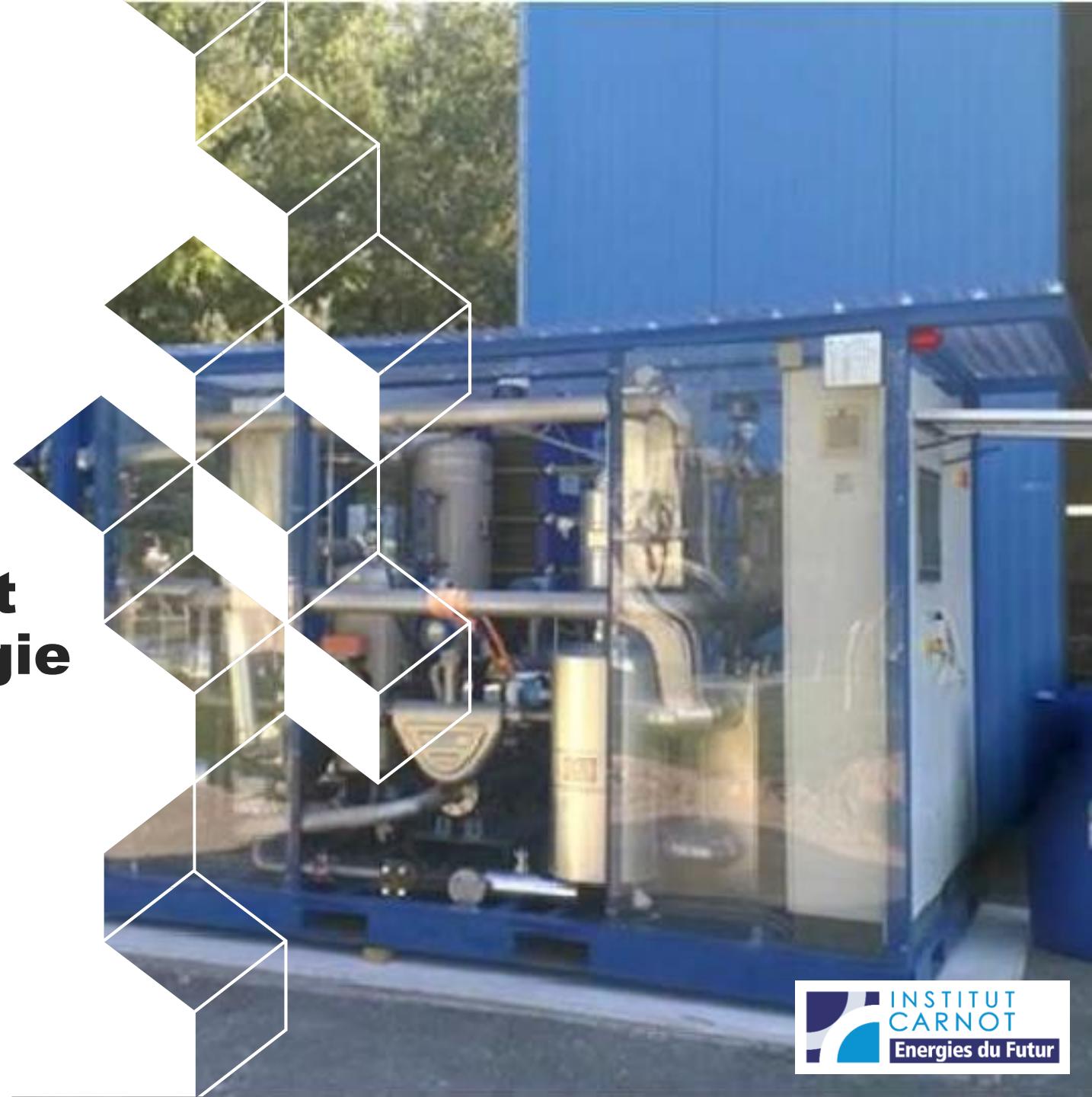




liten

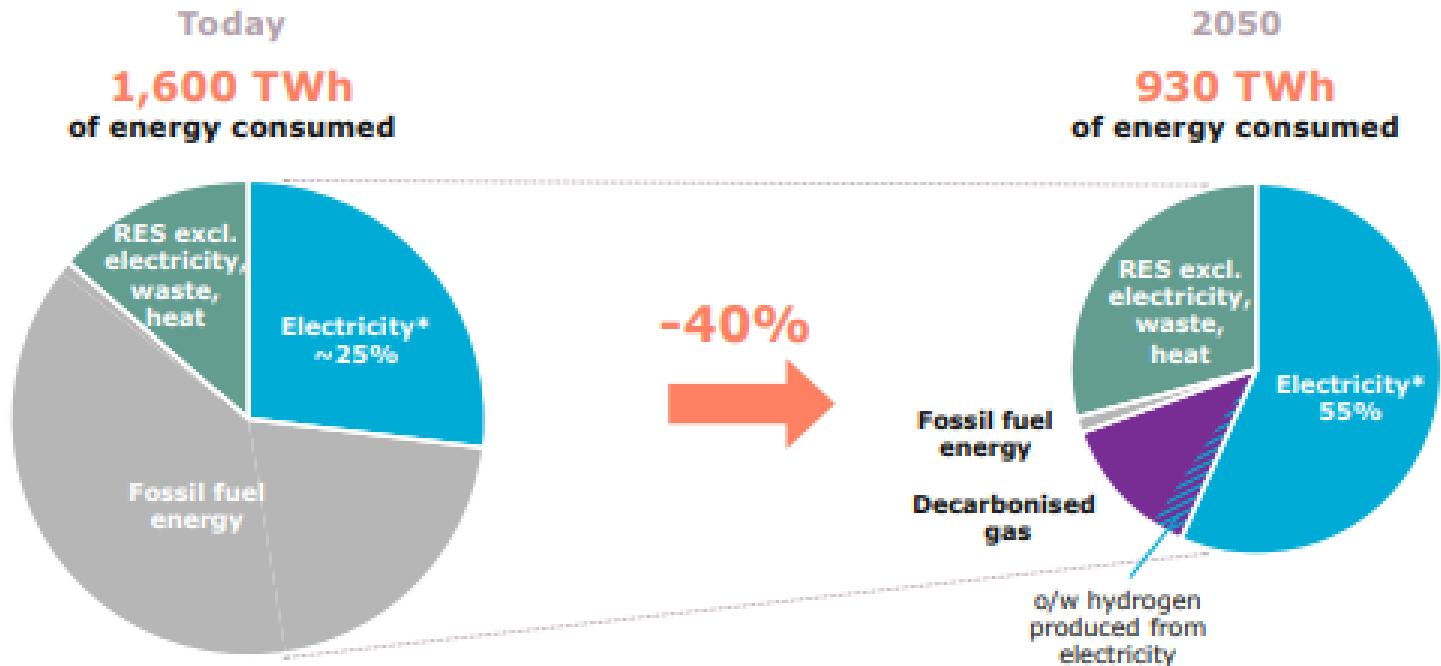


**Efficacité énergétique et  
décarbonation de l'énergie  
pour les territoires**



# L'énergie en France

**Figure 2** Final energy consumption in France and under the NLCS



\* Final electricity consumption (excluding losses, excluding consumption related to the energy sector and excl. consumption for hydrogen production)  
 Total electricity consumption in RTE's baseline trajectory = 645 TWh

Source : RTE, Energy Pathways 2050 -Main results (October 2021), p.11

**Avant de la consommer il faut la produire et la distribuer**

# L'électricité



## Puissance installée en GW

au 31/12/2021



## Énergie produite en TWh

au 31/12/2021

Thermique renouvelable et déchets **10 TWh**

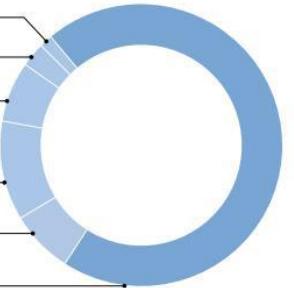
Solaire **14,3 TWh**

Éolien **36,8 TWh**

Hydraulique **62,5 TWh**

Thermique fossile **38,6 TWh**

Nucléaire **360,7 TWh**



Le réseau : quelques chiffres importants :

Pour le **transport**, la longueur totale des lignes électriques en 2022 en exploitation par RTE est de 105 970 km (48 000 km THT 400 kV/225 kV, 56 000 km HT 63 kV/90kV) ;

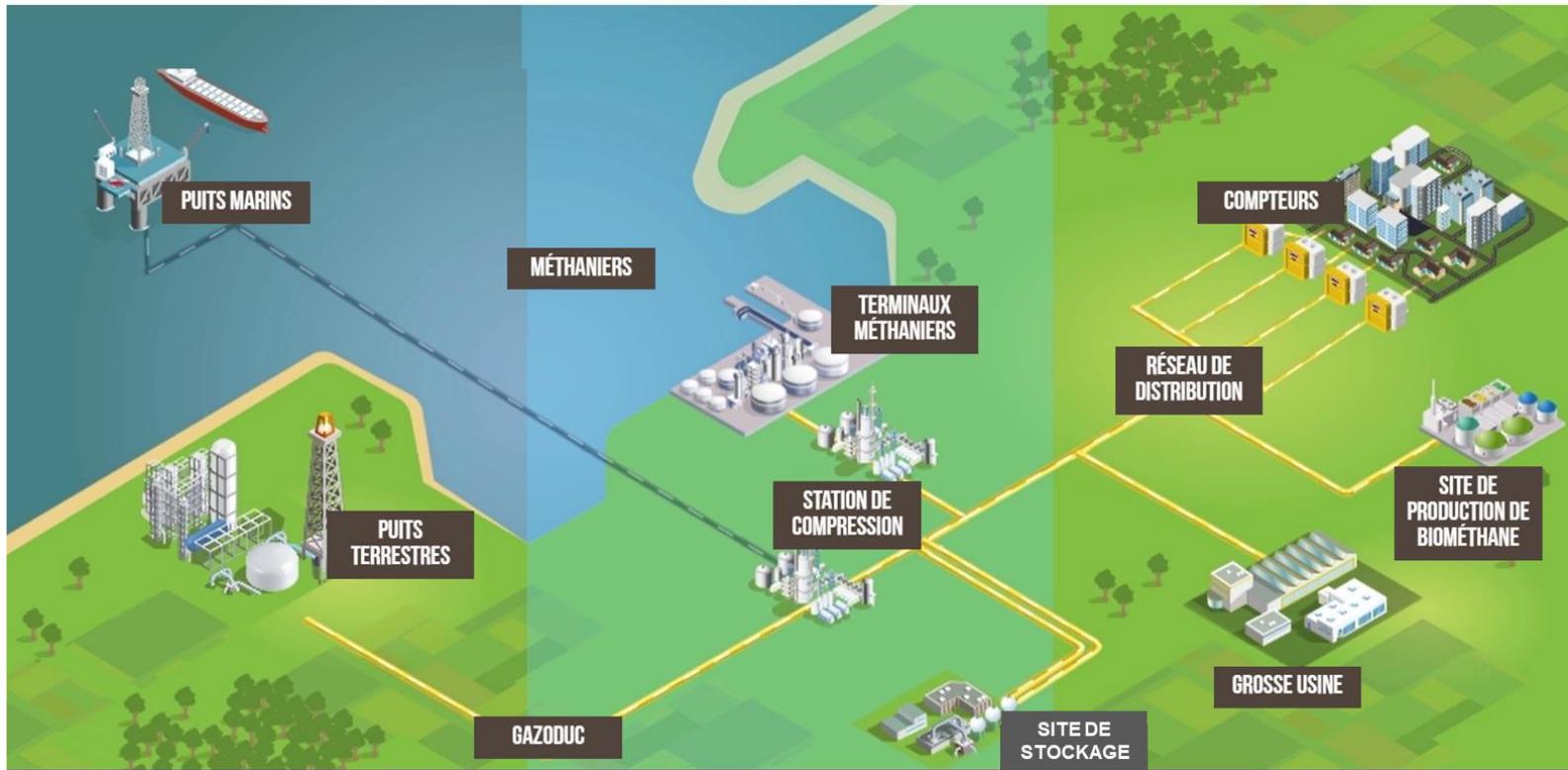
Pour la **distribution** ENEDIS et les 22 ELD utilisent 1 332 942 km de lignes électriques à moyenne (20 kV) et basse tension (230 V)

