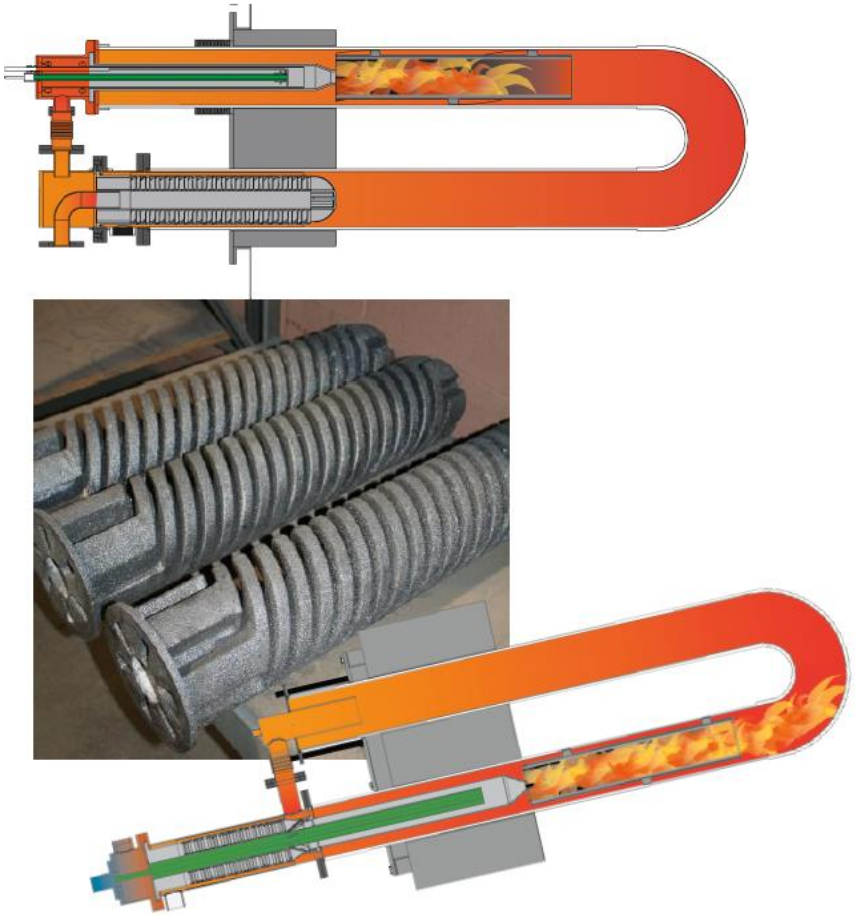


Les échangeurs sur liquides et gaz

- **Récupération sur fumées de brûleur, techniques de fabrication additive**

La fabrication additive ouvre de nouvelles perspectives pour le développement d'échangeurs de chaleur

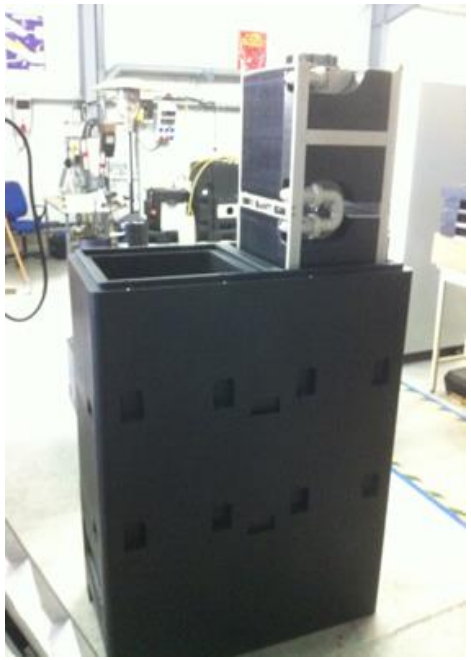
Cette technique permet à la fois le prototypage rapide mais également la réalisation de pièces pour des applications spécifiques



