



Les méthodes et technologies de valorisation de la chaleur

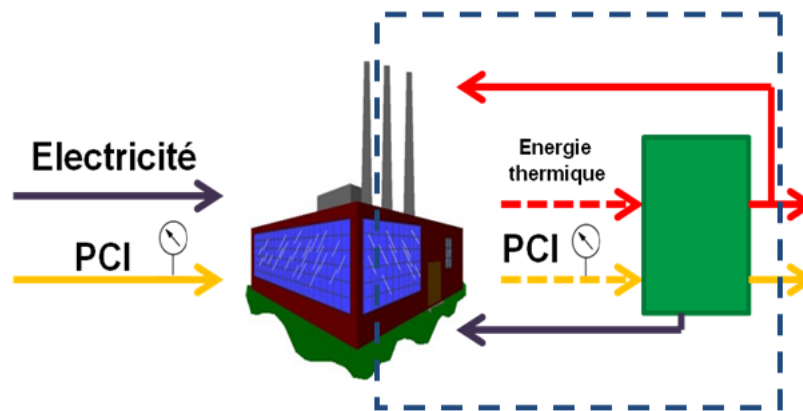
Maroun NEMER

Dijon le 04 novembre 2021.

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

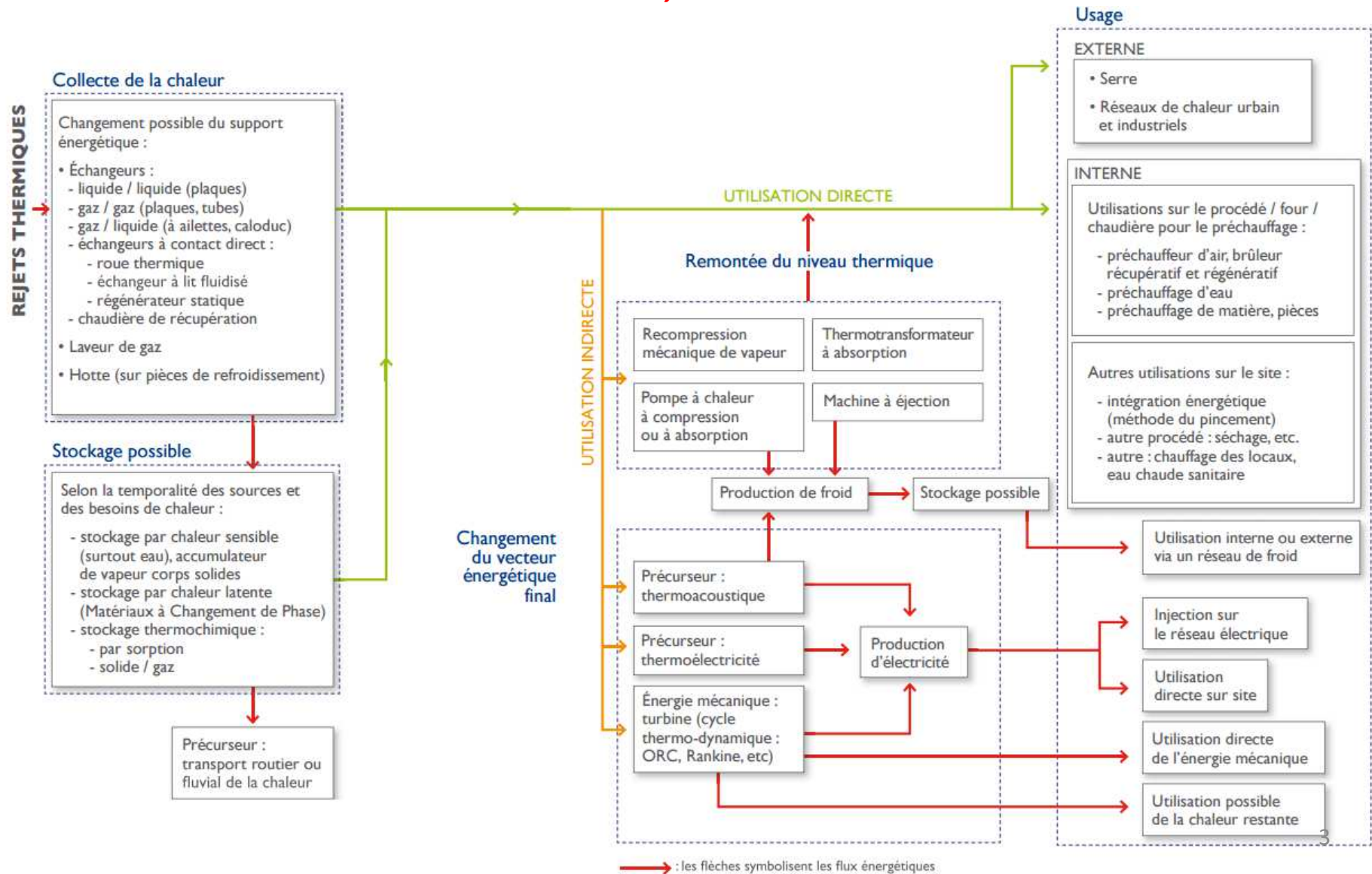


Systèmes de réduction et valorisation des énergies fatales incluant

- Récupération (échangeurs)
- Transformateurs
- Réseaux
- Stockages

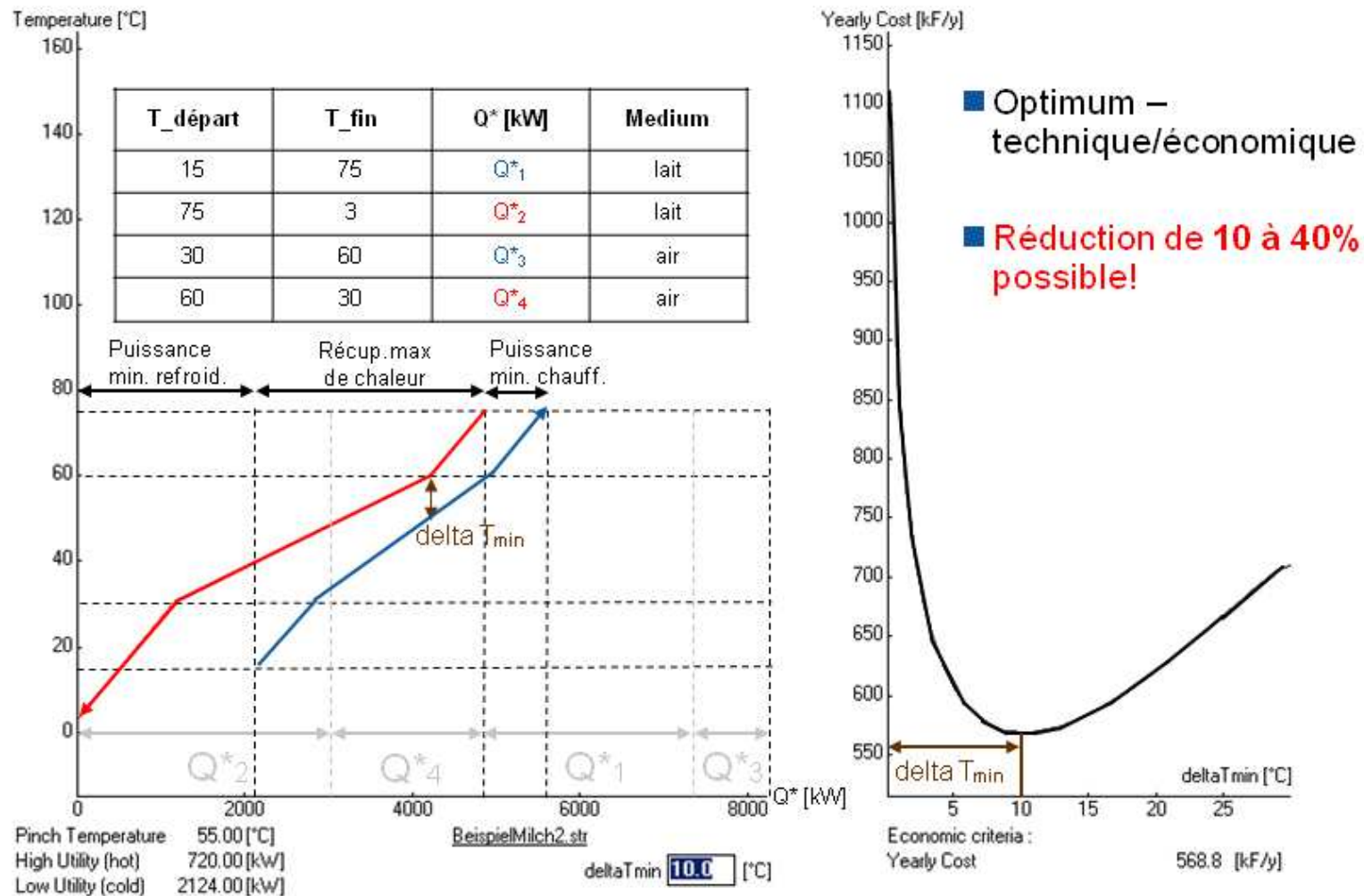
Les solutions technologiques

