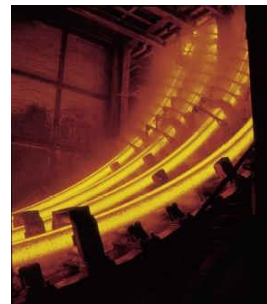


■ L'EFFICACITE ENERGETIQUE dans l'Industrie : Place de la Valorisation de la CHALEUR.

L'USINE DU FUTUR Technologies, enjeux et applications.

Maroun NEMER, maroun.nemer@mines-paristech.fr

Mardi 26 et Mercredi 27 Janvier 2016



○ Développement durable, transition écologique et transition énergétique

➤ Engager la transition écologique, c'est évoluer vers un nouveau modèle économique et social, un modèle qui renouvelle nos façons de consommer, de produire, de travailler, de vivre ensemble. La transition écologique va au-delà d'un simple verdissement de notre modèle de société actuel. Elle repose sur deux volets essentiels et indissociables :

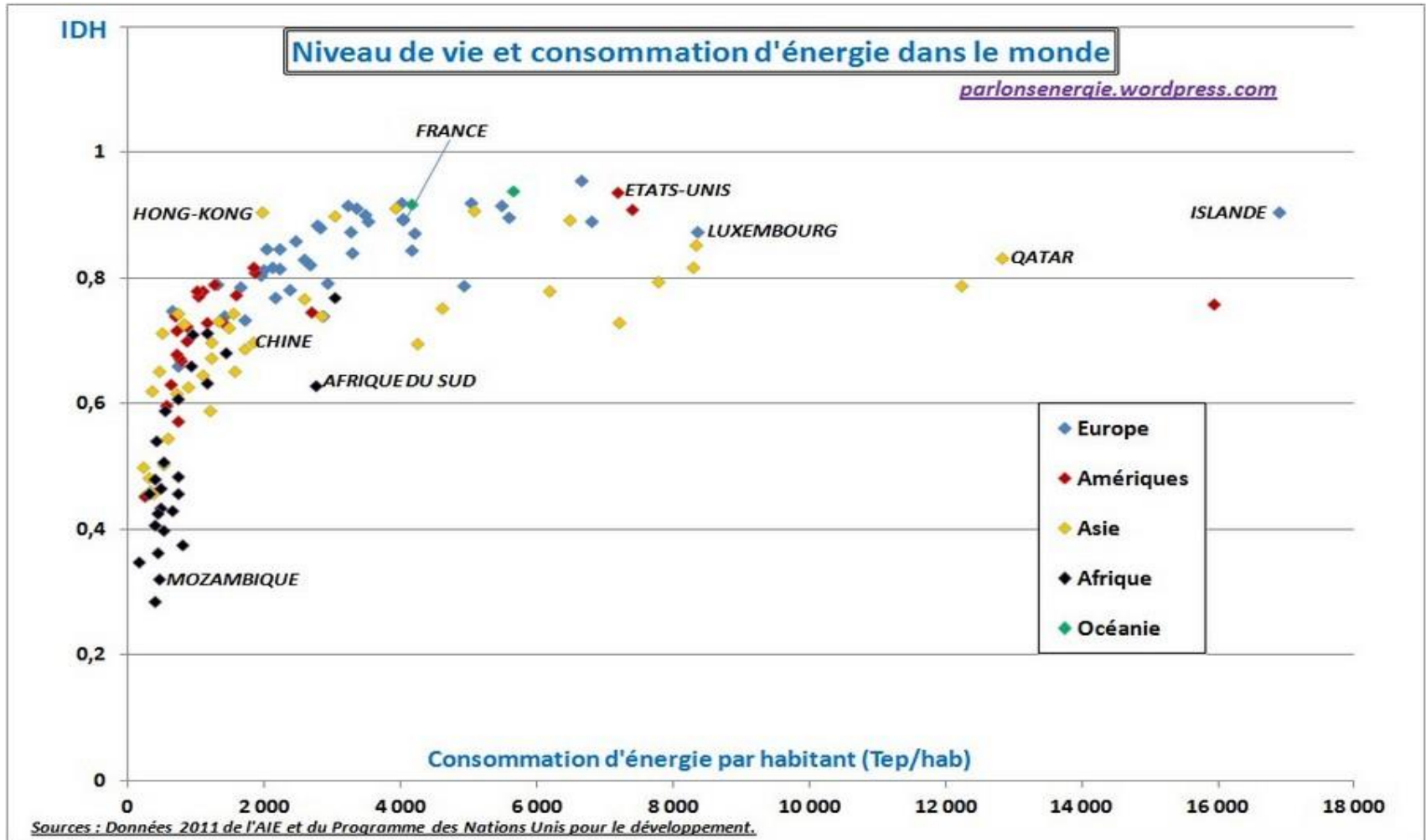
- **L'innovation sociale et sociétale**, avec une rénovation de nos modes de pensée et de notre socle culturel : la transition écologique suppose de faire émerger de nouvelles gouvernances, de nouvelles manières d'agir, de produire, de nouvelles pratiques de consommation plus sobres et qui soient construites et partagées par l'ensemble des acteurs pour constituer progressivement de nouvelles références collectives.
- **L'innovation technologique et la recherche et développement** en matière d'organisation et de procédés industriels : il est nécessaire de travailler sur toutes les modalités permettant d'économiser les ressources naturelles et de réduire les impacts environnementaux. C'est en particulier le cas pour des secteurs caractérisés par un faible rythme de renouvellement des infrastructures et des équipements (production d'énergies, bâtiment, transports, etc.), pour lesquels les choix des prochaines années seront déterminants pour infléchir la trajectoire de long terme

○ Développement durable, transition écologique et transition énergétique

➤ Lorsque l'on parle de développement durable et de transition écologique, il y a convergence. L'objectif de la transition écologique est de permettre le développement durable/soutenable.

- Le **développement durable** fait référence à un développement de nos sociétés que la planète peut supporter sur le long terme : aujourd'hui, nos modèles de croissance ne sont pas tenables au vu des ressources et limites de la planète, il faut donc passer par une transition pour refonder nos modèles et aboutir à un développement durable.
- La **transition énergétique** constitue l'une des composantes de la transition écologique. Elle traduit le passage d'une société fondée sur la consommation abondante d'énergies fossiles à une société plus sobre en énergie et faiblement carbonée. Un tel changement de modèle énergétique suppose de travailler à la fois sur les économies d'énergie et sur l'évolution du mix énergétique, avec une part accrue des énergies renouvelables.

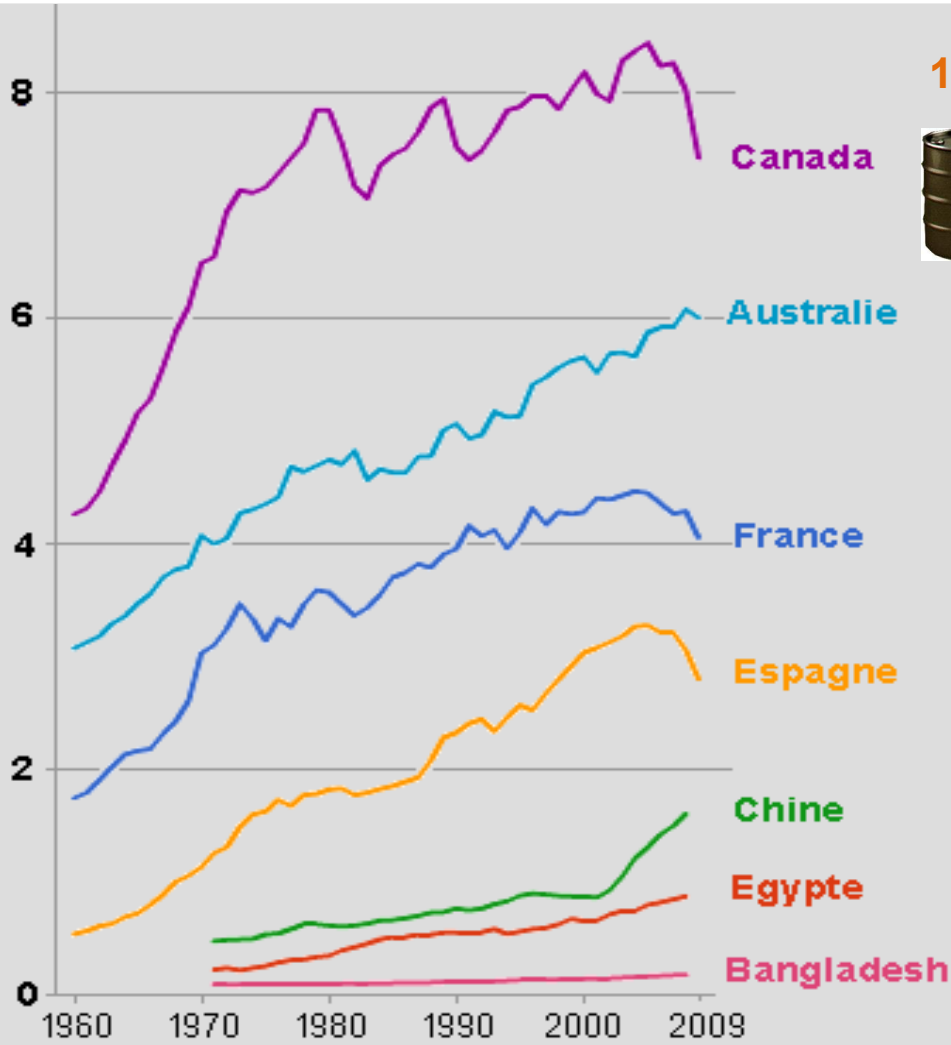
○ L'Indice de Développement Humain (IDH)



L'IDH est un Indice statistique supposé évaluer le niveau de développement humain d'un maximum de pays du monde (PNB & Espérance de vie & Niveau d'éducation).

La consommation d'énergie, ordre de grandeur

○ Evolution de la consommation d'énergie par habitant (TEP)



1 TEP ≈ 42 GJ, entre 7 et 9,3 barils.



1 TEP ≈ 13 Esclaves énergétiques.

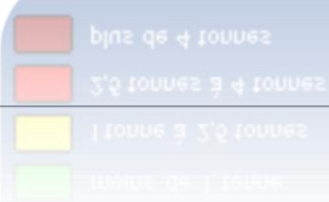
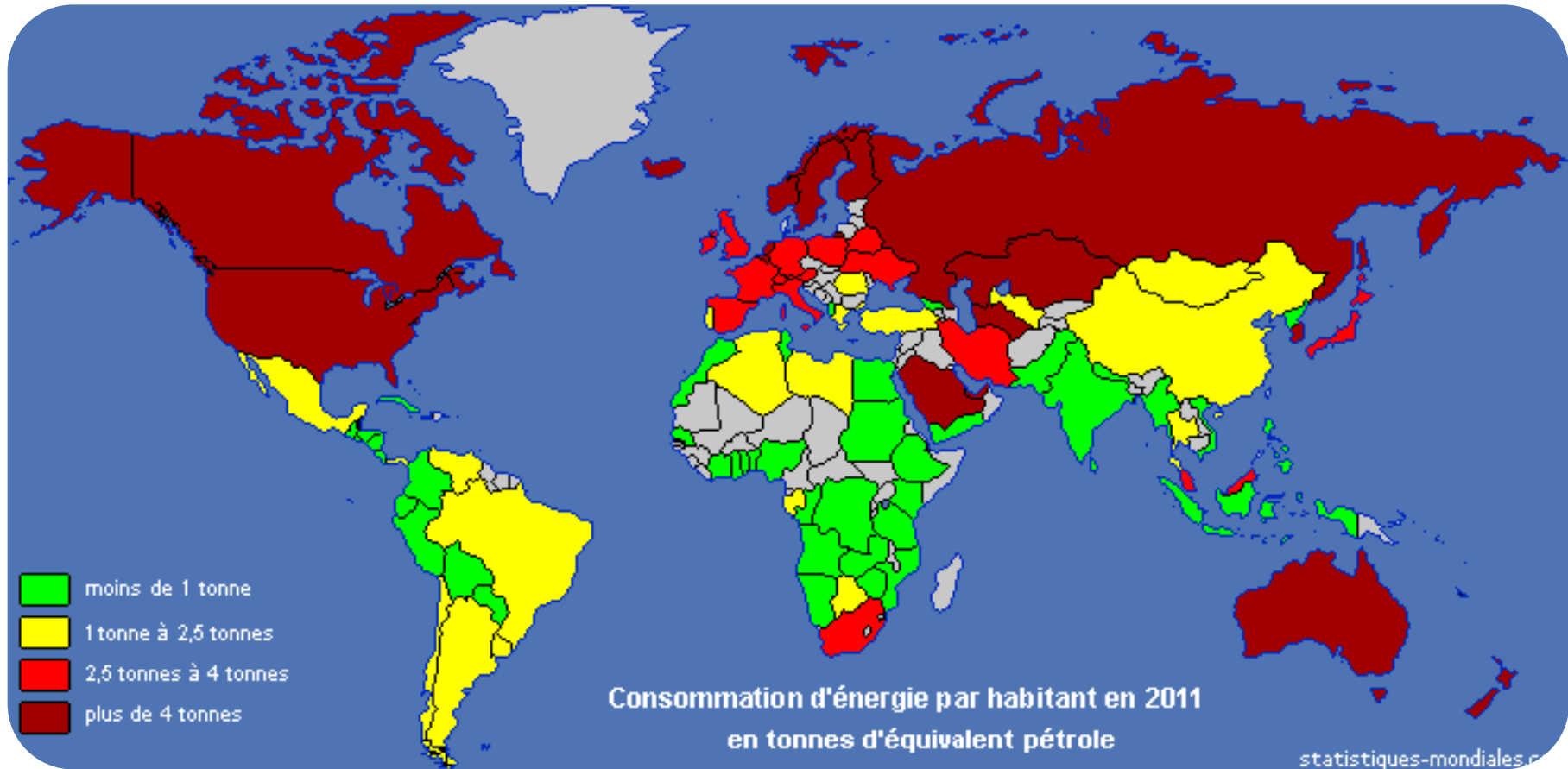
Consommation d'énergie par habitant de 1960 à 2009 (en tonnes équivalent pétrole)

Source : Banque Mondiale



La consommation d'énergie, ordre de grandeur

○ Evolution de la consommation d'énergie par habitant (TEP)



Source : Banque Mondiale

○ La forte présence du nucléaire pour la production d'électricité.

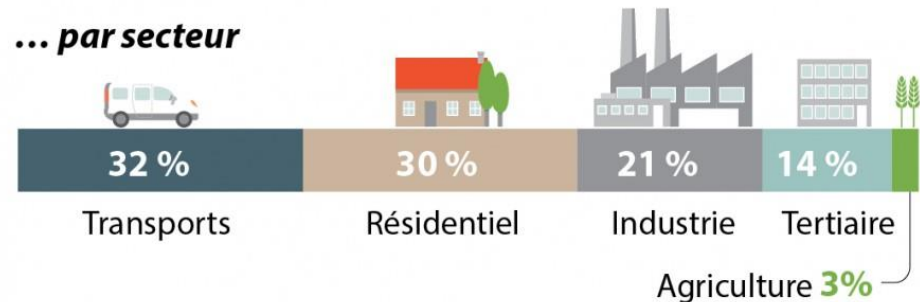
- La consommation d'énergie en France n'est pas représentative de la situation mondiale.
- Le nucléaire représente presque 76 % de la production d'électricité.
- Ceci induit un taux d'émission de CO2 parmi les plus faibles au monde.
- Mais l'utilisation de l'énergie nucléaire est très souvent sujette à débat.
- Les émissions de CO2 par habitant en France sont de l'ordre de 5,7 tonnes en 2012 (Banque Mondiale). (17 tonnes/habitant aux Etats Unis) (8,9 tonnes/habitant en Allemagne).

L'énergie en France

Consommation finale d'énergie en 2013...

