

LA COGÉNÉRATION DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Henri Safa

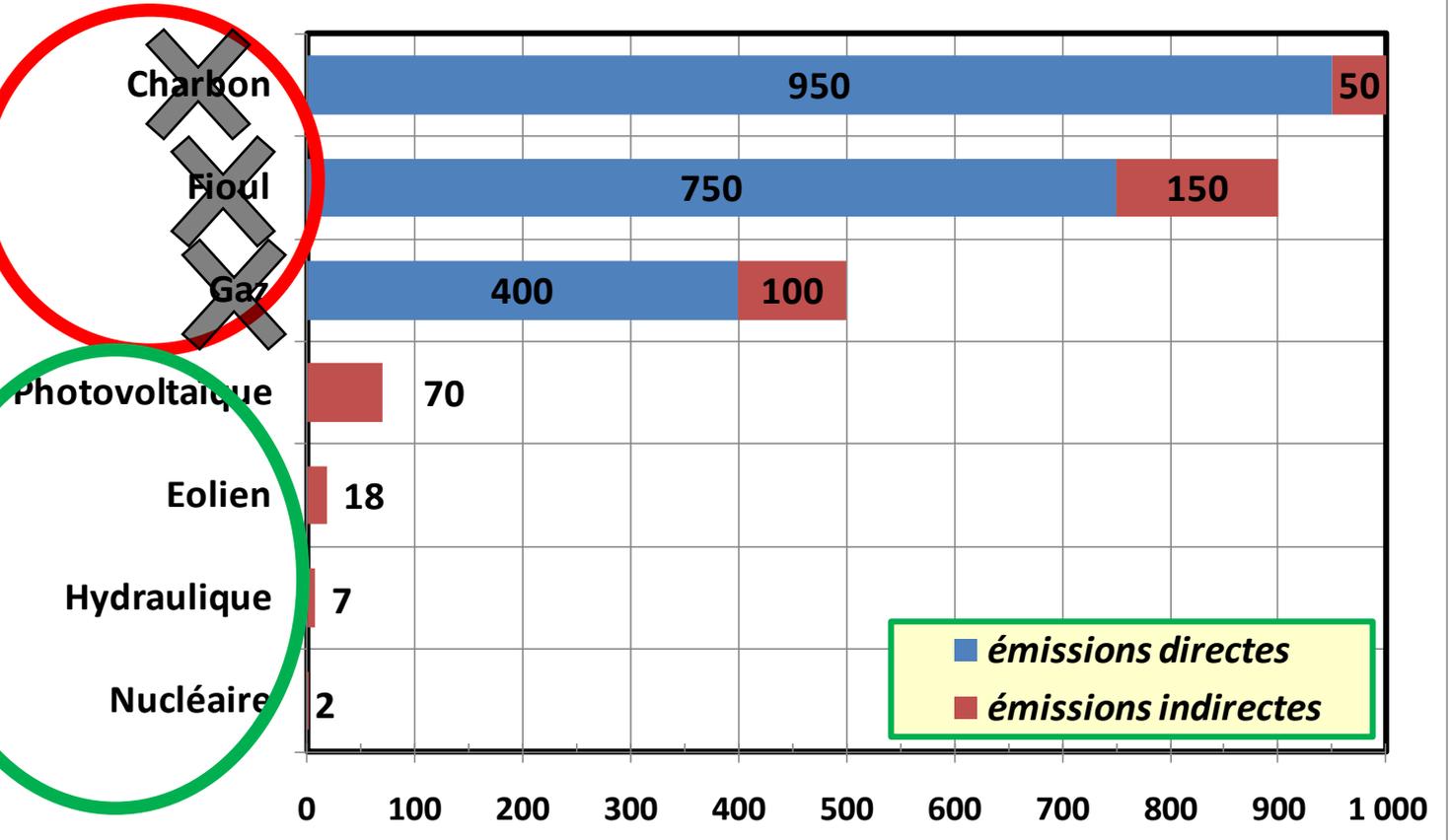
Institut international de *l'énergie* nucléaire, I2EN, France

&

Direction de *l'énergie* nucléaire, CEA, France

henri.safa@i2en.fr

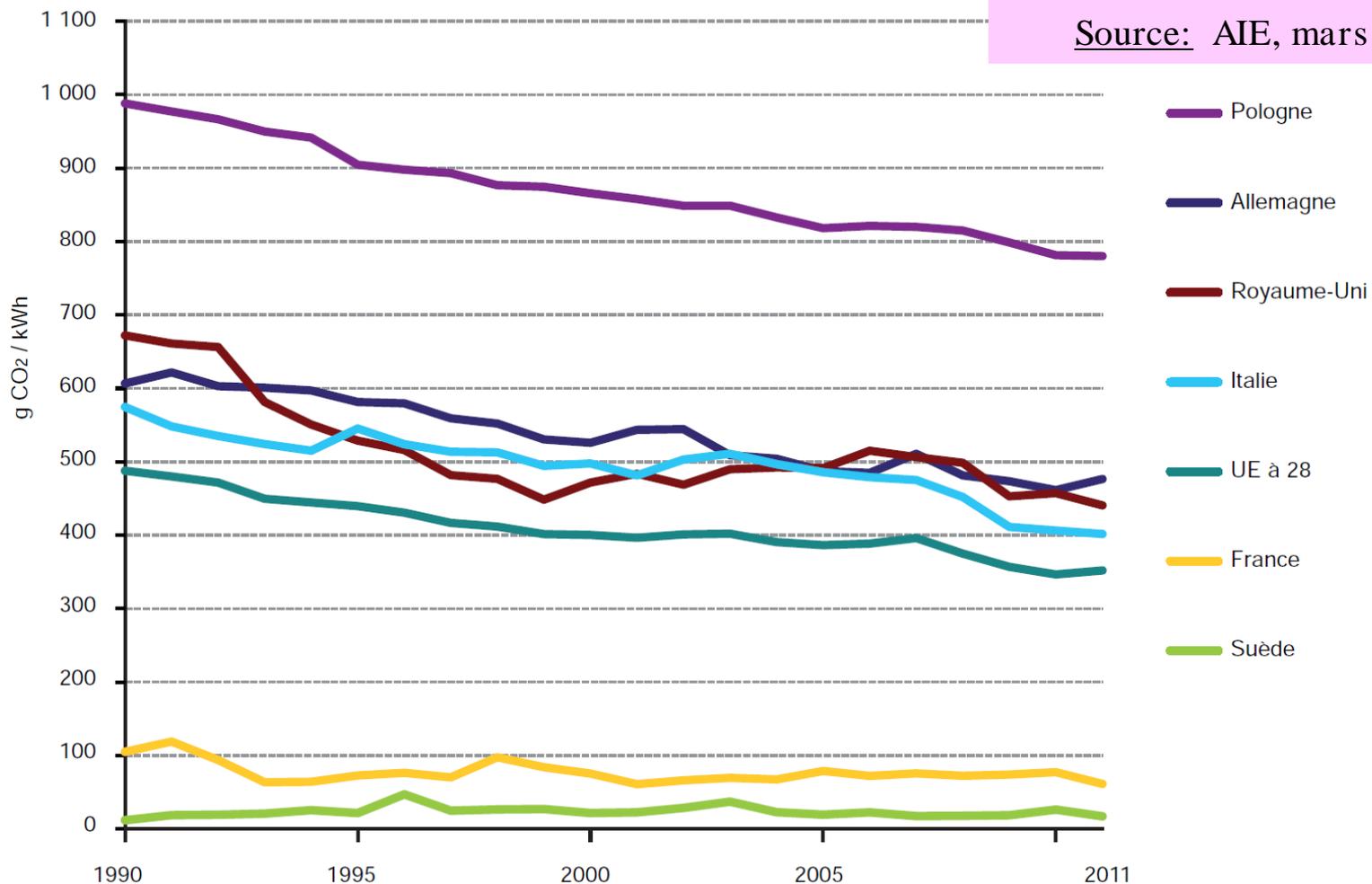
Production d'électricité: émissions de CO₂ (en g/kWhe)



Comment limiter l'usage de sources carbonées ?

