

# LA COGÉNÉRATION DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

*Henri Safa*

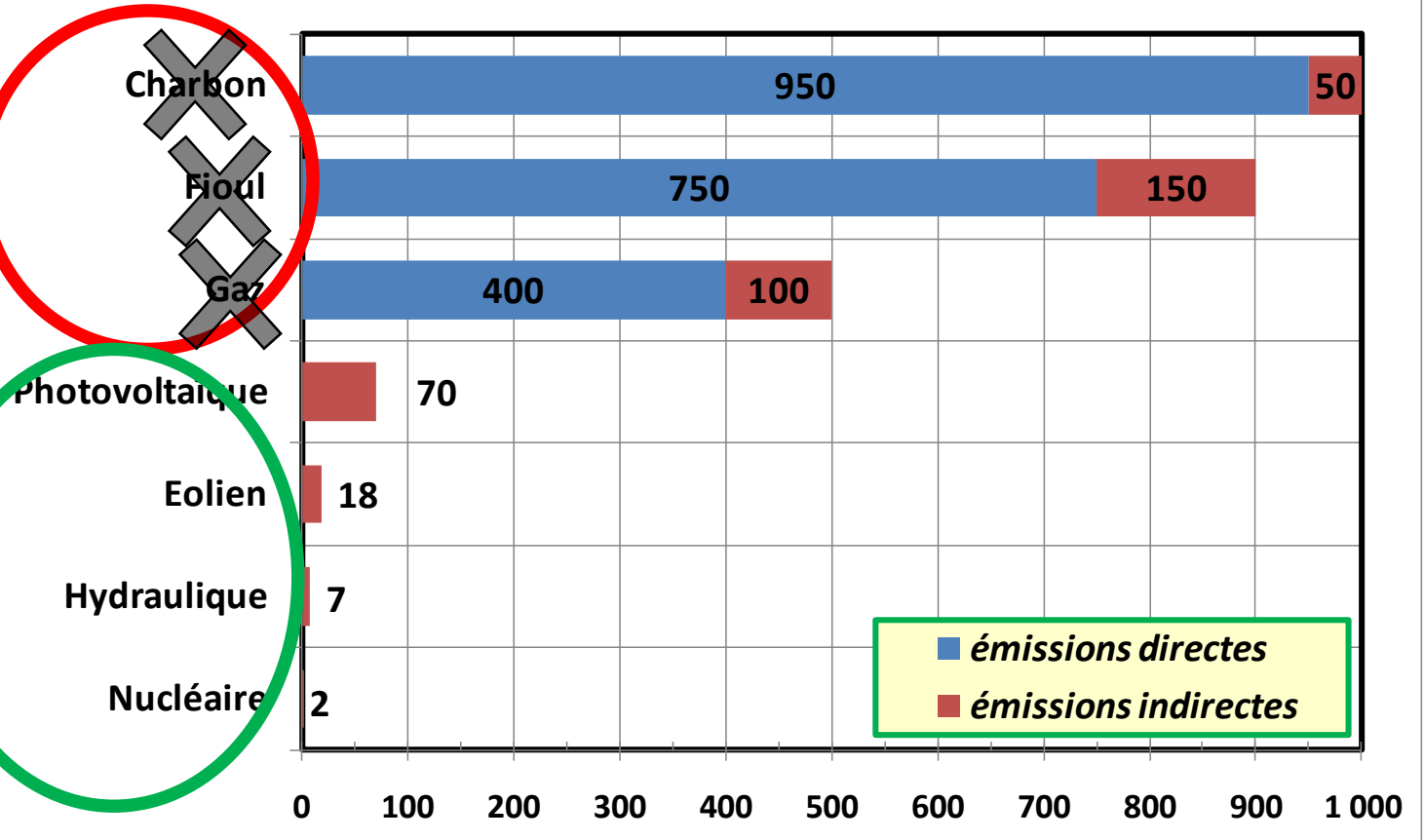
*Institut international de l'énergie nucléaire, I2EN, France*

*&*

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

*henri.safa@i2en.fr*

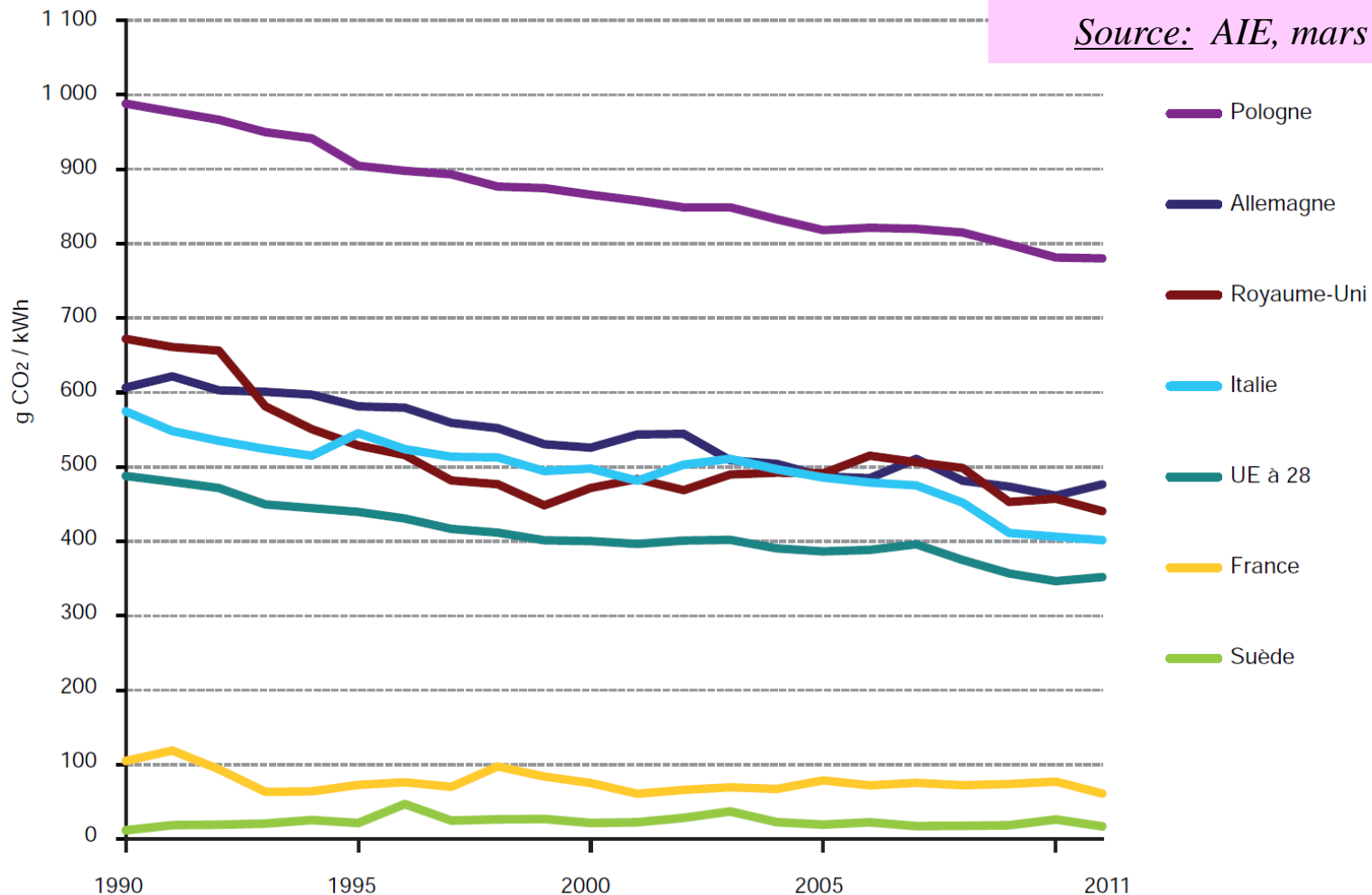
Production d'électricité: émissions de CO<sub>2</sub> (en g/kWhe)