# Le gaz

> PRODUCTION

> TRANSPORT ET STOCKAGE

> DISTRIBUTION ET CONSOMMATION



2 gestionnaires de réseaux de transport de gaz naturel en France: NaTran gère 32 414 km et Terega gère 5 136 km  
 Le réseau de distribution de GRDF et les 22 ELD représente 197 928 km  
 Consommation : 500 TWh/an

# Les carburants

Consommation de produits pétroliers

Produit pétrolier	2018	2019	2020	2021	2022	2022/2021 (en %)
Gazole	33,6	32,8	27,7	30,8	30,6	-0,5
Fioul domestique	5,7	5,4	5,3	(r) 5,2	4,2	-19,3
Carburants pour automobile <sup>1</sup>	8,0	8,5	7,4	8,9	9,9	10,7
Bases pétrochimie	7,5	7,8	7,4	7,7	5,5	-28,7
Carburéacteurs	6,8	7,1	3,2	(r) 3,7	5,5	48,7
Fiouls lourds	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	15,5
Gaz (GPL)	1,7	1,7	1,6	1,7	1,5	-9,9
Autres produits	9,0	9,1	8,7	9,2	8,8	-3,6
Consommation intérieure	72,7	72,7	61,5	(r) 67,3	66,2	-1,6



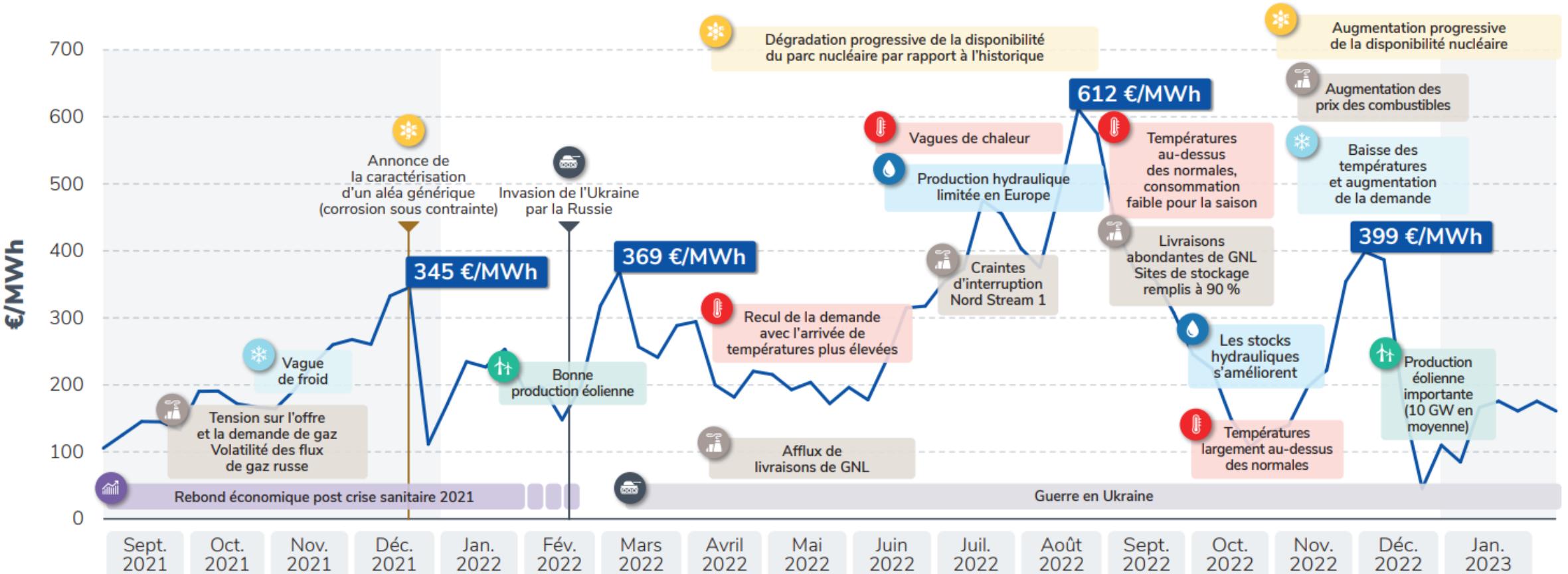
PCI du gazole = 12 kWh/kg

Au total de l'ordre de 800 TWh

Arrive dans les ports et le réseau de distribution à l'intérieur de la France est plutôt par camions



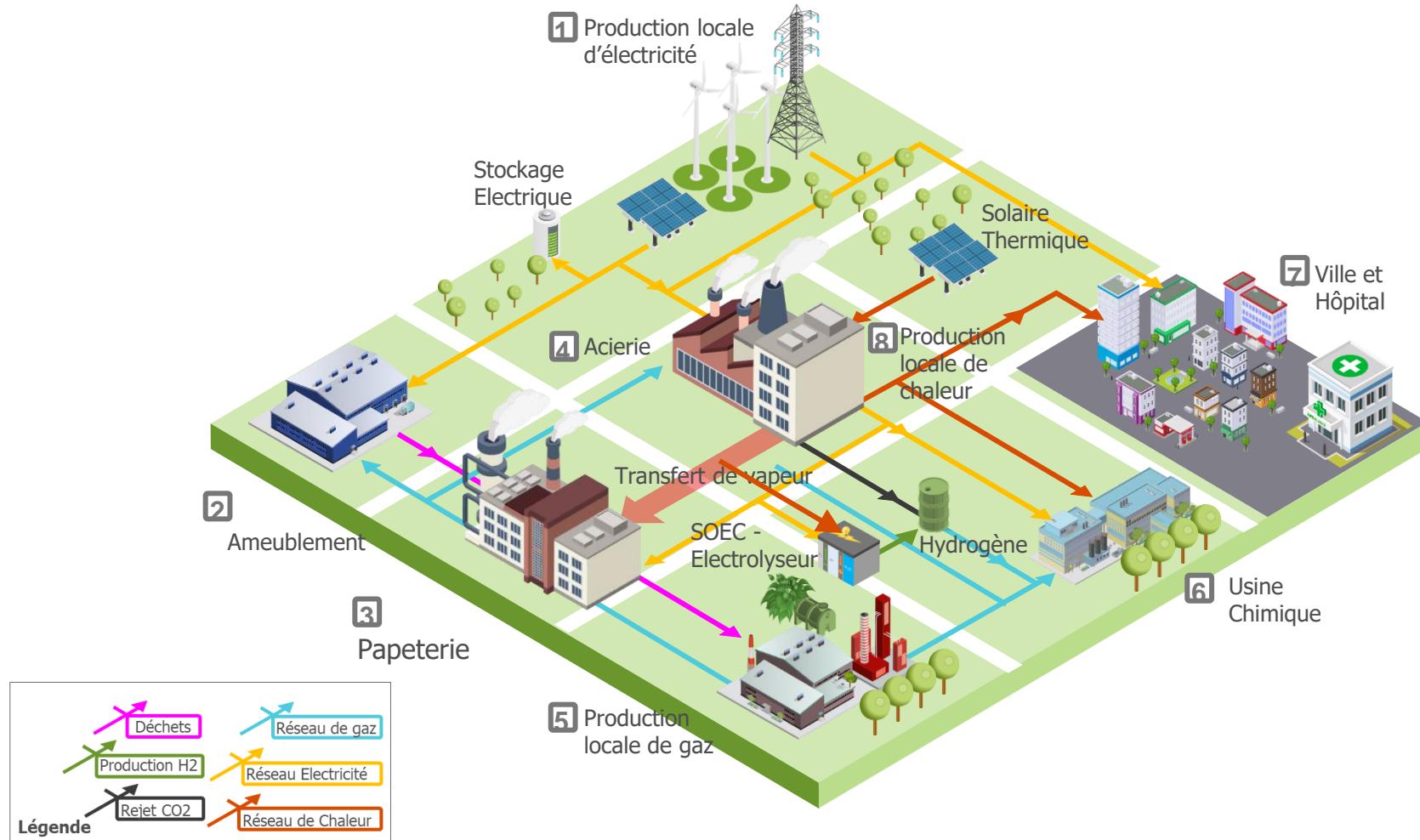
# Parlons un peu d'argent



\* Gaz Naturel Liquéfié

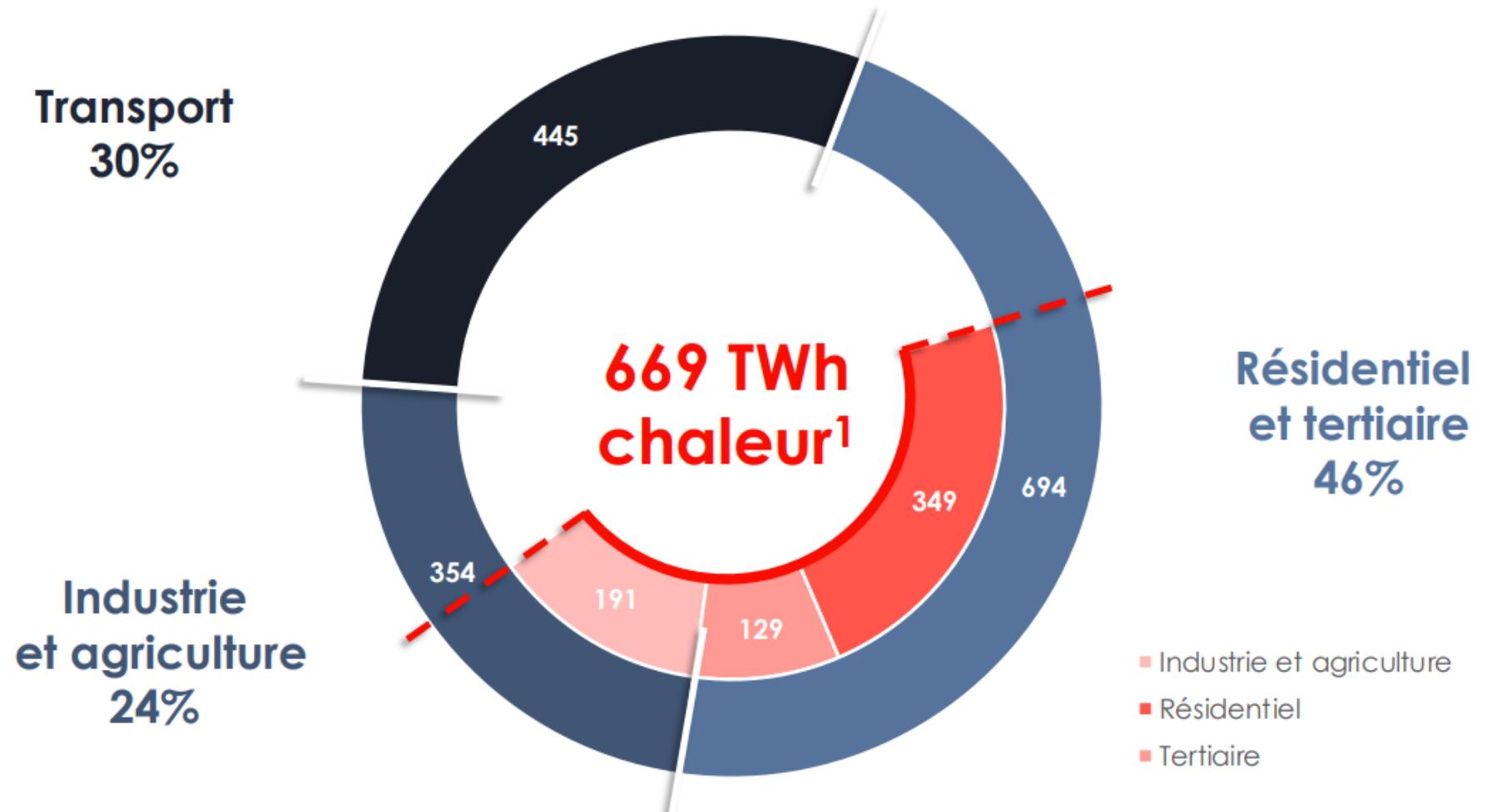


# L'énergie à l'échelle d'un territoire



# La chaleur part très importante

Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finale en France (2020)



