

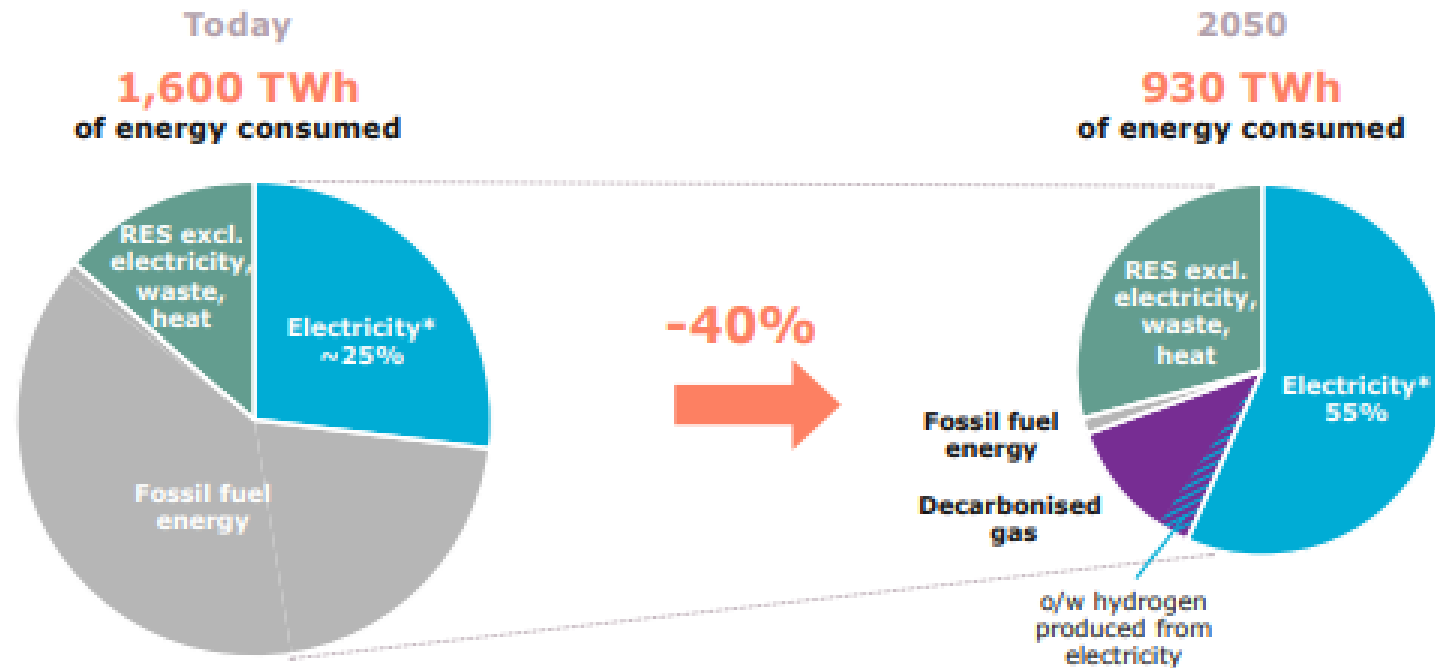


Efficacité énergétique et décarbonation de l'énergie pour les territoires



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

Nucléaire	61,4 GW
Thermique	17,9 GW
Énergies renouvelables	59,8 GW

Énergie produite en TWh

au 31/12/2021

Thermique renouvelable et déchets 10 TWh

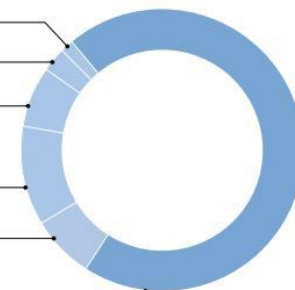
Solaire 14,3 TWh

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



en millions de tonnes

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 ¹	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