**Comment limiter l'usage de sources carbonées ?**

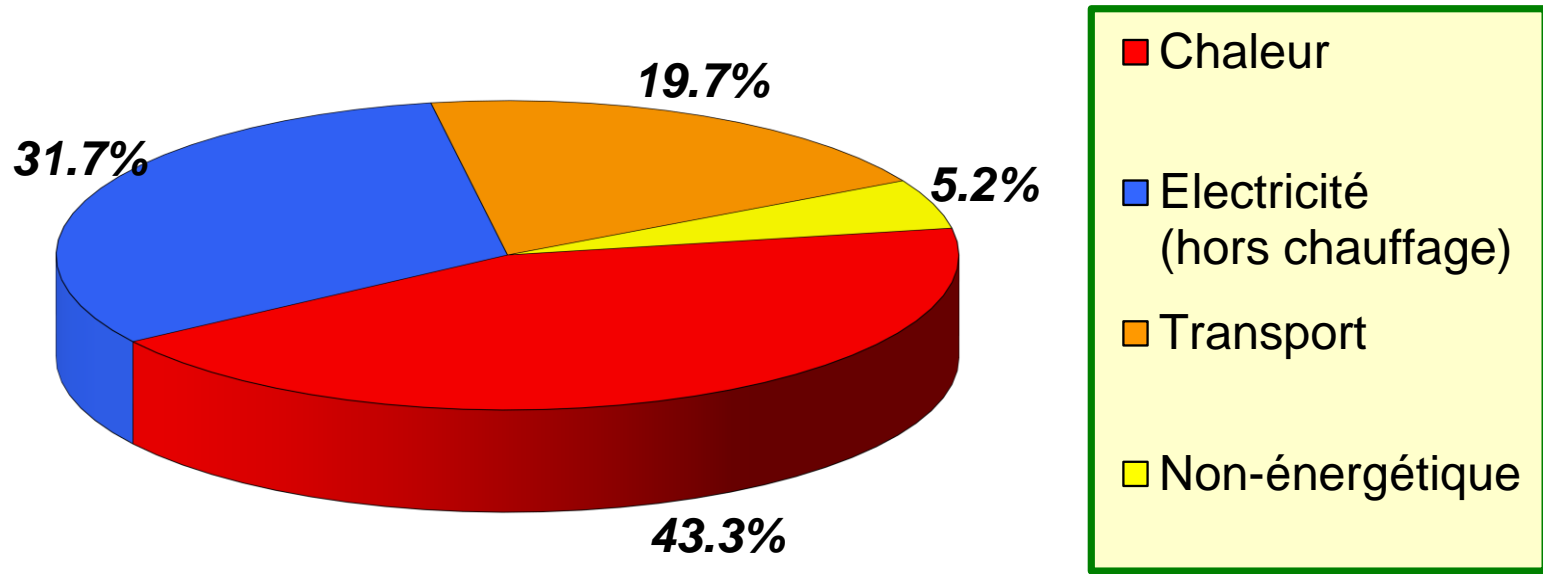
# LES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> DUES À LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE

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 (peut dépasser 90% !!)

Refroidissement  
(Chaleur dissipée)