Echangeur en carbure de Silicium haute température

Récupération d'énergie sur fumées humides

- **Echangeur polymère, résistance à la corrosion**



Technologie utilisée initialement pour la concentration des effluents liquides

Les transformateurs

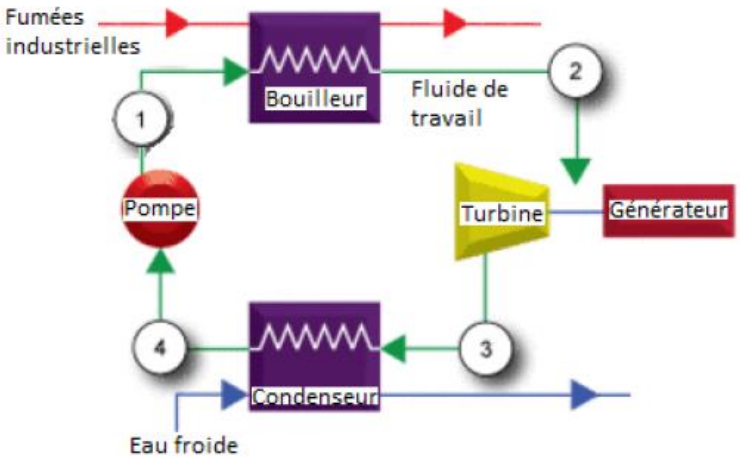
- **Les pompes à chaleur**
  - **Compression mécanique de vapeur**
  - **Les cycles à absorption**
  - **Les cycles à compression vapeur**
  - **Les cycles à éjection**

- **La production de froid**
  - **Les cycles à absorption**
  - **Les cycles à éjection**
  - **Les cycles à turbocompresseur**

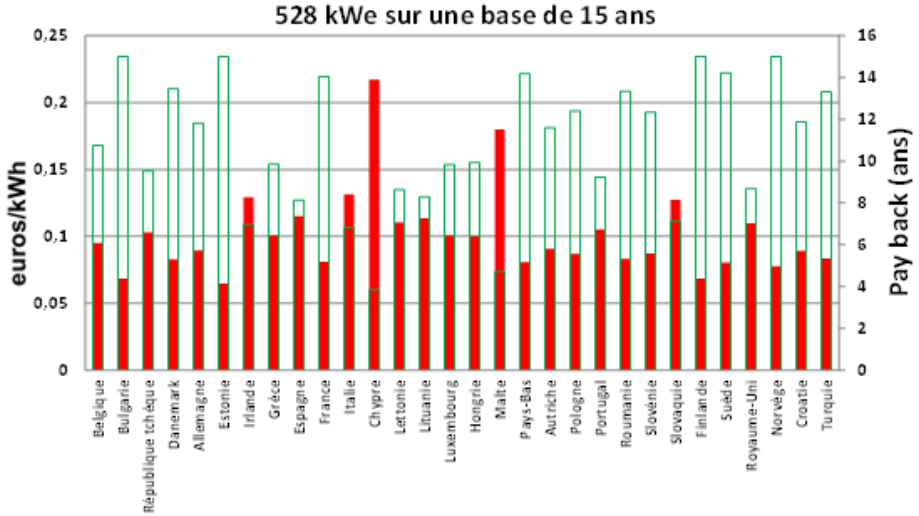
- **La production d'électricité**
  - **Les cycles de Rankine**
  - **Les cycles de Kalina**
  - **Autres technologies (thermoélectricité, Stirling, etc.)**

Transformateurs : Production d'électricité – exemple cycle de Rankine organique

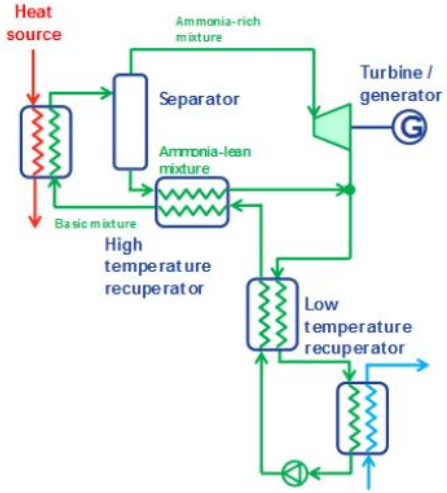
ORC sur fumées basses températures (120 °C)