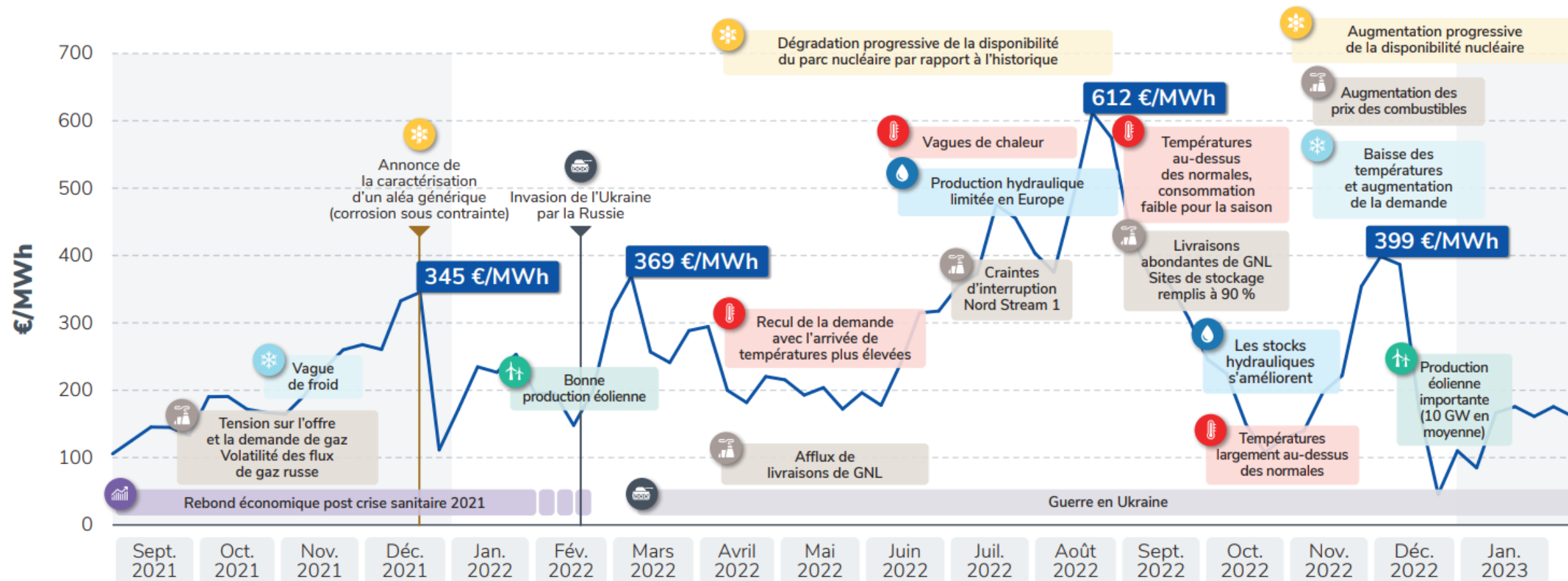


PCI du gazole = 12 kWh/kg

Au total de l'ordre de 800 TWh

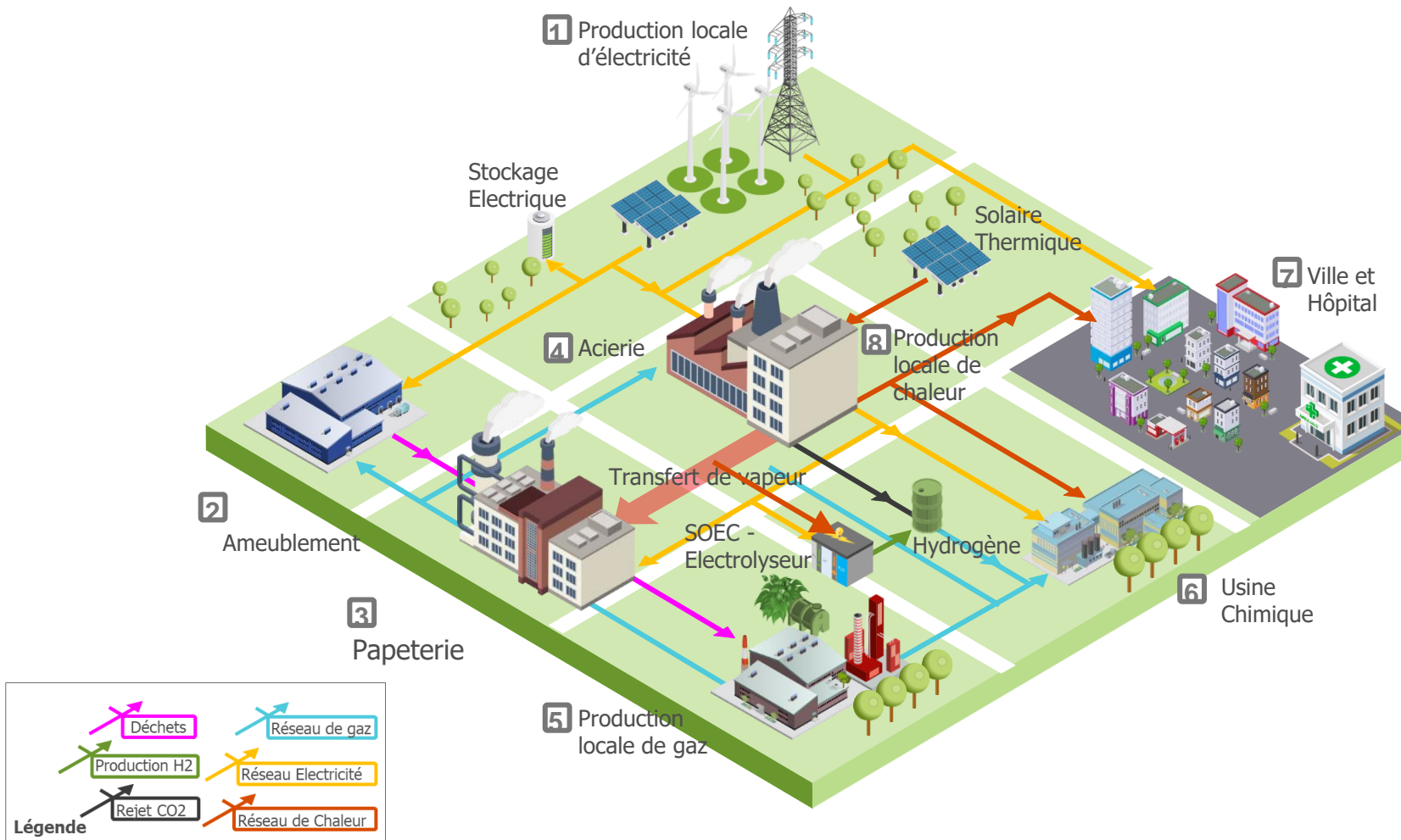
Arrive dans les ports et le réseau de distribution à l'intérieur de la France est plutôt par camions