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



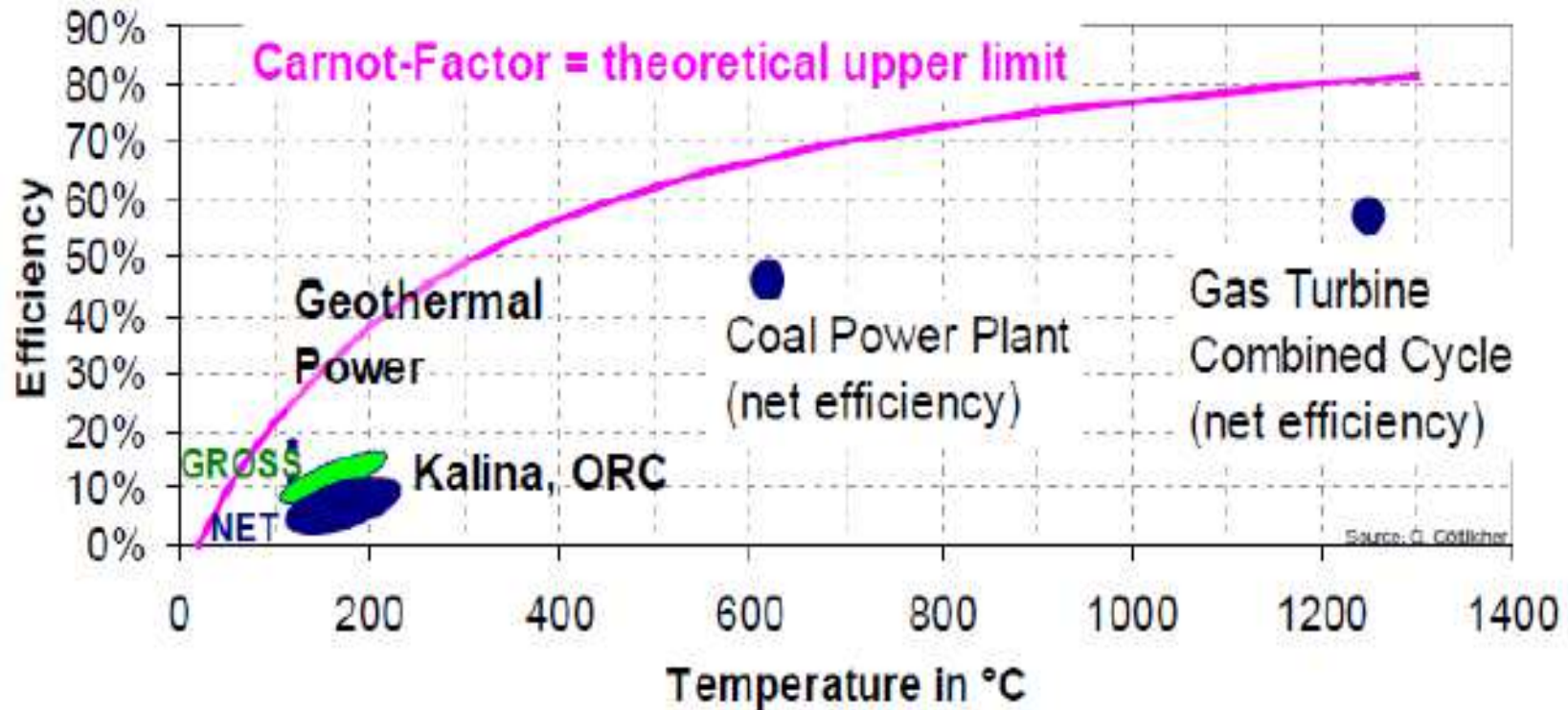
Intégration des solutions

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



Réalités physiques

- A basses températures le rendement de Carnot est très sensible à la variation de la température



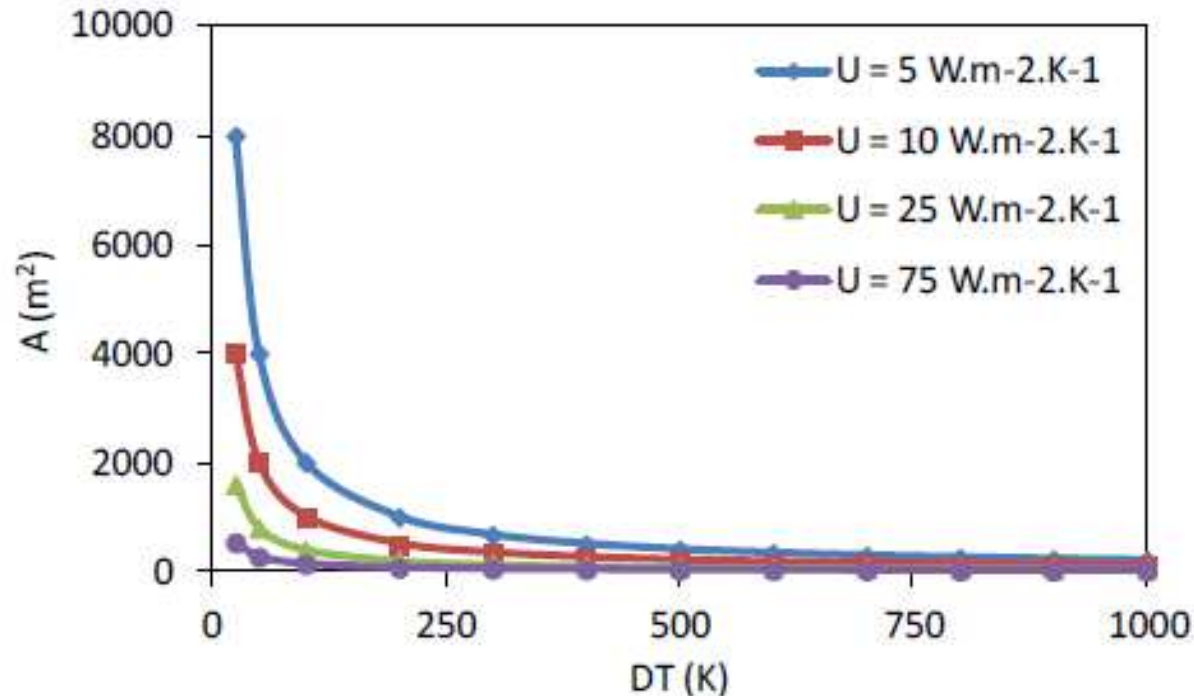
State-of-the-art efficiencies and Carnot factors of power generation cycles/processes vs. process temperatures [FP7 07]