ORC



TRI de l'ORC avec régénérateur



Kalina Ammonia/Water Cycle [BEC 12]

Transformateurs : Production d'électricité – exemple cycle de Rankine organique

Enertime

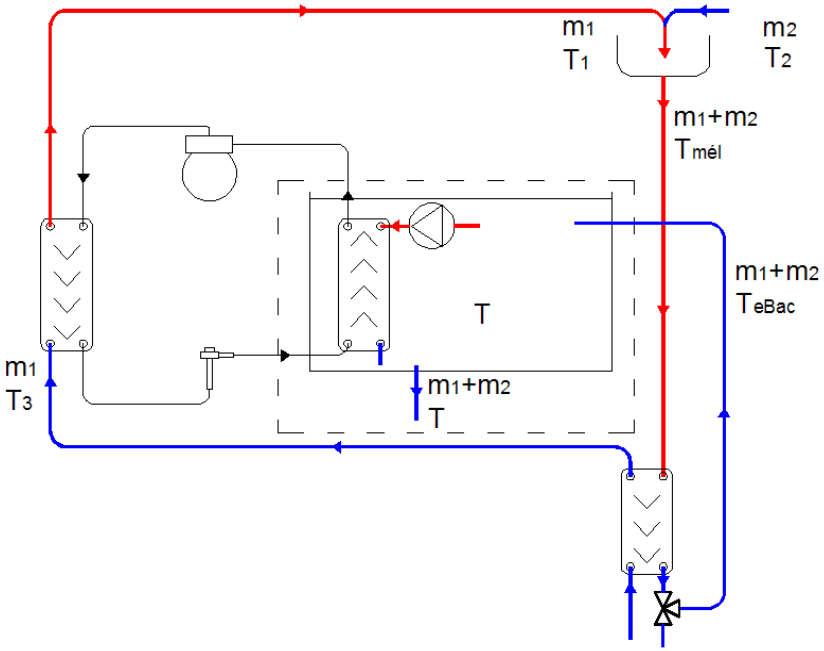
AQylon

Enogia

Les transformateurs : Pompage de chaleur à compression de vapeur.

- **Points à prendre en compte**
  - Placer la récupération d'énergie au plus près de la source
  - Récupérer la chaleur résiduelle
  - Revaloriser grâce à une pompe à chaleur bien intégrée au niveau de température d'utilisation

- **Actions génériques**
  - Analyses énergétiques et exergétiques des opérations
  - Quantification et comparaison sur énergie primaire et émissions de CO_2

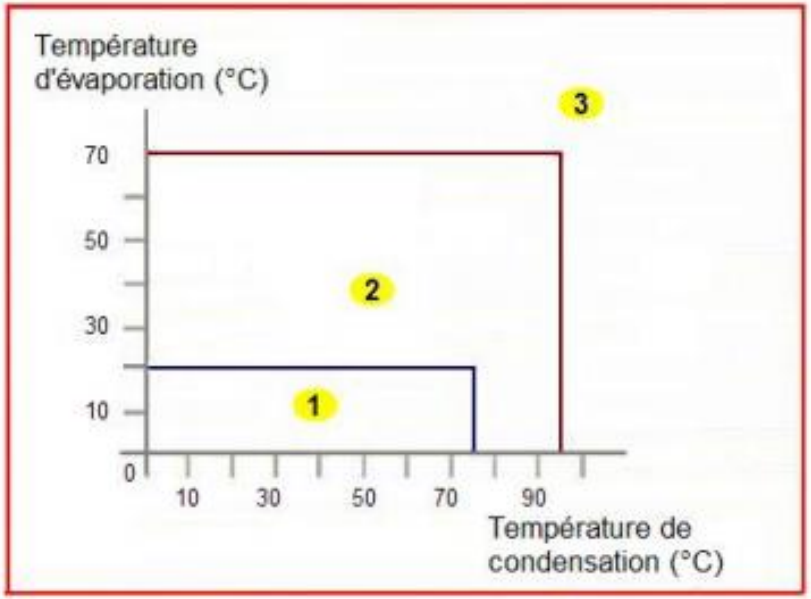


Optimisation de l'emplacement d'une pompe à chaleur

Les transformateurs : Pompage de chaleur à compression de vapeur

- **Technologies disponibles pour des températures allant jusqu'à 90 °C**
- **Développement de nouvelles technologies pour des températures plus élevées**
- **Le COP atteignable est de l'ordre de 5** (DT source / puits de 40 K génère des COP jusqu'à 5)