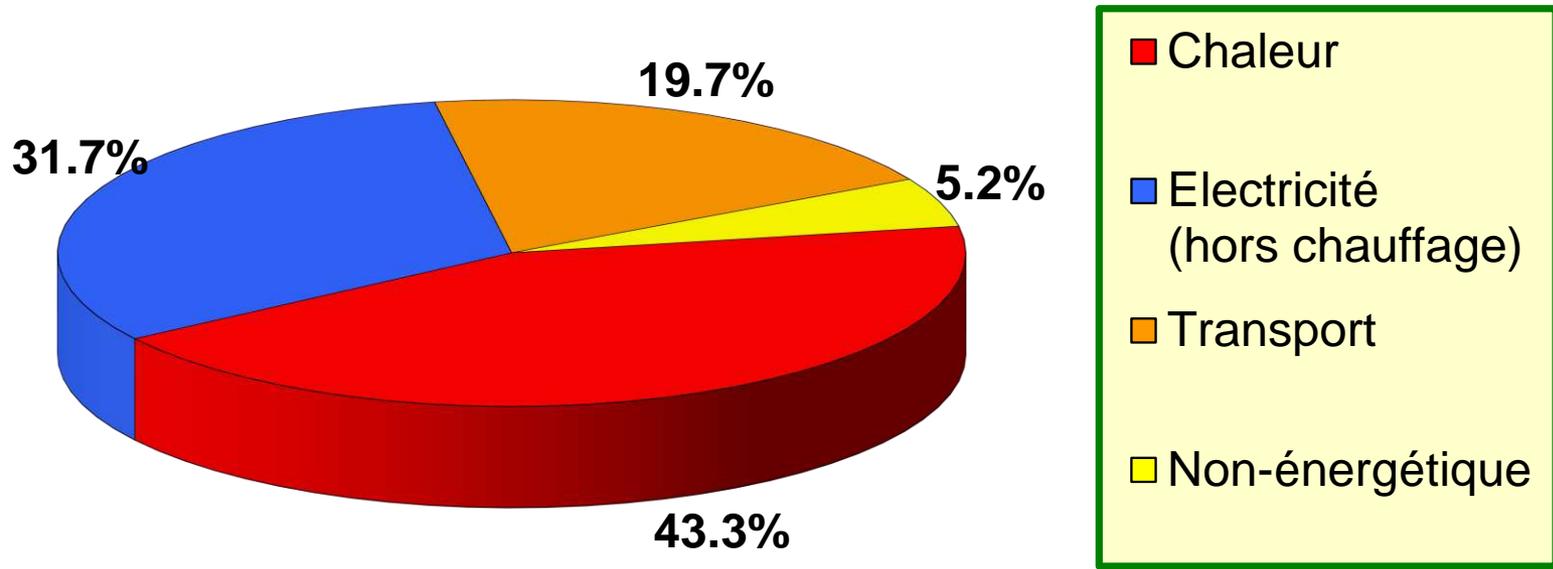
LES ÉMISSIONS DE CO₂ DUES À LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE

Source: AIE, mars 2014



L'électricité en France est déjà décarbonée !

Energie primaire en France par utilisation (2016)



Total = 250 Mtep

Il faut décarboner les transports et surtout la chaleur !

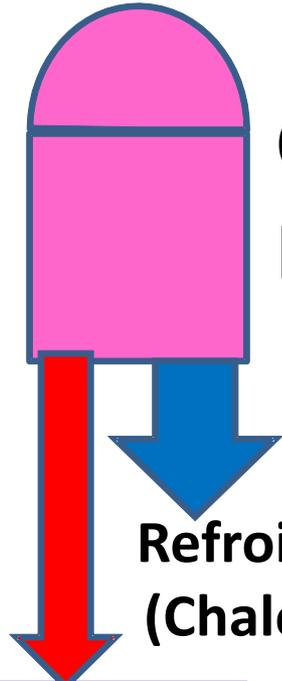
On peut décarboner la **chaleur** grâce à la
cogénération qui est :

1. techniquement réalisable
2. économiquement compétitive

En mode Cogénération

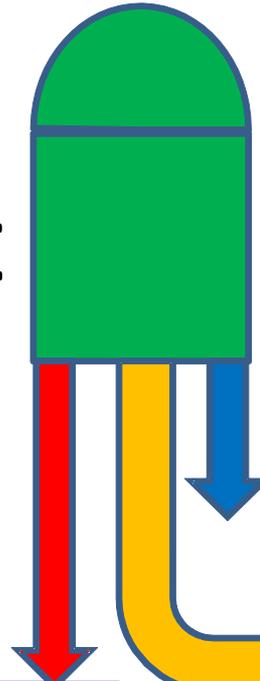
Excellent rendement énergétique global (qui peut dépasser 90% !!)

CENTRALE ÉLECTRIQUE



Refroidissement
(Chaleur dissipée)

ÉLECTRICITÉ



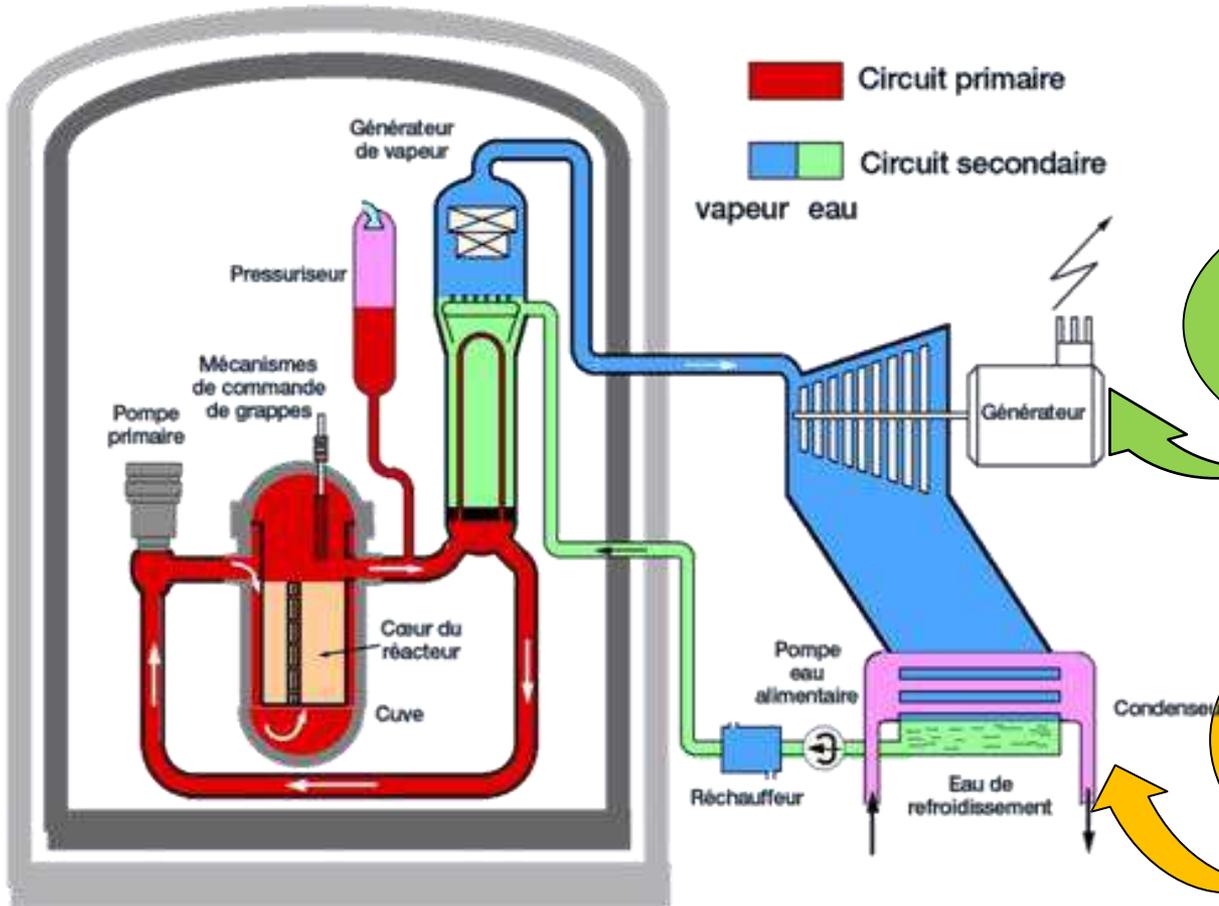
Refroidissement
(Chaleur dissipée)