Les machines réelles ont des rendements exergetiques de l'ordre de 40 %

Réalités physiques

- Les surfaces d'échange varient d'une façon exponentielle en fonction de la différence de température

$$Q = U.A.\Delta T$$

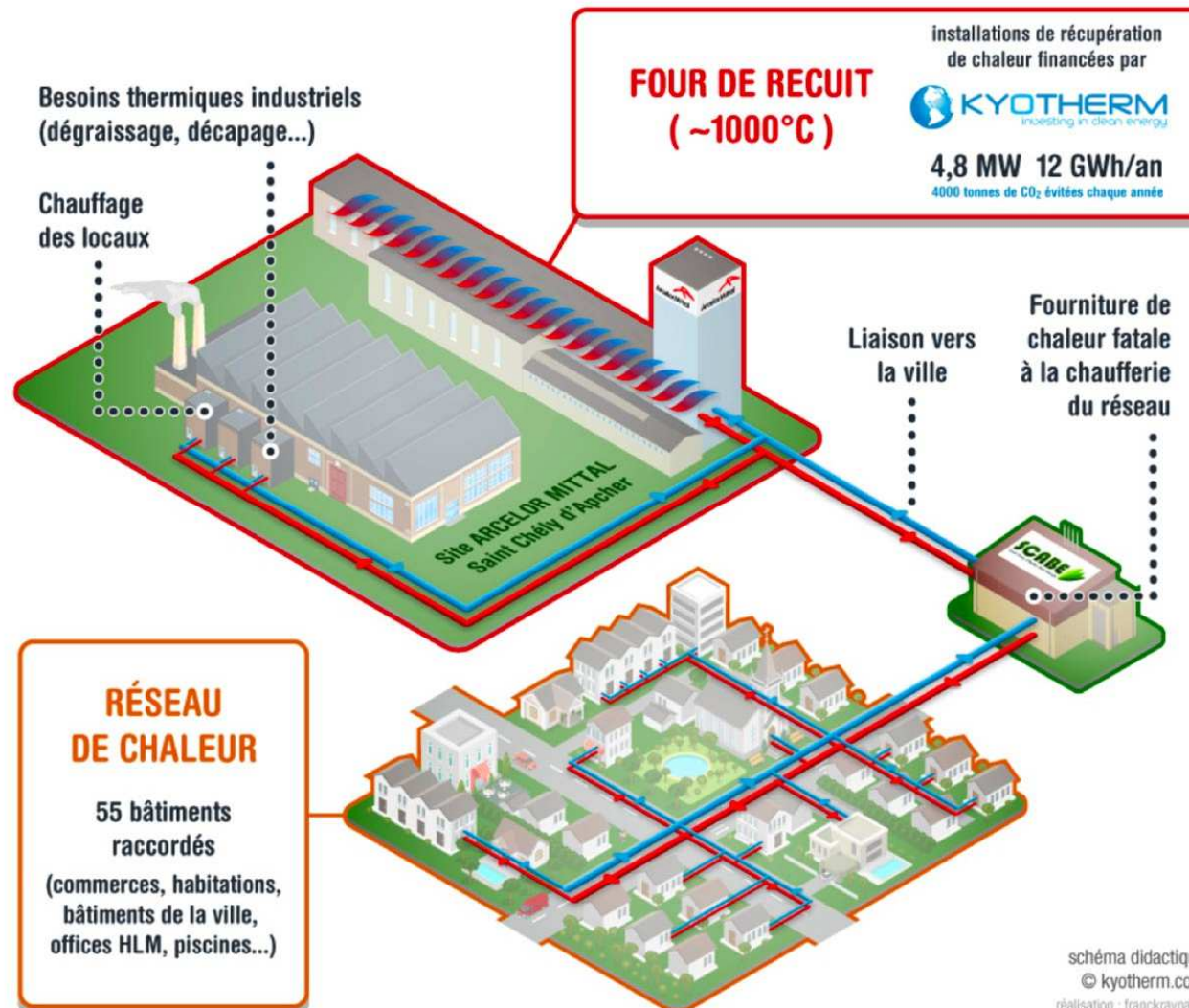


The Influence of source and sink temperature (ΔT)
on required heat-exchanger area ($Q = 1 \text{ MW}_{\text{th}}$)

La consommation des auxiliaires est un point clé dans le calcul des performances des systèmes de valorisation de la chaleur

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

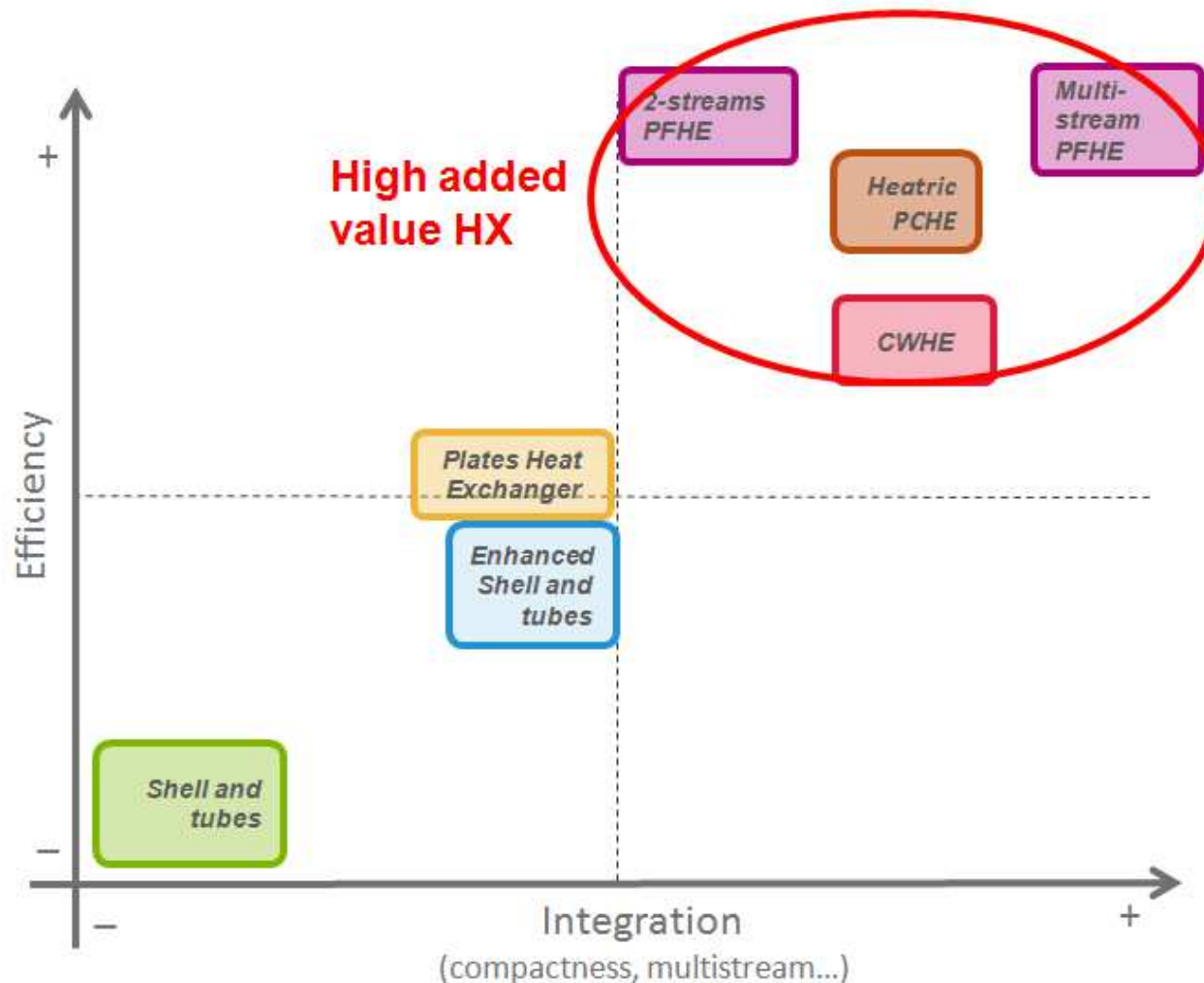
- **Exemple récupération sur des produits solides de la coulée continue**
- La Coulée continue
 - Distribution vers plusieurs brins
 - Vitesse du brin d'acier 1.5-1.7 m/min
 - Rouleaux refroidis à l'eau
 - La poudre est versée pour éviter l'accrochage de l'acier