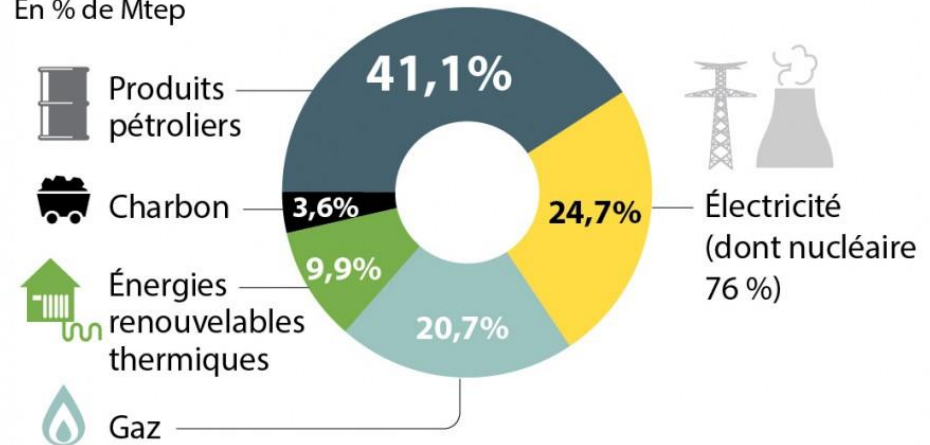
En % de Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole)


... par secteur



... par type d'énergie

En % de Mtep

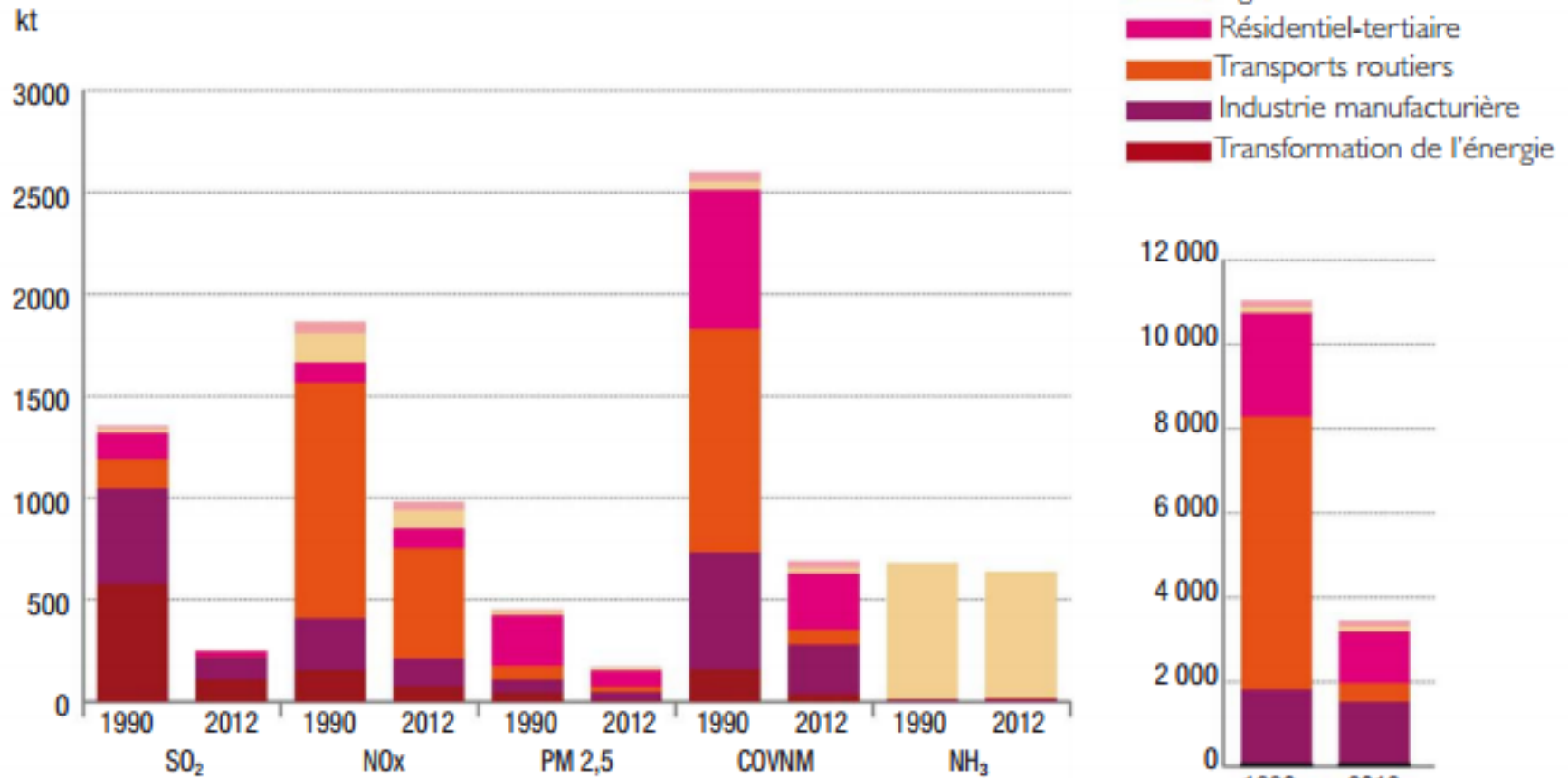


Source : Commissariat général au développement durable 

Les autres polluants

○ L'impact sur la santé de la consommation d'énergie n'est pas à négliger

Répartition des émissions de polluants en France par secteur (kt)

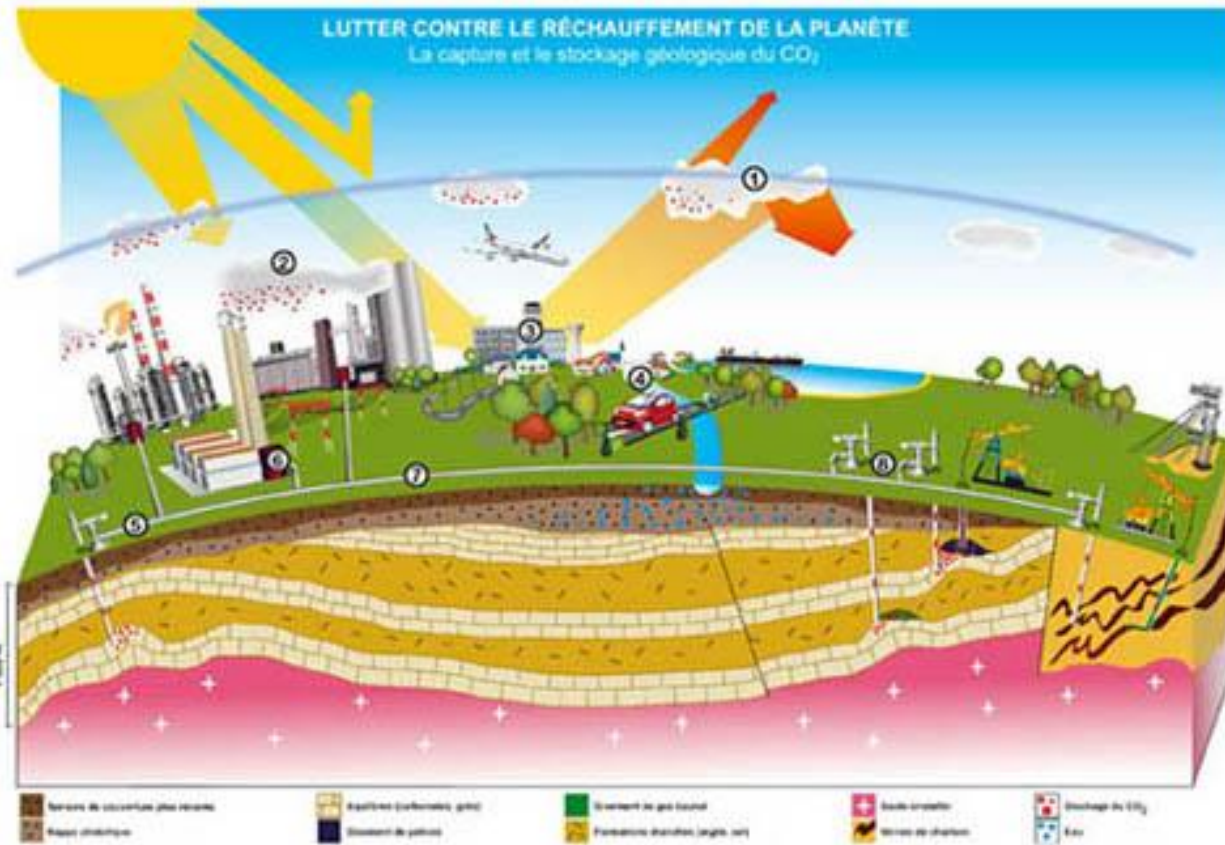


Source: CITEPA - Rapport Secten - Avril 2013

Mais cela n'est pas visible ?

○ Le réchauffement climatique est un phénomène très lent comparé à l'échelle de temps d'une vie.

- Le syndrome de la grenouille

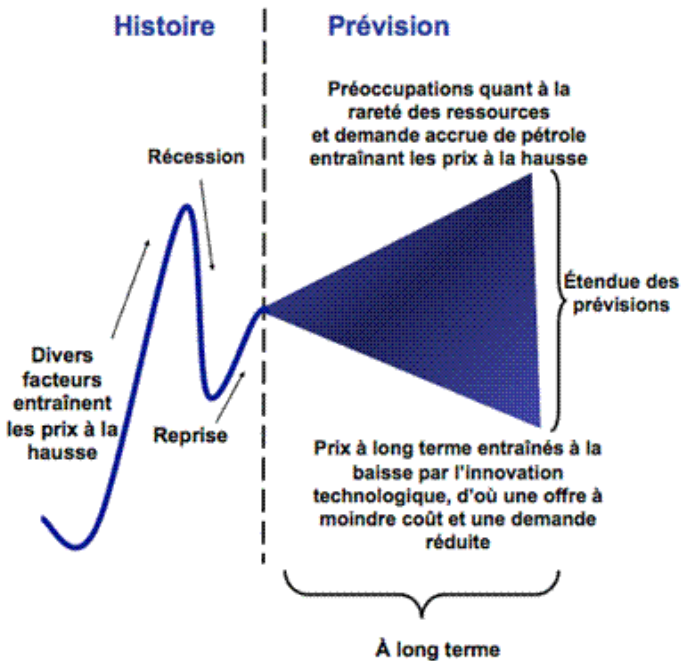


Mais cela n'est pas visible ?

○ Le prix du pétrole baisse drastiquement

- La peur de l'efficacité énergétique et des renouvelables ?

Profil qualitatif des prix du pétrole à long terme



Source : Ce profil qualitatif est fondé sur les observations du ministère des Finances et de Ressources naturelles Canada



Mais cela n'est pas visible ?

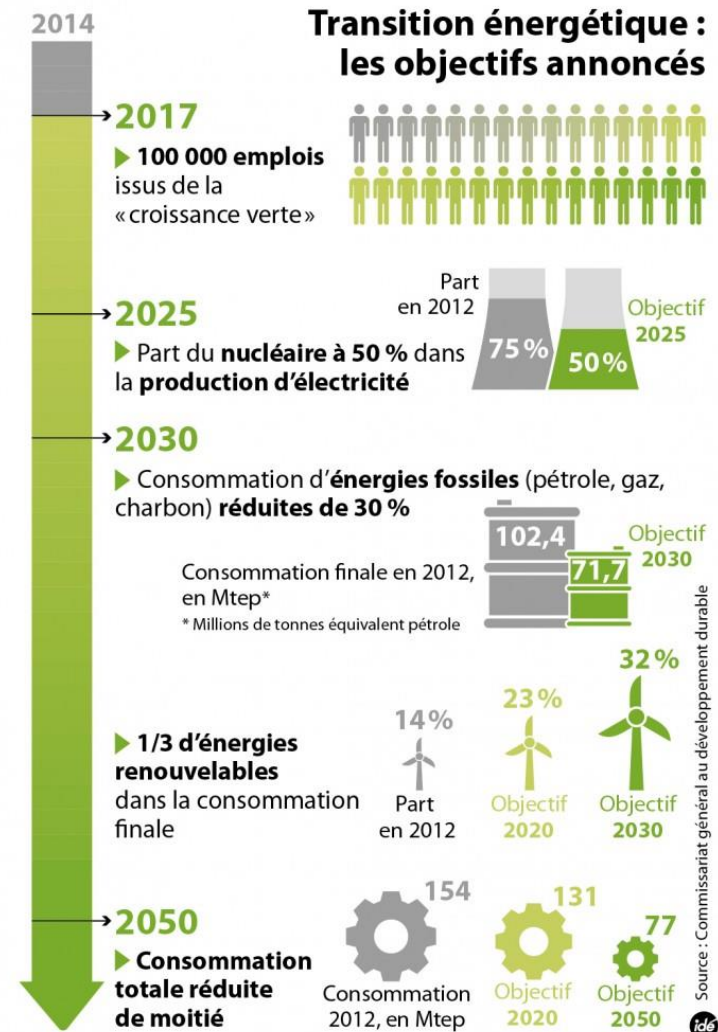
- La pollution est relativement visible
 - Cela rappelle l'histoire des déchets.

L'Airpocalypse se poursuit en Chine : depuis une semaine, le nord du pays suffoque de nouveau sous une épaisse pollution atmosphérique.
(blog le monde 4 mars 2015)



○ Réduire la demande et augmenter les sources renouvelables de l'énergie

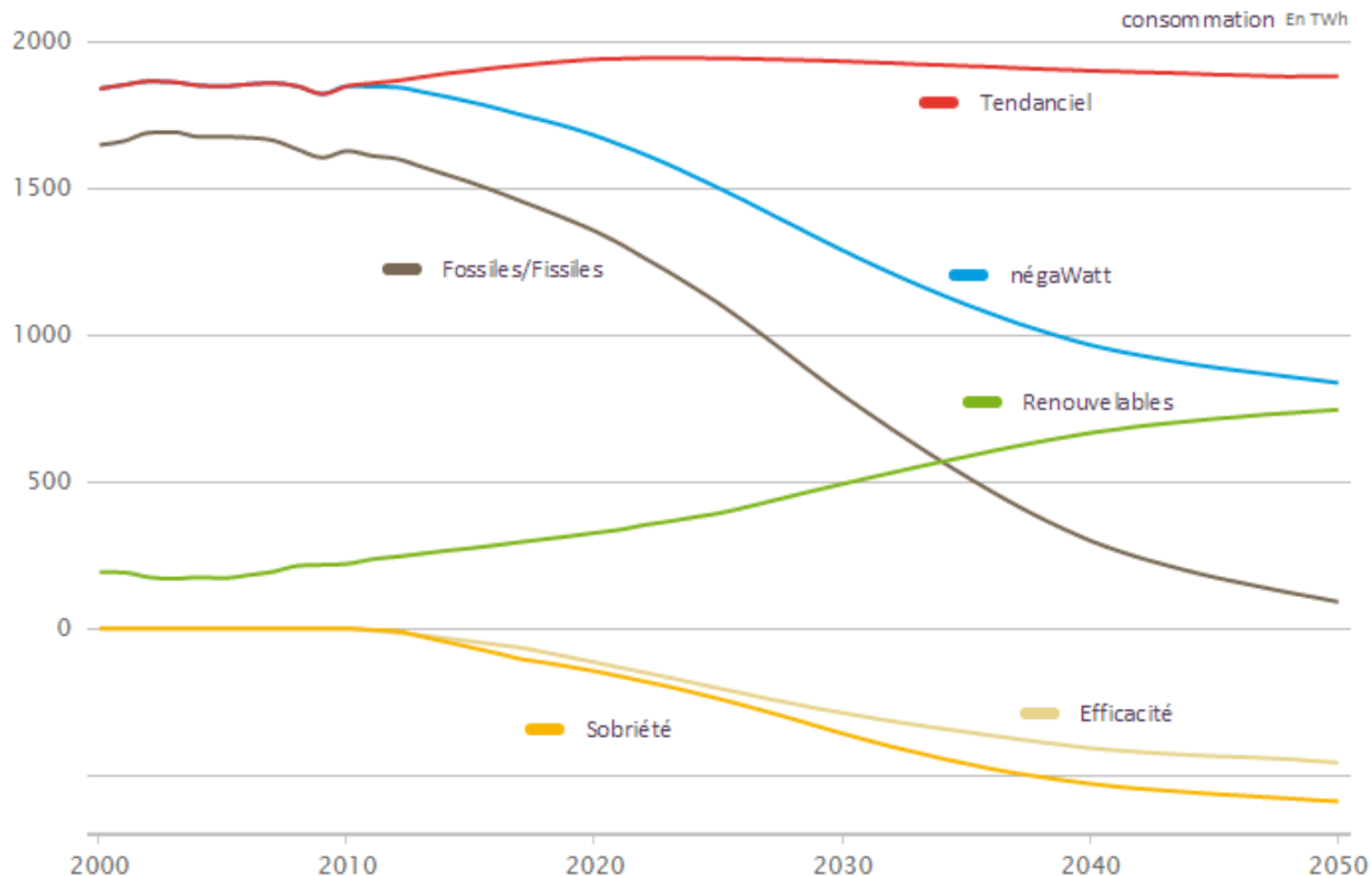
- Agir pour l'environnement et la transition écologique.
- Maintenir la qualité de vie.
- Assurer des emplois durables.
- Couvrir les besoins de l'ensemble de la population mondiale.
- Assurer le droit d'accès à l'énergie.
- 1,2 milliard de terriens n'ont pas encore accès à l'électricité.