Parlons un peu d'argent



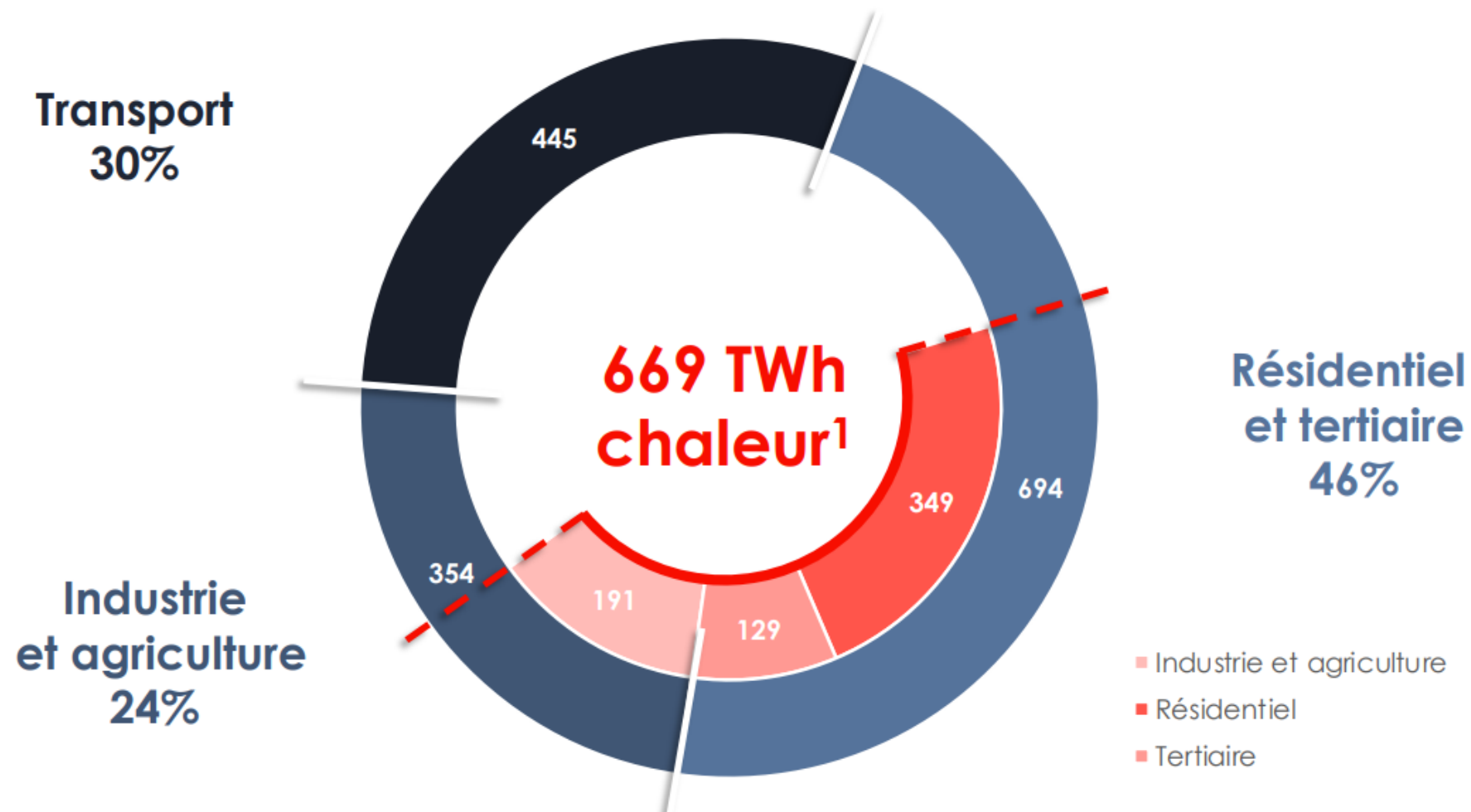
* Gaz Naturel Liquéfié

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

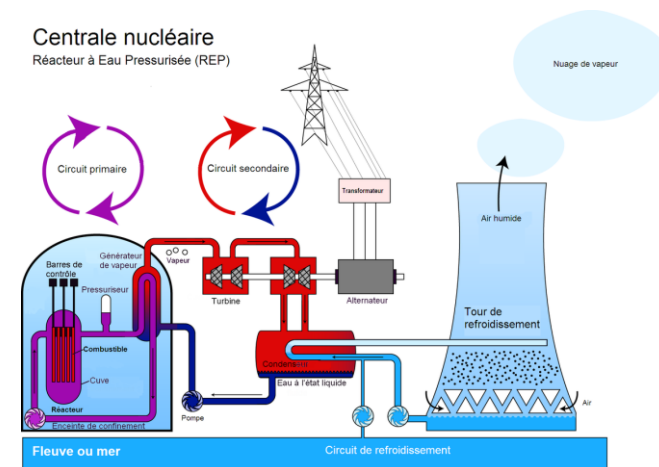
La chaleur est au cœur de :

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



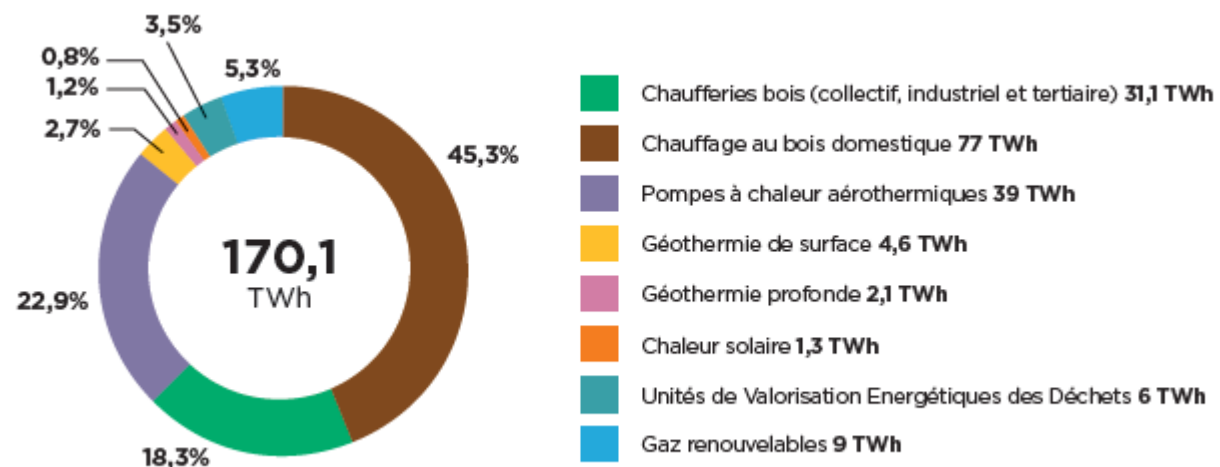
Source Wikipedia



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

La décarbonation c'est comment produire cette chaleur sans émissions de CO2

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



UVE à Grenoble



Biogaz : méthanisation ou centres d'enfouissement cogénération

Les réseaux de chaleur




















Un réseau de chaleur c'est :
Un ou plusieurs sites de production
Des tuyaux enterrés qui apportent la chaleur au pied des immeubles
Des sous-stations : échangeur entre l'eau du circuit enterrée et l'eau de distribution dans l'immeuble à une température plus basse

Un réseau de chaleur :
Cela peut être énorme comme à Paris ou Grenoble
Cela peut alimenter deux ou trois bâtiments dans des petites villes

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%
 Russie	55%



Islande avec la géothermie chaude



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

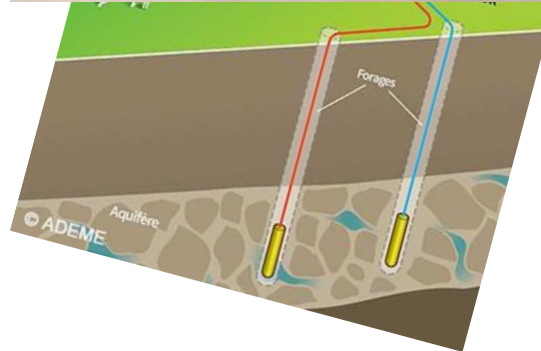
Classement	Réseau	Longueur (km)
1	Paris	486
2	Grenoble	168
3	Metz	103,5
4	Lyon	78
5	Paris (Froid)	73
6	Roissy	68
7	St Denis	67
8	Cergy	52
9	Chambéry	51,3
10	Lille	49,2
11	Venissieux	48,2
12	Nantes	45,7
13	Evry	43,7
14	Roissy (Froid)	43
15	Vitry / seine	39,8
16	Dunkerque	38,1
17	Rennes	37,9
18	Créteil	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