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**

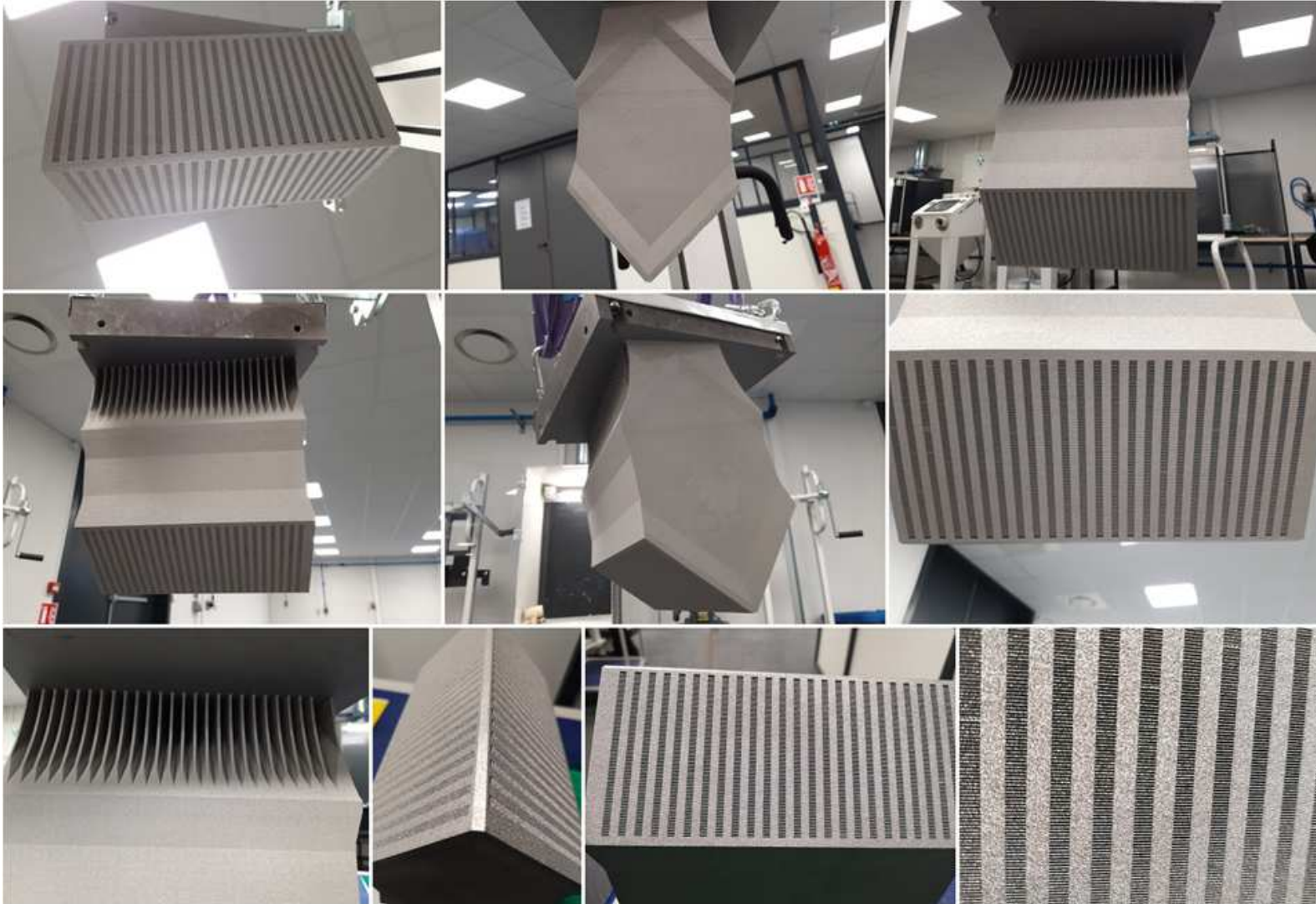
La fabrication additive ouvre de nouvelles perspectives pour le développement d'échangeurs de chaleur

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



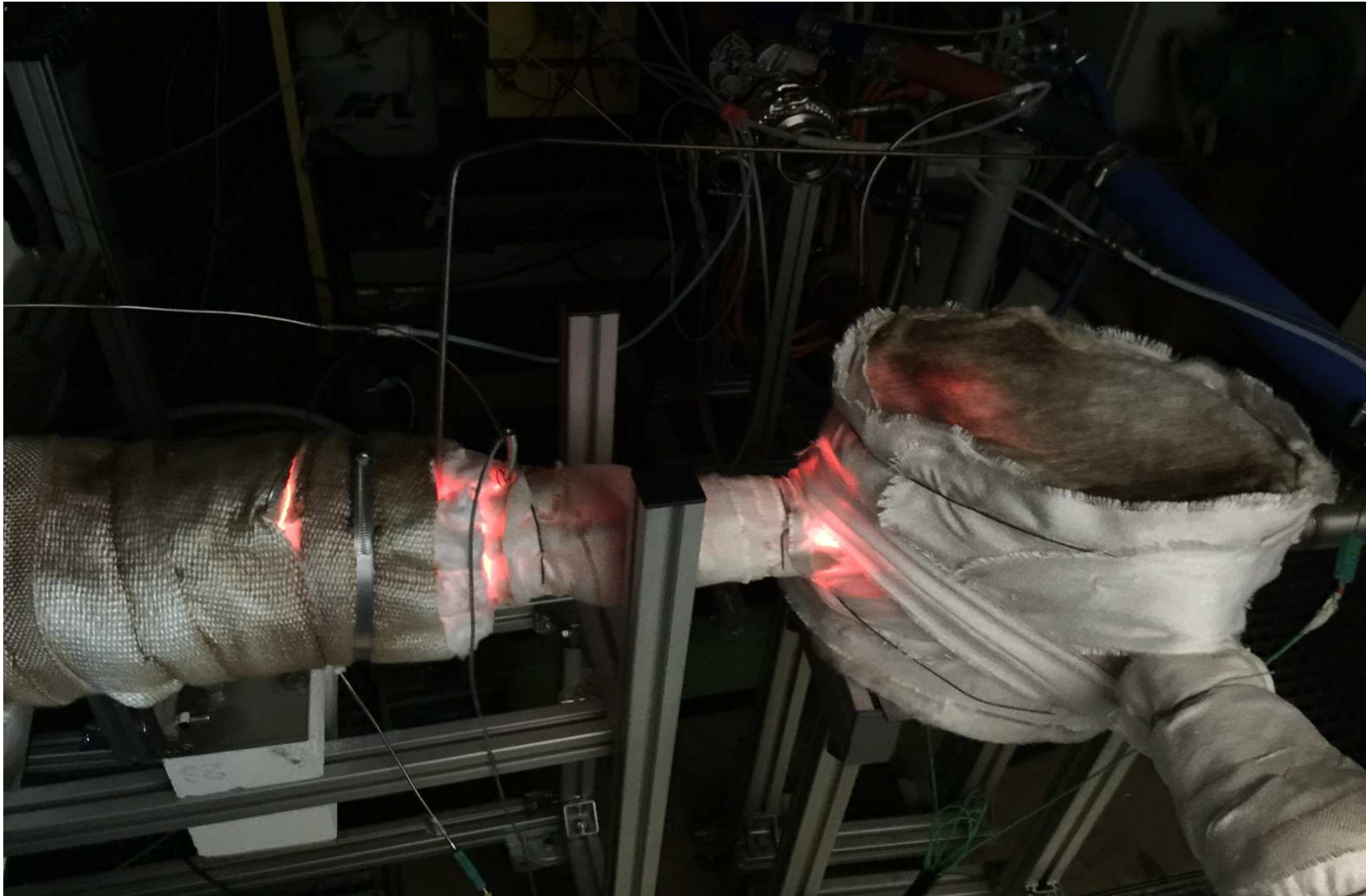
Echangeur en carbure de Silicium haute température