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

## CENTRALE ÉLECTRIQUE

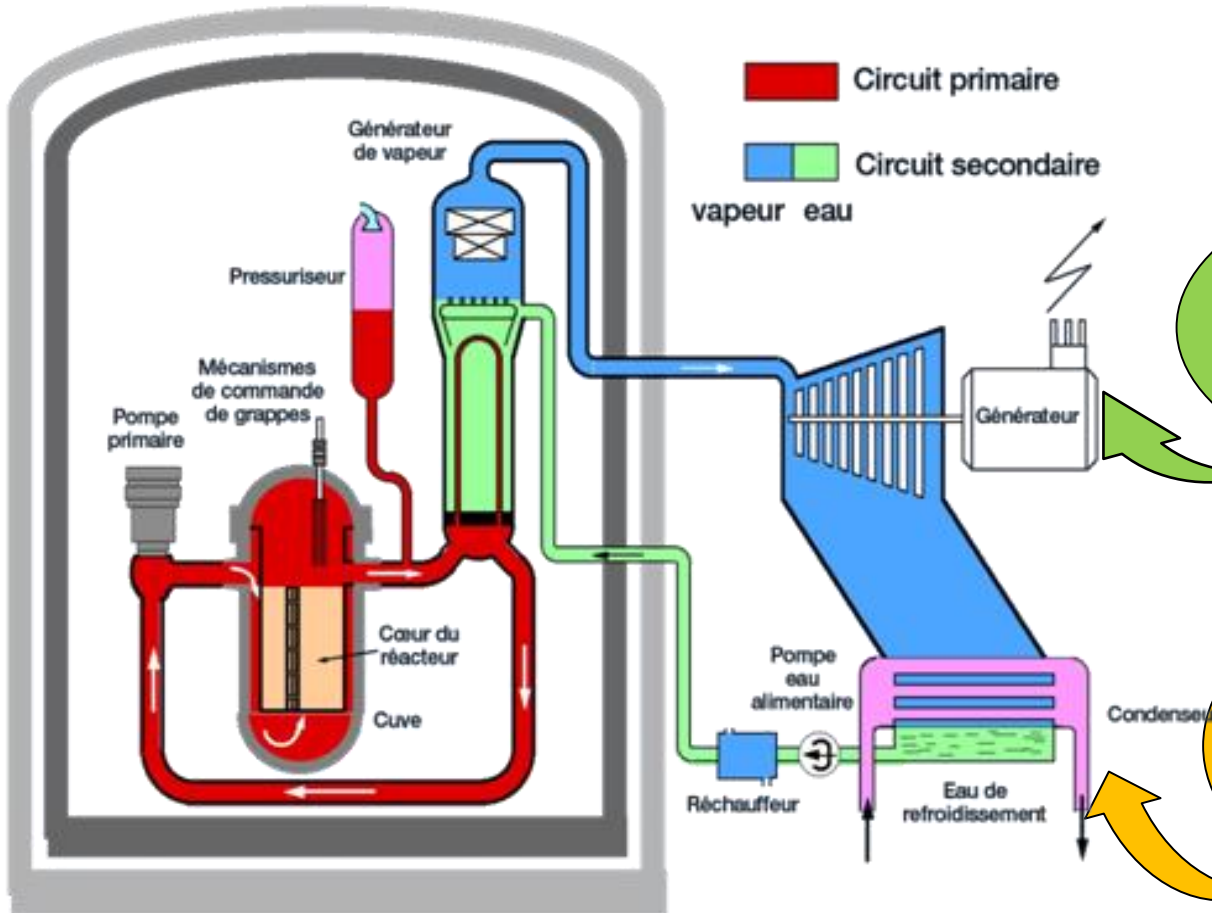
Refroidissement  
(Chaleur dissipée)

**ÉLECTRICITÉ**

**ÉLECTRICITÉ**

## En mode électrique pur

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



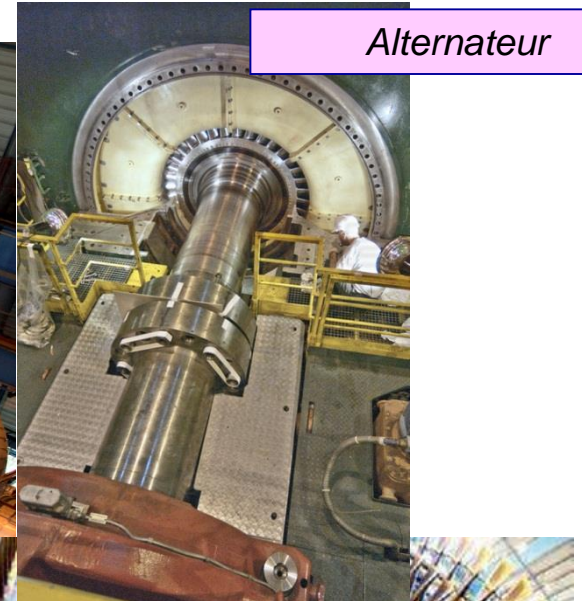
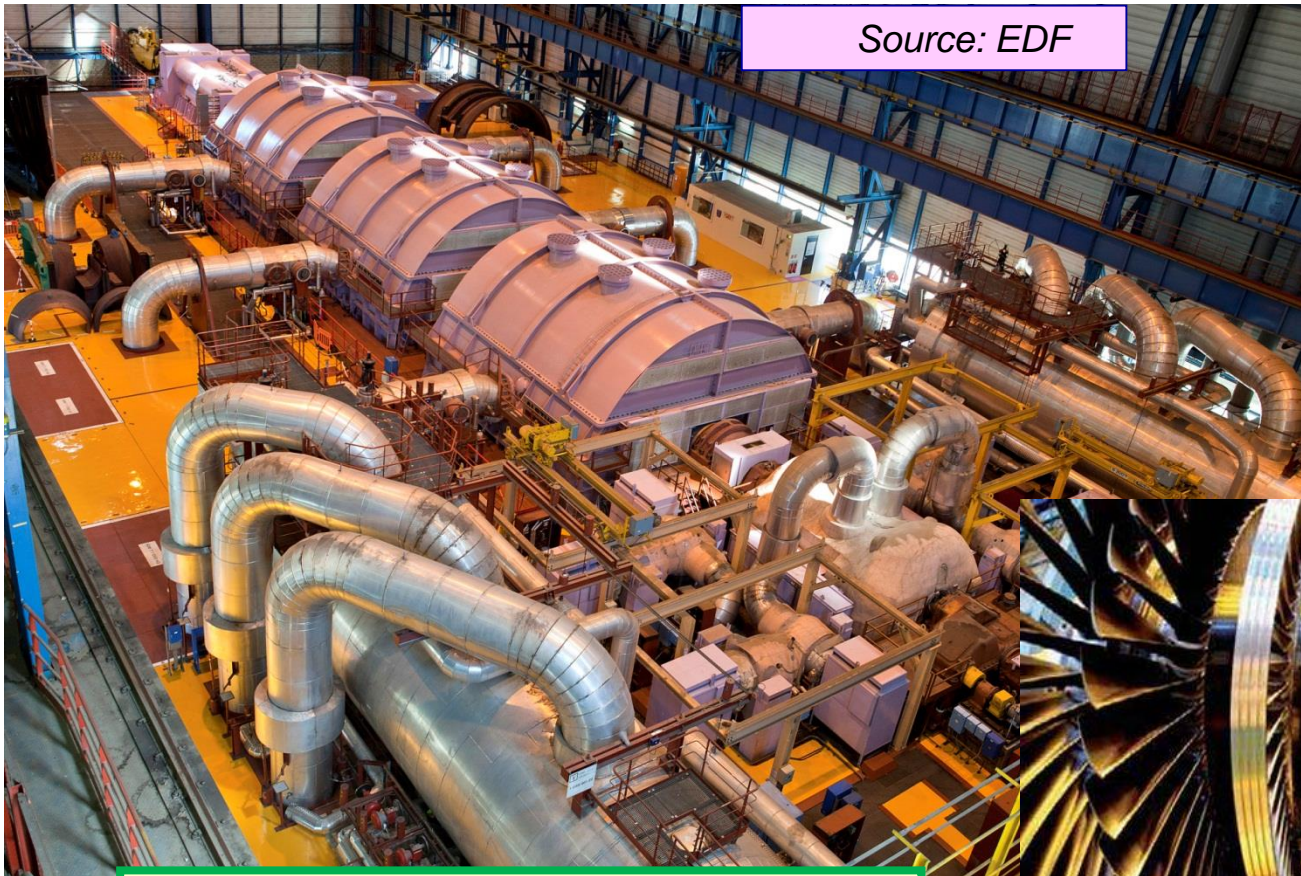
1/3 de l'énergie de fission est transformée en électricité