Un peu vieux mais à peu près valable

La production de chaleur renouvelable et de récupération pour les réseaux



Centrale **biomasse** BIOMAX à Grenoble



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

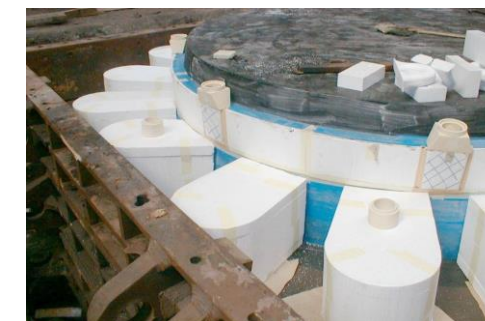
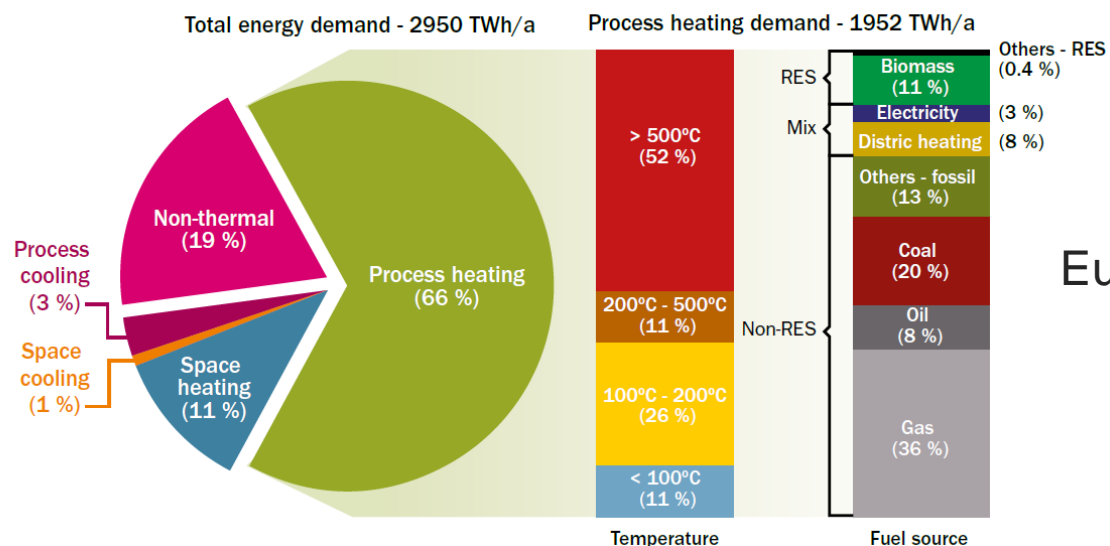


Production de chaleur **solaire** pour un réseau au Danemark



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

La production de chaleur dans l'industrie



Chaleur process et chaleur fatale

Par exemple un four de traitement thermique

Chaleur perdue dans les fumées chaudes en cheminée

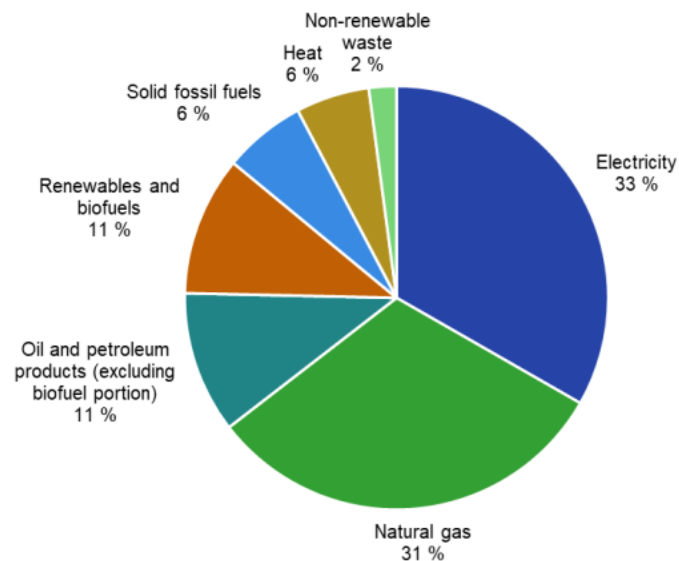
Chaleur des pièces massives sorties chaudes du four

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

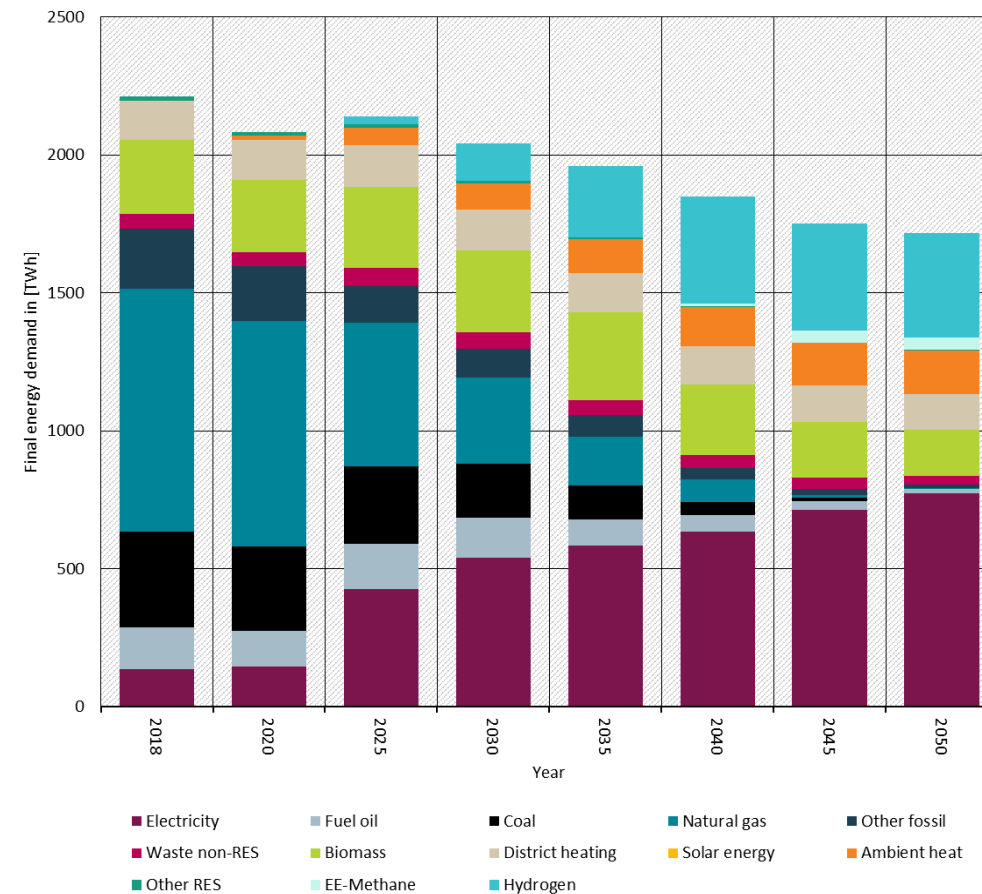
Final energy consumption in the industry sector by energy product, EU, 2022 (%)