# La chaleur omniprésente

La chaleur est au cœur de :

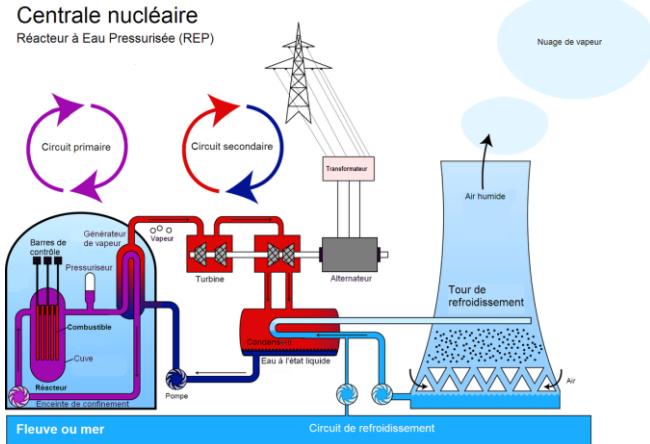
La production d'électricité que ce soit par les centrales nucléaires,  
les centrales thermiques fossiles ou les centrales solaires thermodynamiques.

Le confort des habitations par le chauffage et l'eau chaude sanitaire:  
individuel ou réseaux



La production industrielle depuis les  
hauts-fourneaux jusqu'à l'agro-alimentaire

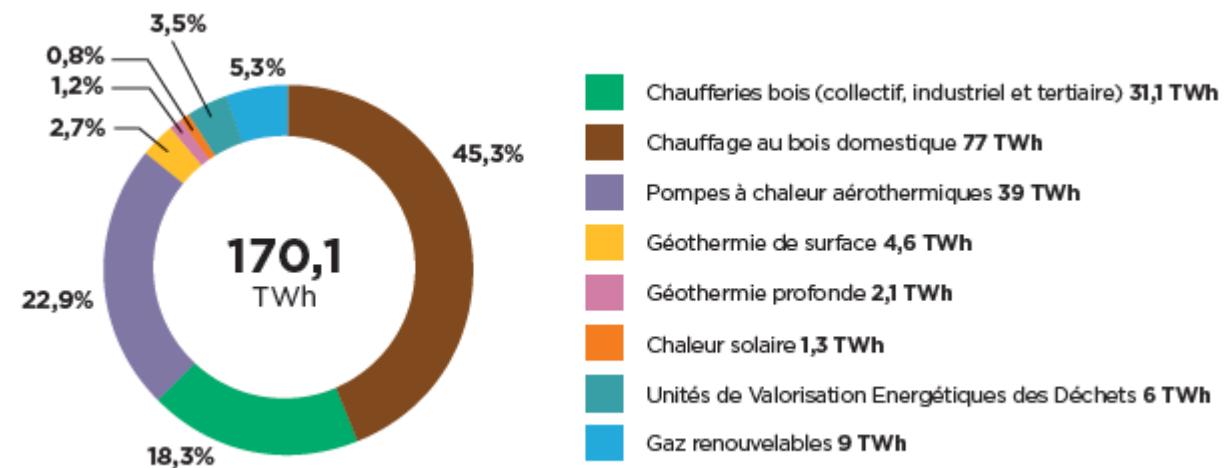
**L'efficacité énergétique** c'est comment produire et utiliser de façon optimale cette chaleur



Source Wikipedia



# La production de chaleur renouvelable



Rapport : panorama de la chaleur renouvelable et de récupération

En 2022 en France , la consommation finale brute de chaleur atteignait  
625 000 GWh dont 170 100 GWh de chaleur renouvelable

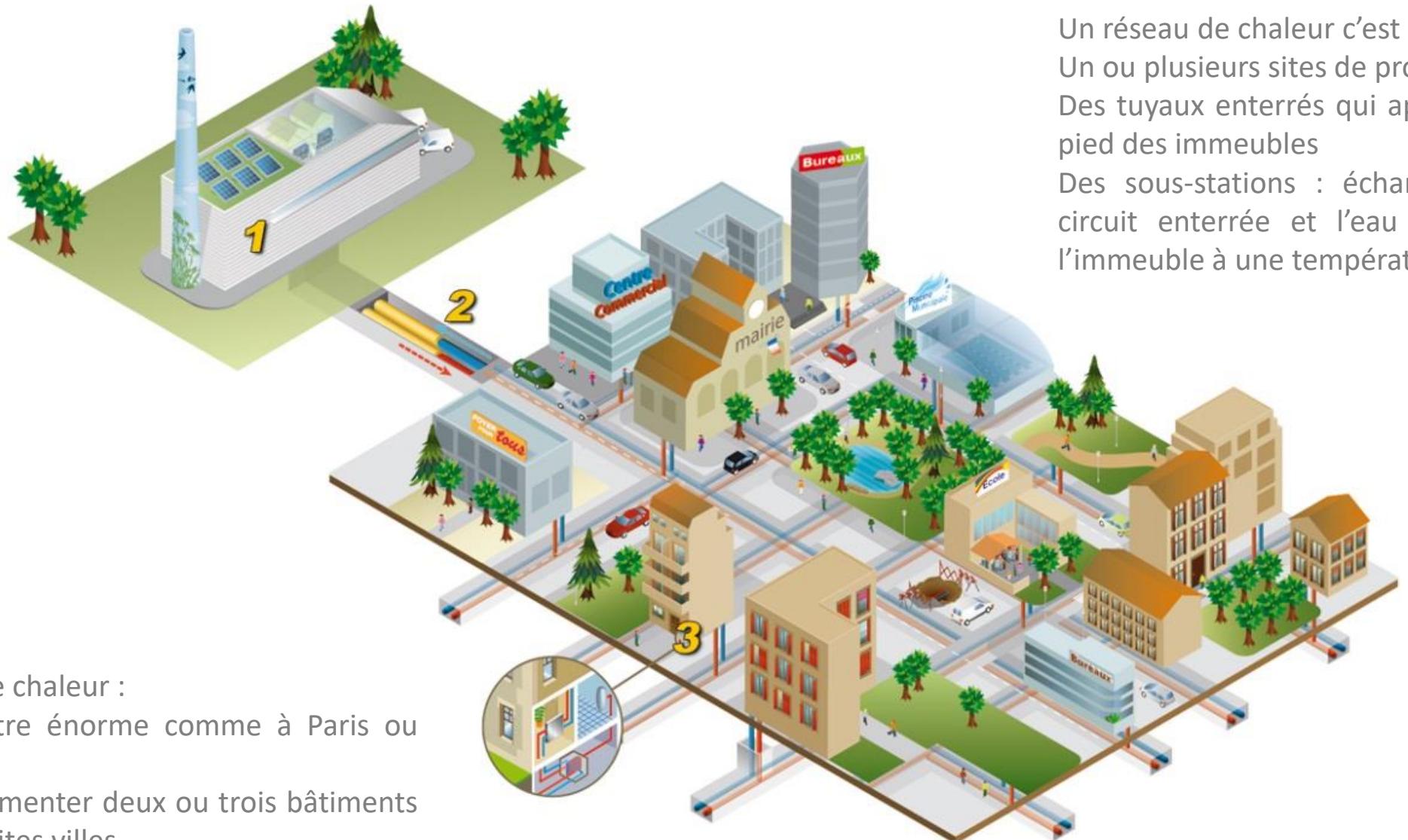


La part la plus importante (45%)  
correspond au chauffage domestique



Biogaz : méthanisation ou centres d'enfouissement  
cogénération

# Les réseaux de chaleur



# Les réseaux de chaleur

Part de marché des réseaux de chaleur dans différents pays d'Europe	
Allemagne	13%
Autriche	18%
Croatie	9,5%
République Tchèque	41%
Danemark	50%
Finlande	49%
France	5%
Grèce	0,3%
Islande	95%
Lettonie	29%
Lituanie	50%
Pays-Bas	3,6%
Norvège	4,8%
Pologne	47%
Roumanie	29,6%
Serbie	25%
Slovénie	9%
Suède	55%
Suisse	2,8%
<b>Russie</b>	<b>55%</b>

Un peu vieux mais à peu près valable



Islande avec la géothermie chaude



Qualité des tuyaux pour éviter pertes thermique et fuites mais il faut limiter les distances entre production et consommation.

Classement	Réseau	Longueur (km)
1	Paris	486
2	Grenoble	168
3	Metz	103,5
4	Lyon	78
5	Paris (Froid)	73
6	Roissy	68
7	St Denis	67
8	Cergy	52
9	Chambéry	51,3
10	Lille	49,2
11	Venissieux	48,2
12	Nantes	45,7
13	Evry	43,7
14	Roissy (Froid)	43
15	Vitry / seine	39,8
16	Dunkerque	38,1
17	Rennes	37,9
18	Créteil	37,8
19	Macon	35,6
20	Dijon	35,2
21	Massy	33,9
22	Rungis	30,5
23	Chalon / saone	30
24	Chevilly Larue	30

# La production de chaleur renouvelable et de récupération pour les réseaux



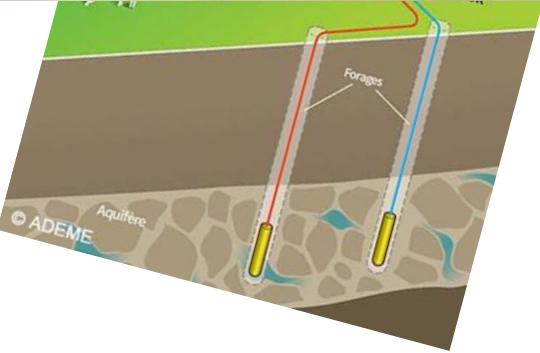
Centrale **biomasse** BIOMAX à Grenoble



cea



Production de chaleur et de froid pour les réseaux de l'île Seguin  
Thermofrigopompe  
(**géothermie de surface-électricité**)