La transition écologique – 900 scénarios

○ Les différents scénarios supposent une contribution importante de l'efficacité énergétique pour assurer la transition énergétique.

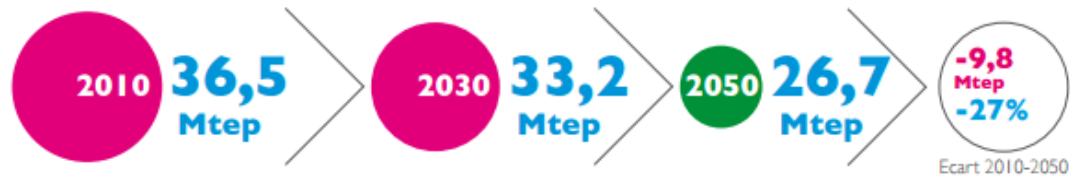
• Le scénario négaWatt du 29 septembre 2011



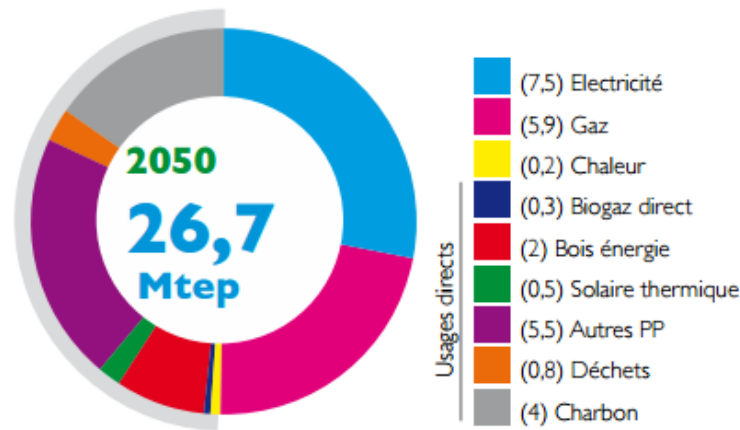
La transition écologique – L'ADEME

○ Les différents scénarios supposent une contribution importante de l'efficacité énergétique pour assurer la transition énergétique.

• Le scénario de l'ADEME – L'industrie



BILAN DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE L'INDUSTRIE EN 2010, 2030 ET 2050 EN MTEP FINALES.

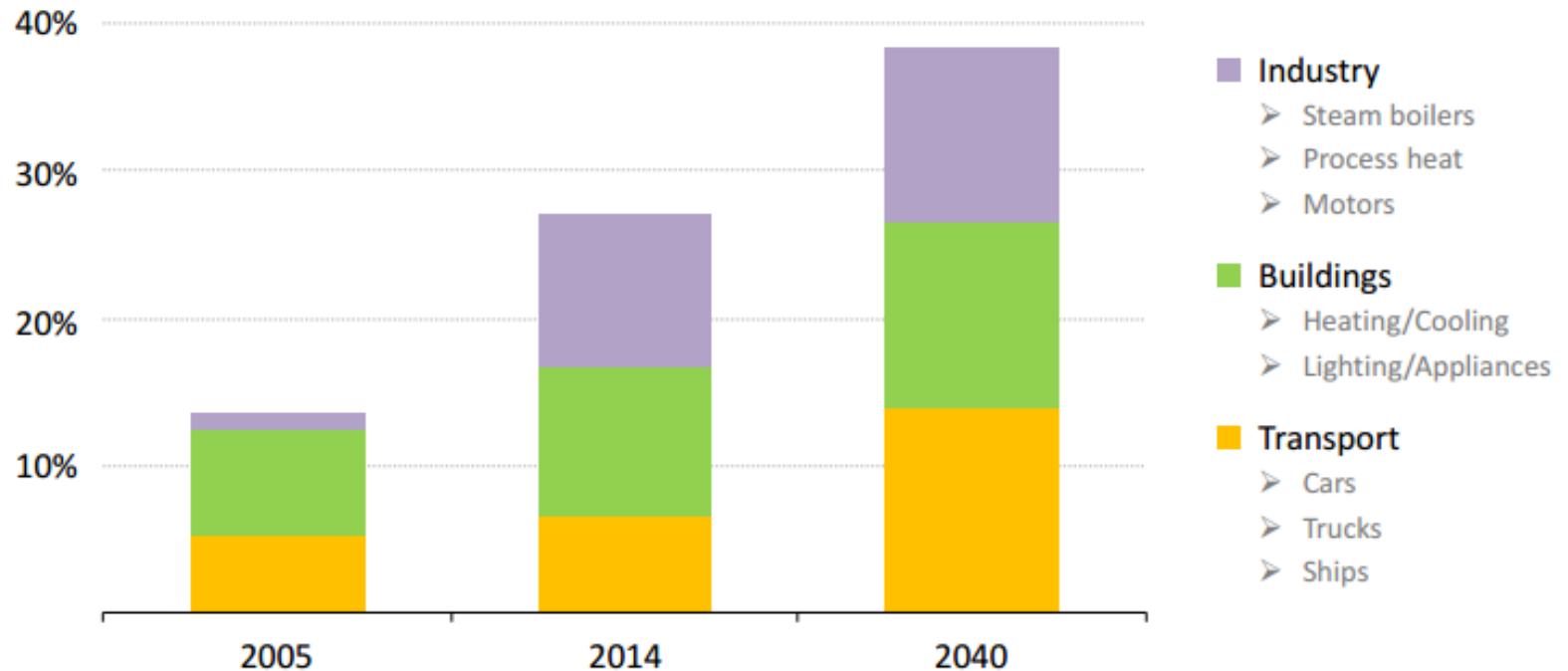


BILAN DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE L'INDUSTRIE EN 2050, PAR VECTEUR

La transition écologique – L'AIE

- Les différents scénarios supposent une contribution importante de l'efficacité énergétique pour assurer la transition énergétique.

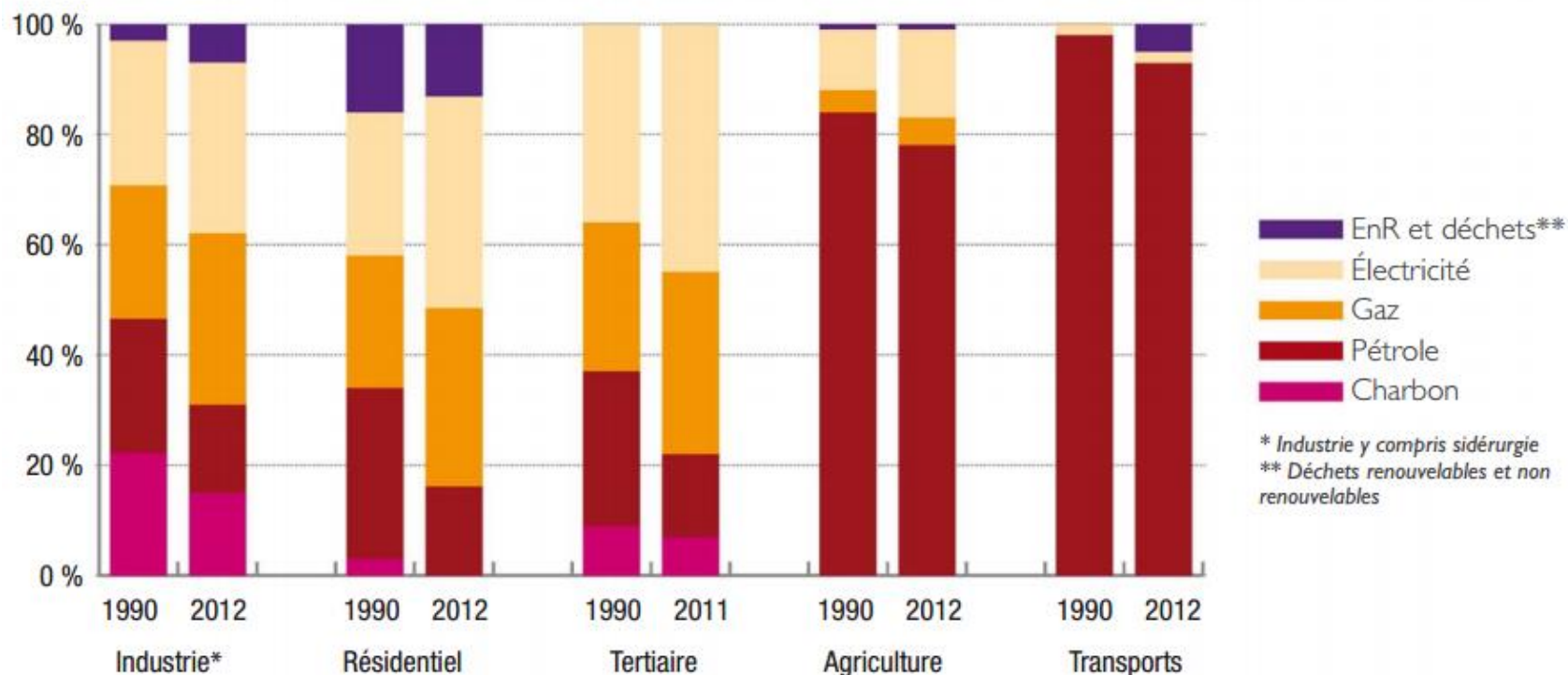
Share of global mandatory efficiency regulation of final energy consumption



Energy efficiency policies are introduced in more countries and sectors; they continue to slow demand growth but more can be done

○ Consommation d'énergie finale en France.

Consommation d'énergie finale de chaque secteur par énergie en France (%)

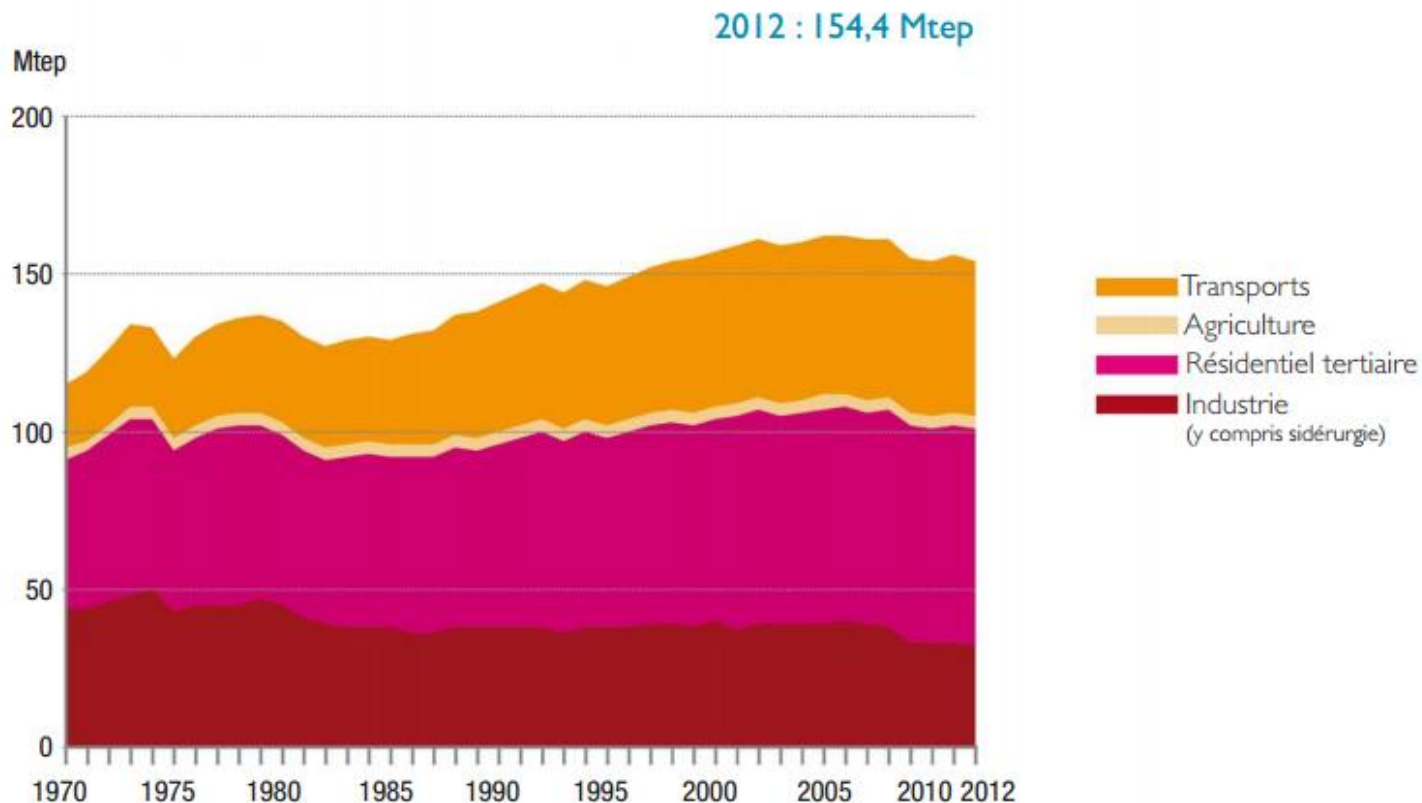


* Industrie y compris sidérurgie
 ** Déchets renouvelables et non renouvelables

Sources: MEDDE/SOeS - « Bilan énergétique de la France 2012 » - Juillet 2013
 Ceren - « Secteur résidentiel : Suivi du parc et des consommations d'énergie » - 2012
 Ceren - « Secteur tertiaire : Suivi du parc et des consommations d'énergie » - Juillet 2013
 Données corrigées du climat

○ Consommation d'énergie finale en France.

Consommation d'énergie finale par secteur en France (Mtep)

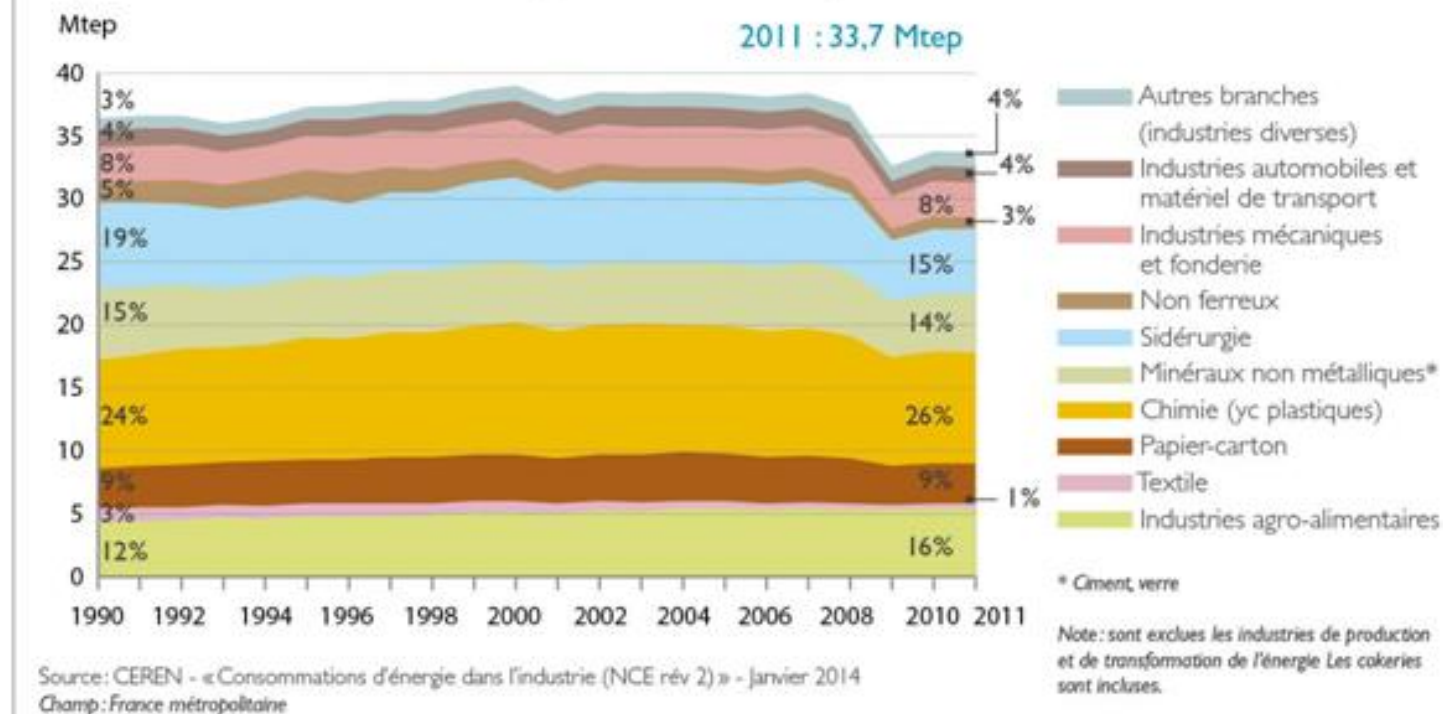


Source: MEDDE/SOeS - «Bilan énergétique de la France 2012» - Juillet 2013
Données corrigées du climat

○ Consommation d'énergie finale dans l'industrie en France.