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'H₂ par électrolyse et utilisation dans l'industrie
- modification des procédés

Les gaz de synthèse décarbonnés :

- Procédés de production de gaz à partir de CO₂ 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

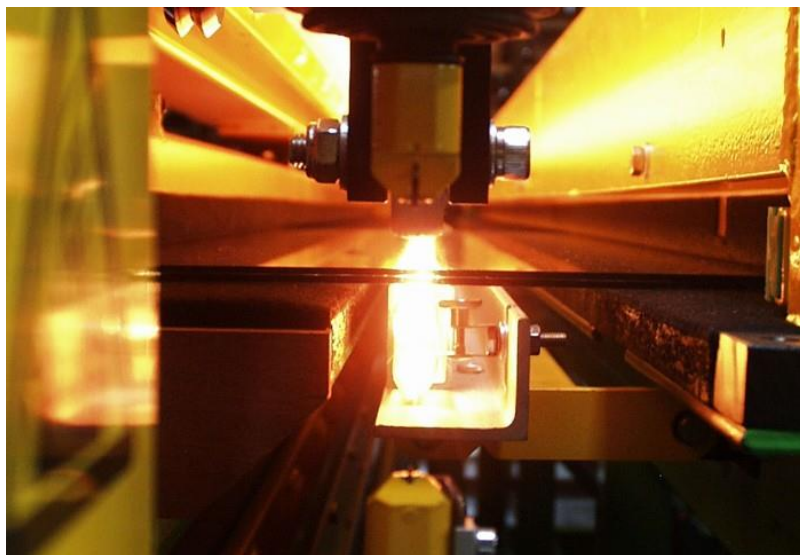
Décarbonation : exemples industriels

Chauffage par fours infra-rouge

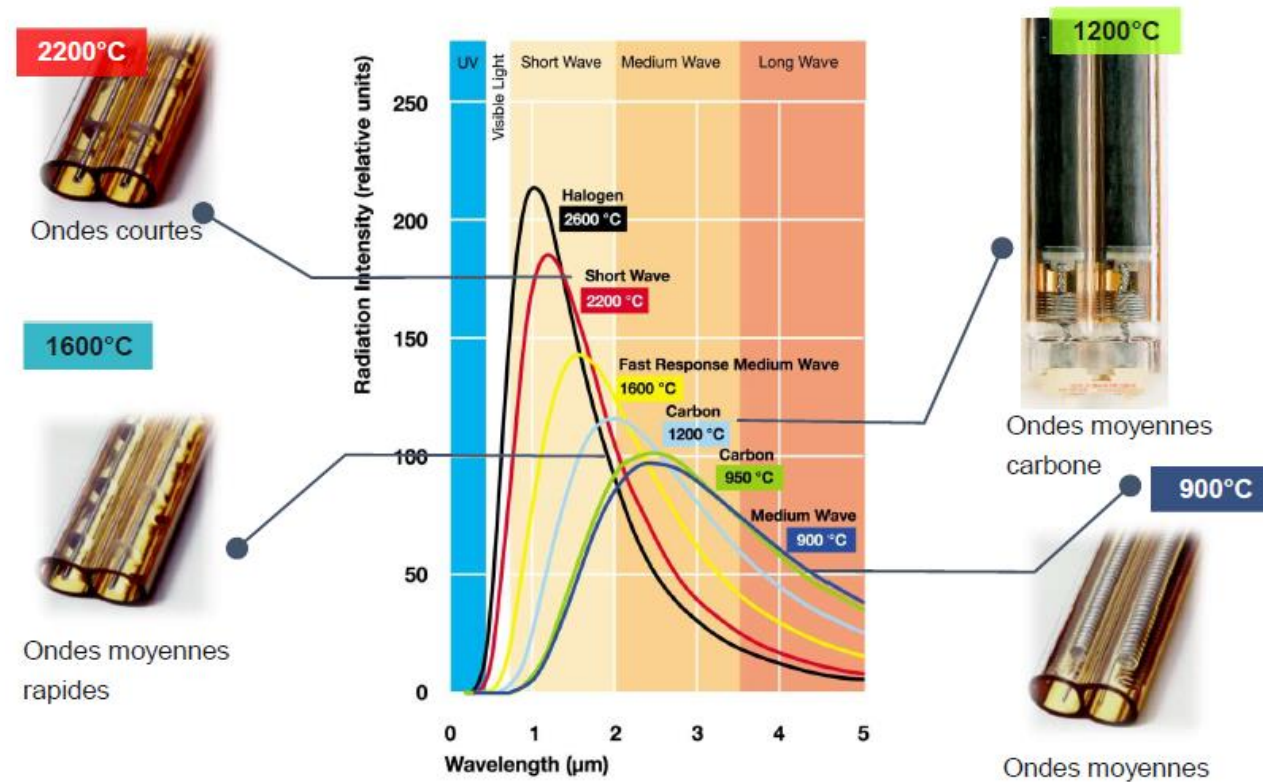
Exemple de four du site de :

EXCELITAS
TECHNOLOGIES®

Noblelight



Le spectre électromagnétique

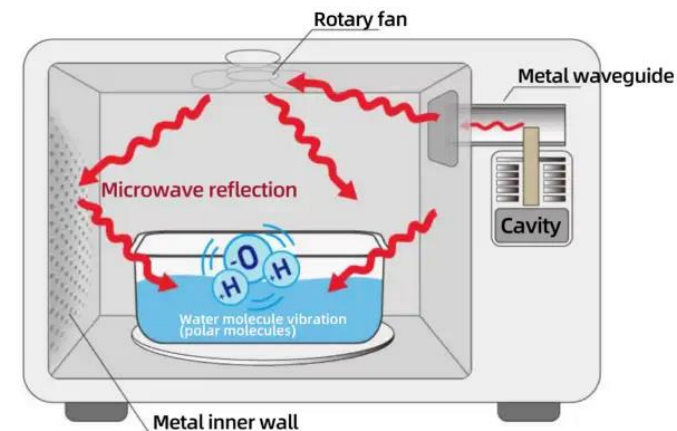


Décarbonation : exemples industriels

Chauffage par générateurs micro ondes

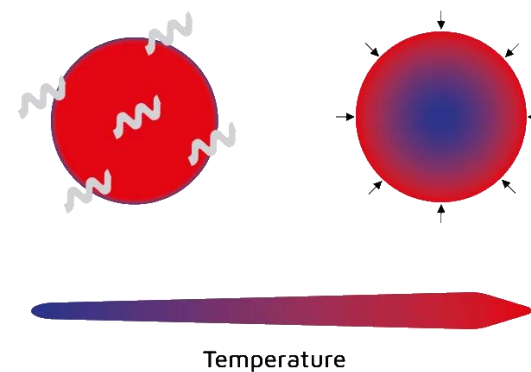
Exemple de four du site de :