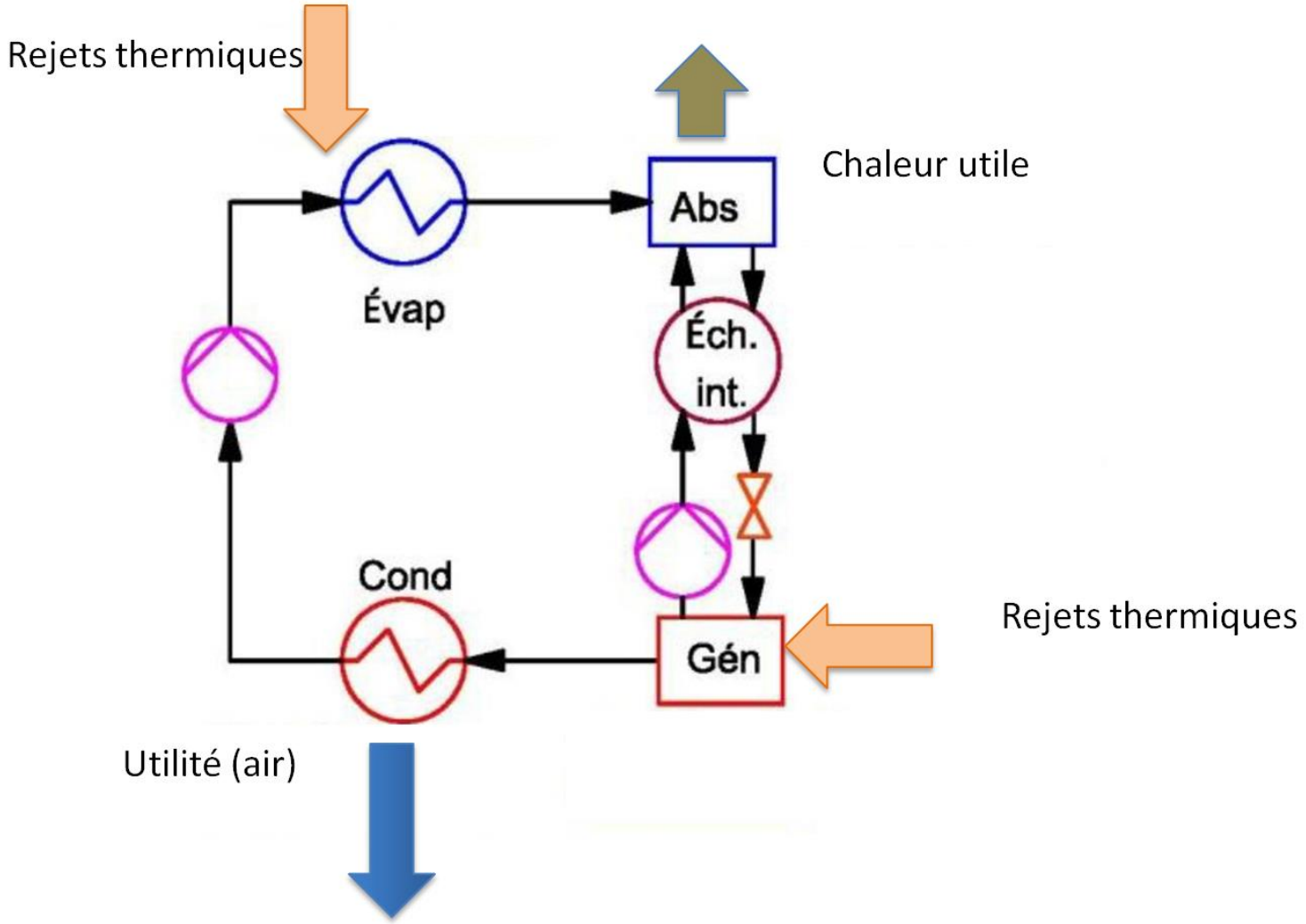
Photo du simulateur expérimental intégrant la pompe à chaleur dans le laboratoire



Zones des limites technologiques des PAC à haute température

Les transformateurs : Absorption heat transformer.