ÉLECTRICITÉ

**Autre produit énergétique
(Chaleur, Carburant,
Vapeur, Eau...)**

En mode électrique pur

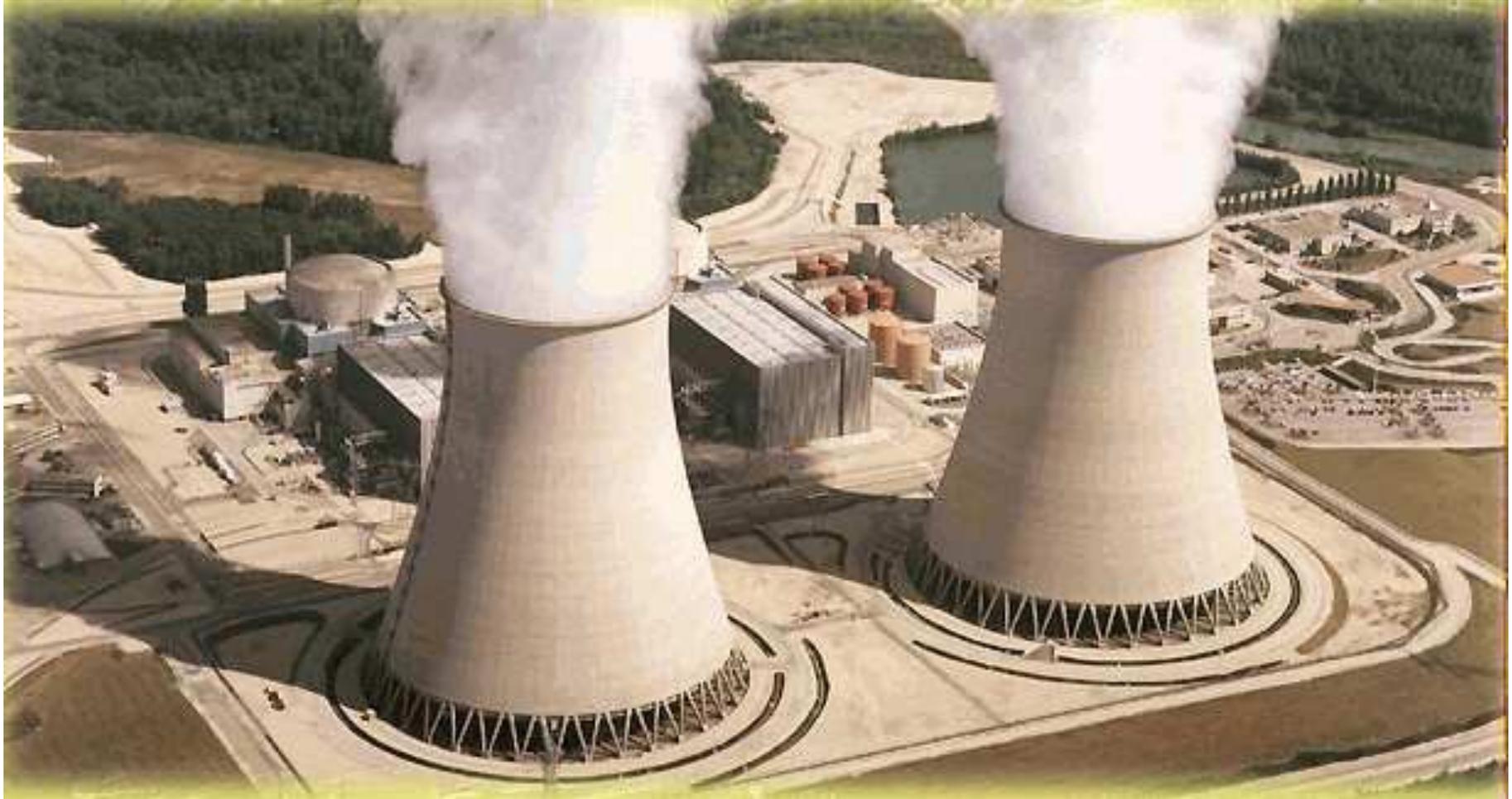
Rendement de 34% (Nucléaire) à 56%
(Gaz dans un cycle combiné CCGT)



1/3 de l'énergie de fission est transformée en électricité

2/3 de l'énergie est dissipée dans l'environnement

Un réacteur à eau pressurisée (REP)