sairam

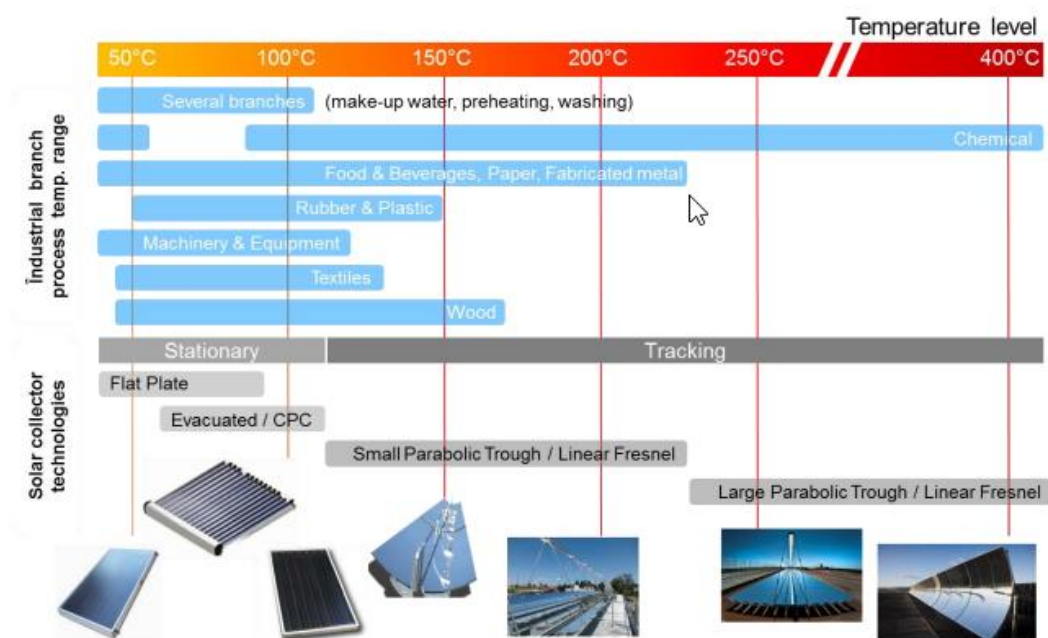


Microwave and RF
volumetric heating

Conventional conductive
heating



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 dessiccante

Combustible fossile effacé : gaz



Décarbonation : exemples industriels

SolarLite



Brasserie Heineken à Séville

Solaire concentré haute température pour production de vapeur

43.414 m² 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



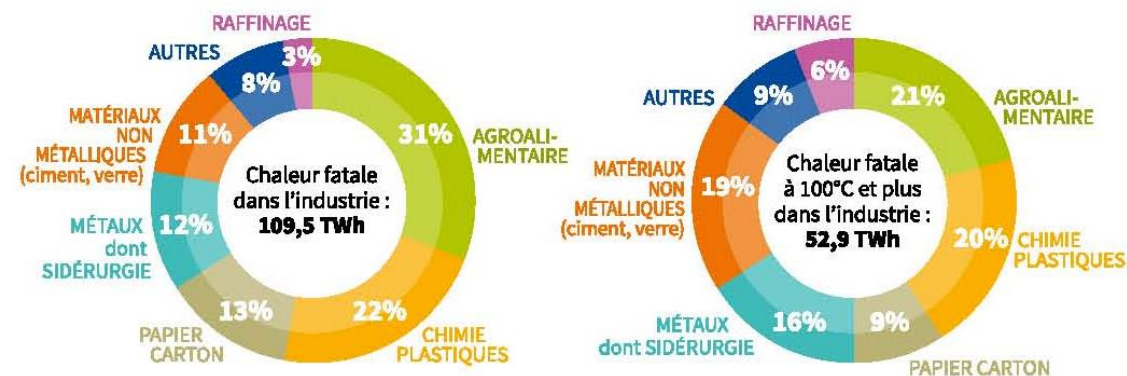
Source rapport Ademe chaleur fatale (2017)



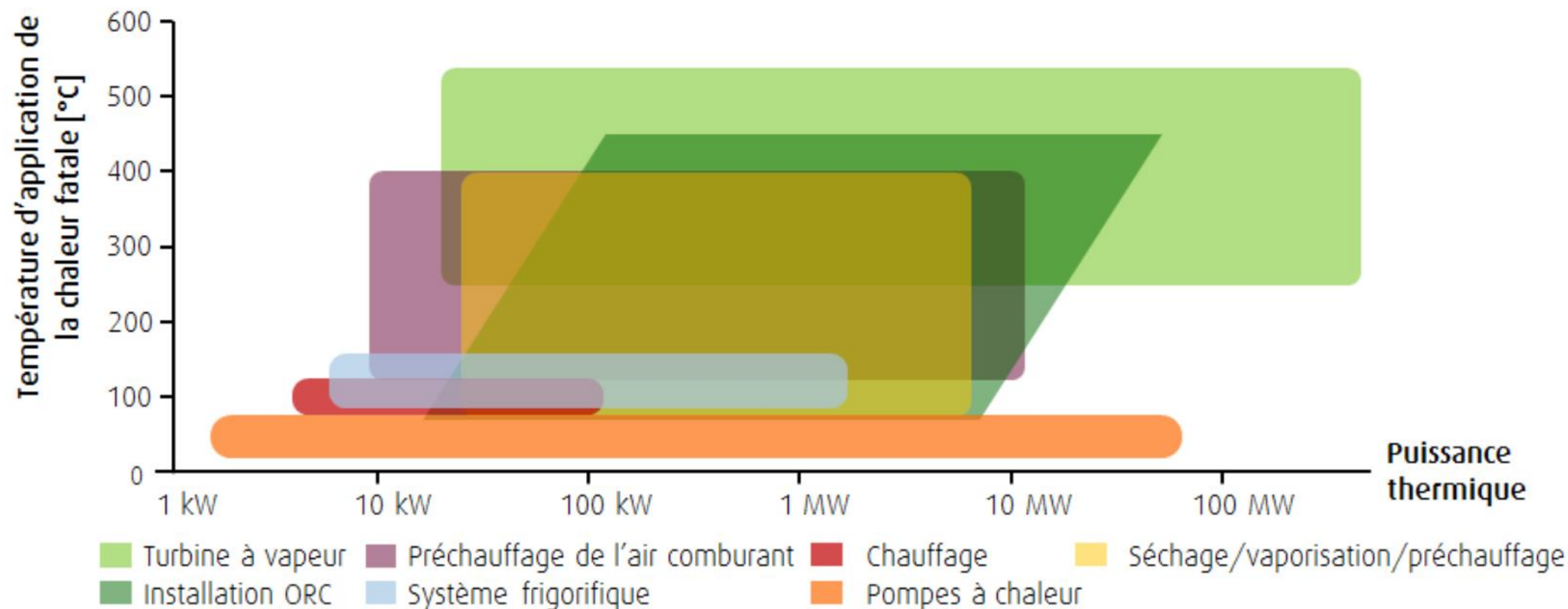
109,5 TWh, soit **36 %** de la consommation de combustibles de l'industrie⁽¹⁾, rejetés sous forme de chaleur, dont **52,9 TWh** perdus à plus de 100°C