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

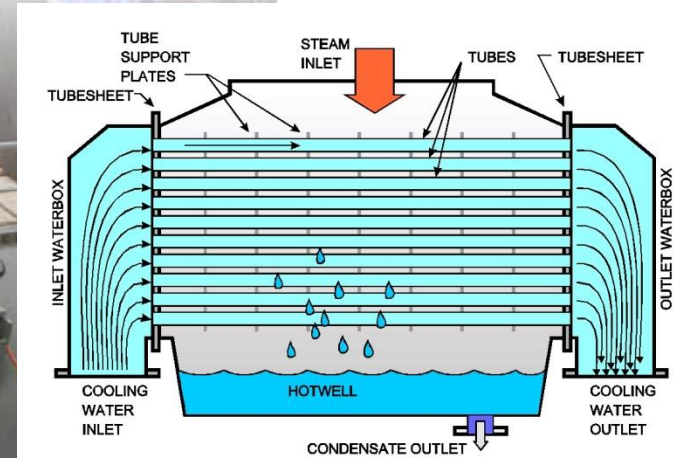
Un réacteur à eau pressurisée (REP)







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

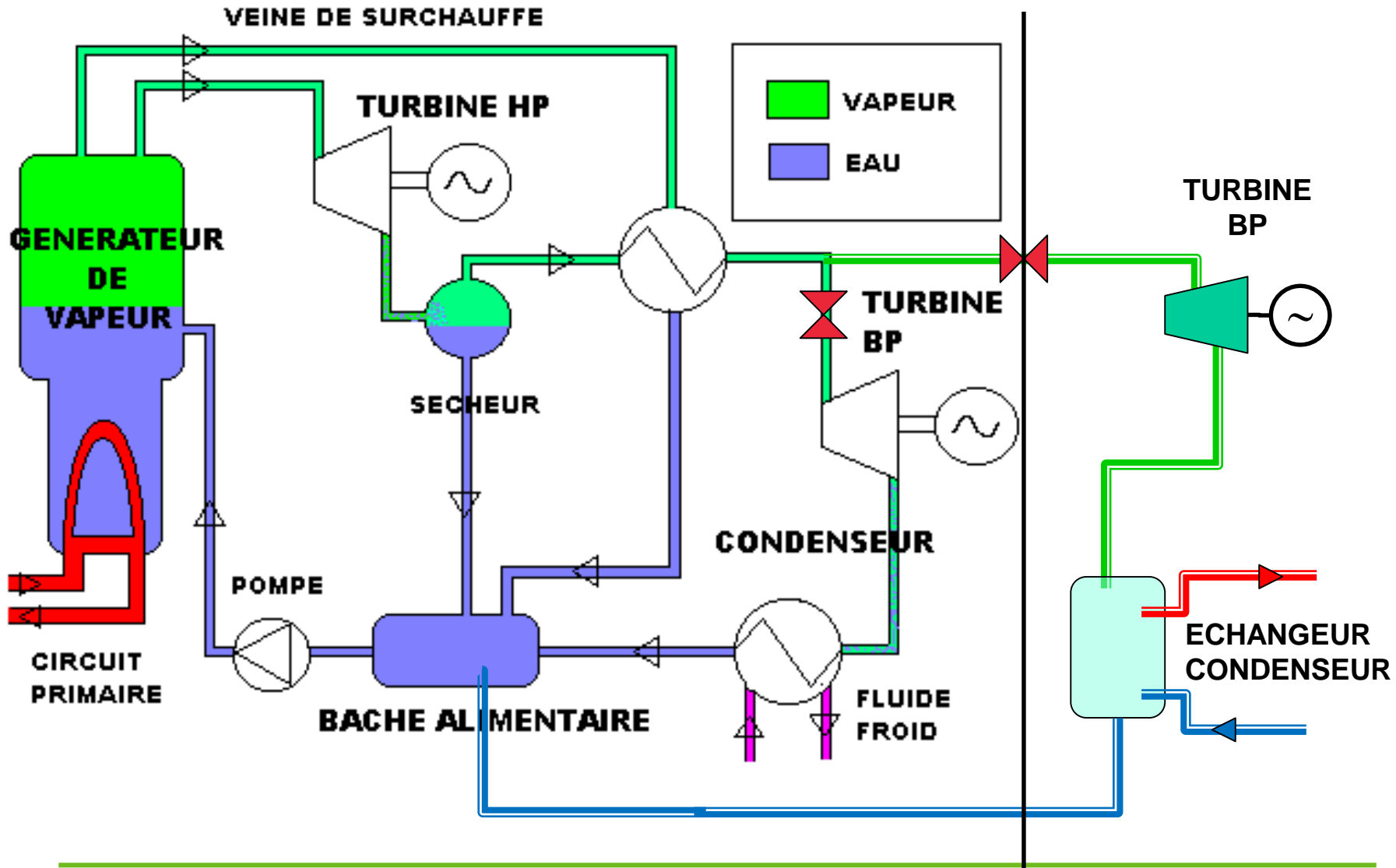
$$E = H - T_0 \cdot S$$

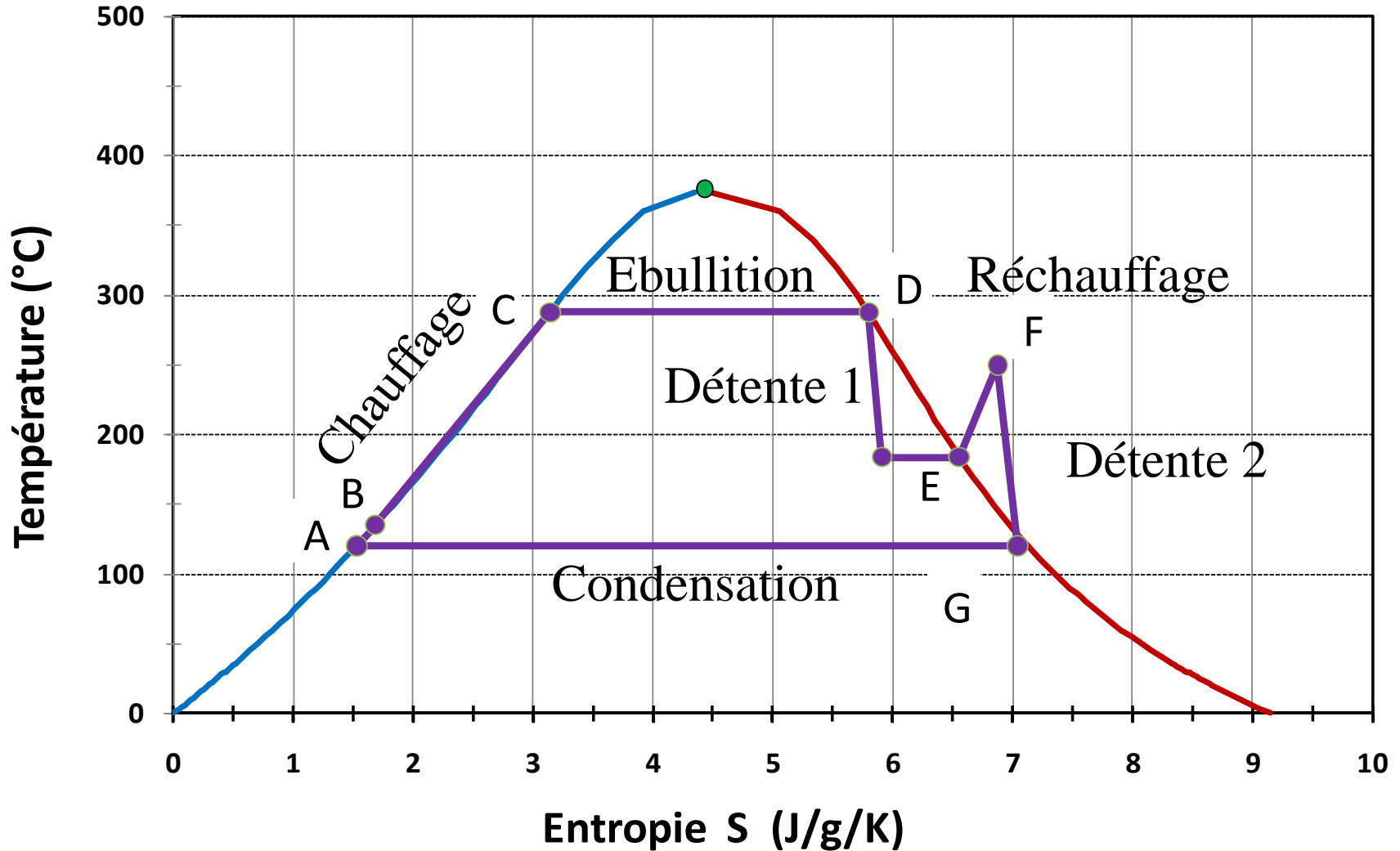
*Valeur exergétique* d'une quantité de chaleur  $Q$  à une température  $T$   $\longrightarrow$   $E = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$

## Exemple d'un REP 1300 MWe

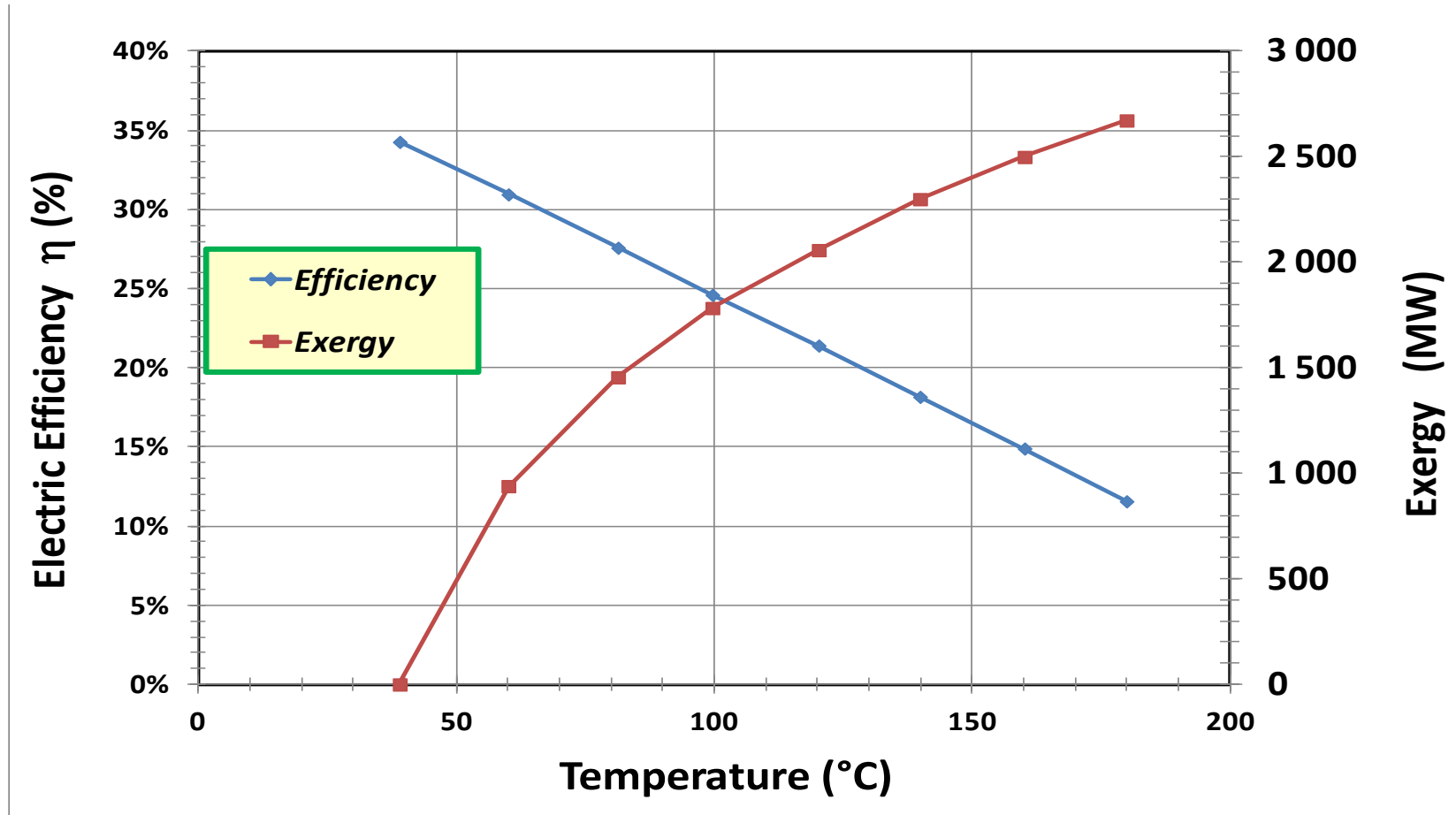
T hot	T cold	Wp	Qi	W <sub>HP</sub>	W <sub>BP</sub>	W <sub>gross</sub>	Qs	η <sub>carnot</sub>	η
(°C)	(°C)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MWe)	(MW)	(%)	(%)
288	39	9	3 920	-417	-936	1 353	-2 562	44.4%	34.3%