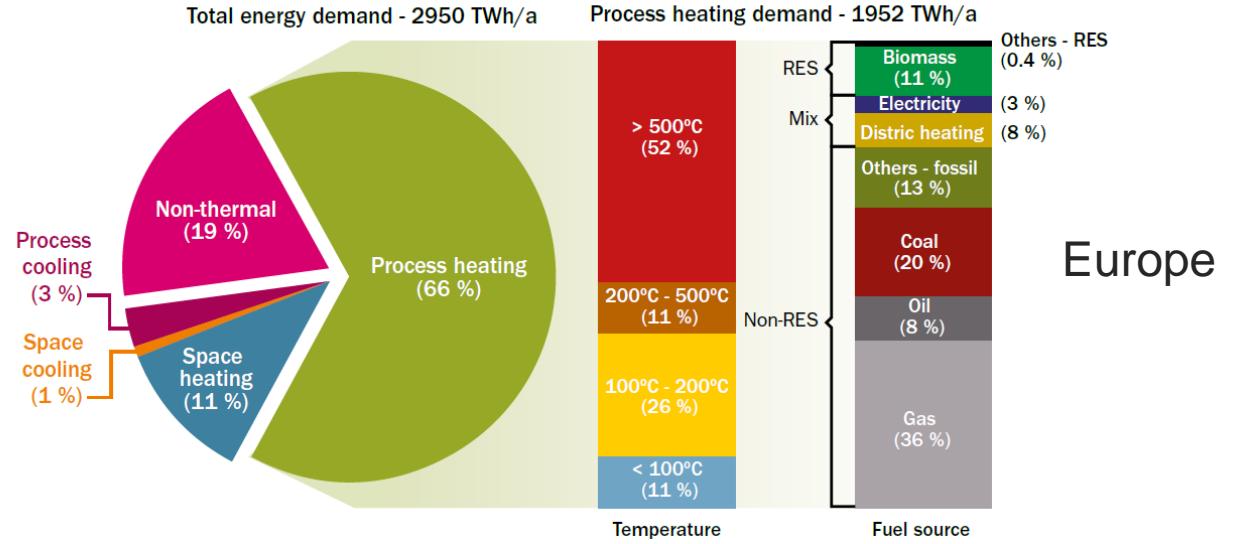


Production de chaleur **solaire** pour un réseau au Danemark



La **récupération** de chaleur sur un procédé industriel

# La production de chaleur dans l'industrie



Europe



Chaleur process et chaleur fatale

Par exemple un four de traitement thermique

Chaleur perdue dans les fumées chaudes en cheminée

Chaleur des pièces massives sorties chaudes du four

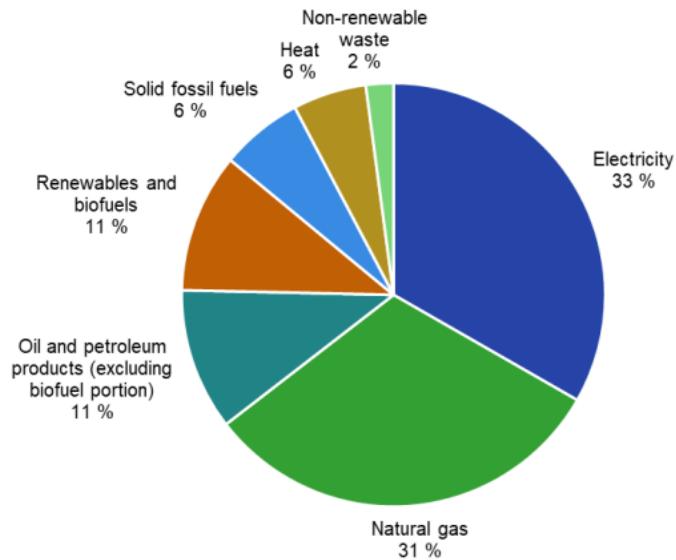
Exemple de la fonderie : four de fusion à arc puis moule à sable

Chaleur dissipée lors du refroidissement du moule



# L'énergie dans l'industrie : perspectives

Final energy consumption in the industry sector by energy product,  
EU, 2022  
(%)

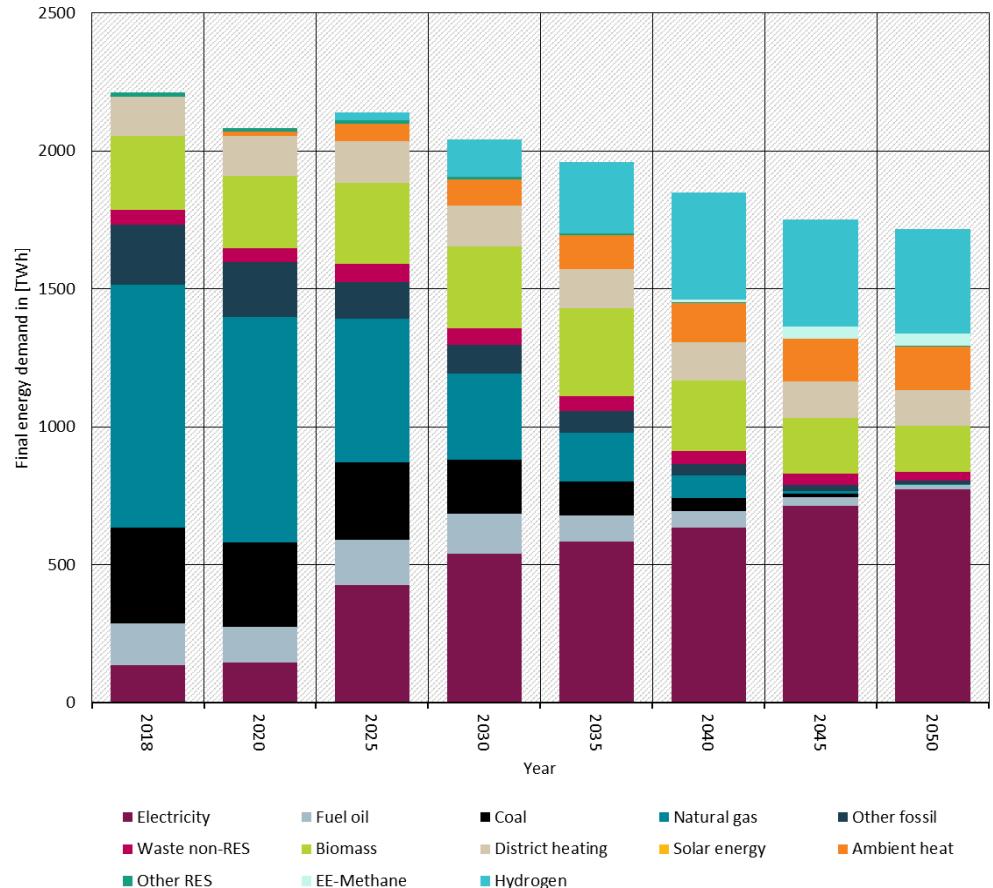


Source: Eurostat (nrg\_bal\_s)

eurostat



Industrial Heating and cooling Final Energy Demand - Decarbonisation Pathway



Final energy demand for H&C in industry in 2050 in the pathway scenario (EU27)  
From : Renewable Heating and Cooling Pathways – Towards full decarbonisation by 2050

# Les feuilles de route de décarbonation : comment ?

**La diminution des consommations : efficacité énergétique et sobriété**

**L'électrification des procédés :**

- électrification directe de la chaleur : résistances, pompe à chaleur, infra-rouge, induction, micro-ondes, plasma ...
- Production d'H<sub>2</sub> par électrolyse et utilisation dans l'industrie  
→ modification des procédés

**Les gaz de synthèse décarbonnés :**

- Procédés de production de gaz à partir de CO<sub>2</sub> capté et d'hydrogène vert  
→ pas de modification des procédés

**Les biogaz :**

- Méthanisation  
→ pas de modification des procédés

**Le solaire thermique (Solar Heat for Industrial Processes)**

→ modification des procédés

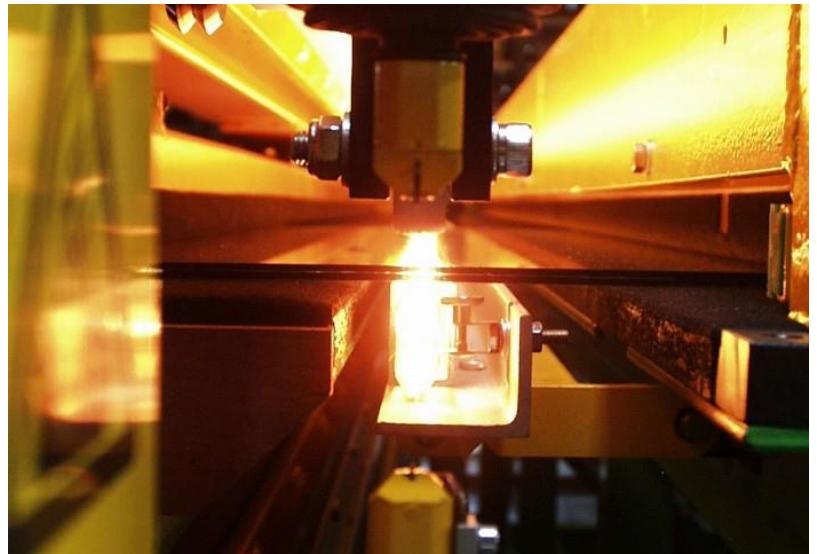
# Décarbonation : exemples industriels

Chauffage par fours infra-rouge

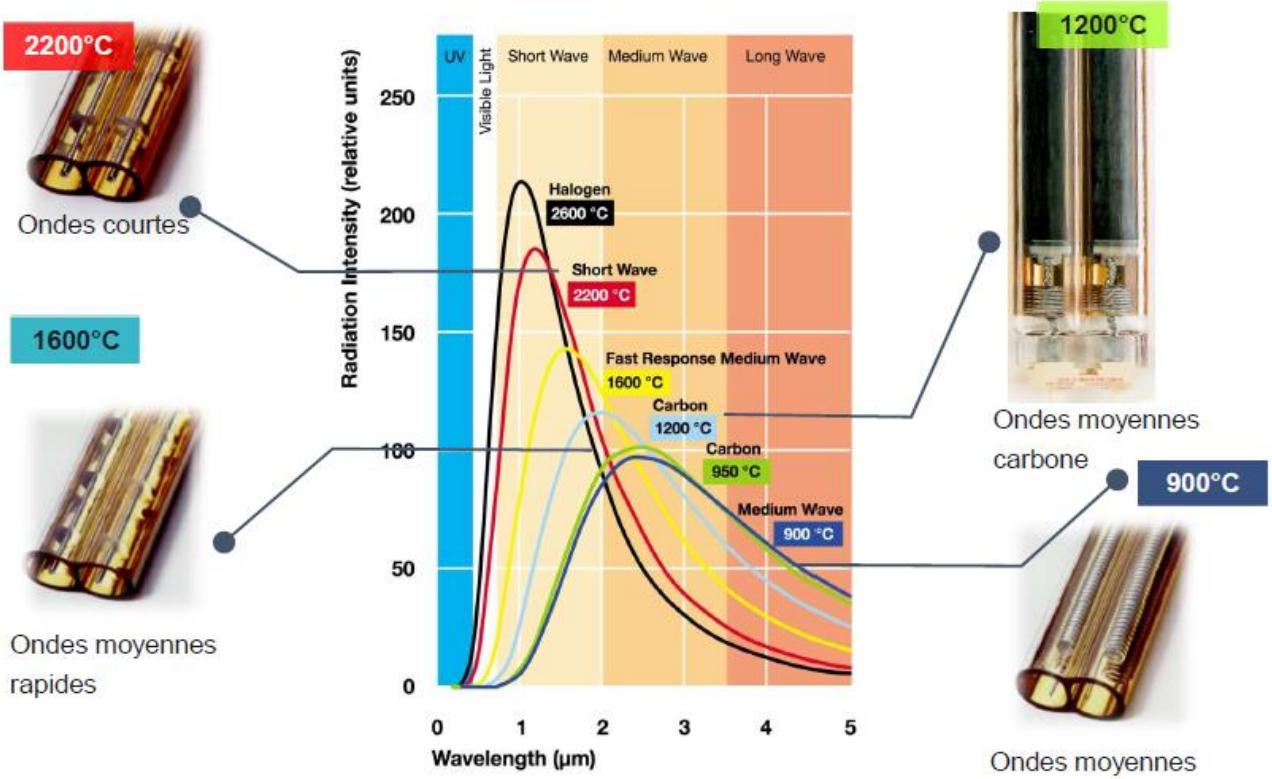
Exemple de four du site de :