Les échangeurs sur liquides et gaz



Echangeur en acier inoxydable

Les échangeurs sur liquides et gaz



Echangeur en acier inoxydable

Récupération d'énergie sur fumées humides

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



Technologie utilisée initialement pour la concentration des effluents liquides

Récupération de chaleur et dépollution

- **Echangeur de chaleur à contact direct.**



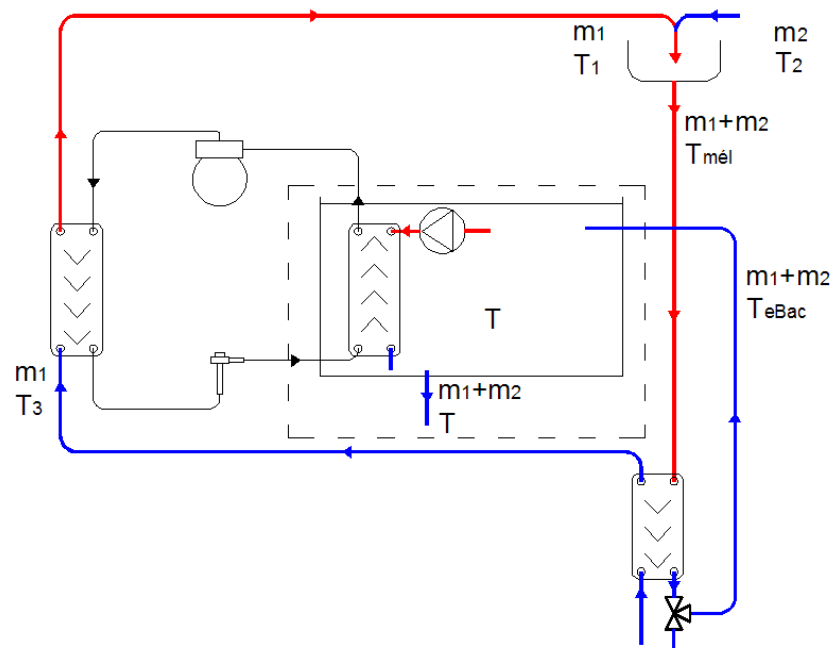
L'entreprise Terraotherme a conçu un procédé de transfert thermique où l'air se mélange à l'eau.

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

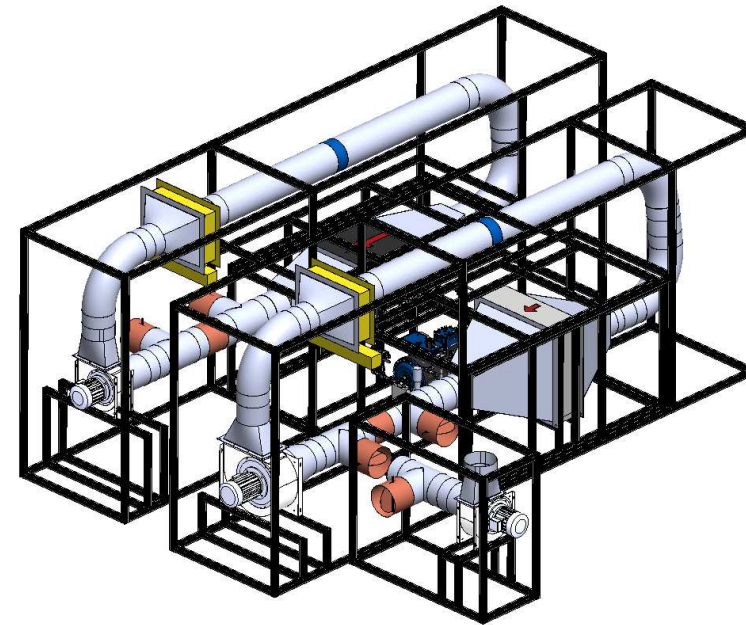
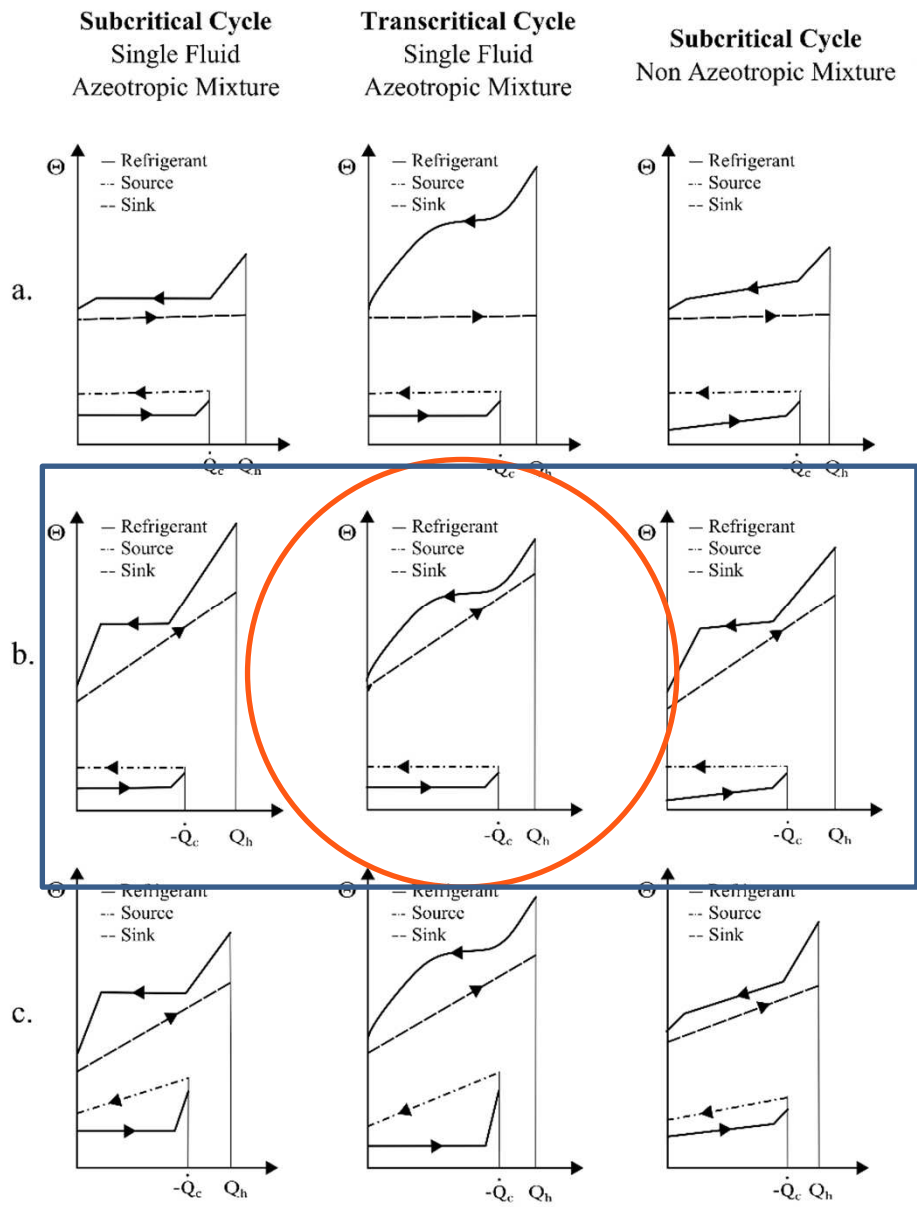
Les transformateurs : Pompage de chaleur à compression de vapeur.

- **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 exergetiques des opérations
 - Quantification et comparaison sur énergie primaire et émissions de CO₂



Optimisation de l'emplacement d'une pompe à chaleur

PAC Haute Température Transcritique – Récupération d'énergie pour les procédés de séchage.