# MODIFICATIONS DU CIRCUIT SECONDAIRE





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



**Compromis entre production d'électricité et exergie**

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

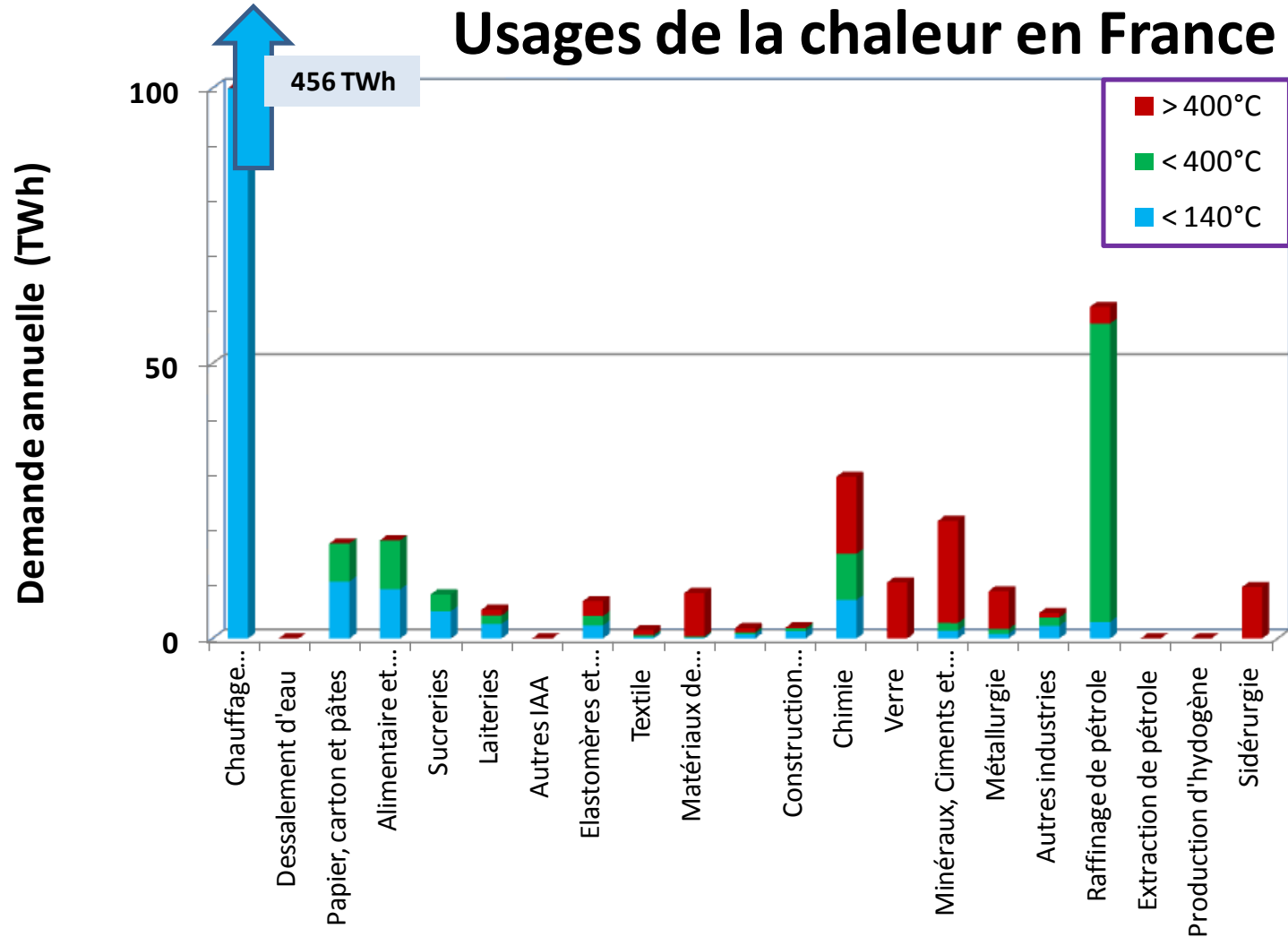
- **80%** de l'énergie consommée dans le résidentiel-tertiaire
- **40%** des besoins de l'industrie