- Un transformateur de chaleur à absorption permet de remonter une partie de la chaleur fatale à des niveaux de température élevés en utilisant des rejets thermiques basses températures



Les transformateurs : Absorption heat transformer

- D'autres transformateurs à absorption sont développés, ces transformateurs permettent de produire du froid et le pompage de chaleur.
- Des cycles à adsorption sont également développés.

THERMAX
Sustainable solutions
Energy & Environment

HEAT TRANSFORMER - COP = 0,4

Transformateurs : Production de froid – exemple de cycle à éjecteur

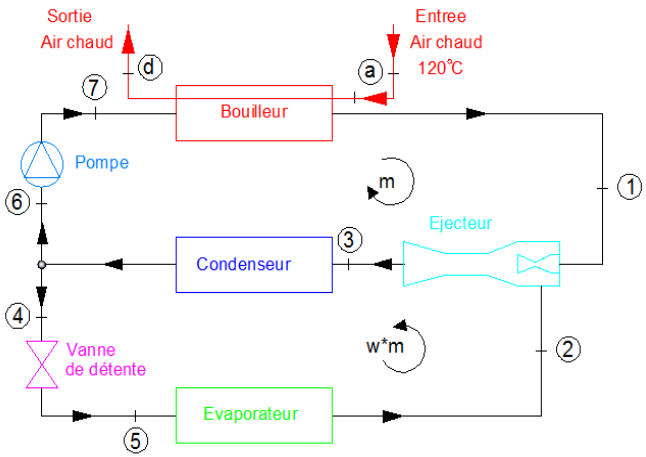


Schéma du cycle de base

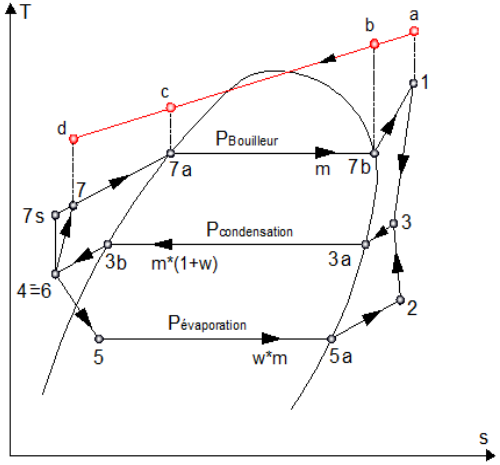


Diagramme T-S

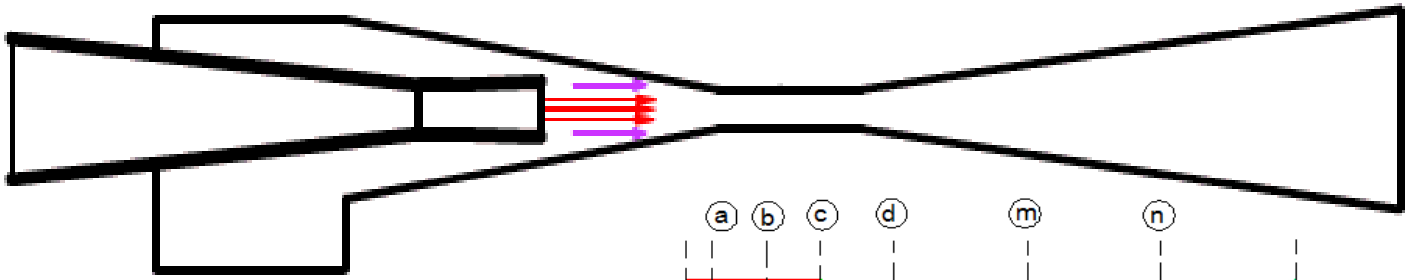
8 paramètres à optimiser/calculer

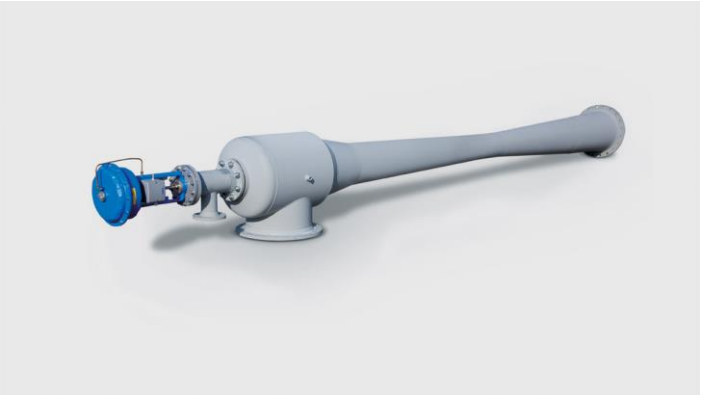
- P mélange, P col
- w , DP
- Puissance condenseur
- Rendement de mélange ($\eta_m = f(d_{col}, d_{ch\ cste})$)
- Pincement condenseur
- Puissance bu bouilleur