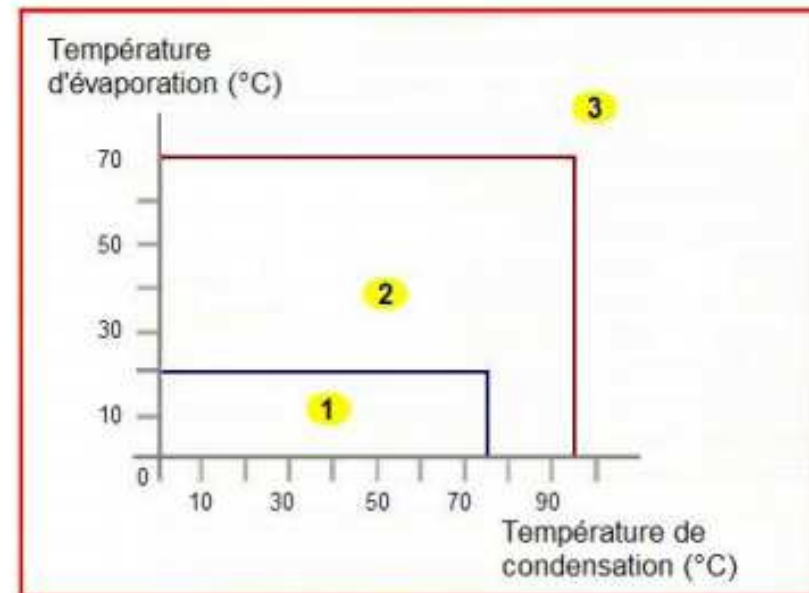
□ For these operating conditions (45°C HS, Hot air 60-120°C), R32 is the best fluid in a TC-HP in terms of energy performance

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)



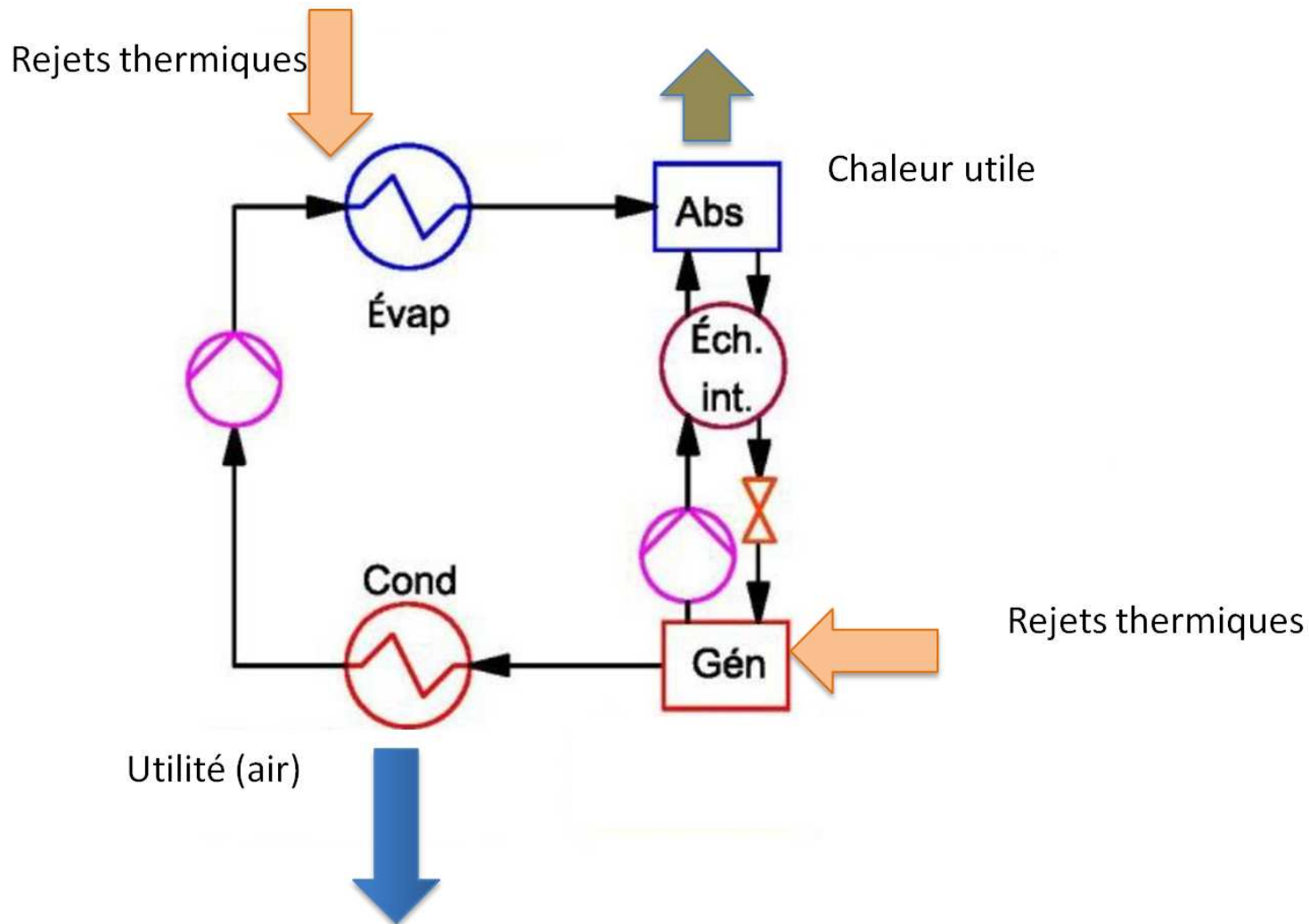
Photo du simulateur expérimental intégrant la pompe à chaleur dans le laboratoire



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.