ADEME - LES CHIFFRES CLÉS 2015 CLIMAT, AIR ET ÉNERGIE

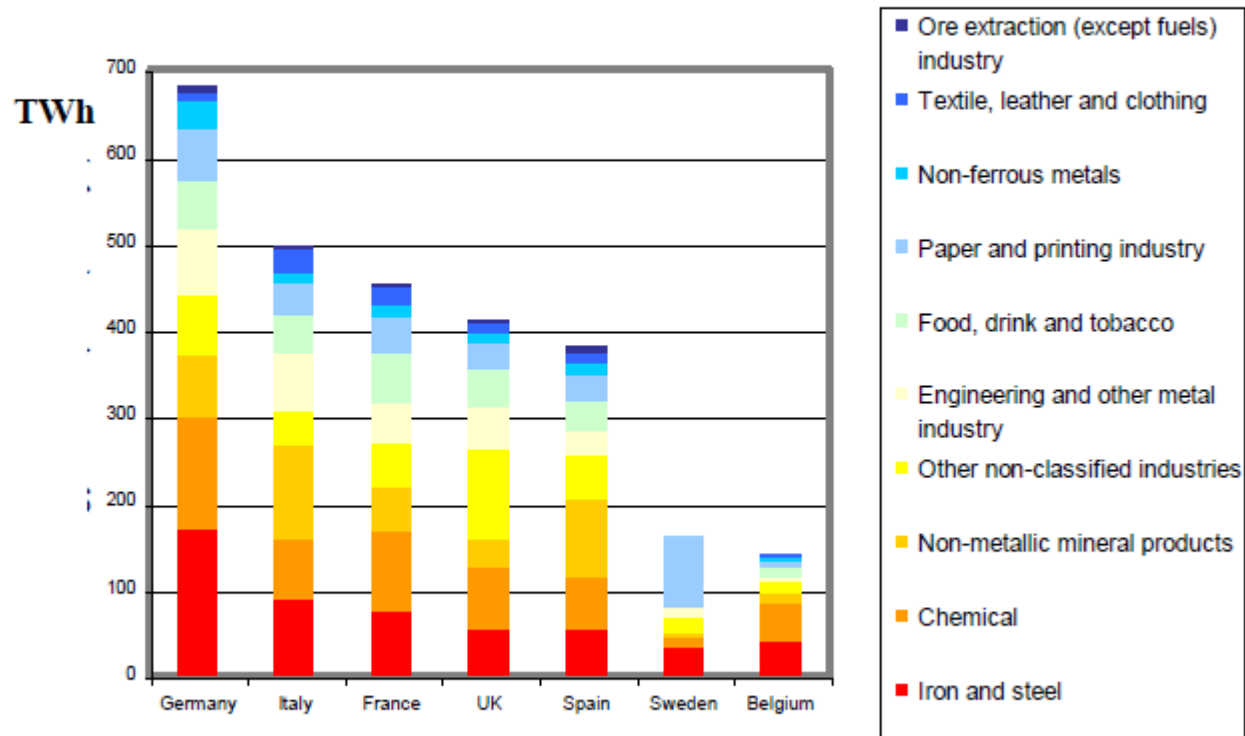
EI. Consommation finale de l'industrie en France par branche, hors usages matières premières (Mtep, 2011)



○ Consommation d'énergie finale dans l'industrie en Europe.

HEAT USE BY INDUSTRY SECTOR

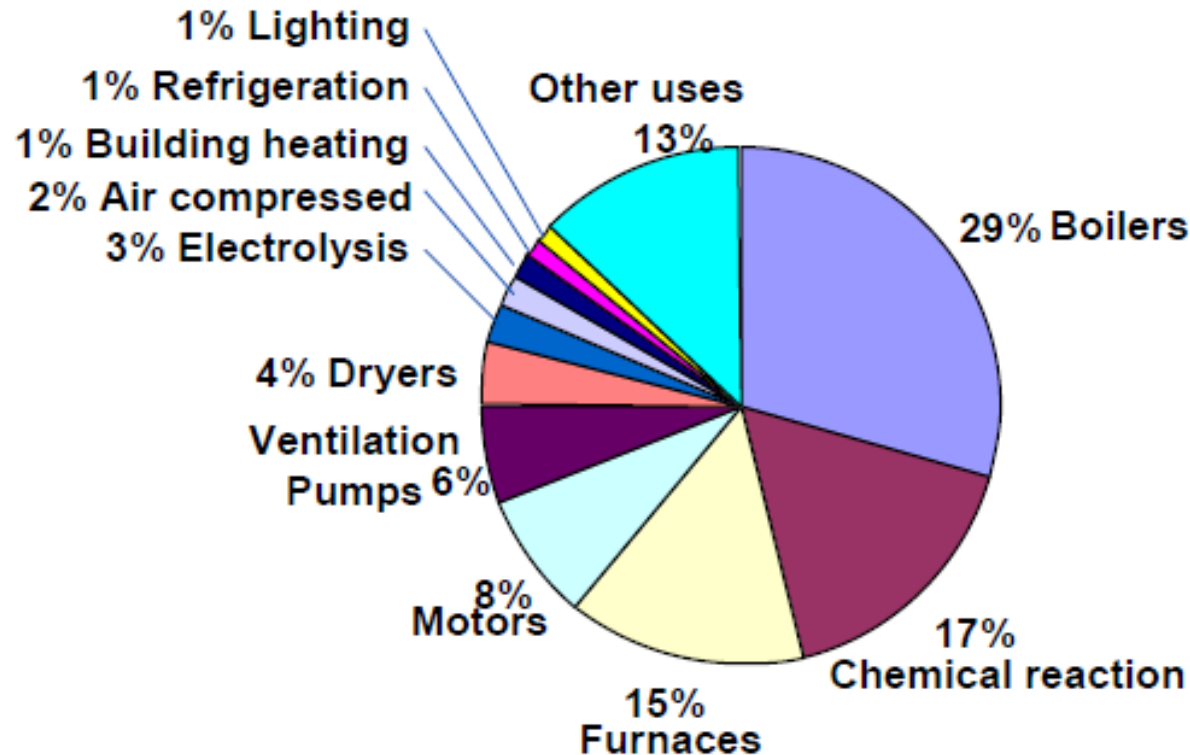
In the EU 27, the industry sector represents 28% of the final energy consumption and 21% of the GHG emissions



In Europe, the energy savings potential in industry by using Best Available Technologies (BATs) are estimated at 20% of the baseline energy consumption

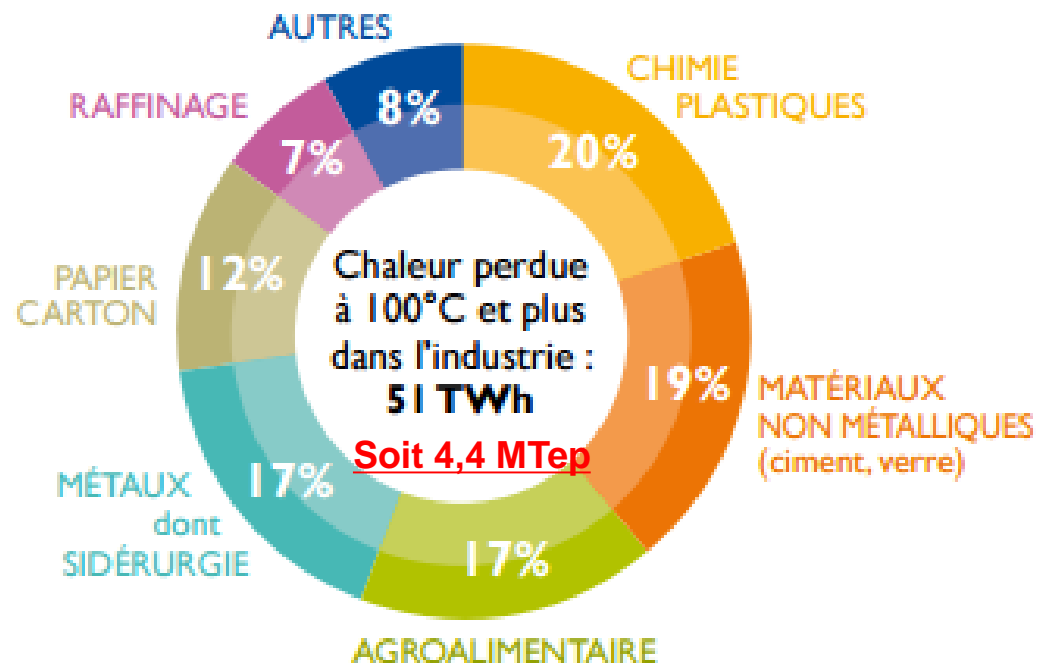
- Consommation d'énergie finale dans l'industrie en France (sources Ecleer).

70%
of total energy used generating **heat**



○ Chaleur rejeté dans différents secteurs industriels en France,

- Une majeure partie de l'énergie consommée dans l'industrie se retrouve sous forme de rejets de chaleur ?

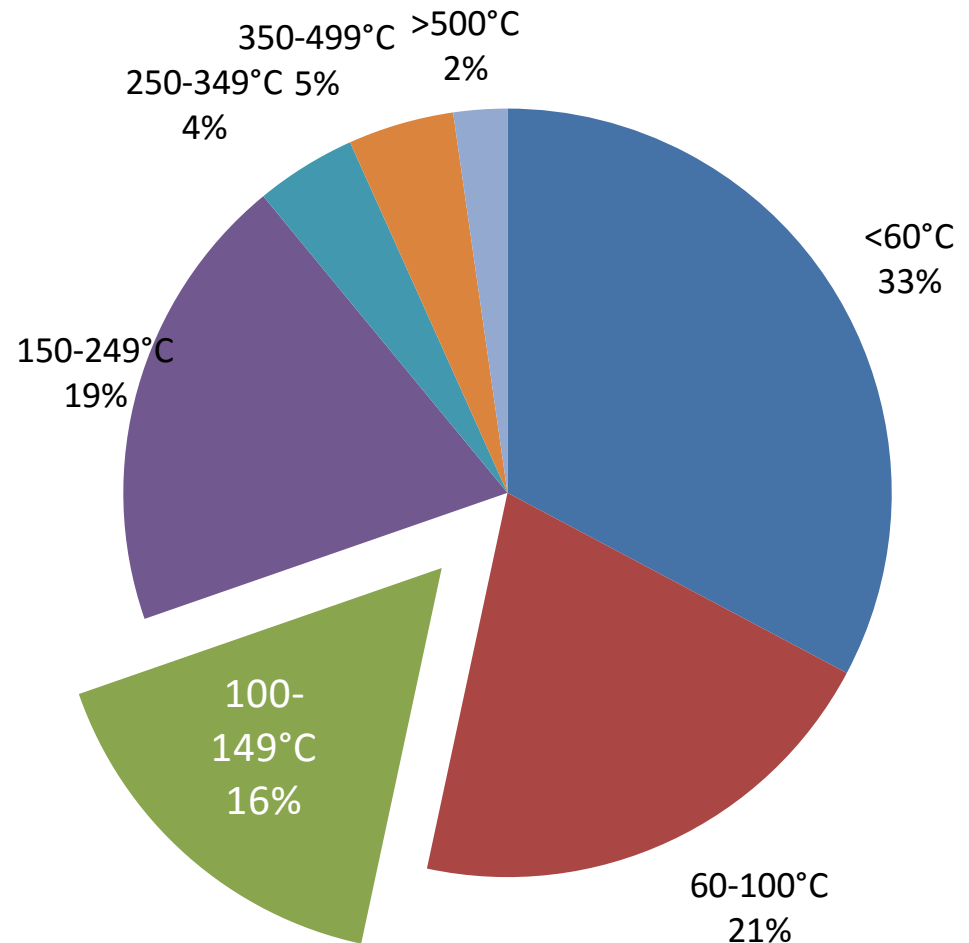


Les conditions de fonctionnement du site de production jouent dans le volume de chaleur fatale : les sites fonctionnant en 3 x 8 et sans arrêt le week-end en sont les plus générateurs.

○ Chaleur rejeté dans différents secteurs industriels en France,

- Boilers
- Drying
- Kiln, furnaces, reactors
- Air compressors
- Condensers of Chillers
- Without Blast Furnaces, cooling of products

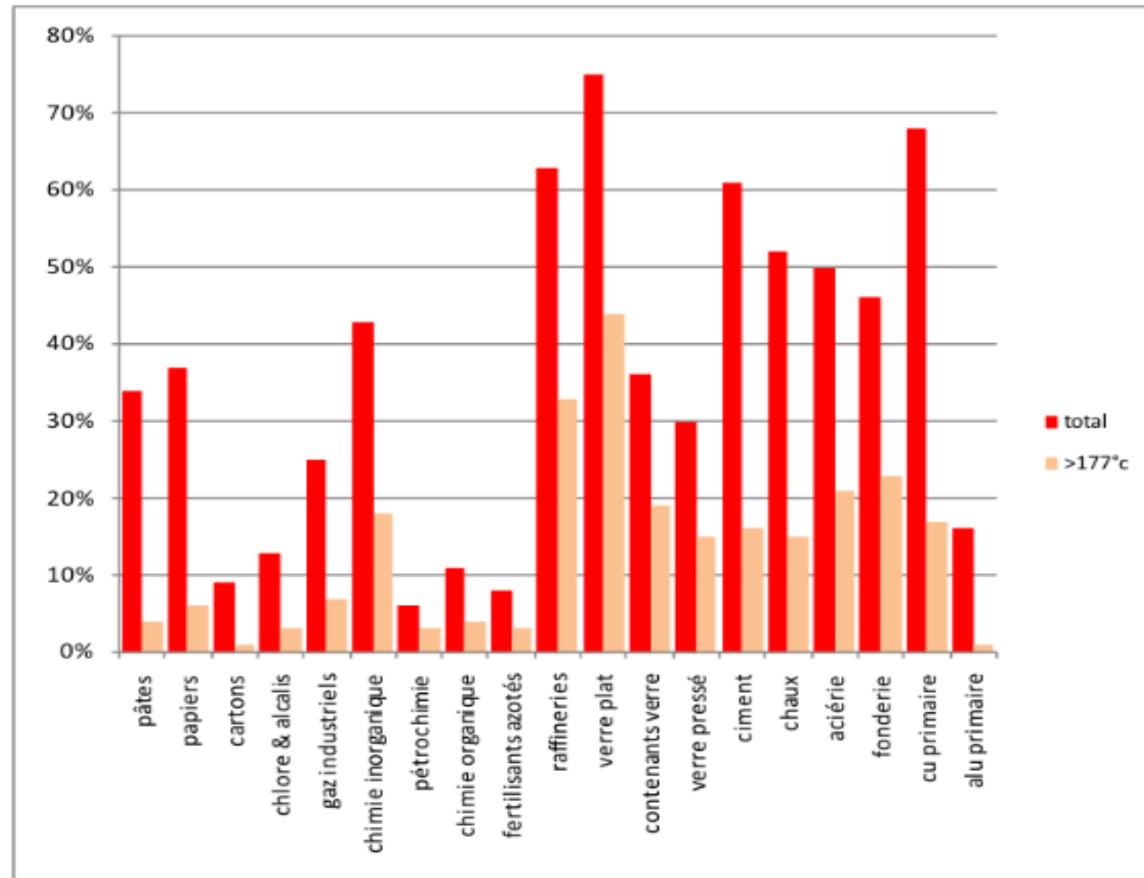
Waste heat in the French industry by temperature (109 TWh)



Source: CEREN Study for EDF,
Waste heat in the French industry
2010

○ Chaleur rejeté dans différents secteurs industriels Québec,

- Rejets de chaleurs basses températures, un grand potentiel mais des limitations physiques, techniques et économiques.