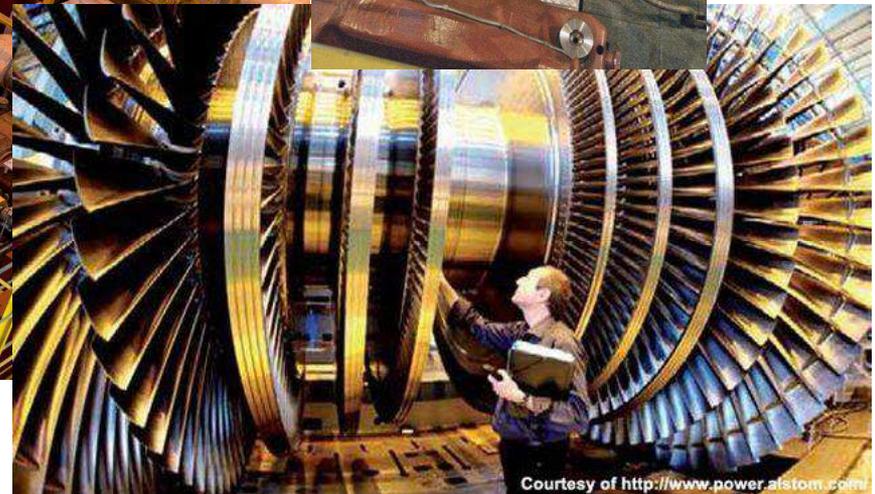




Source: EDF



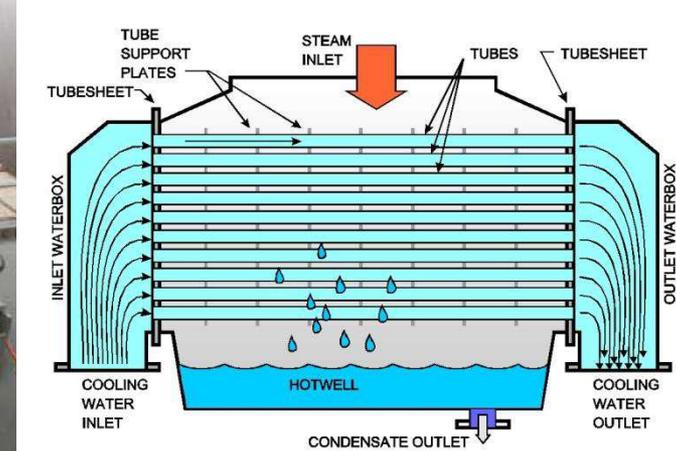
Alternateur



Courtesy of <http://www.power.alstom.com>

Turbine à basse pression d'ALSTOM

Les gros composants du turbo-alternateur



Source: TVO, Finlande
EPR, Olkiluoto 3

Le condenseur est situé en-dessous de la turbine à basse pression

$$\eta = \frac{|W_{HP} + W_{BP}| - W_P}{Q_i}$$

- Le travail produit par la turbine à basse pression W_{BP} **décroit** lorsque la température de sortie augmente

$$E_{out} = Q_{out} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

- L'exergie **augmente** avec la température de sortie

- De la chaleur à température ambiante n'a aucune valeur intrinsèque
- **L'exergie** est une grandeur plus appropriée qui prend en compte la température à laquelle une quantité de chaleur est produite

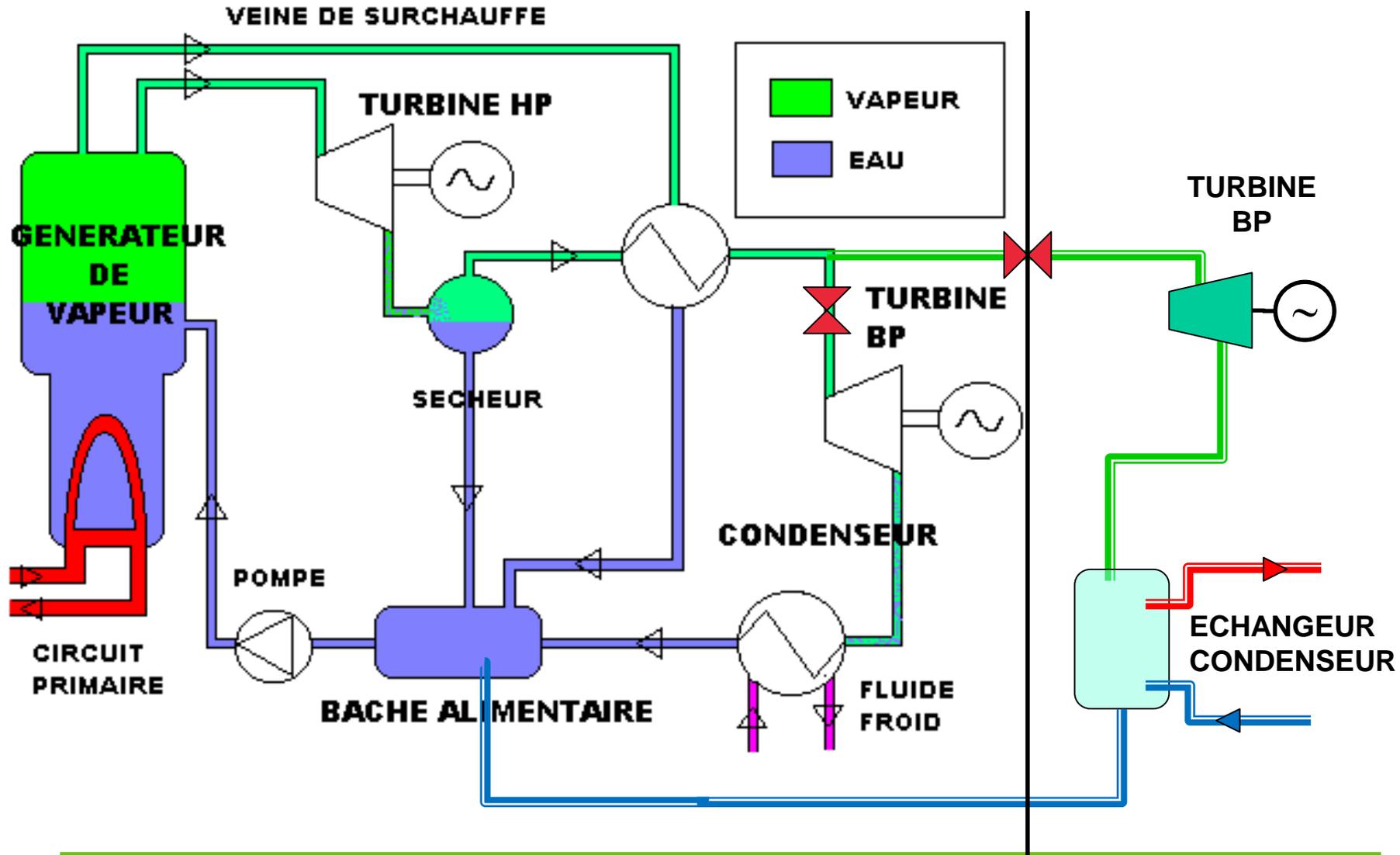
$$E = H - T_0 \cdot S$$

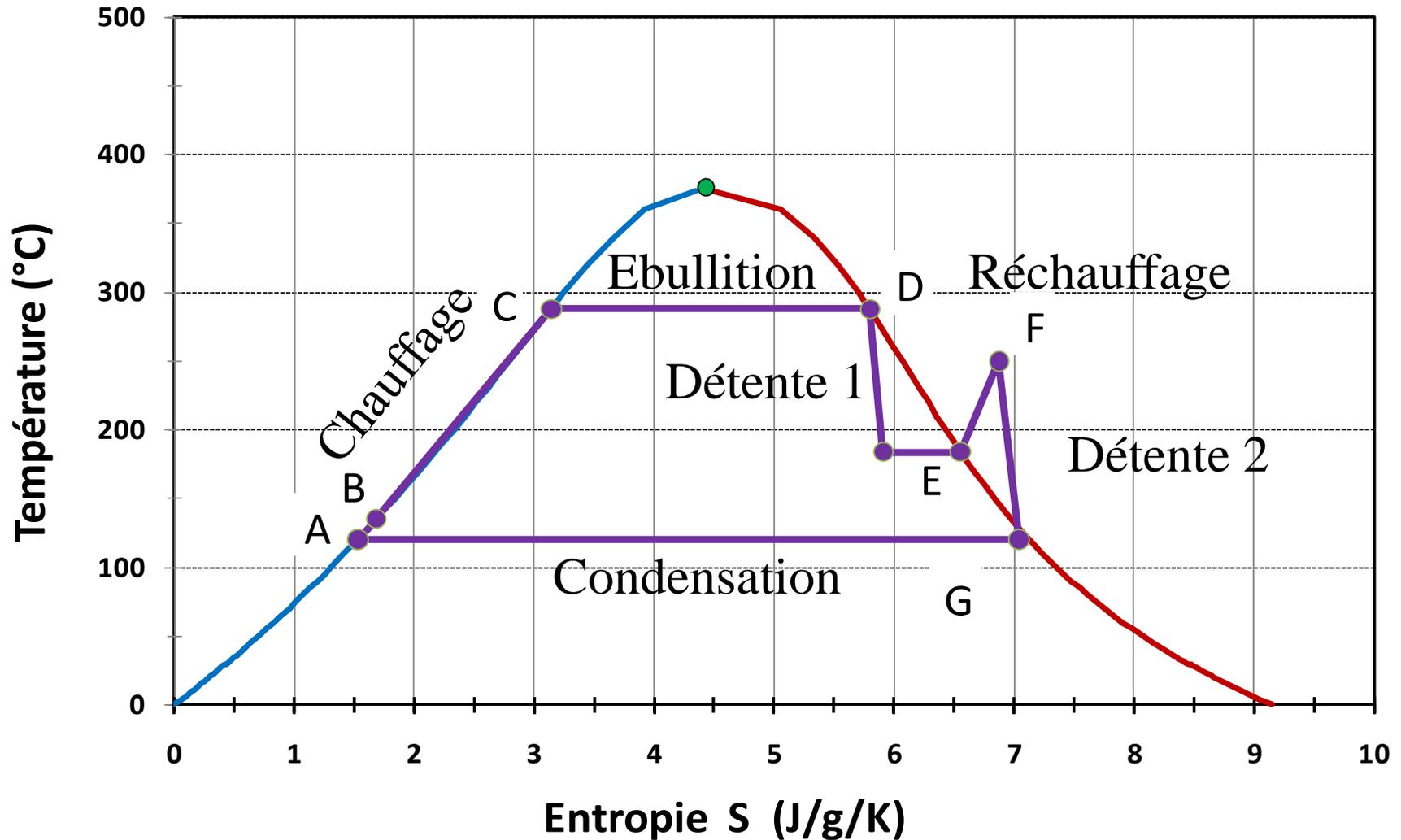
Valeur exergétique d'une quantité de chaleur Q à une température T \longrightarrow $E = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$