HEAT TRANSFORMER - COP = 0,4

Transformateurs : Production de froid – exemple de cycle à éjecteur

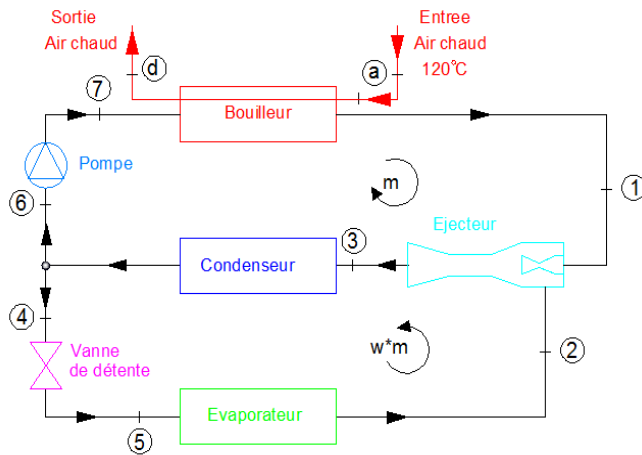


Schéma du cycle de base

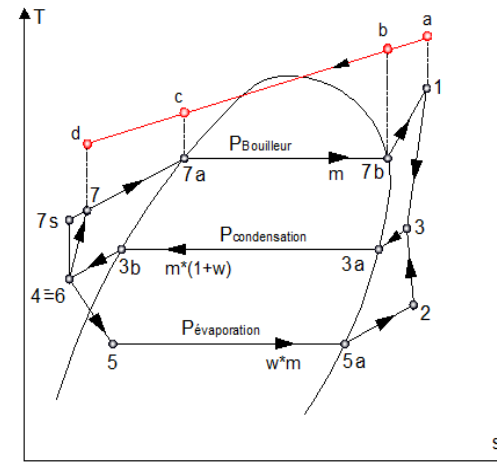


Diagramme T-S

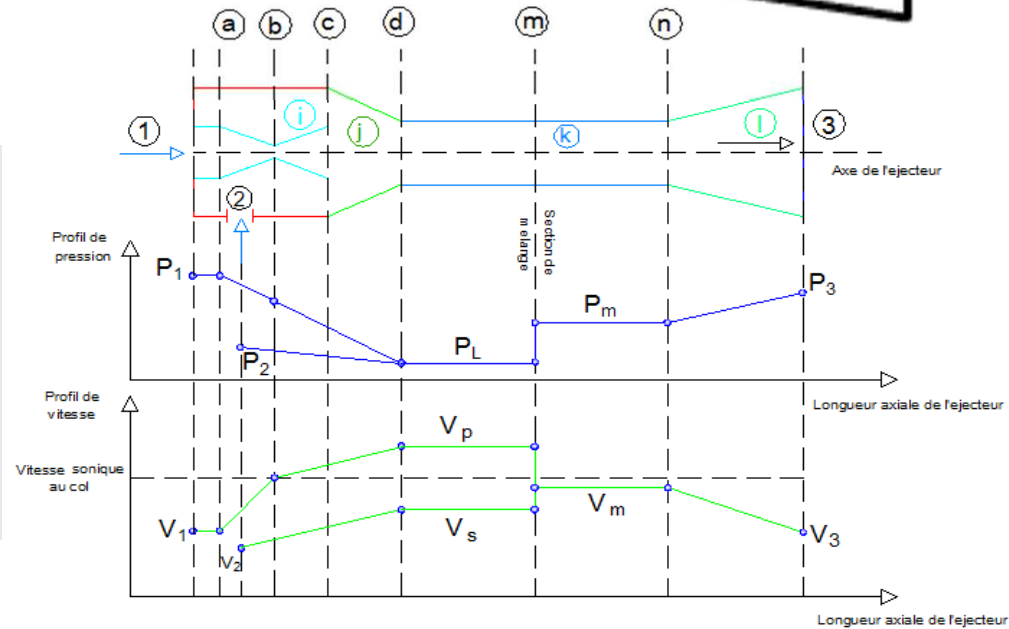
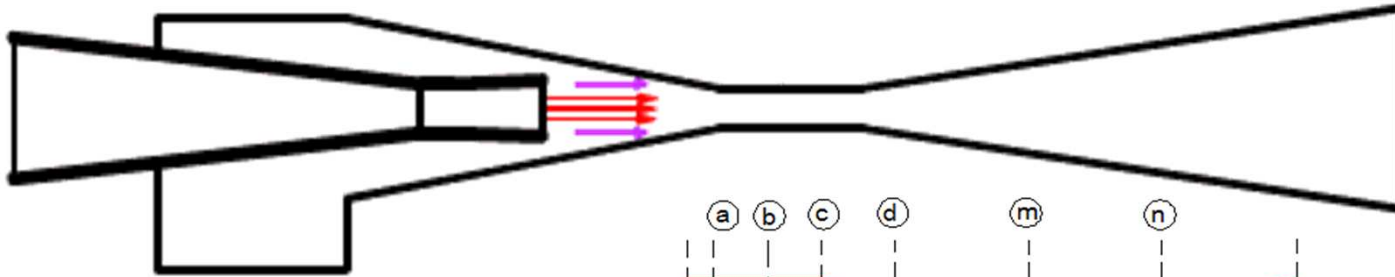
8 paramètres à optimiser/calculer

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

Résultats

- $d_{col\ base}$, $D_{sec\ cste}$, 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.

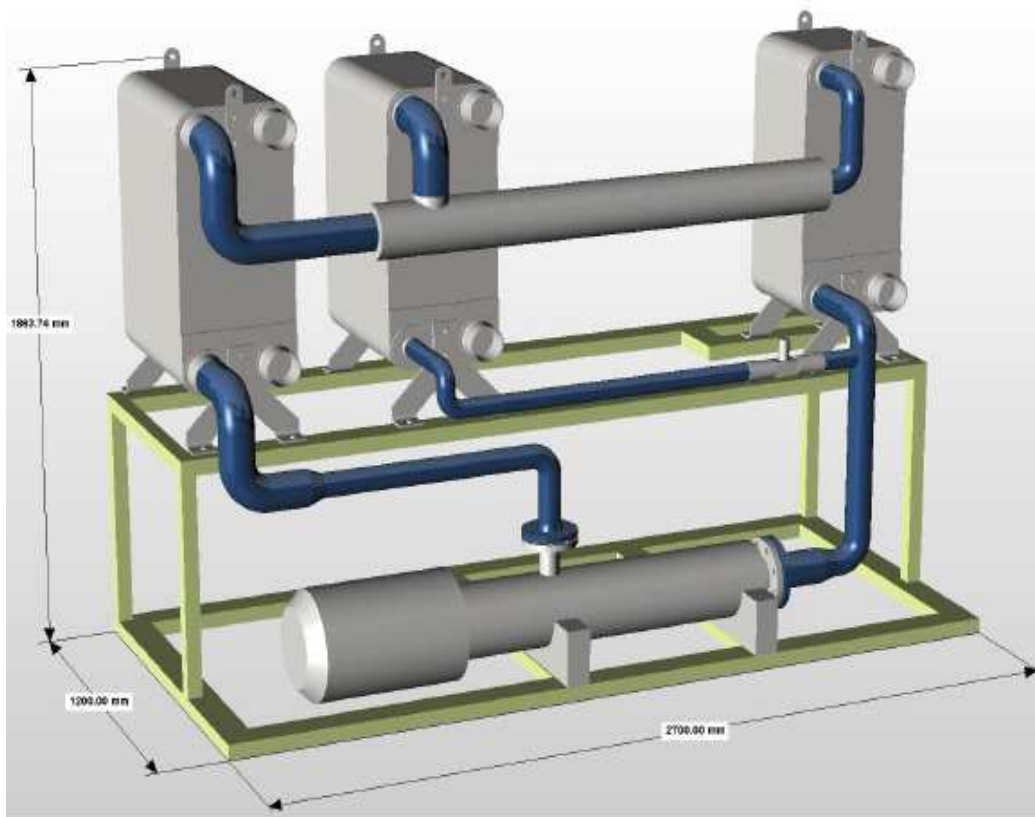
k : Chambre de mélange à section constante.

l : Diffuseur

- $w = m_2/m_1 = 1 / \text{MER}$

- $DP = P_2 - P_L$

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

Transformateurs : Production de froid – exemple de cycle à éjecteur



Validation de la technologie en cours, premiers résultats d'essais conformes aux simulations.

Transformateurs : Production de froid – exemple de machine thermoacoustique

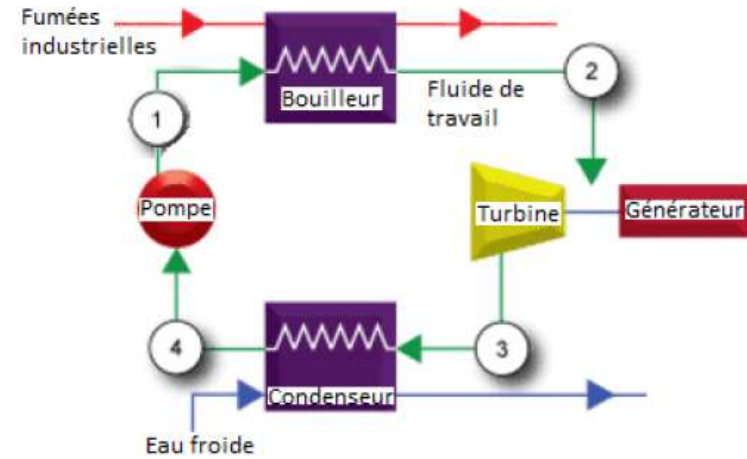


Equium développe une technologie de production de froid (chaleur fatale de 200 à 400 °C) avec une technologie thermoacoustique (COP de l'ordre de 0,4).

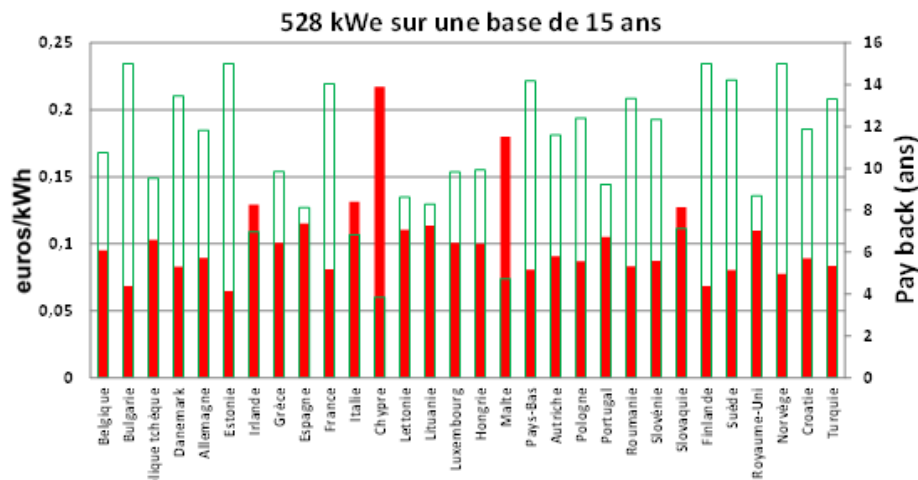
Transformateurs : Production d'électricité – exemple cycle de Rankine organique