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**

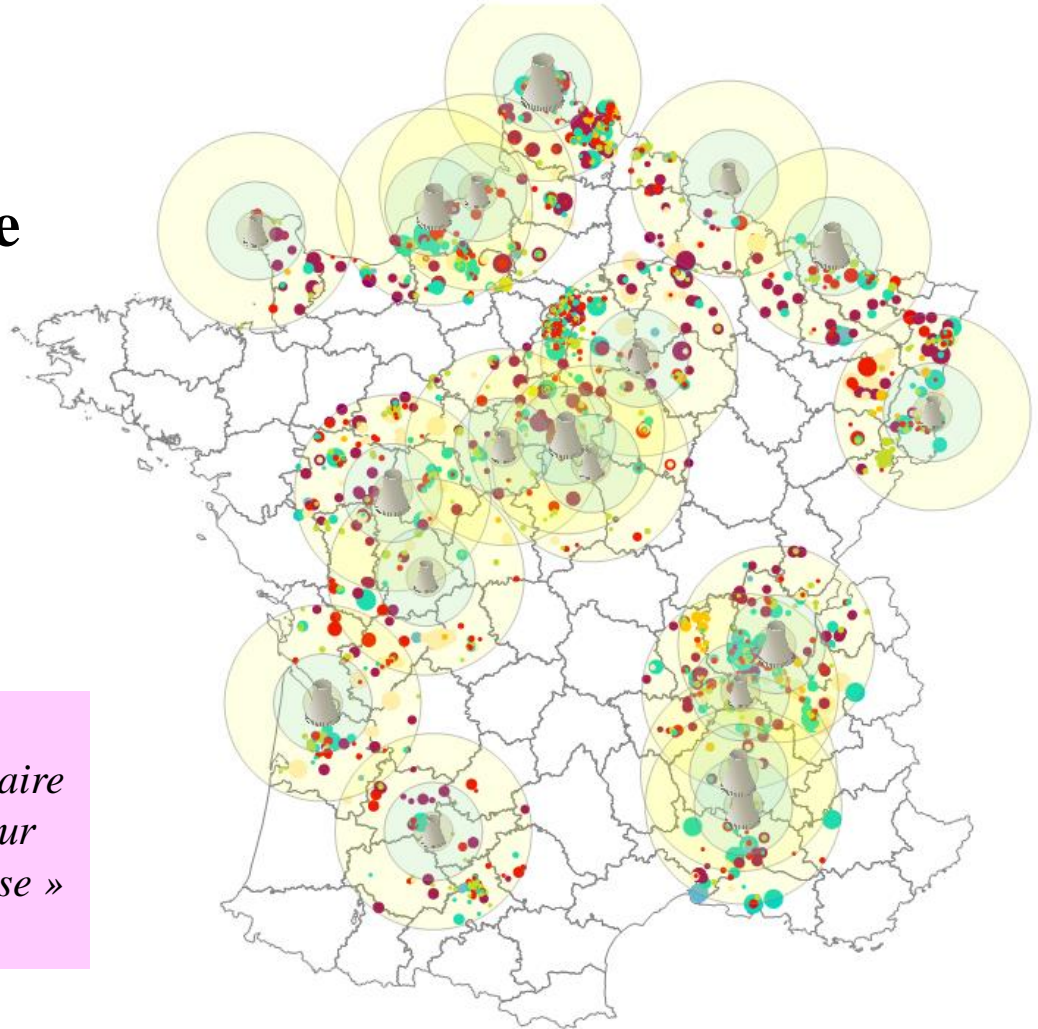
**Les besoins en chaleur se trouvent  
principalement à basses températures**



**Le chauffage urbain est le principal poste de consommation**

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

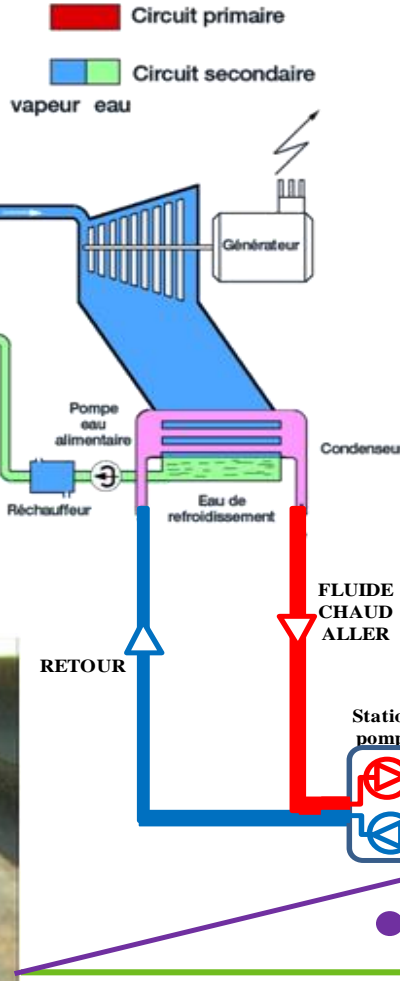
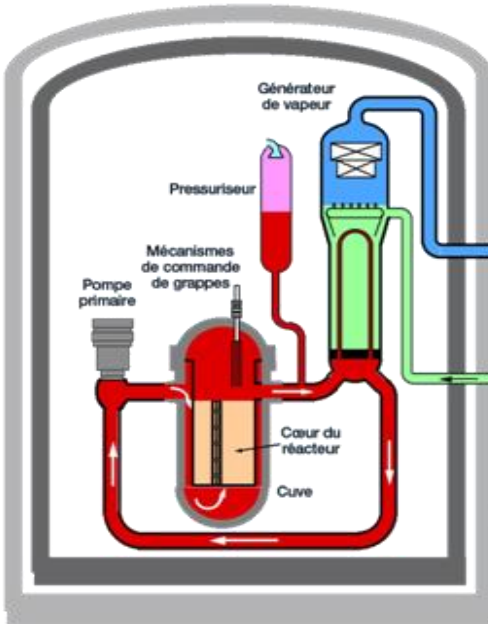
**2156 sites industriels des secteurs pertinents à moins de 100 km à vol d'oiseau d'au moins une des 19 centrales**