Exemple d'un REP 1300 MWe

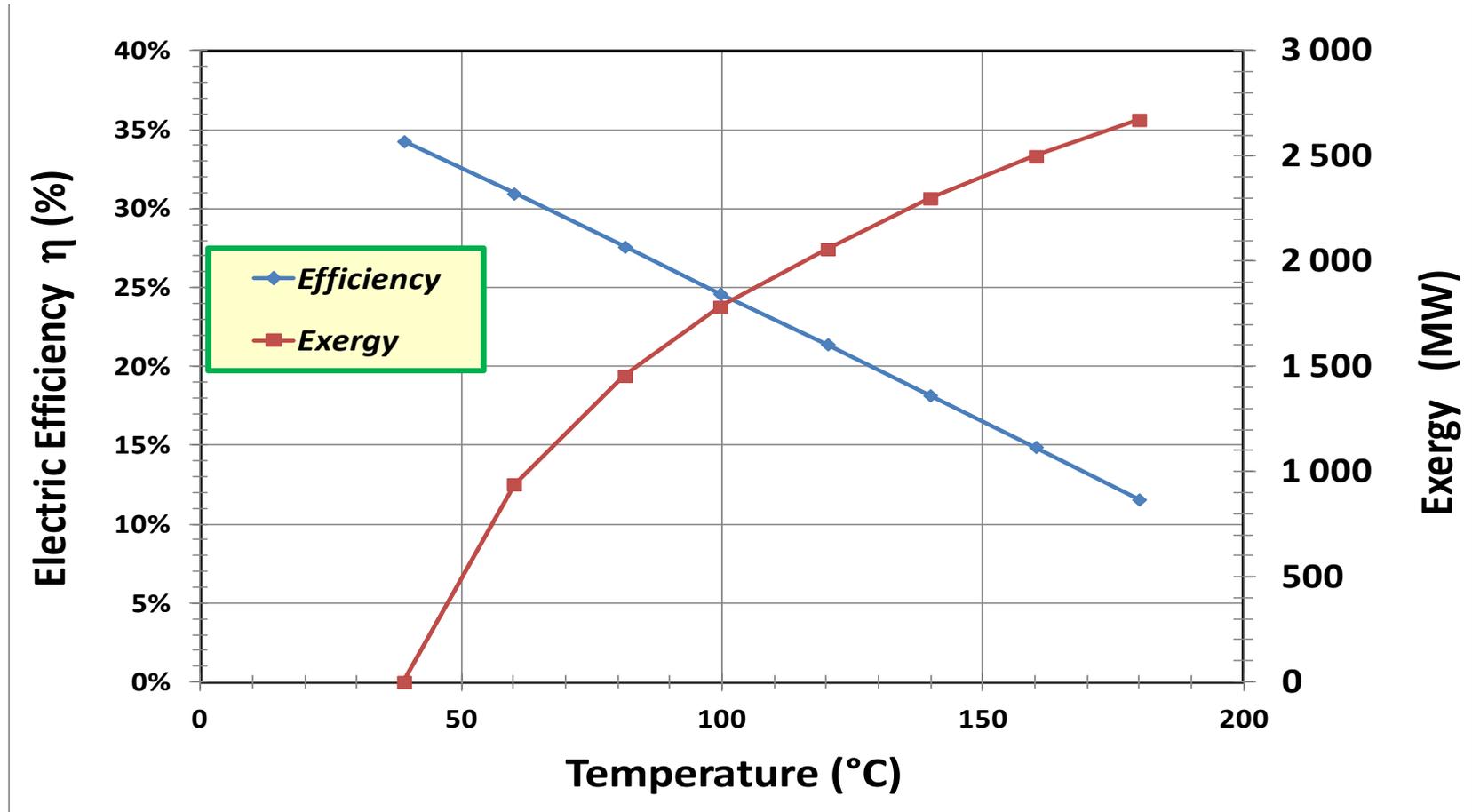
T hot	T cold	Wp	Qi	W _{HP}	W _{BP}	W _{gross}	Qs	η _{carnot}	η
(°C)	(°C)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MWe)	(MW)	(%)	(%)
288	39	9	3 920	-417	-936	1 353	-2 562	44.4%	34.3%