**EXCELITAS**  
TECHNOLOGIES®

Noblelight



## Le spectre électromagnétique



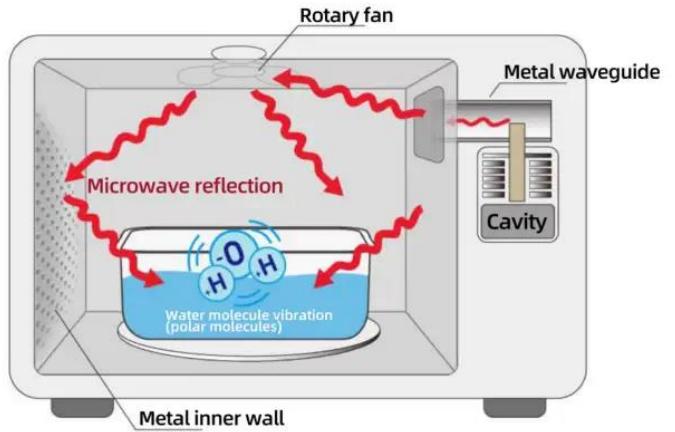


# Décarbonation : exemples industriels

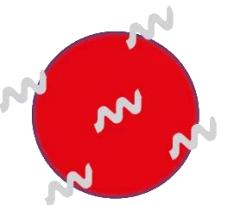
Chauffage par générateurs micro ondes

Exemple de four du site de :

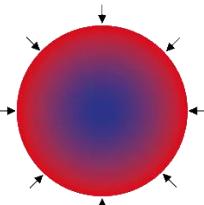
**paironc**



Microwave and RF volumetric heating

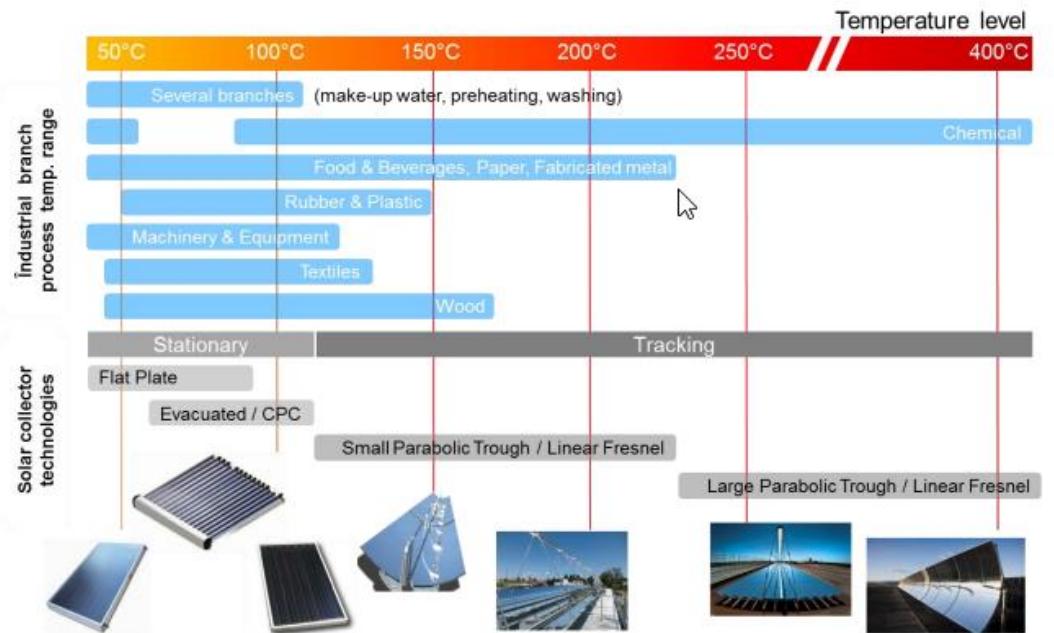


Conventional conductive heating



Temperature

# Décarbonation : exemples industriels



IEA SHC Task 49 Solar Process Heat for Production and Advanced Applications Technical Report A.2.1

Site Lactalis : centrale solaire Newheat

Préchauffage de l'air frais alimentant la tour principale de séchage par atomisation du site

Intégration de 2 batteries eau/air au sein de l'entrée d'air principale et de la régénération de la roue dessicante

Combustible fossile effacé : gaz



# Décarbonation : exemples industriels

SolarLite



Brasserie Heineken à Séville

Solaire concentré haute température pour production de vapeur

43.414 m<sup>2</sup> de miroirs, 30 MW max et de l'ordre de 30 GWh



## Technical Details

Materials used	Thin-film glass mirror, Thick glass mirror, steel, vacuum receiver
Segment length	12.0 m
Collector width	5.77 m
Glass pipe diameter	130 mm
Absorber diameter	70 mm
Max. operating temperature	500 °C
Focal line	1.2 m
Concentration factor	66
Heat transfer medium	water / steam
Optical efficiency	75 %



# La chaleur fatale

Exemple d'un four de cuisson



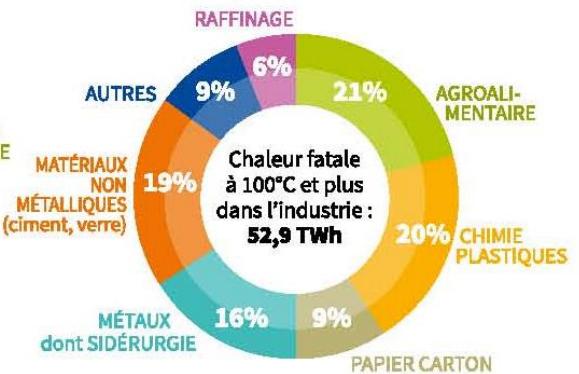
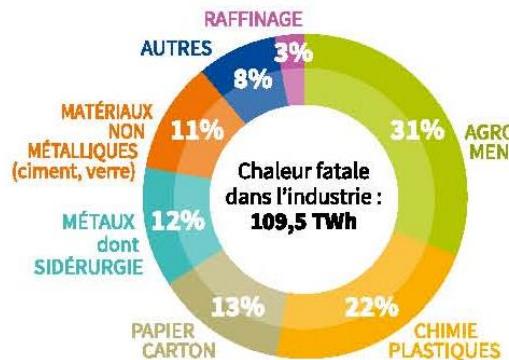
Source rapport Ademe chaleur fatale (2017)



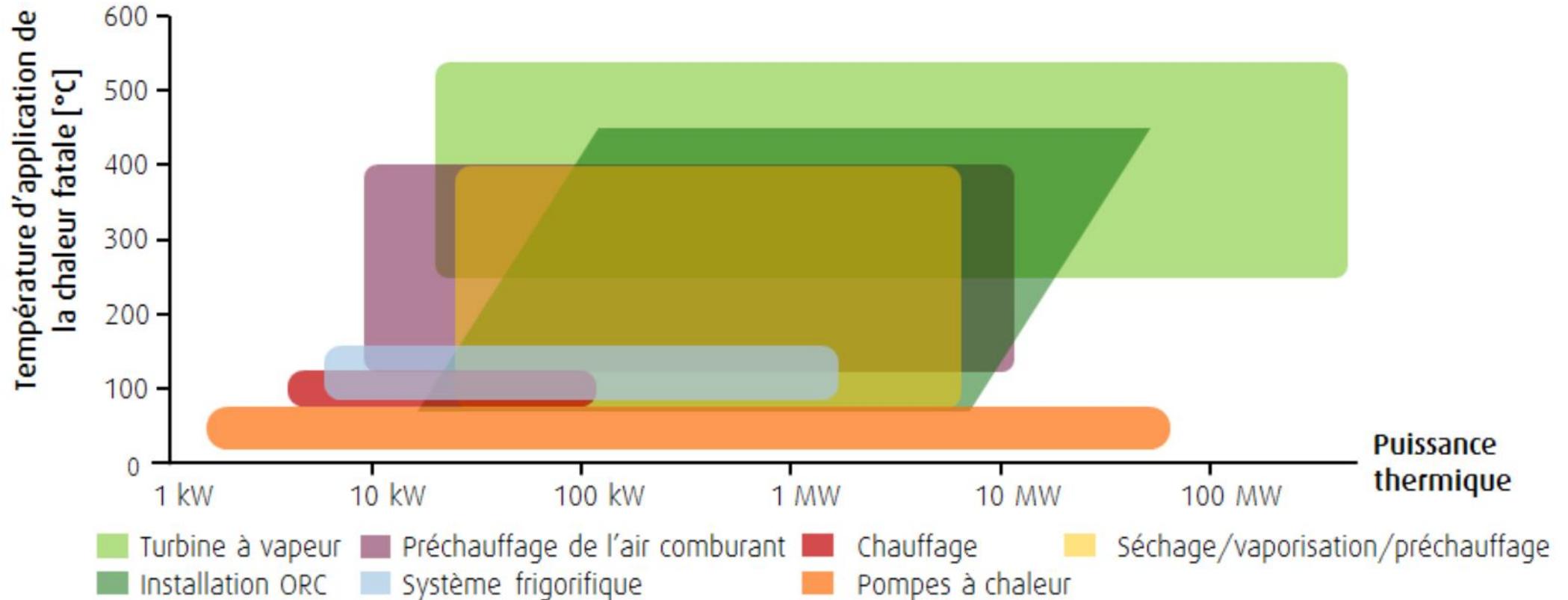
**109,5 TWh, soit 36 % de la consommation de combustibles de l'industrie<sup>3</sup>,**  
rejetés sous forme de chaleur, dont **52,9 TWh** perdus à plus de 100°C

## Origine du gisement

La moitié du gisement concerne les deux grands secteurs de l'agro-alimentaire et de la chimie.