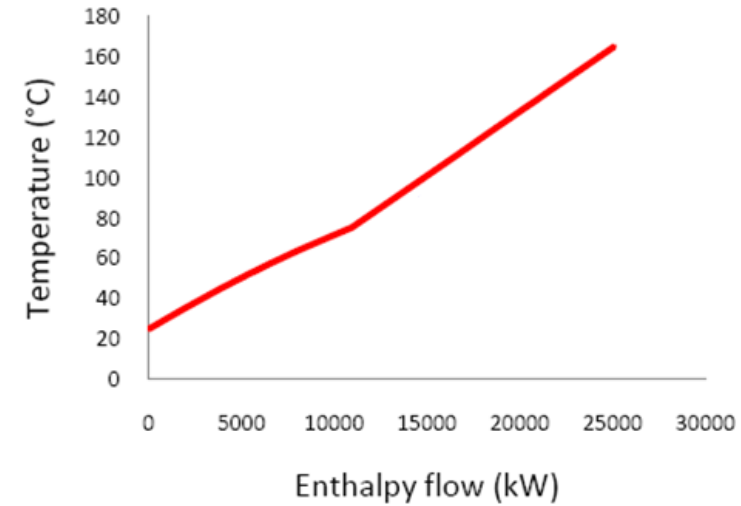
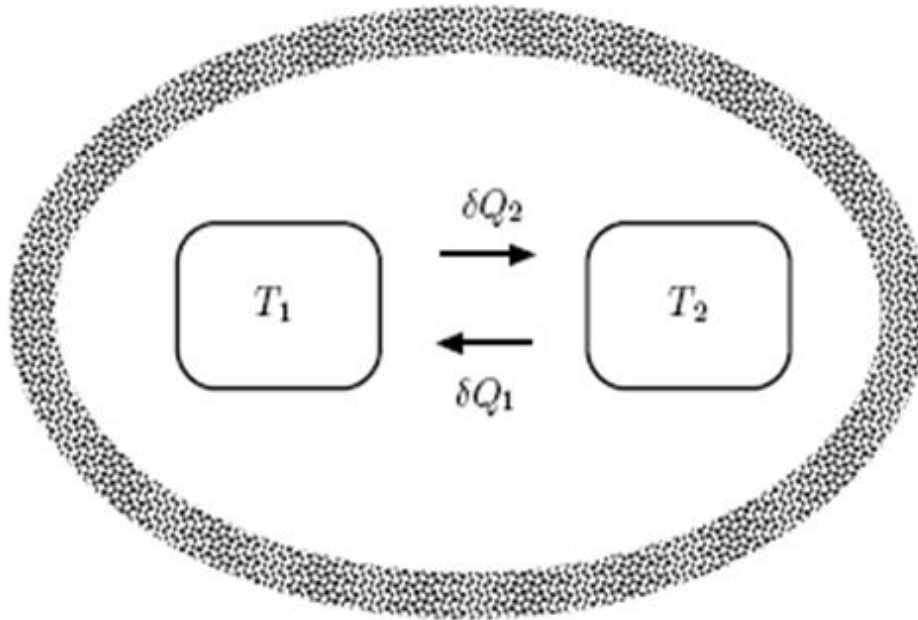


Rejets thermiques en % des consommations d'énergie pour différents secteurs industriels

La valorisation de la chaleur – Destruction d'exergie

○ La chaleur perdue est en effet une dégradation de la qualité de l'énergie.

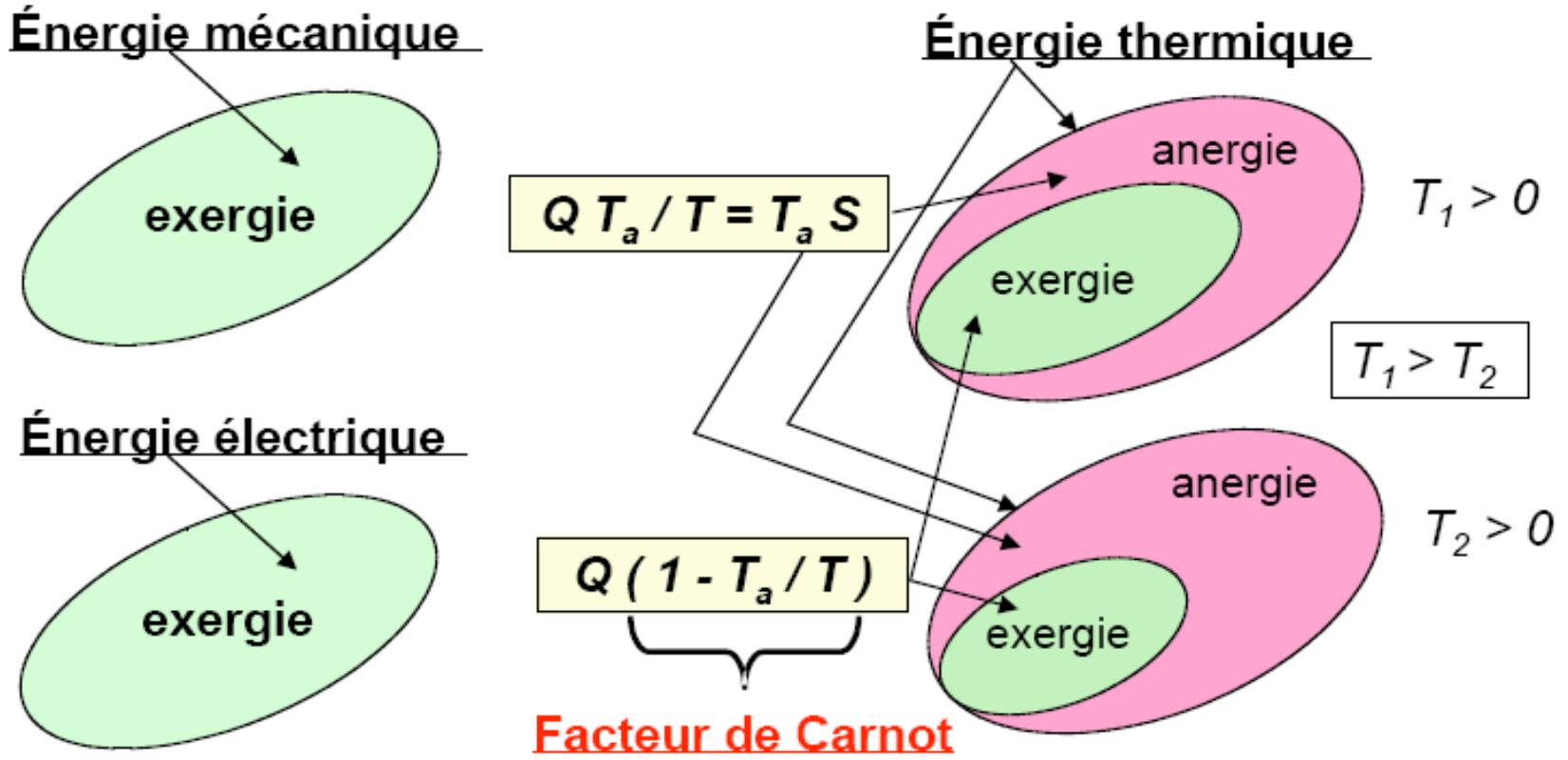
○ Destruction d'exergie.



$$0 = \delta Q_{\text{global}} = \delta Q_1 + \delta Q_2 \Rightarrow \delta Q_2 = -\delta Q_1$$

La valorisation de la chaleur – Destruction d'exergie

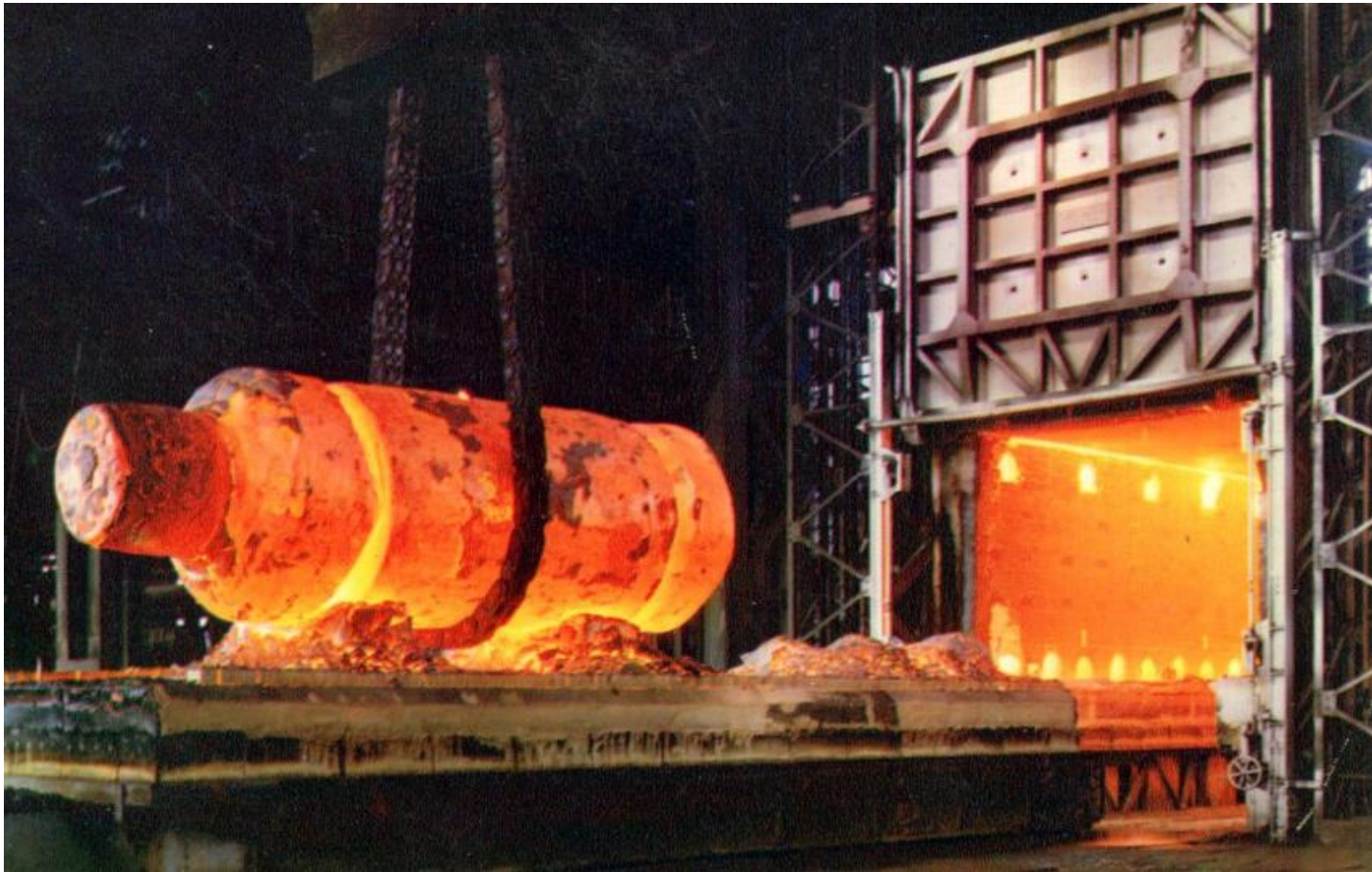
- L'énergie est la somme d'une énergie noble (exergie) et d'une énergie en équilibre avec l'environnement (l'anergie)