Origine du gisement

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



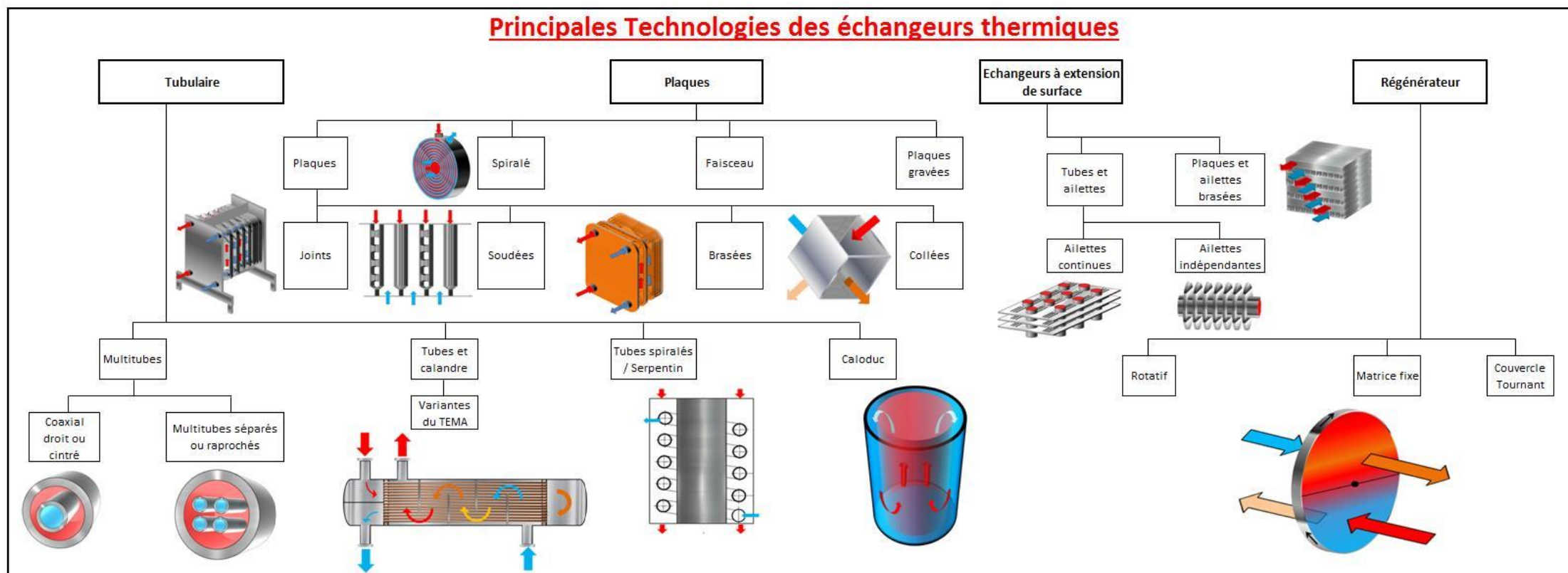
La chaleur fatale : utilisation



La chaleur fatale industrielle en France et en Allemagne OFATE 2019

Les échangeurs de chaleur

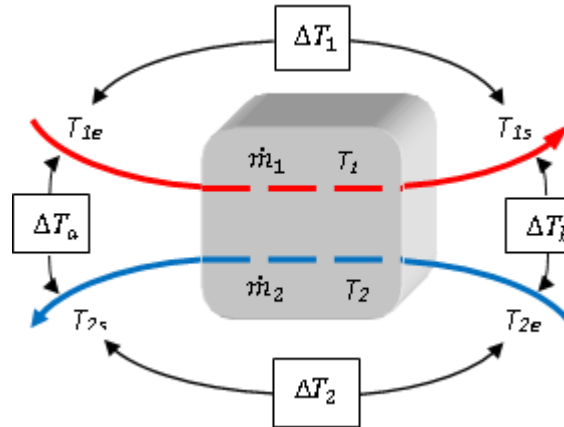
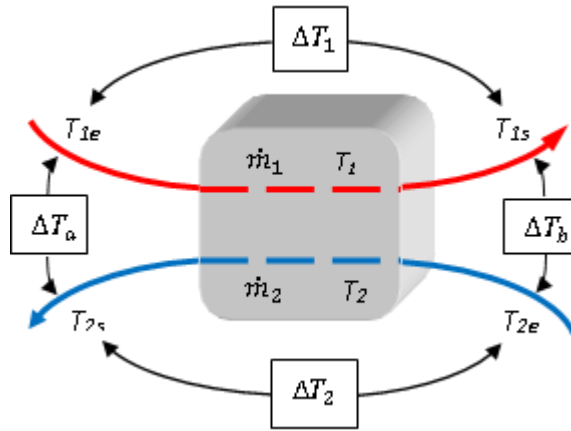
Pour convertir la chaleur fatale en une chaleur utilisable ou pour apporter de la chaleur à un procédé industriel :
L'échangeur pour transférer de la chaleur d'un fluide à un autre



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 :