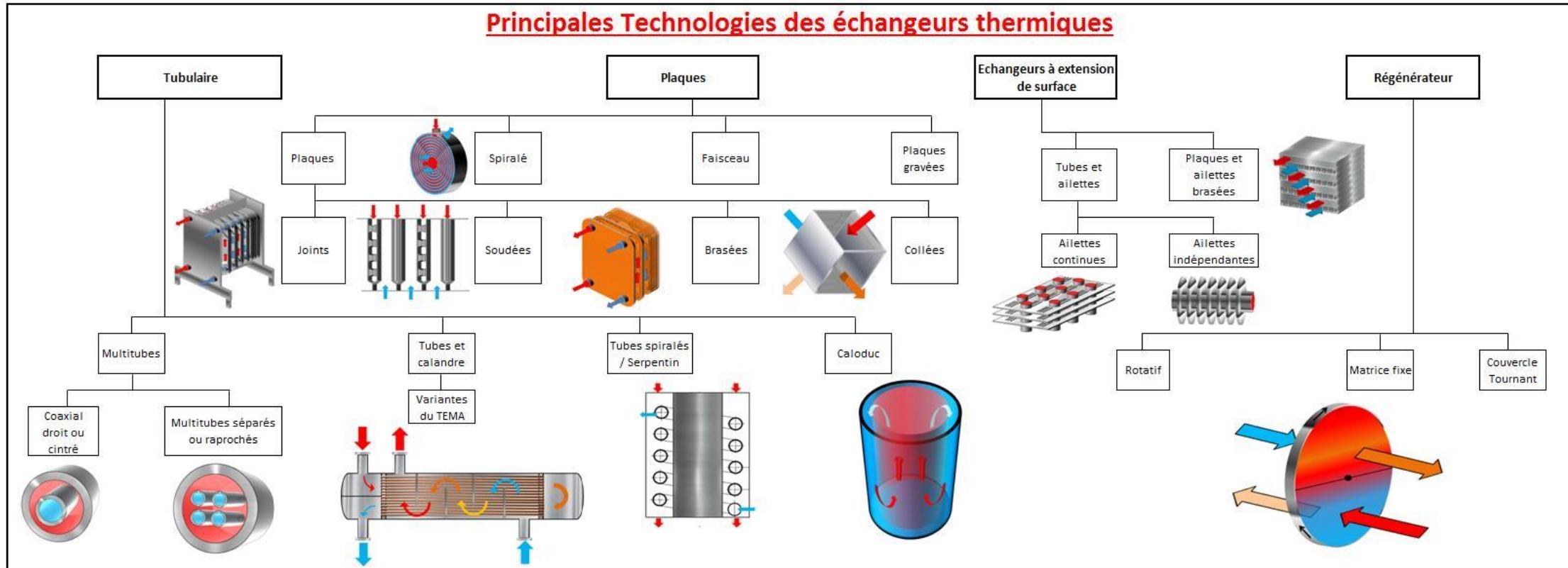
# La chaleur fatale : utilisation



La chaleur fatale industrielle en France et en Allemagne OFATE 2019

# Les échangeurs de chaleur

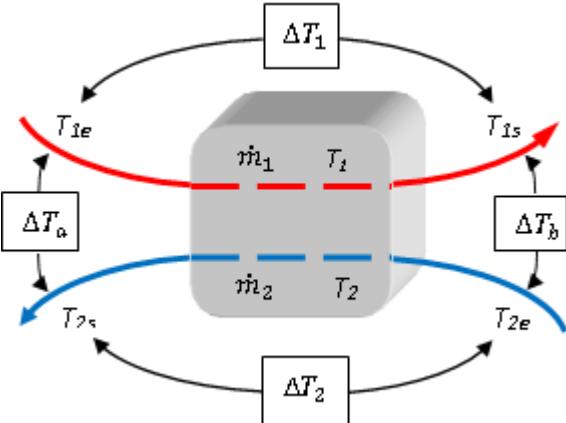
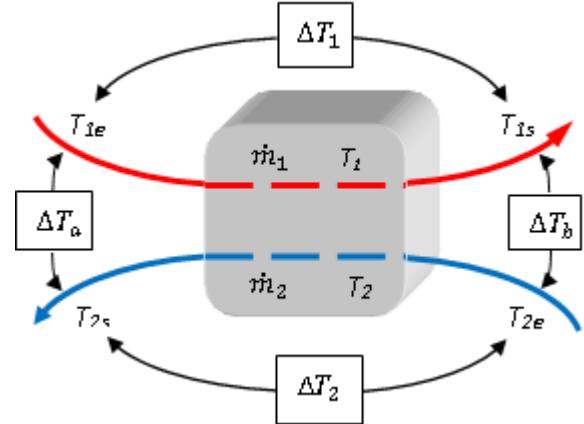
Pour convertir la chaleur fatale en une chaleur utilisable ou pour apporter de la chaleur à un procédé industriel :  
L'échangeur pour transférer de la chaleur d'un fluide à un autre



L'efficacité d'un échangeur de chaleur sur un procédé vient en priorité de sa **conception adaptée** (techno + surface)

# Les échangeurs de chaleur

Dimensionnement d'un échangeur :



$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{1e} - T_{2s}) - (T_{1s} - T_{2e})}{\ln\left(\frac{T_{1e} - T_{2s}}{T_{1s} - T_{2e}}\right)}$$

$$\Phi = K A_\ell \Delta T_{ML}$$

$A_\ell$  est la surface d'échange et représente donc la géométrie de l'échangeur

$K$  est le coefficient d'échange global qui dépend des écoulements de fluide des deux circuits de l'échangeur

il existe des corrélations qui permettent de le calculer dans les différentes géométries existantes

# Les échangeurs de chaleur

Pourquoi étudier l'encrassement ?

Parce que cela coûte cher en surdimensionnement ou en perte d'efficacité du procédé ou de la récupération de chaleur

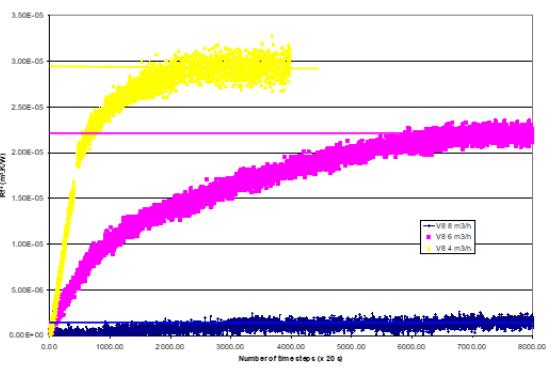
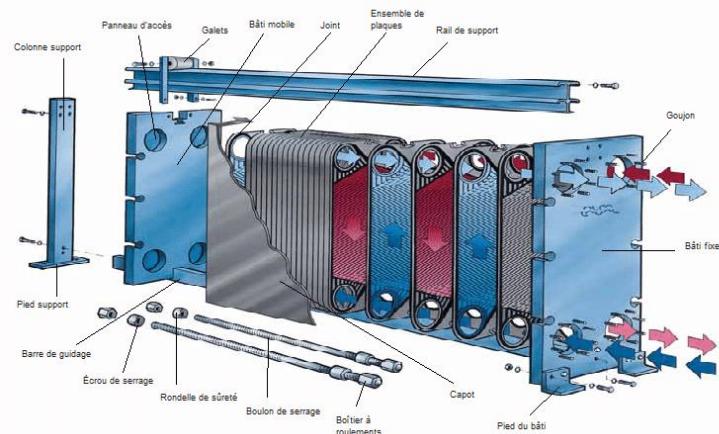


Tableau IV- 8 : Valeurs des résistances d'encrassement conseillées pour le dimensionnement des échangeurs sur fumées industrielles [Marner & Webb 1982].

Nature de l'effluent	Résistance d'encrassement ( $10^3 \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ )
Gaz Propre	
Gaz naturel	0.09 – 0.53
Propane	0.17 – 0.53
Butane	0.17 – 0.53
Turbine à gaz	0.17
Gaz moyennement encrasant	
Fuel n°2 (% soufre < 1 %)	0.35 – 0.70
Turbine à gaz	0.26
Moteur diesel	0.53
Gaz fortement encrasant	
Fuel n°6 (% soufre < 4 %)	0.53 – 1.23
Pétrole brut	0.70 – 2.64
Pétrole résiduel	0.90 – 3.52
charbon	0.90 – 8.80



Et donc il est indispensable de le nettoyer!

(Echangeur plaques et joints démontable)



# Les échangeurs de chaleur

Mais si le fluide est « sale », l'échangeur peut s'encrasser au cours du temps

Les moyens d'essais au CEA :



Boucle d'essai d'encrassement en phase air



Boucle d'essai d'encrassement en phase liquide

Pour étudier le comportement de différents types d'échangeurs avec différents types ou tailles de particules

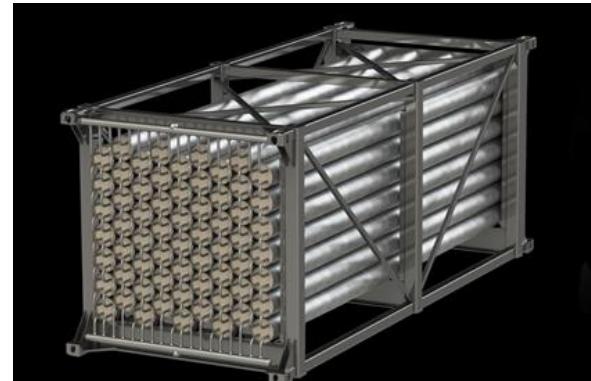
# Déphasage récupération/utilisation : le stockage

La chaleur est une forme d'énergie qui se stocke bien car trois phénomènes physiques permettent de stocker de la chaleur :

Chaleur sensible : éléver la température d'un liquide ou d'un solide



Réservoir d'eau chaude en Allemagne



Cylindres de béton



**SIEMENS Gamesa**  
RENEWABLE ENERGY



# La chaleur solaire et couplage avec stockage

Energie solaire : Production d'électricité ou seulement de chaleur

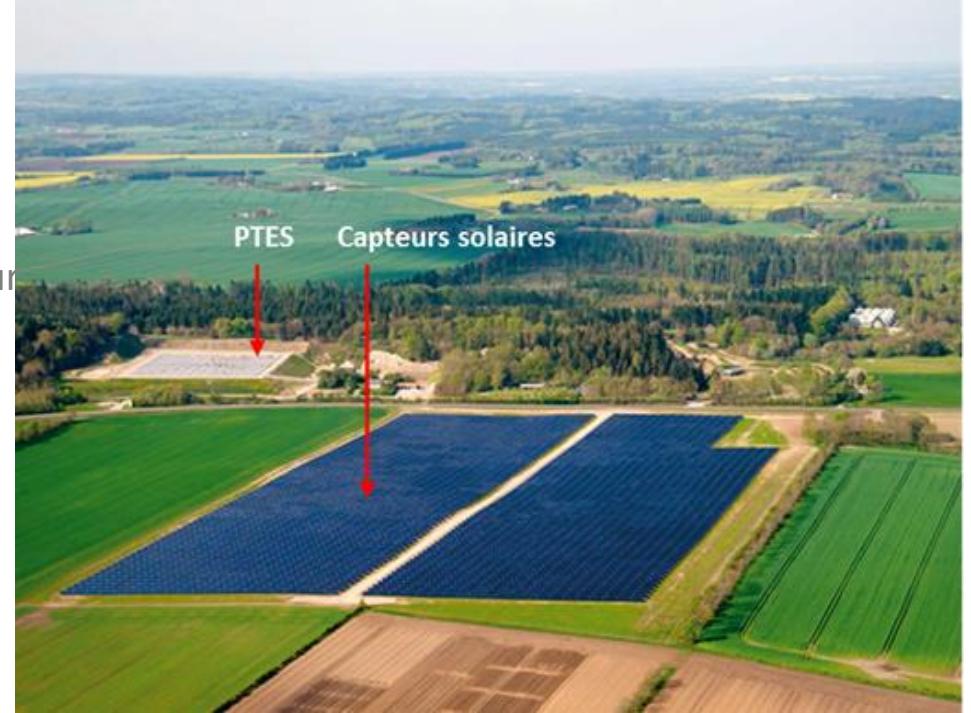


Capteurs solaires thermique à Dronninglund (Danemark) avec stockage en fosse pour stockage saisonnier