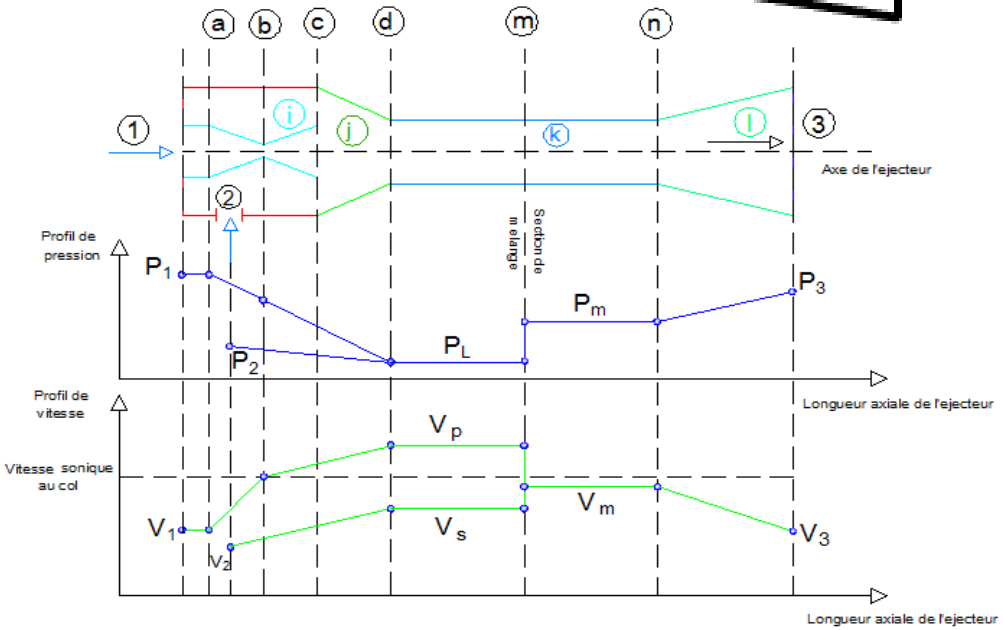
Résultats

- $d_{col\ buse}$, $D_{sec\ cste}$, D_{ent}, D_{sort}
- Q_{evap}, COP

Transformateurs : Production de froid – exemple de cycle à éjecteur





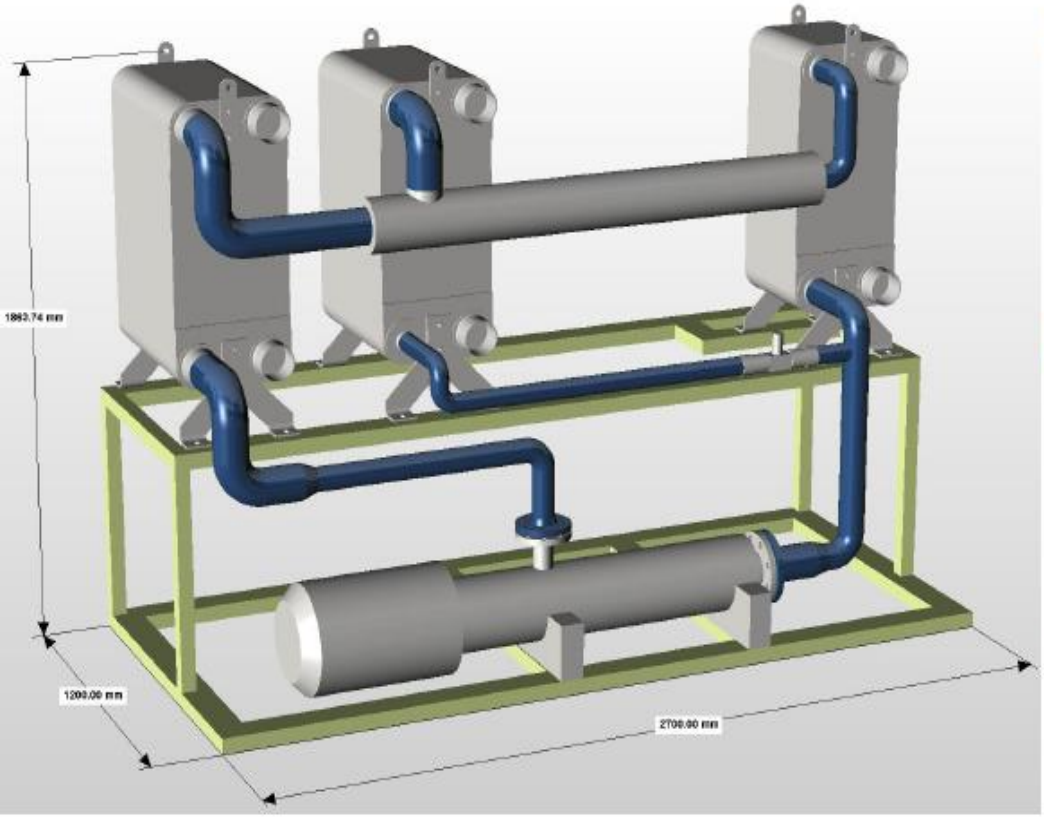


4 parties

i : Buse (tuyère) pour le fluide primaire.
j : Chambre de mélange à pression constante.
k : Chambre de mélange à section constante.
l : Diffuseur

- $w = m_2/m_1 = 1 / MER$
- $DP = P_2 – P_L$

Résultat de l'étude



Caractéristiques machine:

- Valorisation: 1107kW (à 100°C)
- Puissance frigorifique: 293kW (à 5°C)
- COP: 0.266
- COP électrique: 13.33

Performance financière:

- Investissement: 101 061€
- Gain NRJ annuel*: 28 116€
- ROI: 3.59ans

*hypothèses d'étude:

Production:	7000h
Groupe froid:	
Puissance frigorifique:	600kW
COP:	3.5
Prix de l'électricité:	65€/MWh

Conclusions et perspectives

- **Réalisation de l'inventaires précis des disponibilités et des besoins thermiques**
- **Développement des technologies à faible coût, standardisation des équipements**
- **Développement de modes d'investissement innovants,**
- **Garantir les performances et minimiser les risques liés aux arrêts des usines**
- **Incitation/ réglementation et contraintes sur les émissions de polluants**

Développer de nouveaux matériaux à faible coût et qui résistent à la corrosion
Réduire drastiquement le coût des technologies
Développer des technologies de récupération facilement nettoyables
Développer des systèmes de dépollution à sec à faible coût
Développer des nouveaux procédés permettant d'éviter les polluants dans les fumées
Développer et démontrer des nouvelles technologies de valorisation de la chaleur à faible niveau de température
Développer des nouvelles générations d'échangeurs de chaleur (intensification)
Réduire les coûts associés à la spécificité des solutions (développer des solutions génériques)
Développer les échangeurs de chaleur sur sources non conventionnelles (solides, etc.)