Contenu exergetique de quelques types d'énergie

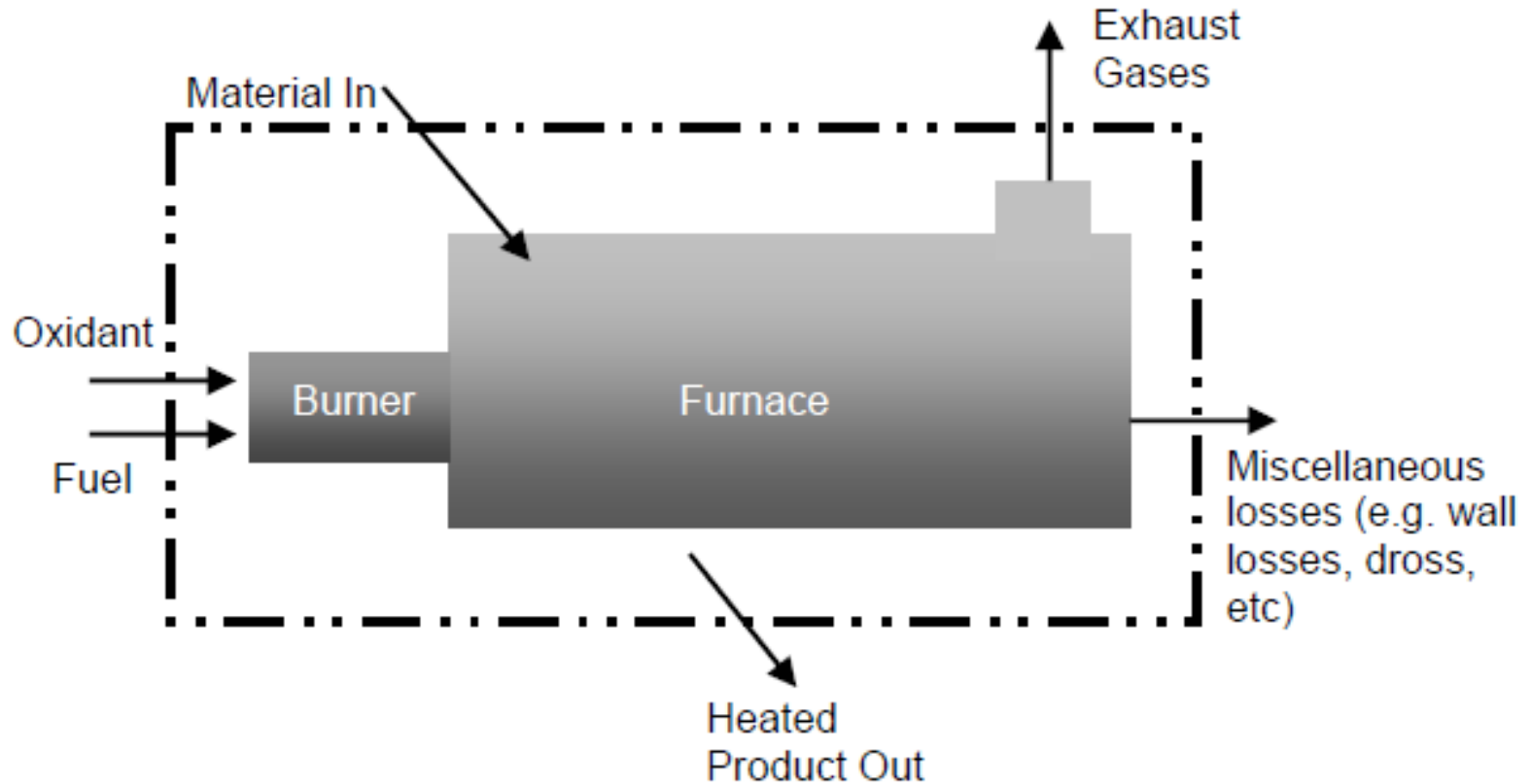
Sources : A. LALLEMAND

○ Exemple d'un four de traitement thermique



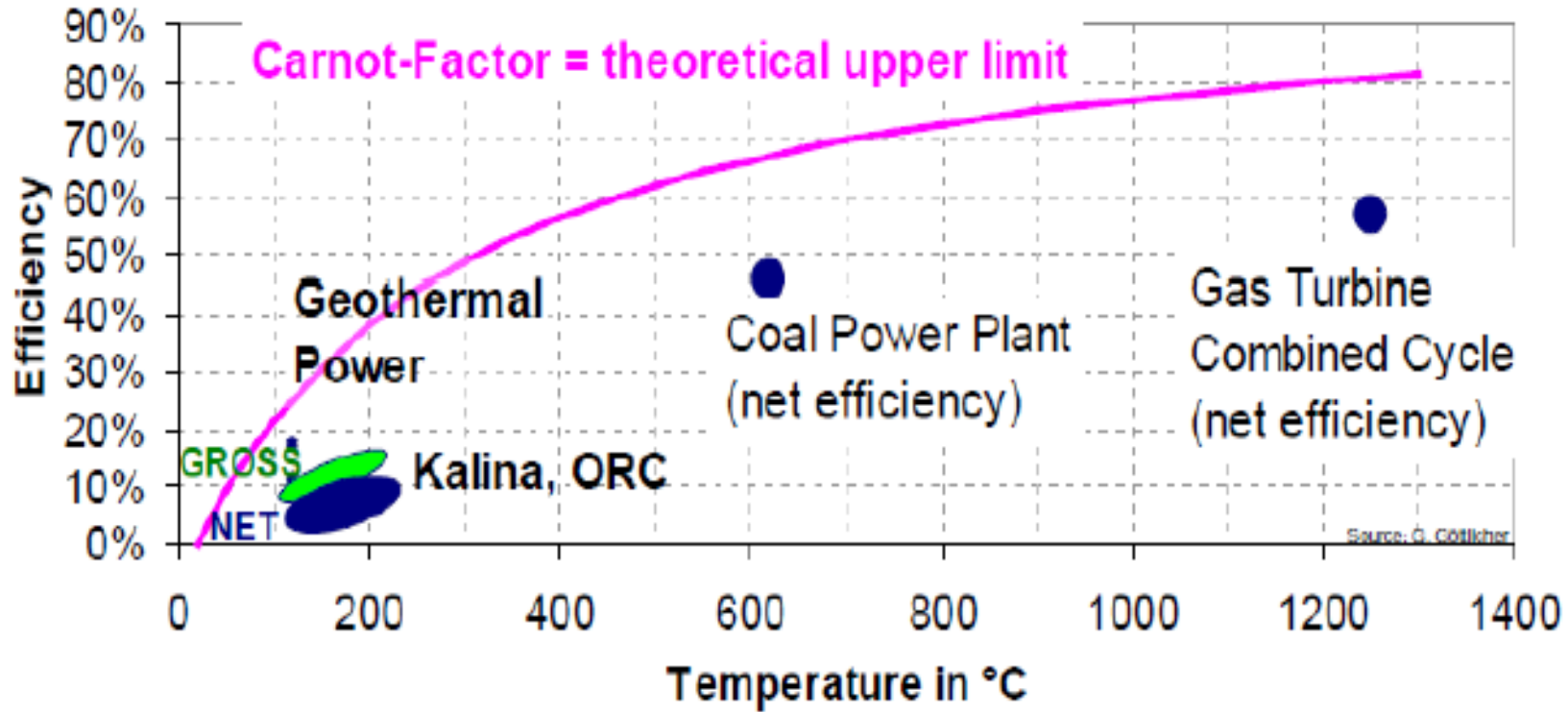
Les installations thermiques sont des convertisseurs d'énergie, la majorité de l'énergie chimique se transforme en énergie thermique, l'exergie est transformée en anergie.

○ Exemple d'un four de traitement thermique



Les installations thermiques sont des convertisseurs d'énergie, la majorité de l'énergie reste sous forme thermique, l'exergie est transformée en anergie.

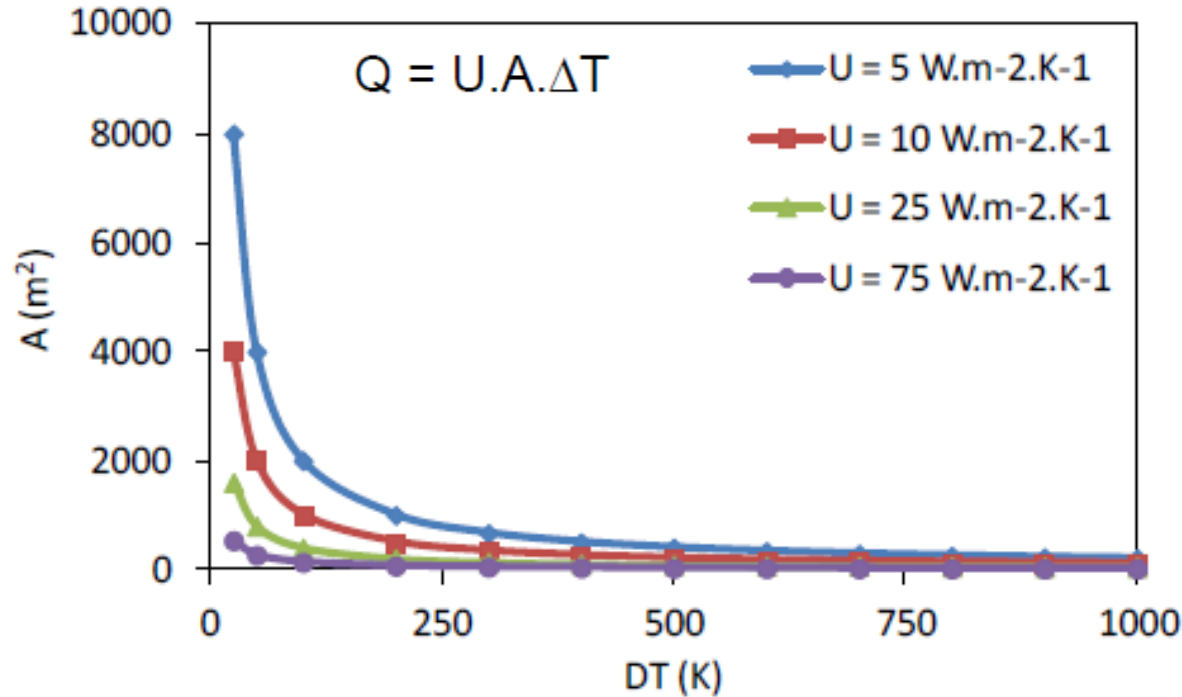
- A basses températures le rendement de Carnot est très sensible à la variation de la température



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

Les machines réel ont des rendement exergétique de l'ordre de 40 %.

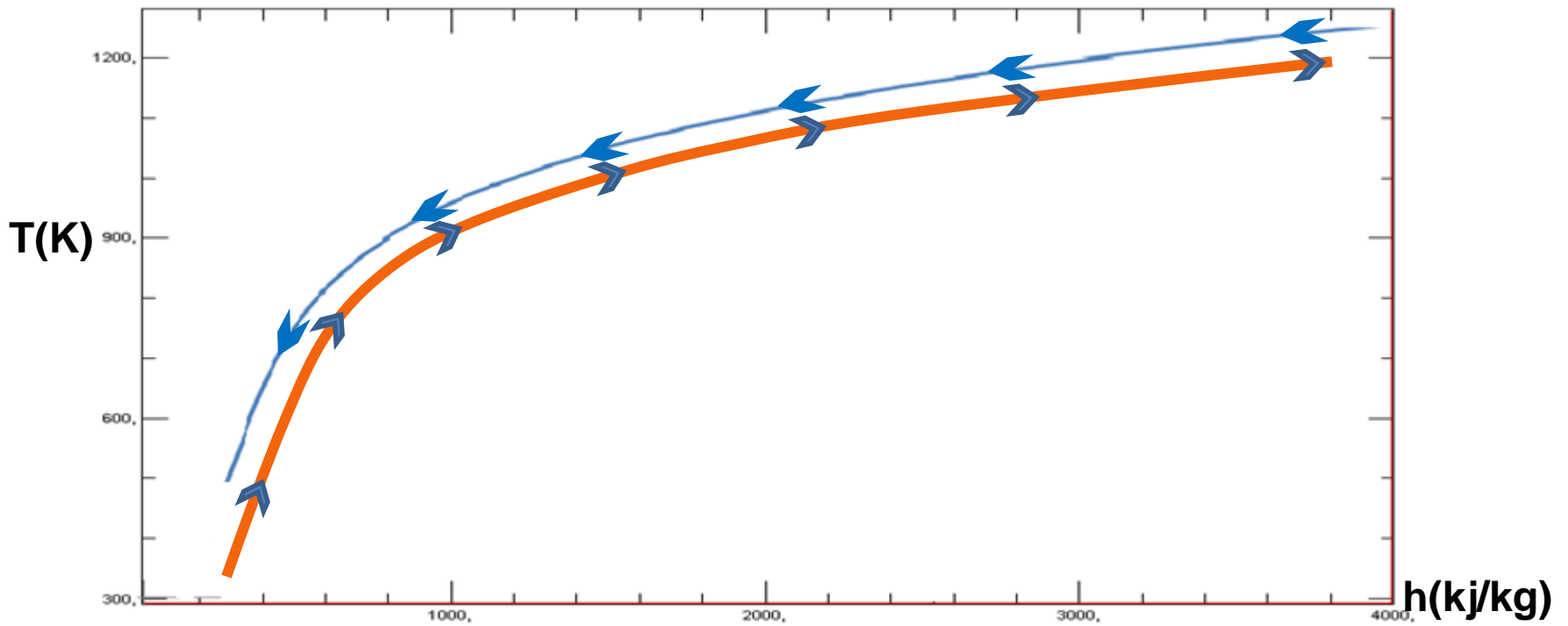
- Les surface d'échange varie d'une façon exponentielle en fonction de la différence de température.



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

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

- L'intégration thermique consiste à optimiser l'utilisation de la chaleur dans un site industriel

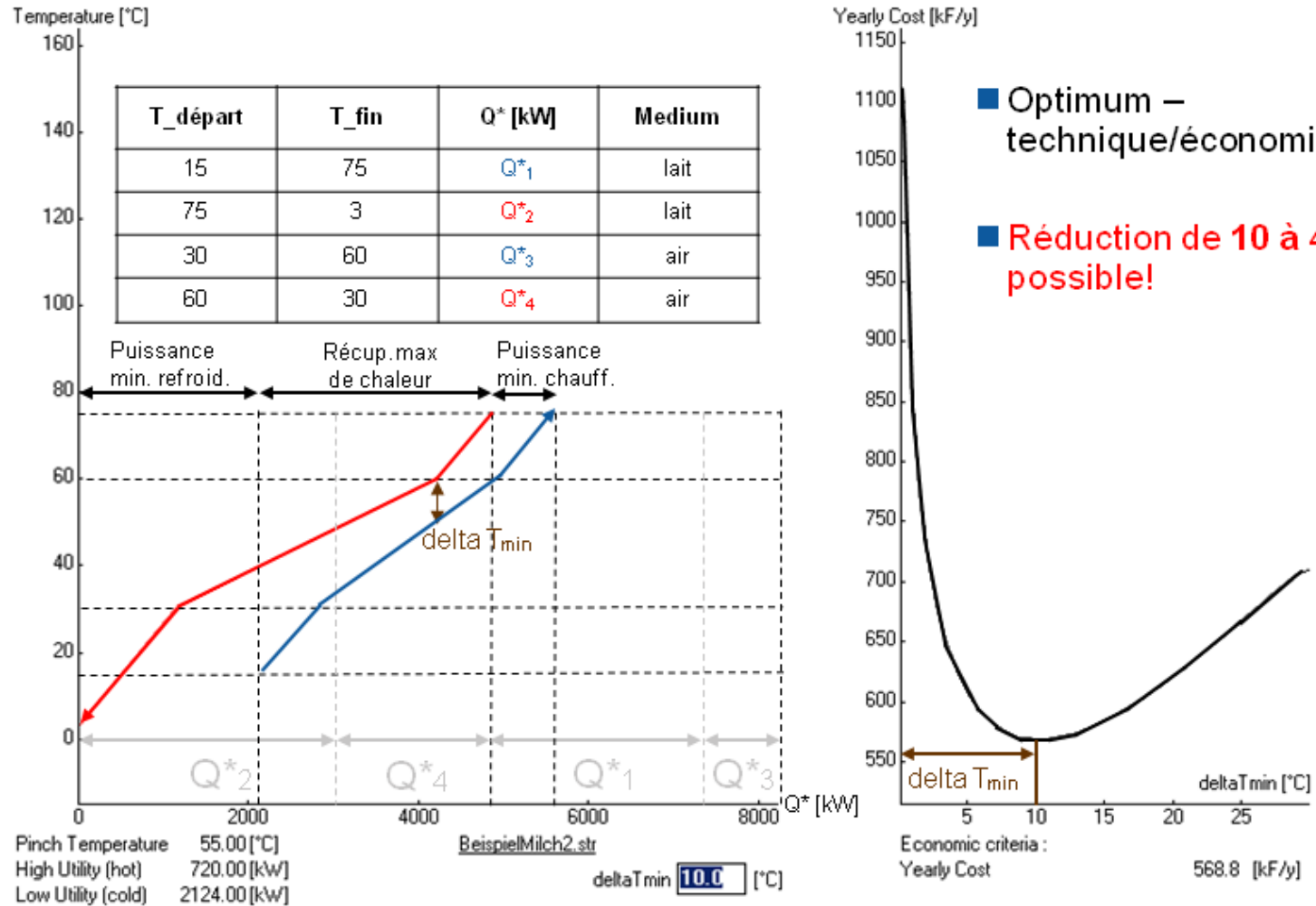


- Récupération idéale

La méthode du pincement permet d'optimiser l'organisation des flux de chaleur, des techniques mathématiques permettent d'optimiser les réseaux d'échanges sous contraintes économiques et technologiques.

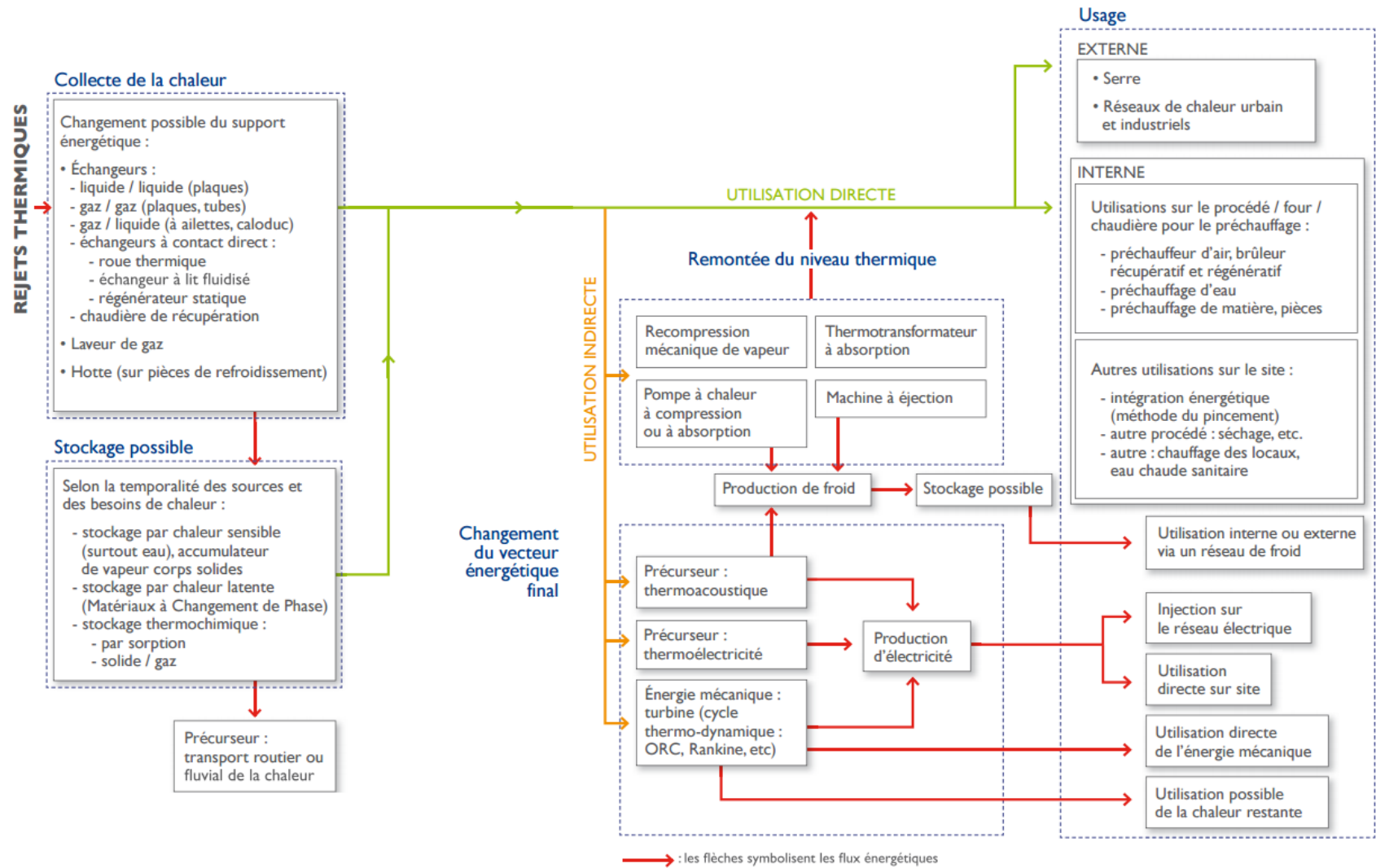
La valorisation de la chaleur, l'intégration thermique

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



○ Quatre volets du programme sont développés

La valorisation de la chaleur, source ADEME.