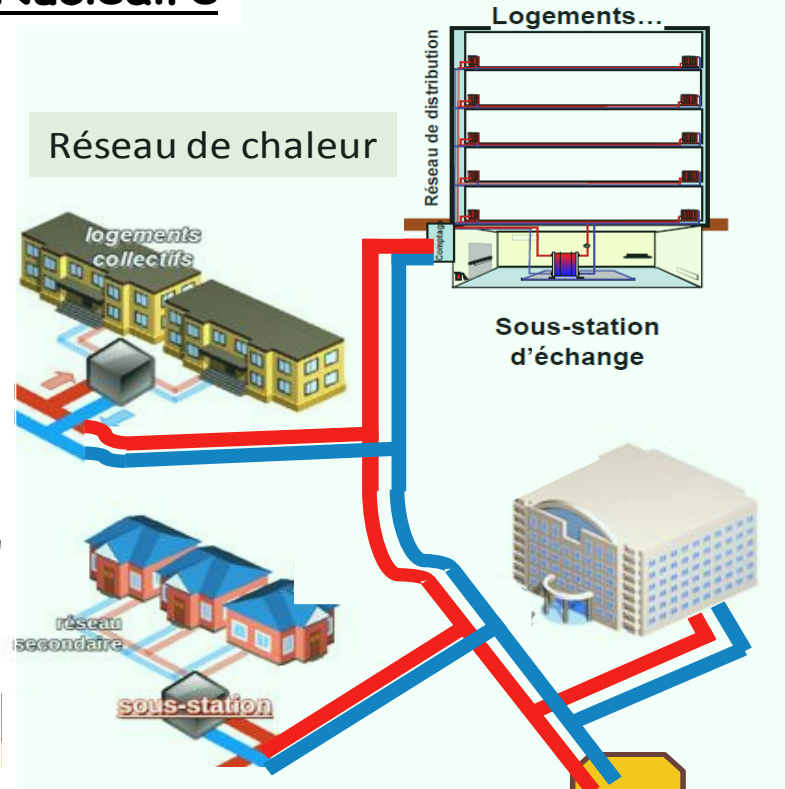
*Source: Etude du CVT ANCRE, Sébastien Sylvestre, « Cogénération nucléaire Intérêts et potentiels d'une offre de chaleur basse température pour l'industrie française » 2016*

## Cogénération Nucléaire

### Réacteur nucléaire



### Réseau de chaleur

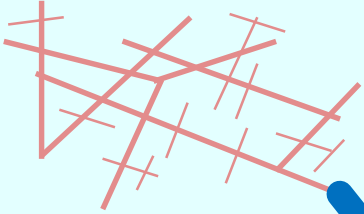


H. S. Ligne de transport

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**

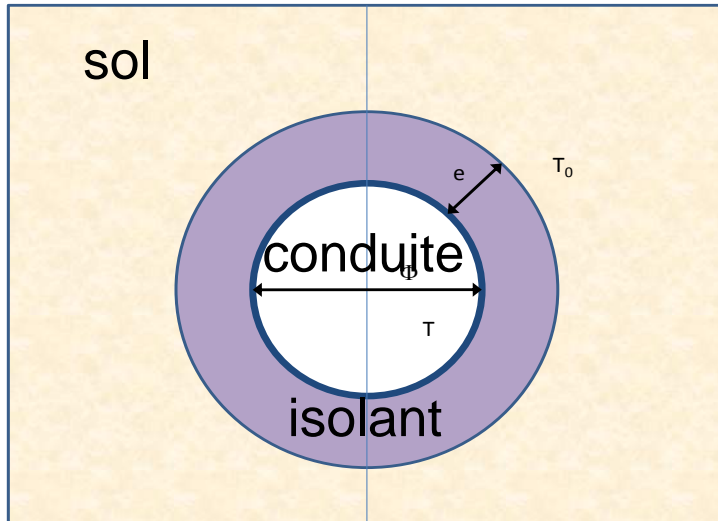


**Centrale nucléaire**



**Ligne de transport de la chaleur**

10 km

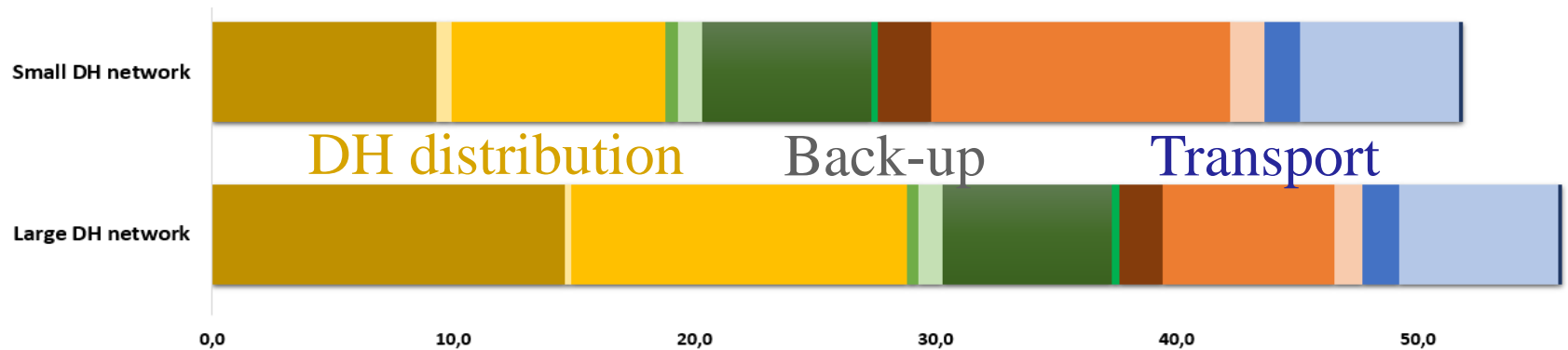


- Diamètre  $\Phi$
- Epaisseur de l'isolant  $e$
- Conductivité thermique de l'isolant  $\lambda < 0.04 \text{ W/m.K}$

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

**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**
- 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 à **longues distances** (> 100 km) avec de très faibles pertes (1%)
- La cogénération nucléaire pour la chaleur urbaine permettra **une réduction massive des émissions de CO<sub>2</sub>** ainsi qu'une **économie d'énergie et de la flexibilité.**