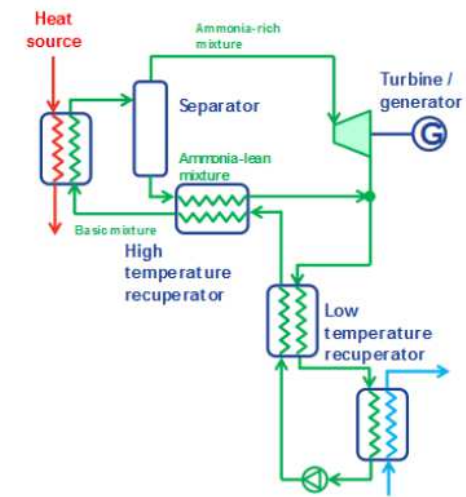
ORC sur fumées basses températures (120 °C)



ORC



TRI de l'ORC avec régénérateur



Kalina Ammonia/Water Cycle [BEC 12]

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

Enertime



AQylon



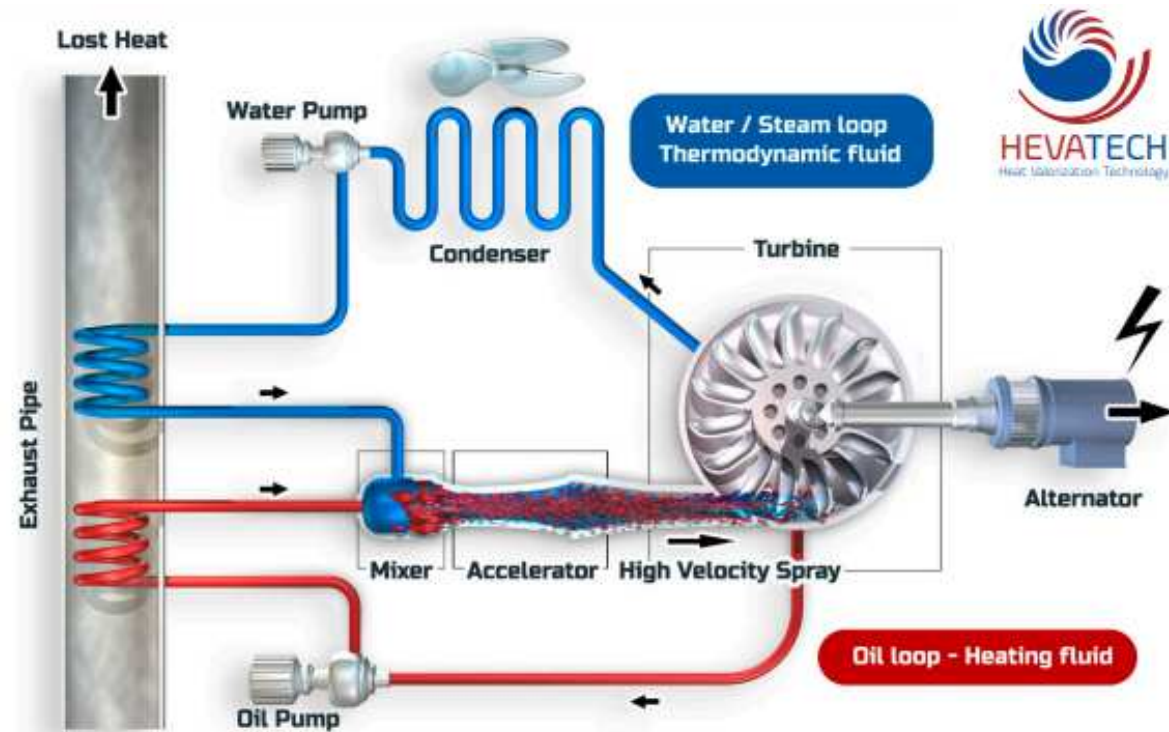
Enogia



Transformateurs : Production d'électricité – exemple cycle TurboSol

Un concept original basé sur :

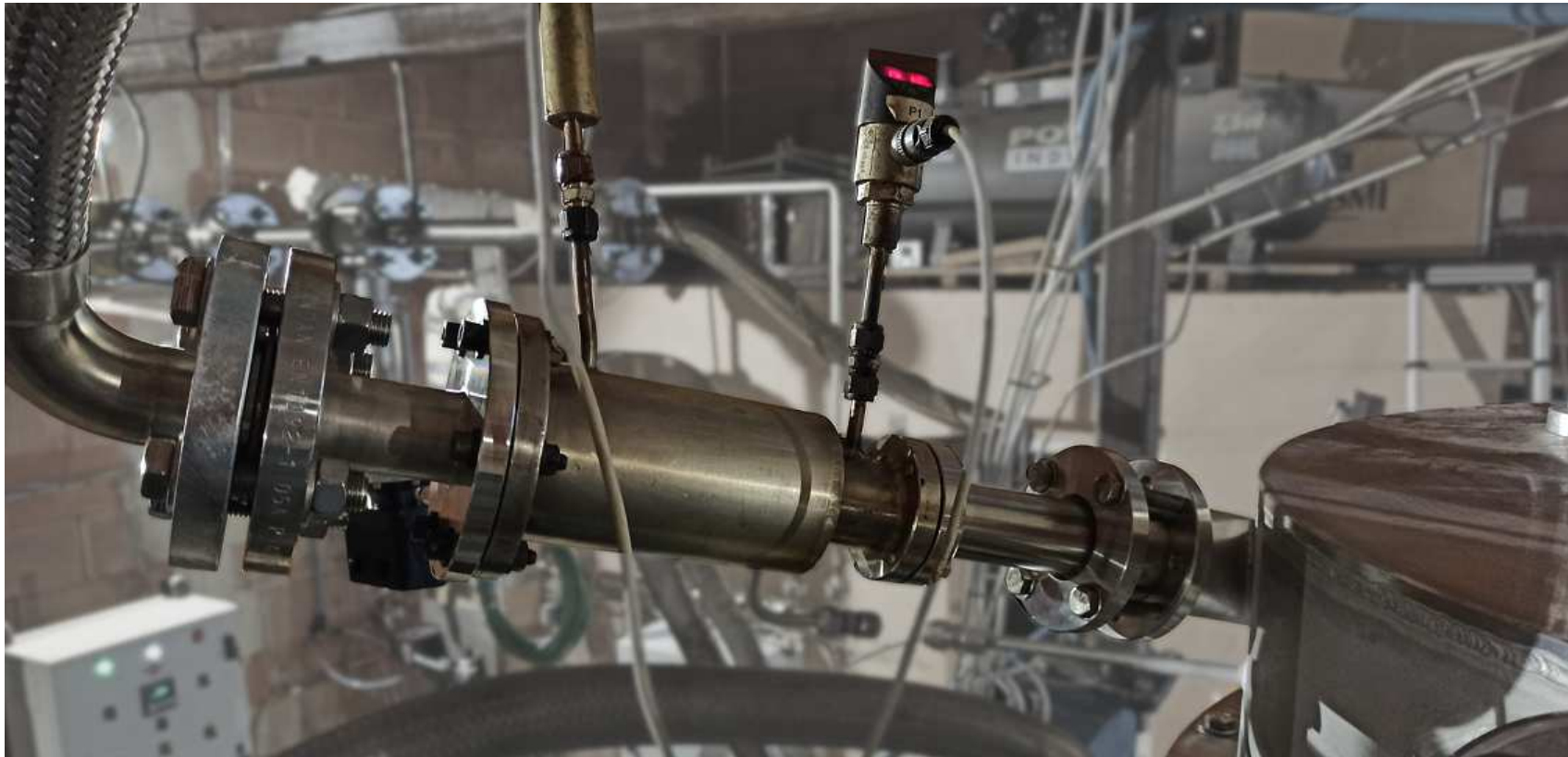
- Une double boucle de fluides caloporteur et thermodynamique (huile et eau/vapeur)
- Un injecteur/accélérateur diphasique (accélération de l'huile par la détente isotherme de la vapeur)
- Une turbine à action "type PELTON" (petit diamètre de roue, basse pression et faible vitesse de rotation)



L'huile cède de la **chaleur** à l'eau

L'eau cède de la **quantité de mouvement** à l'huile

Transformateurs : Production d'électricité – exemple cycle TurboSol



Les dernières avancées de HEVATECH concernent le développement d'un injecteur de plus forte puissance (25 kW) le but est d'arriver à une turbine de plusieurs centaines de kW.

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.)