© Conseil en communication & publicité - L'Éléphant - www.elfe.com.fr

Le programme Valorisation de la chaleur est constitué de 4 sous-programmes et d'une plateforme technologique. Les 4 sous-programmes sont :

- *L'intégration thermique et l'optimisation des flux exergétiques,*
- *Les échangeurs de chaleur du futur (Future Heat Exchangers ou FutureHEX),*
- *Les transformateurs de chaleur et leur intégration dans l'industrie (Waste Heat Conversion technologies and integration in industry),*
- *Le Stockage et le Transport de la Chaleur (Store & Transport Heat),*
- *Les approches économiques innovantes pour permettre le déploiement des technologies de valorisation de la chaleur (Thermo-Economics for Waste Heat valorisation).*

Un volet supplémentaire à ce programme est constitué d'une **plateforme technologique** de valorisation de la chaleur (Experimental platform for waste heat valorization).

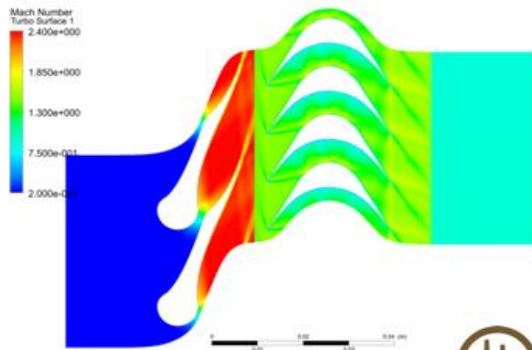


TOTAL

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

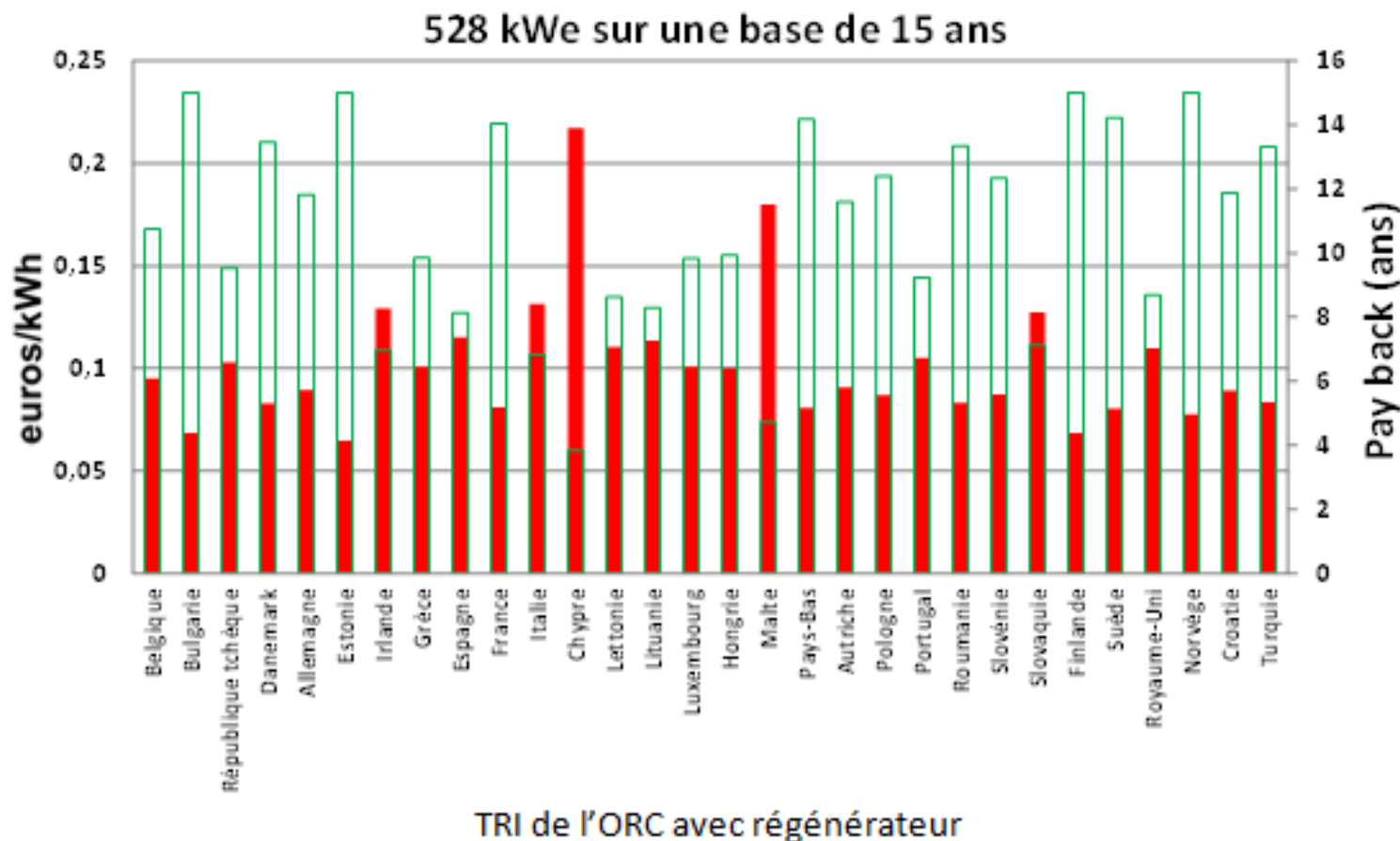


PS2E Projet 2.2.6 ORCHID+ 20/10/2015



Benoit OBERT
R&D Engineer
Tel: 01 80 88 59 82
benoit.obert@enertime.com

- Cas d'un cycle ORC permettant de récupérer l'énergie de refroidissement de tôles d'acier



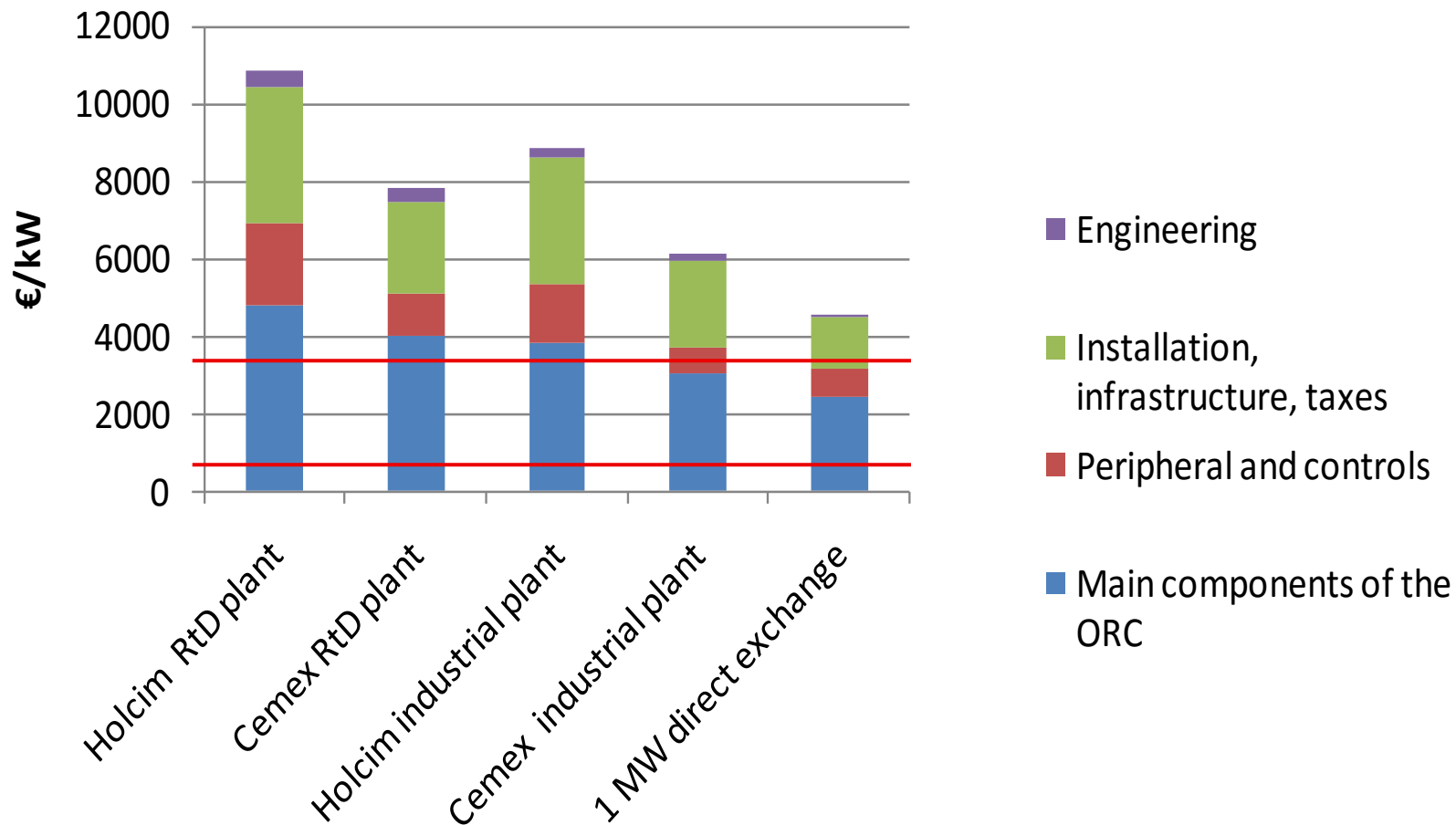
Le temps de retour sur investissement est tout a fait comparable à d'autres sources de production d'électricité.

Les transformateurs – ORC basse température, structure du coût

Other CAPEX in €/kW average/(range)

PV (1500 hours/year) 3700 / (2500-5100)

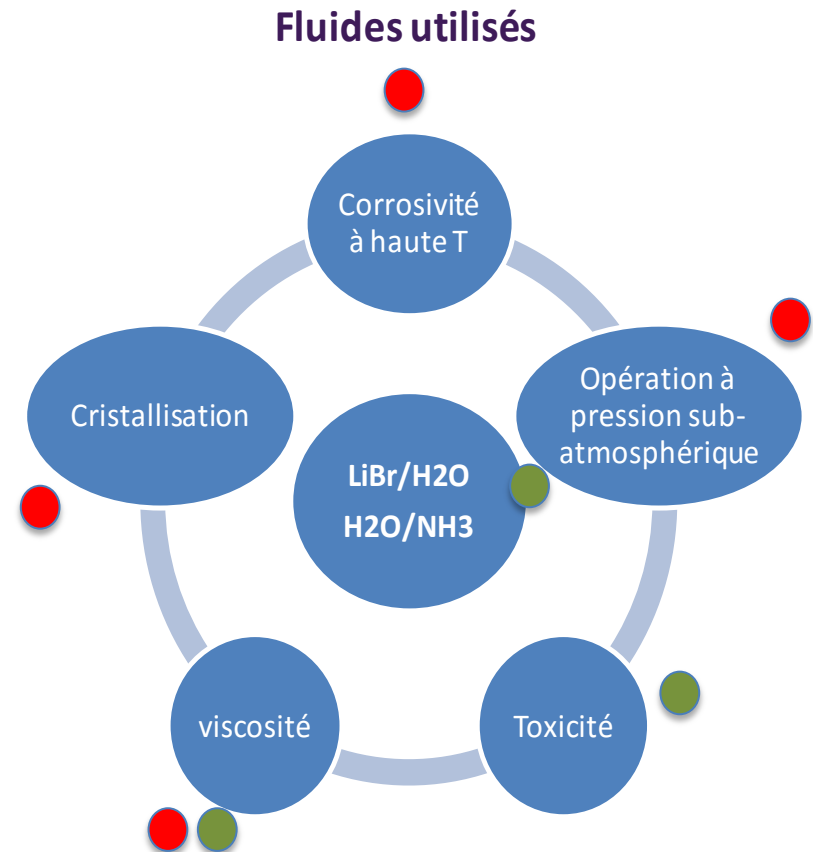
Wind (2300 hours/year) 1200 / (1000-1300)



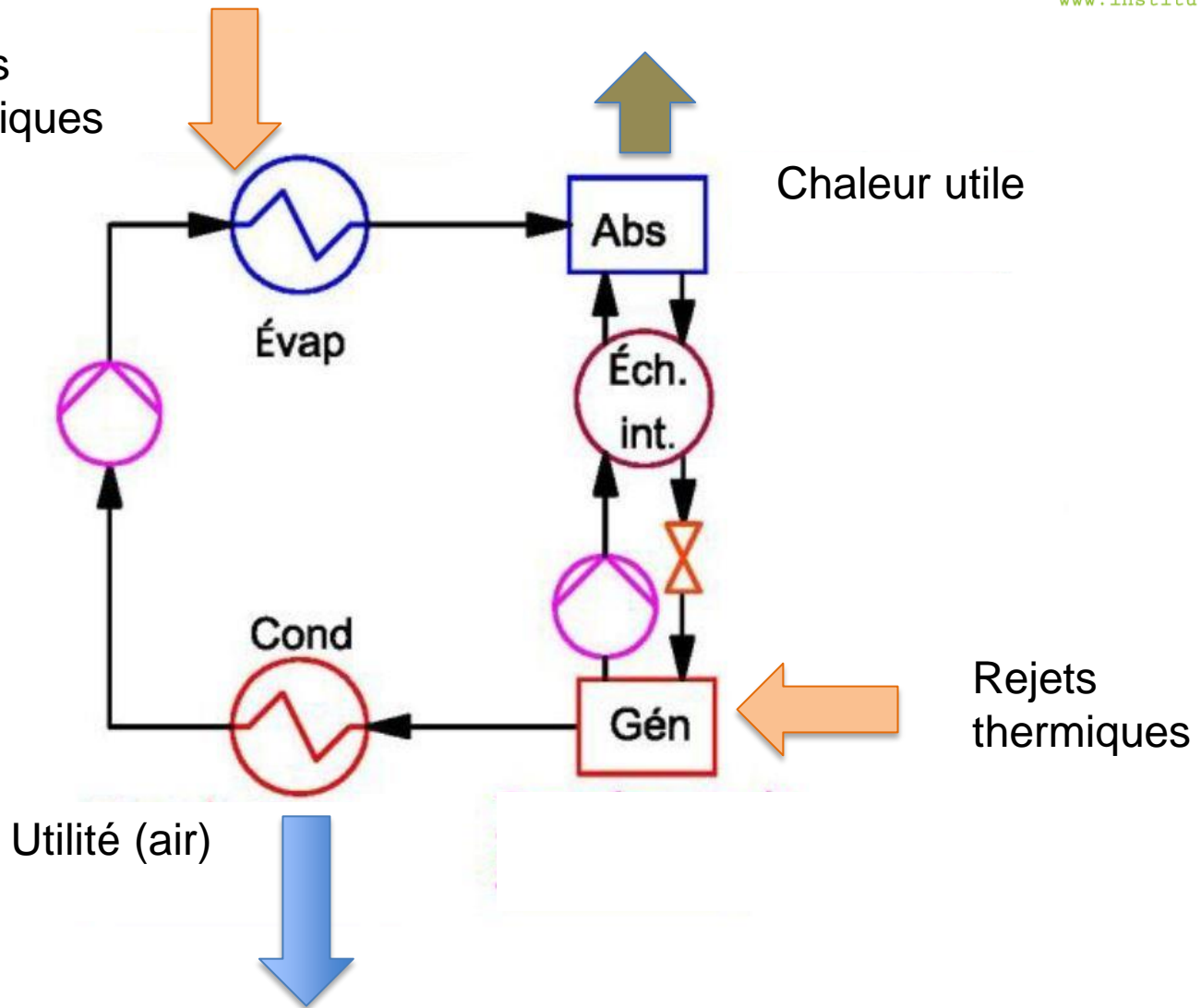
Le coût de l'installation est à ne pas négliger.