MODIFICATIONS DU CIRCUIT SECONDAIRE

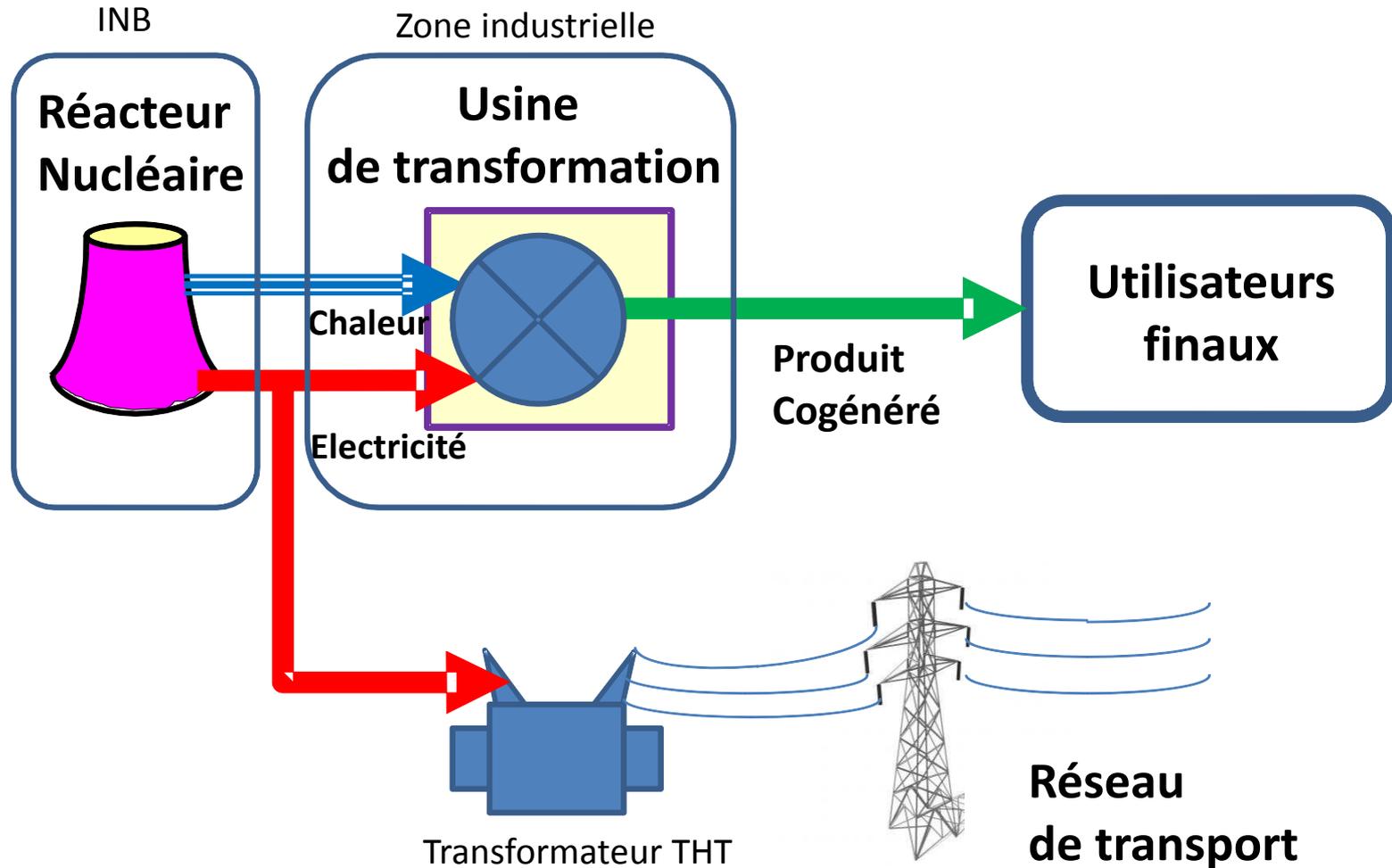




Modification de la turbine Basse Pression (sortie à 2 bars)



Compromis entre production d'électricité et exergie



➤ Réglage primaire de fréquence

Très rapide (~ secondes)

Régulation automatique : vitesse de turbine / ajustement de puissance

➤ Réglage secondaire de fréquence

Temps moyen (~ minutes)

Demande de RTE: réserve de puissance / effacement

➤ Réglage tertiaire de fréquence

Plus longue échéance (~ heures)

Anticipation: démarrage unités de puissance; récupération des marges

La cogénération permet deux options flexibles

1. Une commutation très rapide

entre la production d'électricité et celle du produit cogénéré

- ❖ Autorise un ajustement flexible de la puissance électrique y compris avec un fonctionnement à puissance constante du réacteur
- ❖ Outils disponibles : commutateur électrique, vannes hydrauliques, barres de contrôle, etc

2. Un stockage d'énergie

Les produits cogénérés peuvent être stockables (carburants, gaz, eau)

- ❖ s'affranchit complètement des contraintes temporelles
- ❖ autorise un basculement aisé en fonctionnement

Il faut décarboner les usages non électriques :

1. Le transport



2. L'industrie

3. Le chauffage résidentiel et tertiaire

En France, le poste **chaleur** représente

- **80%** de l'énergie consommée dans le résidentiel-tertiaire
- **40%** des besoins de l'industrie

Usages domestiques: chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson

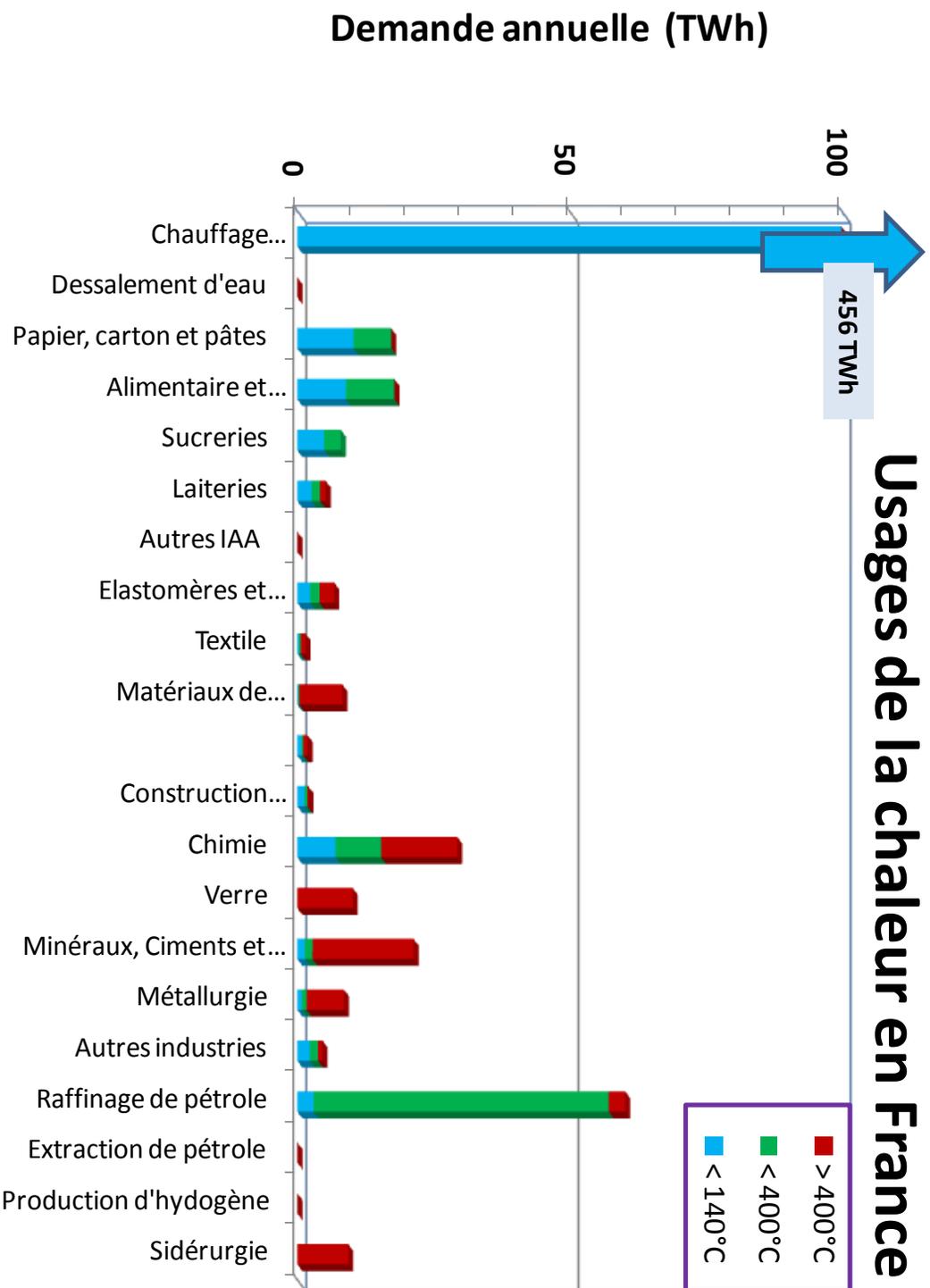
Industrie: Séchage, raffinage de pétrole, chimie, transformation des matières, fusion, évaporation, stérilisation, ...