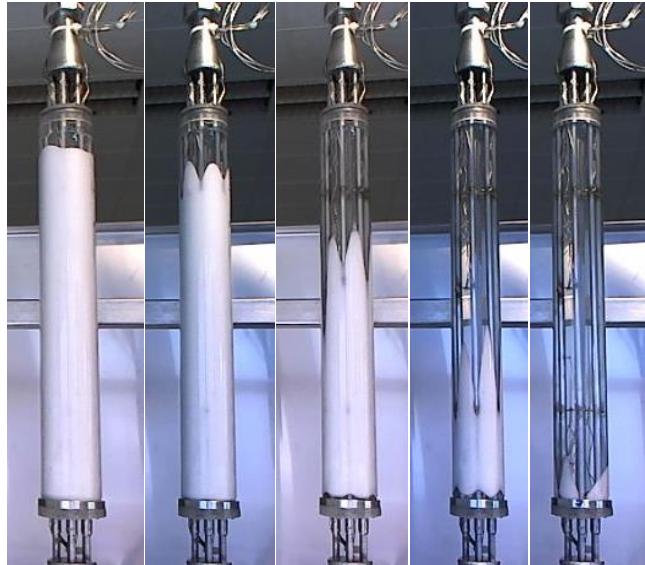
L'efficacité dans ce cas :  
**conversion rayonnement/chaleur  
stockage pour une utilisation différée**

Gemasolar en Espagne  
Centrale solaire concentré à tour avec stockage : deux réservoirs de sels fondus  
Capacité d produire 24h/24 en été



# Déphasage récupération/utilisation : le stockage

Chaleur latente : changement de phase solide vers liquide



Installation expérimentale phénoménologique CEA

Paraffine blanche solide

Transparente liquide

**Un MCP doit avoir une chaleur latente importante**

**Mais il a souvent une conductivité thermique faible**



Dans un réservoir sur une sous-station du réseau de chaleur de Grenoble

Design CEA



Dans un réservoir de camion pour du transport de chaleur fatale



# Déphasage récupération/utilisation : le stockage

Chaleur de réaction : réaction chimique réversible exo/endothermique



Installation expérimentale CEA avec la chaux 400°C



Démonstrateur sur réseau de chaleur de Berlin  
(SaltX) Chaux 350/80°C  
Conversion d'électricité en chaleur puis stockage

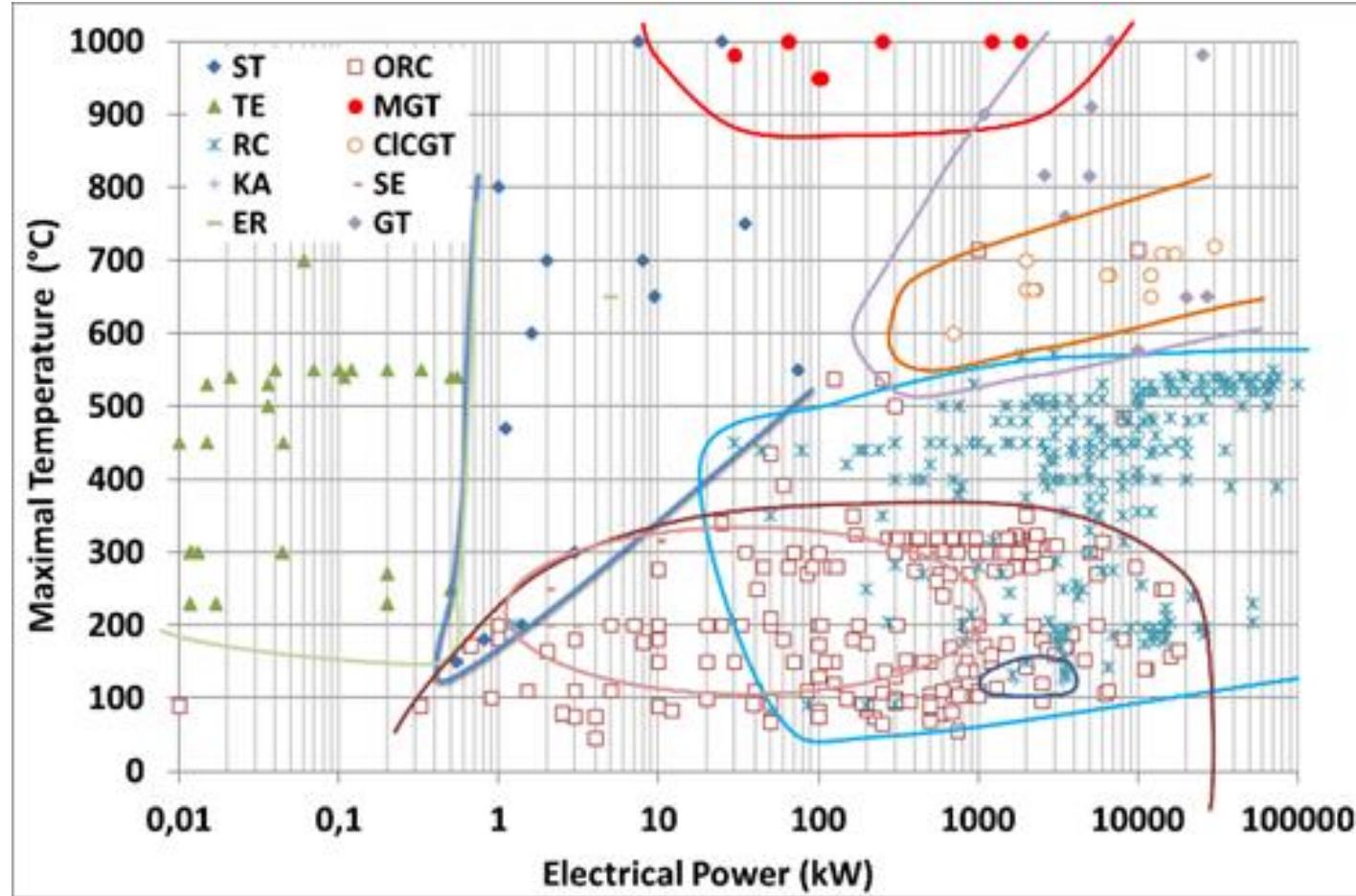
Réactions utilisées (hydratation/déhydratation) opérées en lit fluidisé pour augmenter les transferts de masse et de chaleur ou en lit fixe pour la simplicité

Pour être efficace une réaction doit être très fortement endo/exothermique et mettre en jeu des produits d'un coût raisonnable



Installation démonstration CEA avec du bromure de strontium du stockage saisonnier pour l'habitat  
45°C

# La conversion de chaleur en électricité : les cycles thermodynamiques et autres

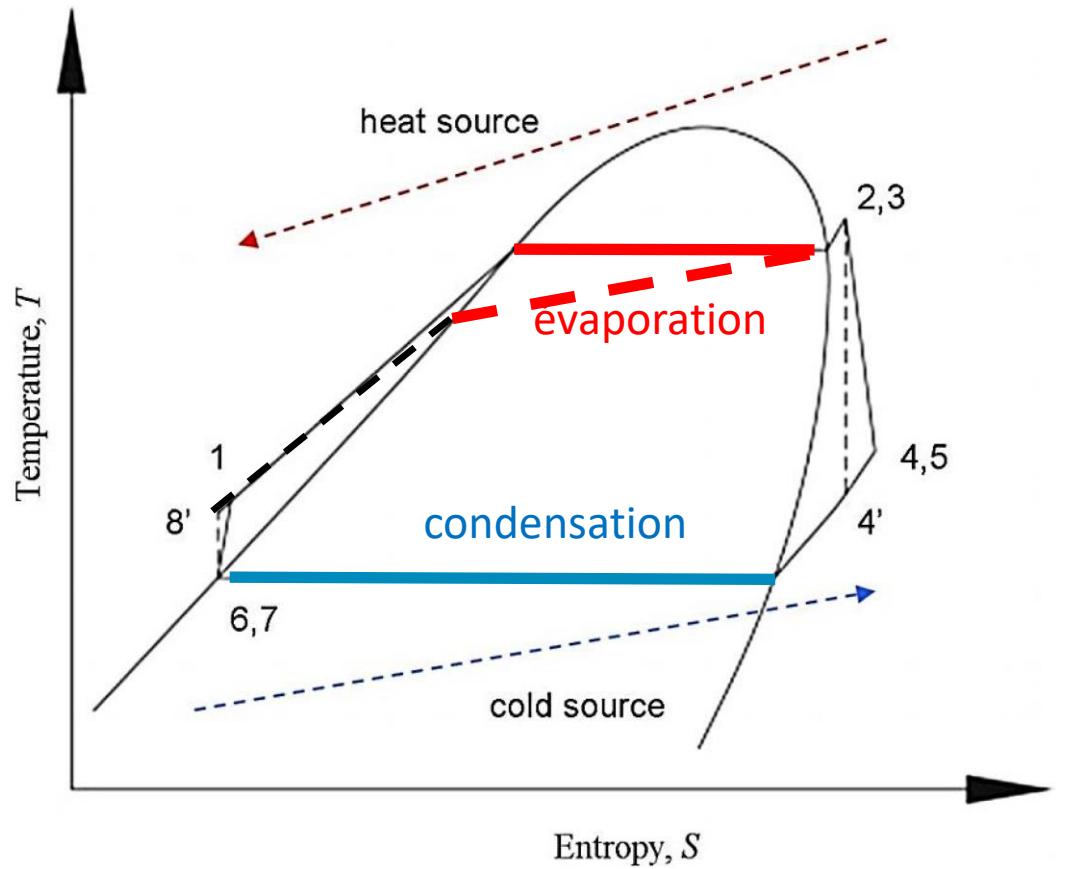


- Rankine cycle plant (RC)
- Steam engine (SE)
- Organic Rankine Cycle plant (ORC)
- Kalina cycle plant (KA)
- Gas turbine plant (GT) and Micro gas turbine (MGT)
- : Brayton cycle
- Closed cycle gas turbine plant (CICGT)
- Combined cycle plant (CCGT)
- Ericsson engine (ER)
- Stirling engine (ST)
- Thermogenerator (TE),
- Thermoacoustic generator (TA),

L'efficacité énergétique c'est le rendement du cycle mais aussi l'épuisement de la source

# La conversion de chaleur fatale moyenne température en électricité

## Le cycle Organique de Rankine



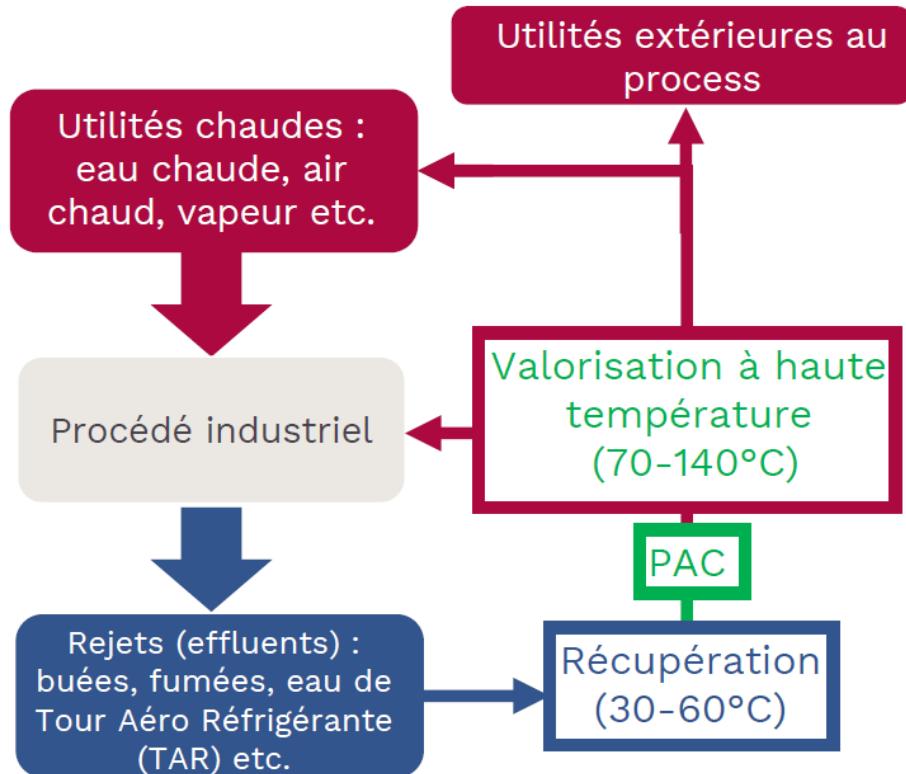
Possibilité d'adaptation à la source chaude disponible en changeant le fluide et le niveau de pression.