L'ambition du projet BAHT est d'étendre le domaine d'application des pompes à chaleur à absorption en :

- **Identifiant de nouveaux mélanges des fluides pouvant atteindre des températures de 150°C (et Tlift >70°C)**
- **Concevant des blocs technologiques performants et si possible moins chers**
- **Optimisant le système complet**



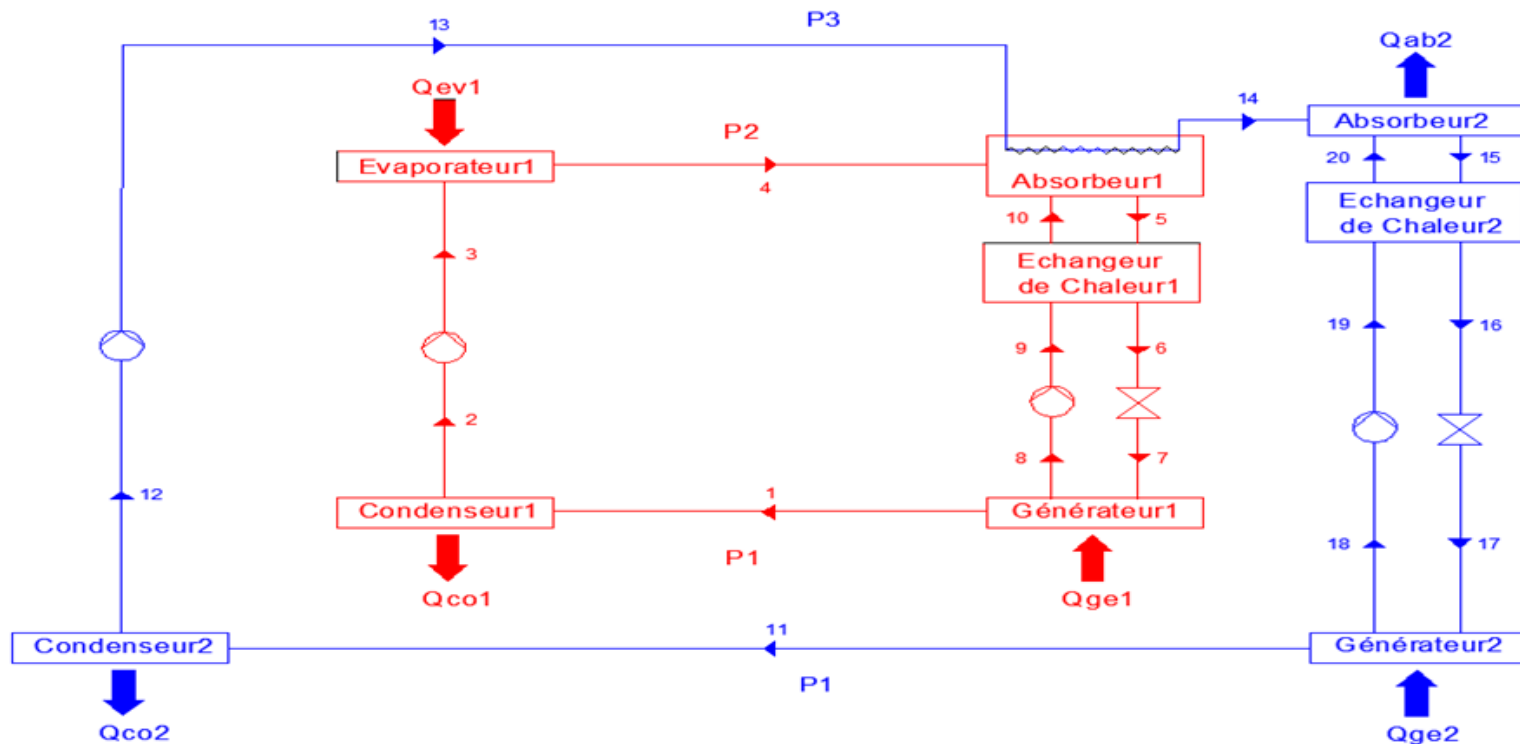
Rejets
thermiques



○ Performances des cycles à fluides alternatifs et sous diverses architectures

Modélisation d'architectures possibles :

Thermo-transformateur Double étage



$$\text{COP} = \frac{Q_{ab2}}{Q_{ge1} + Q_{ge2} + Q_{ev1} + W_p}$$

$$\text{COP}_c = \frac{Q_{ab2} * (1 - \frac{T_0}{T_{ab2}})}{Q_{ge1} * (1 - \frac{T_0}{T_{ge1}}) + Q_{ge2} * (1 - \frac{T_0}{T_{ge2}}) + Q_{ev1} * (1 - \frac{T_0}{T_{ev1}}) + W_p}$$

$$\eta_{\text{exergétique}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_c}$$

Modèle de conception des éjecteurs à vapeur

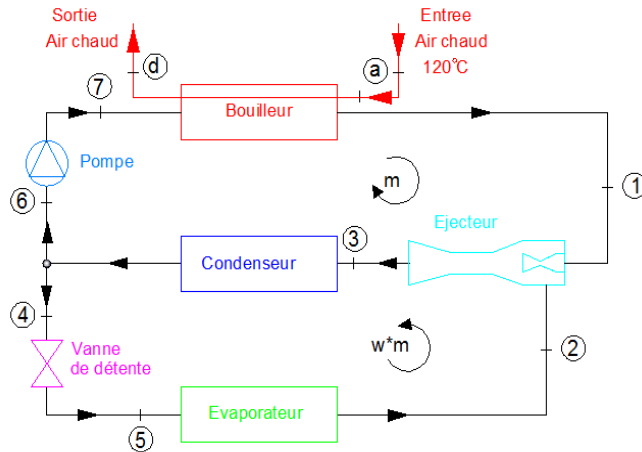


Schéma du cycle de base

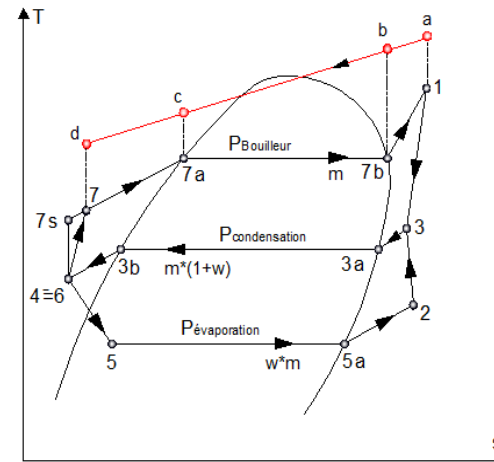


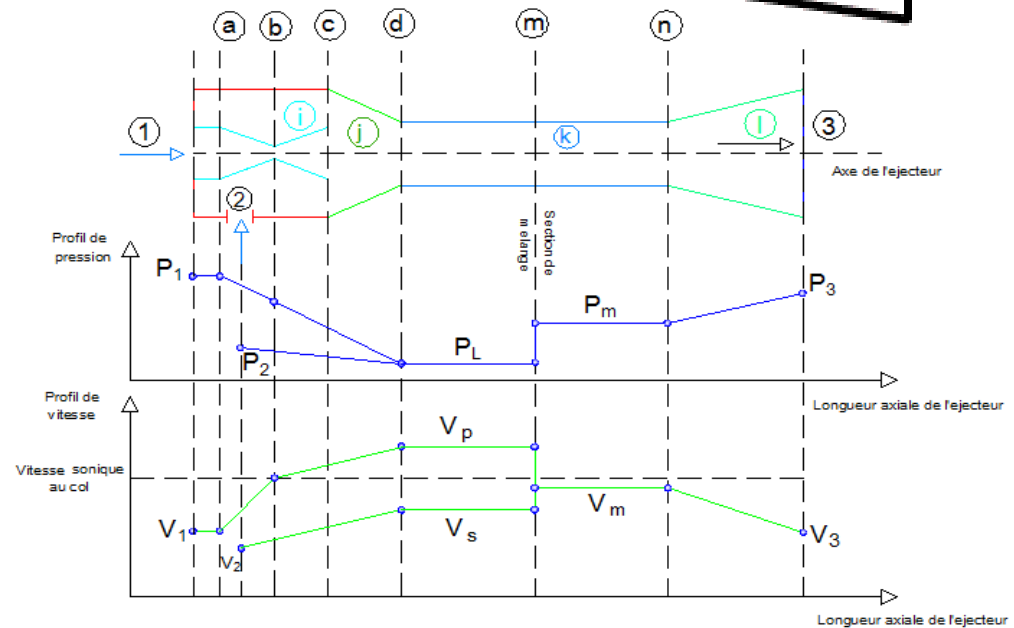
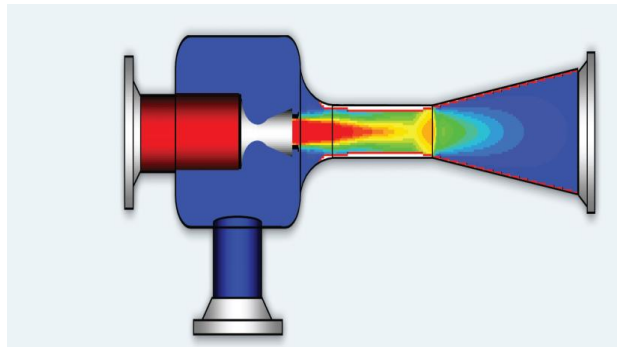
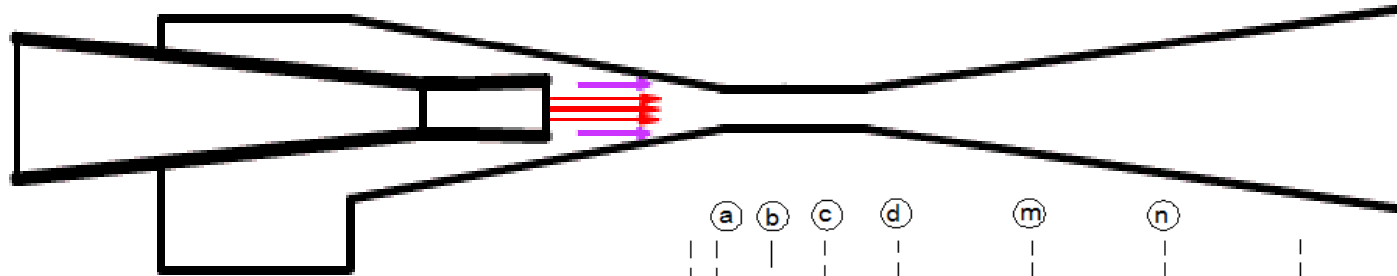
Diagramme T-S

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

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



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

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

- $DP = P_2 - P_L$

- La condensation acide détruit en un temps record les équipements non protégés



Les installations thermiques sont des convertisseurs d'énergie, la majorité de l'énergie reste sous forme thermique, l'exergie est transformée en anergie.

- La condensation acide détruit en un temps record les équipements non protégés

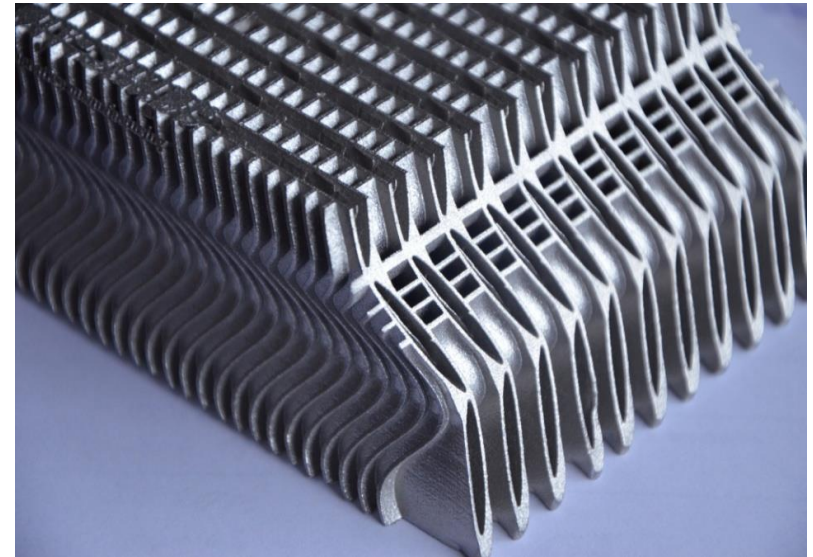


Les installations thermiques sont des convertisseurs d'énergie, la majorité de l'énergie reste sous forme thermique, l'exergie est transformée en anergie.

- Mise en place d'une première application en condensation d'air humide (L'installation comprend 2 modules équipés chacun de 4 échangeurs RO 70 plaques épaisseur 1mm en PP Polyone Thermatech)

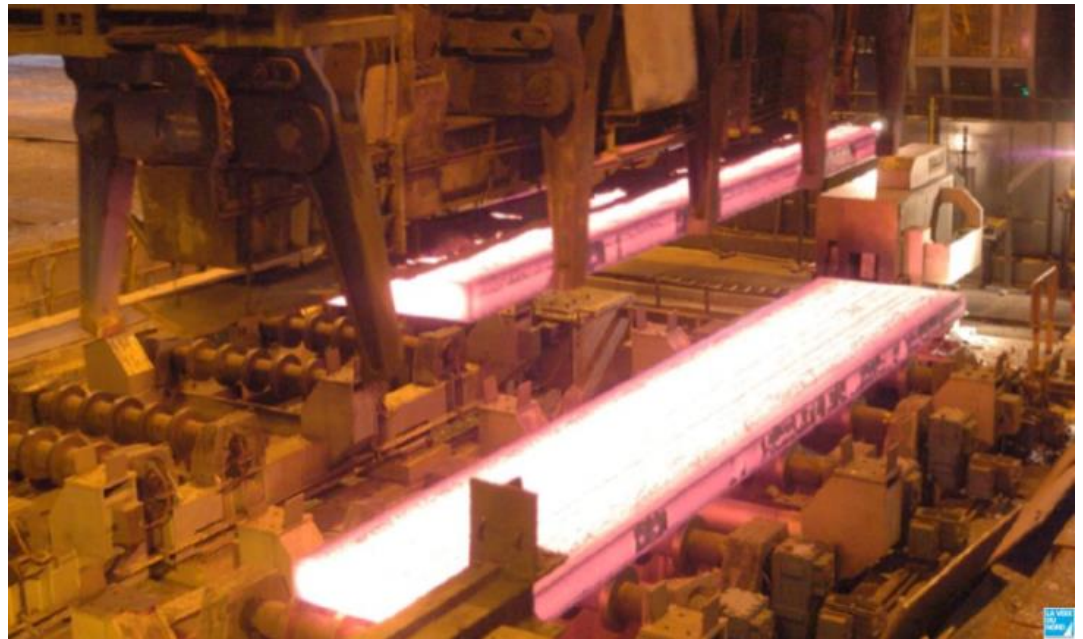
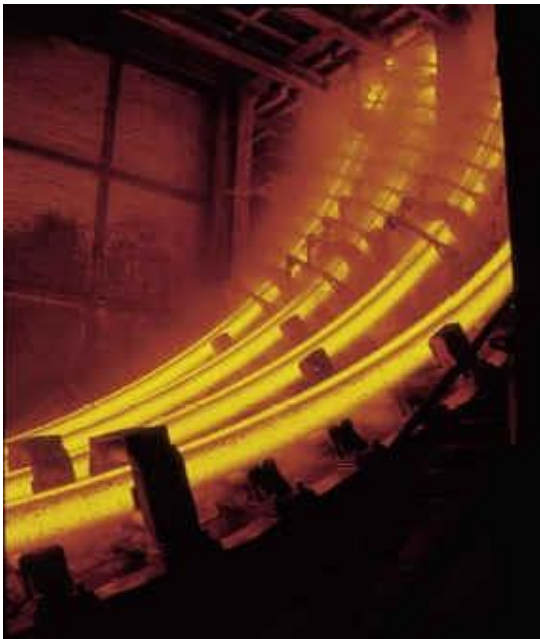


Fabrication additive : exemples.



► La Coulée continue

- Distribution vers plusieurs brins.
- Vitesse du brin d'acier 1.5-1.7 m/min
- Rouleau 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.

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



Assemblage de modules standardisés pour une unité de 1 MW de puissance électrique, turbine à gaz Capston.