- **80%** des usages se font à une température **inférieure à 400°C**
- **65%** des usages se font à une température **inférieure à 120°C**

**Les besoins en chaleur se trouvent
principalement à basses températures**

LES BESOINS DE CHALEUR

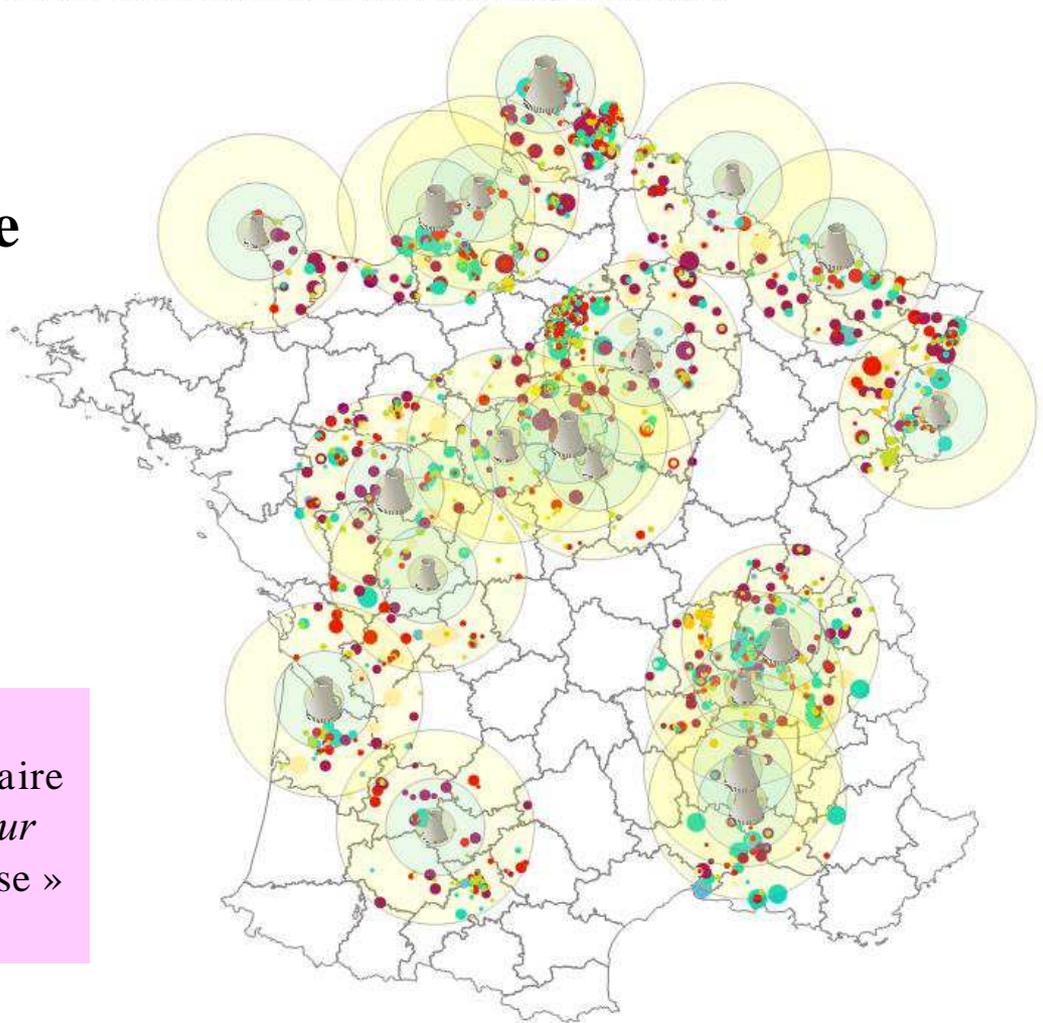
Usages de la chaleur en France



Le chauffage urbain est le principal poste de consommation

Tous sites >10GWh et moins de 100km d'une centrale

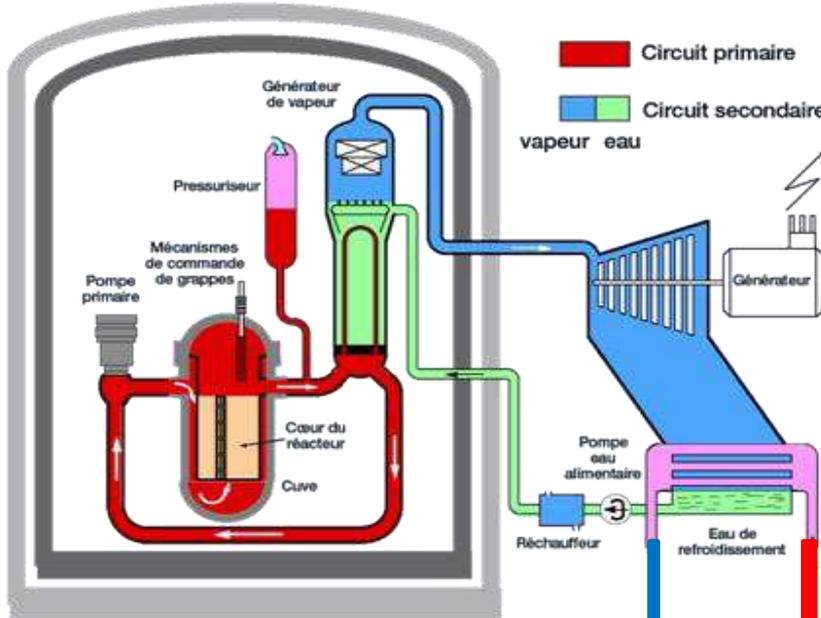
2156 sites industriels des secteurs pertinents à moins de 100 km à vol d'oiseau d'au moins une des 19 centrales



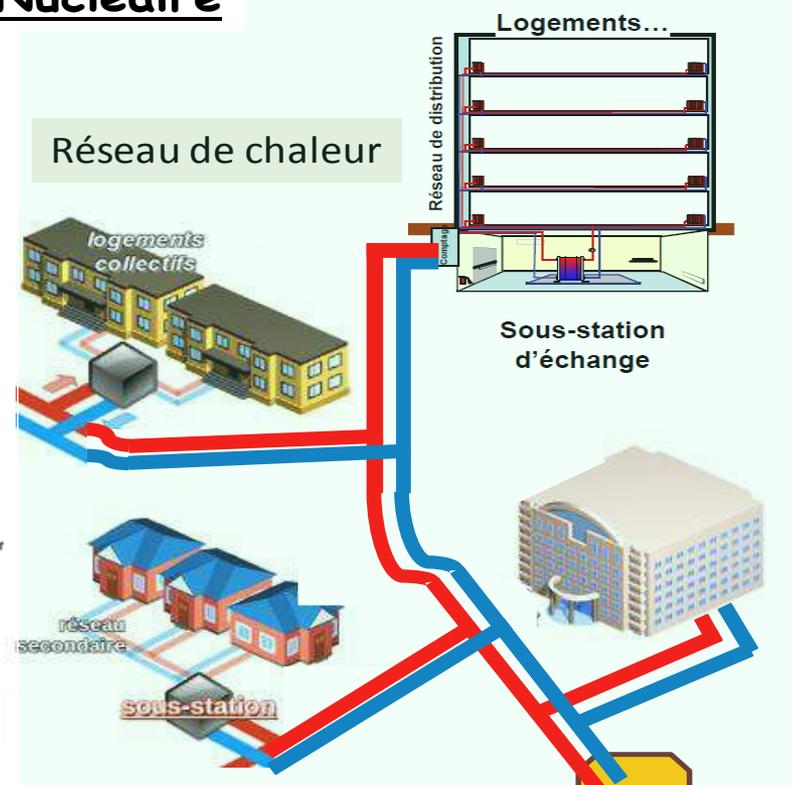
Source: Etude du CVT ANCRE,
Sébastien Sylvestre, « Cogénération nucléaire
*Intérêts et potentiels d'une offre de chaleur
basse température pour l'industrie française* »
2016