Possibilité d'une évaporation à température croissante par l'utilisation d'un mélange de fluides zéotrope

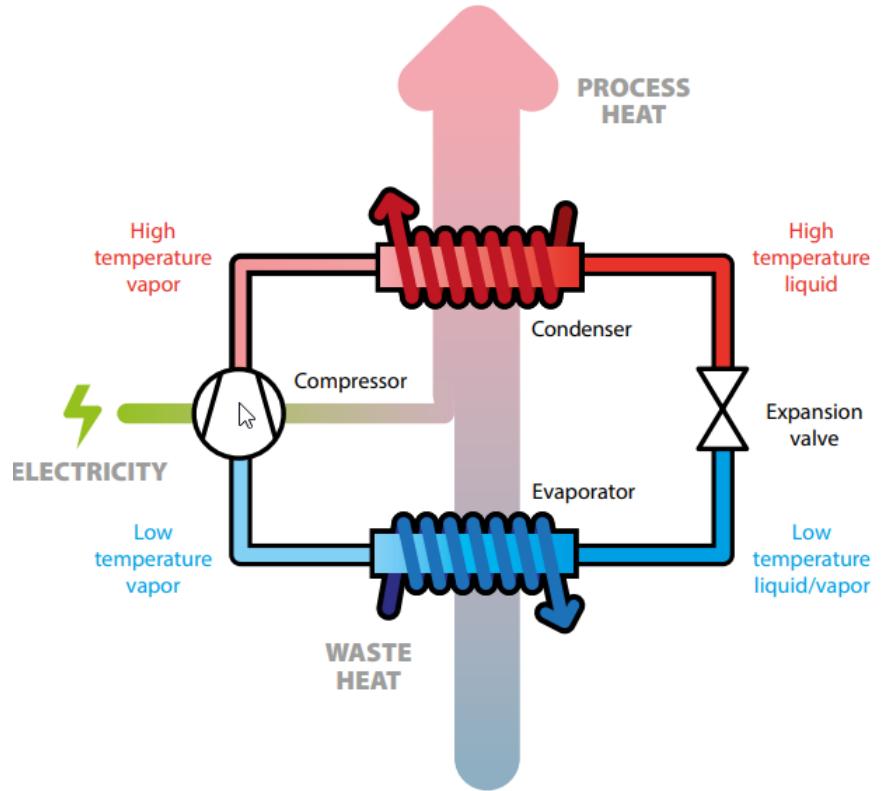
→ Meilleure utilisation de la source chaude



# Intégration d'une pompe à chaleur



Source : CETIAT



White paper: Strengthening Industrial Heat Pump Innovation - Decarbonizing Industrial Heat

# Exemples industriels

## Site Compagnie des Fromages & Riches Monts

Une pompe à chaleur entre l'eau de refroidissement (44-50°C) et la pasteurisation (65-85°C) par Axima Réfrigération

2 MW, COP 5,5

En remplacement du gaz



## Papeterie à Château-Thierry

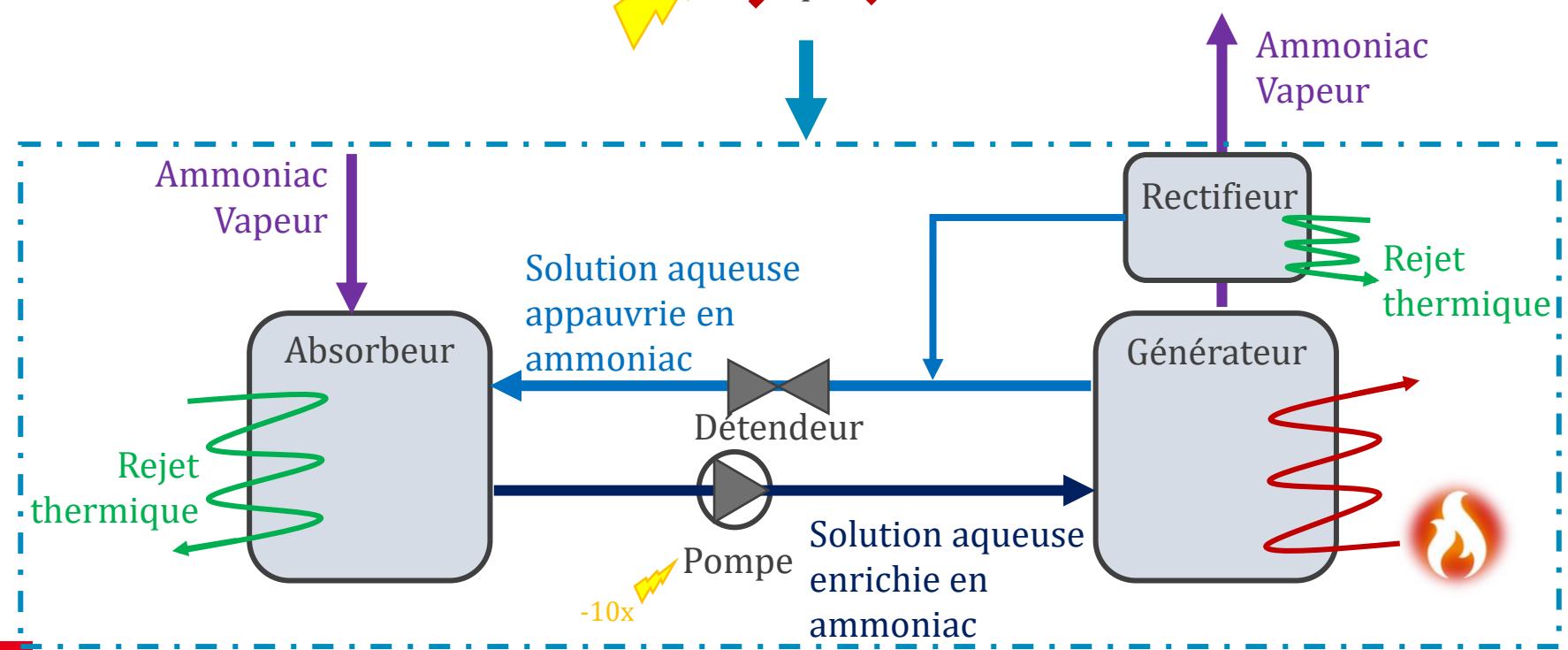
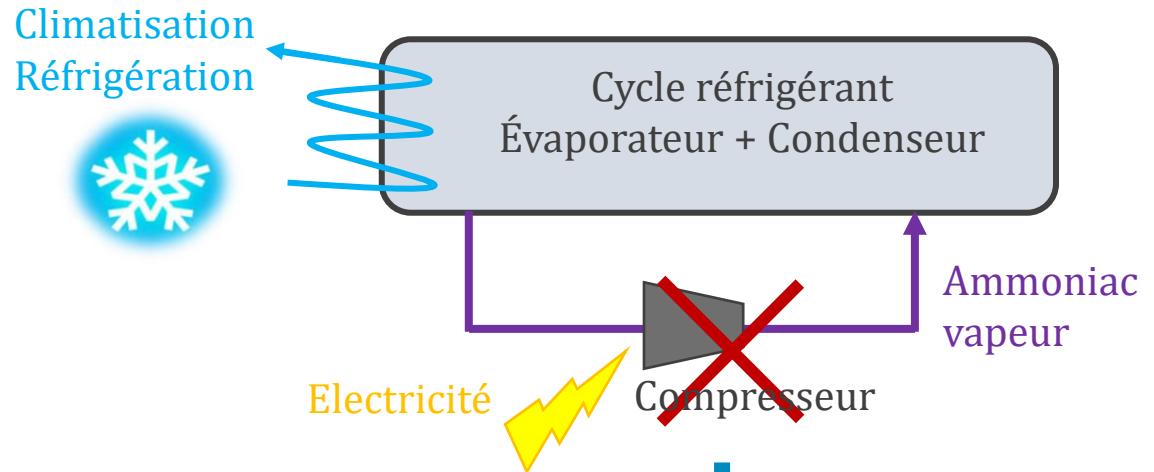
Pompe à chaleur entre les buées de séchoir (70°C) et l'air chaud entrant (140°C)

600 kW, COP 3,5

Combustible fossile effacé : gaz



# La conversion de chaleur fatale en froid



Le cycle à absorption avec le couple ammoniac-eau

L'énergie principale n'est plus l'électricité mais de la chaleur fatale

Possibilité de produire du froid négatif

Rendement jusqu'à 60%

# La conversion de chaleur fatale en froid

Démonstration CEA : machine de 100 kW froid couple ammoniac/eau



Machine commerciale Carrier 16LJ / 16LJ-F  
couple eau/LiBr  
80 kW à 4 MW



Travaux sur la minimisation des quantités d'ammoniac mises en jeu (sécurité).

Travaux sur l'optimisation des performances : cycles à éjecteurs

Taux de conversion de la chaleur en froid (de l'ordre de 60%)

Travaux sur le fonctionnement en mode pompe à chaleur

# Programme et équipements prioritaires de recherche pour la décarbonation de l'industrie :

## PEPR SPLEEN



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
DÉCARBONATION  
DE L'INDUSTRIE

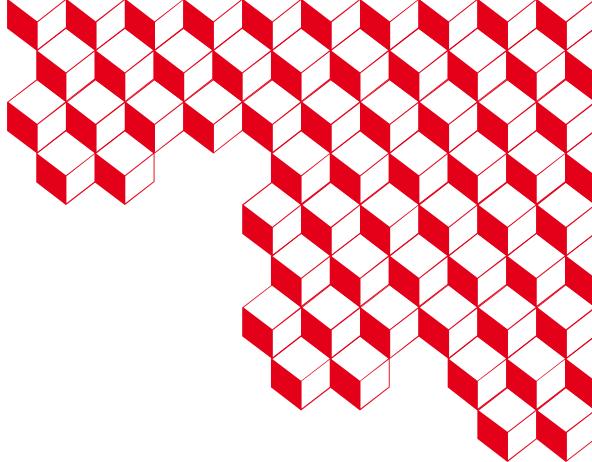
Quatre axes de travail :

- Axe 1 : développement de méthodologies et d'outils génériques de mesure, de contrôle, de conception optimale et d'évaluation des impacts environnementaux, afin de soutenir la décarbonation des procédés industriels
- Axe 2 : intégration d'énergies bas-carbone et efficacité énergétique
- Axe 3 : décarbonation de processus industriels et captage du CO<sub>2</sub>
- Axe 4 : stockage et valorisation du CO<sub>2</sub>

<https://www.pepr-spleen.fr/>



liten



# Merci

Jean-François Fourmigué

CEA-Liten, Grenoble, France

[liten.cea.fr](http://liten.cea.fr)

[jean-francois.fourmigue@cea.fr](mailto:jean-francois.fourmigue@cea.fr)

T. + 33 (0)4 38 78 49 06