Cogénération Nucléaire

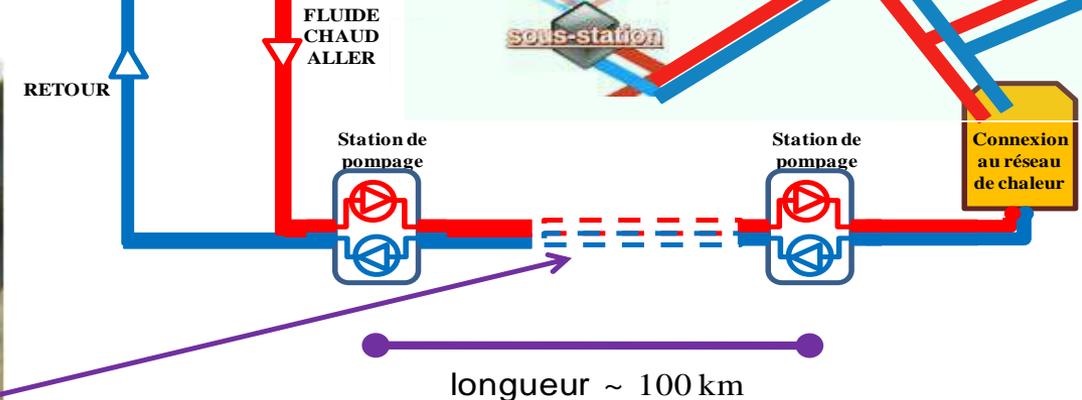
Réacteur nucléaire



■ Circuit primaire
■ Circuit secondaire
 vapeur eau



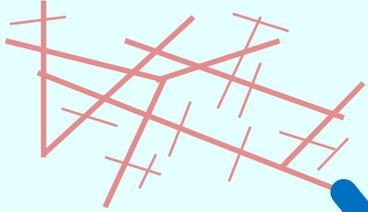
Ligne de transport



longueur ~ 100 km

➤ Une ligne de **transport à longue distance** qui délivre de la chaleur sous la forme d'eau chaude à une agglomération urbaine, un aéroport et des zones industrielles.

Agglomération



Aéroport



Zone industrielle

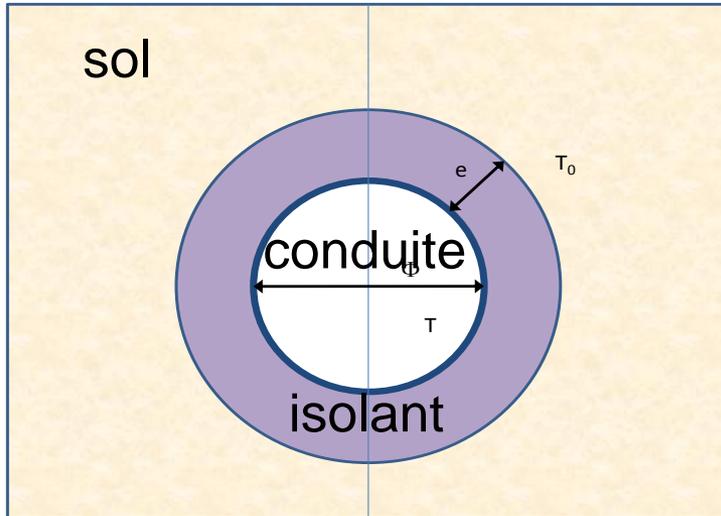


Centrale nucléaire



Ligne de transport de la chaleur

10 km

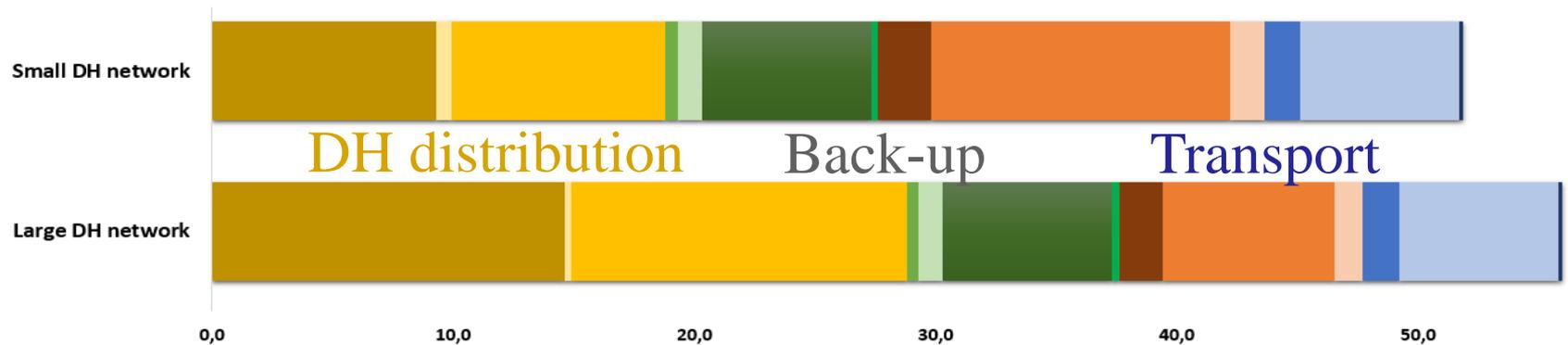


- Diamètre Φ
- Epaisseur de l'isolant e
- Conductivité thermique de l'isolant $\lambda < 0.04 \text{ W/m.K}$

$$\left(\frac{dQ}{dz} \right) = \frac{2\pi\lambda}{\text{Ln} \left(1 + \frac{2e}{\Phi} \right)} (T - T_0) < 120 \text{ W/m}$$

**Pertes thermiques totales ~ 2% de la
puissance transportée sur 100 km !**

Décomposition des coûts de la chaleur



	Small DH network	Large DH network
DH distribution capital cost*	9,3	14,6
DH distribution electricity consumption	0,6	0,3
DH distribution fixed O&M	8,9	13,9
GHOB + WTES capital cost*	0,5	0,5
GHOB + WTES electricity consumption	1,0	1,0
GHOB gas consumption	7,0	7,0
GHOB + WTES fixed O&M	0,3	0,3
HTS capital cost*	2,2	1,8
HTS electricity consumption	12,4	7,1
HTS fixed O&M	1,4	1,2
NCHP heat generation capital cost**	1,5	1,5
NCHP opportunity cost (electric output reduction)	6,6	6,6
NCHP fixed O&M	0,0	0,0

Source: Martin Leurent,
Thèse au CEA, « Les conditions de développement économique de la cogénération nucléaire »

- La récupération de la chaleur d'une centrale électrique pour le chauffage urbain ou des applications industrielles est **techniquement réalisable** et **économiquement viable**
- La **cogénération** améliore le **rendement énergétique** de la centrale électrique (**de 33% à plus de 80%**)
- La **ligne de transport** est une réalisation clé pour la compétitivité économique. La chaleur peut être transportée sur de **longues distances** (> 100 km) avec de très faibles pertes (**1%**)
- La cogénération nucléaire pour la chaleur urbaine permettra **une réduction massive des émissions de CO₂** ainsi qu'une **économie d'énergie** et de la **flexibilité pour le réseau électrique**.