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

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

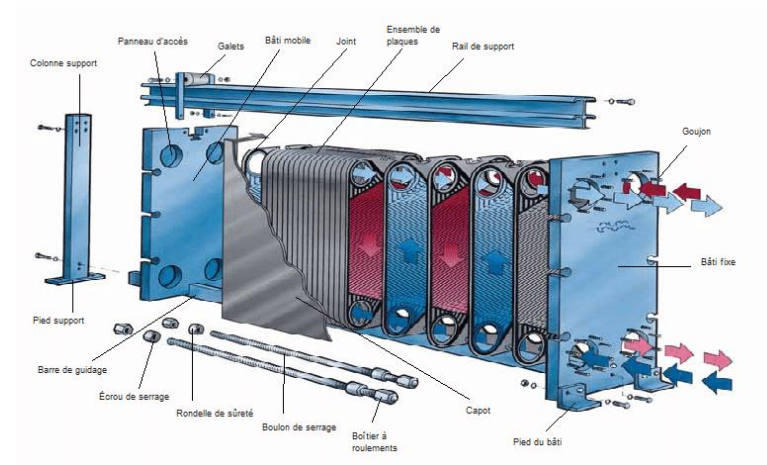
A_ℓ est la surface d'échange et représente donc la géométrie de l'échangeur

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

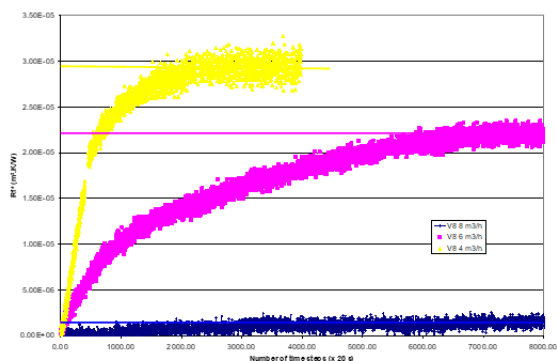


Et donc il est indispensable de le nettoyer!

(Echangeur plaques et joints démontable)

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 encrassant	
Fuel n°2 (% soufre < 1 %)	0,35 – 0,70
Turbine à gaz	0,26
Moteur diesel	0,53
Gaz fortement encrassant	
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



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

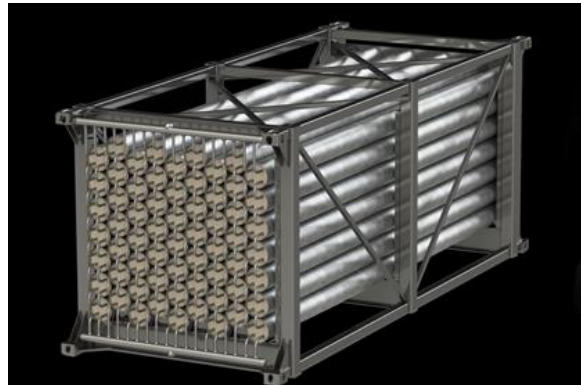
Déphasage récupération/utilisation : le stockage

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

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



Réservoir d'eau chaude en Allemagne



Cylindres de béton



SIEMENS Gamesa
RENEWABLE ENERGY

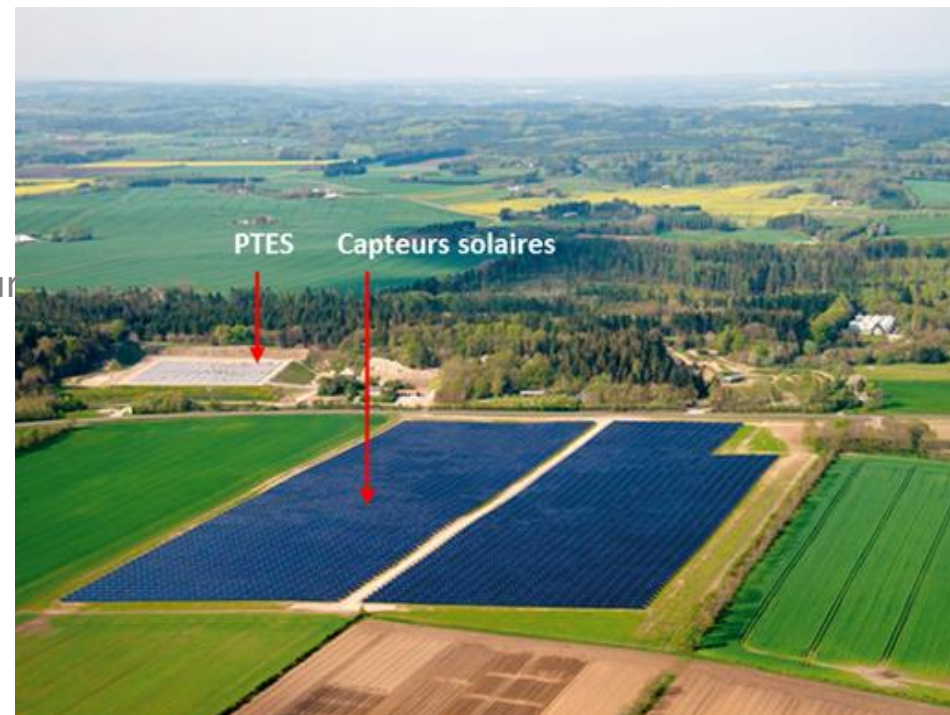


La chaleur solaire et couplage avec stockage

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 :

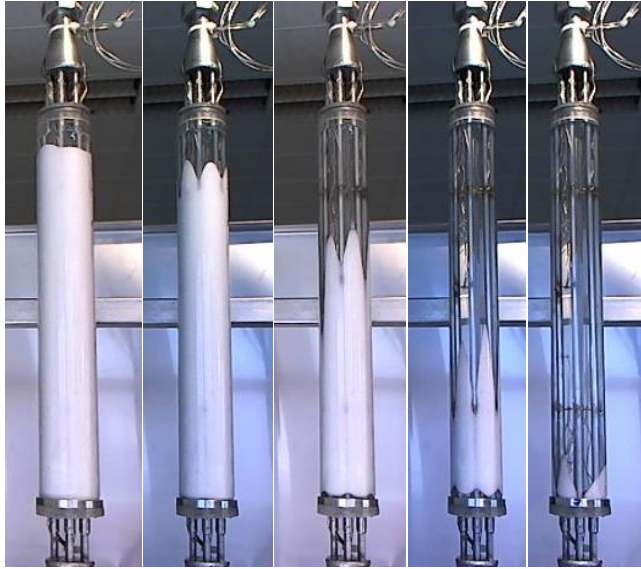
conversion rayonnement/chaleur
stockage pour une utilisation différée

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



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



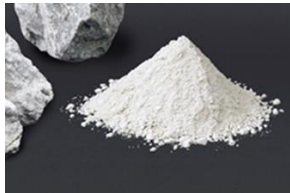
Un MCP doit avoir une chaleur latente importante
Mais il a souvent une conductivité thermique faible

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



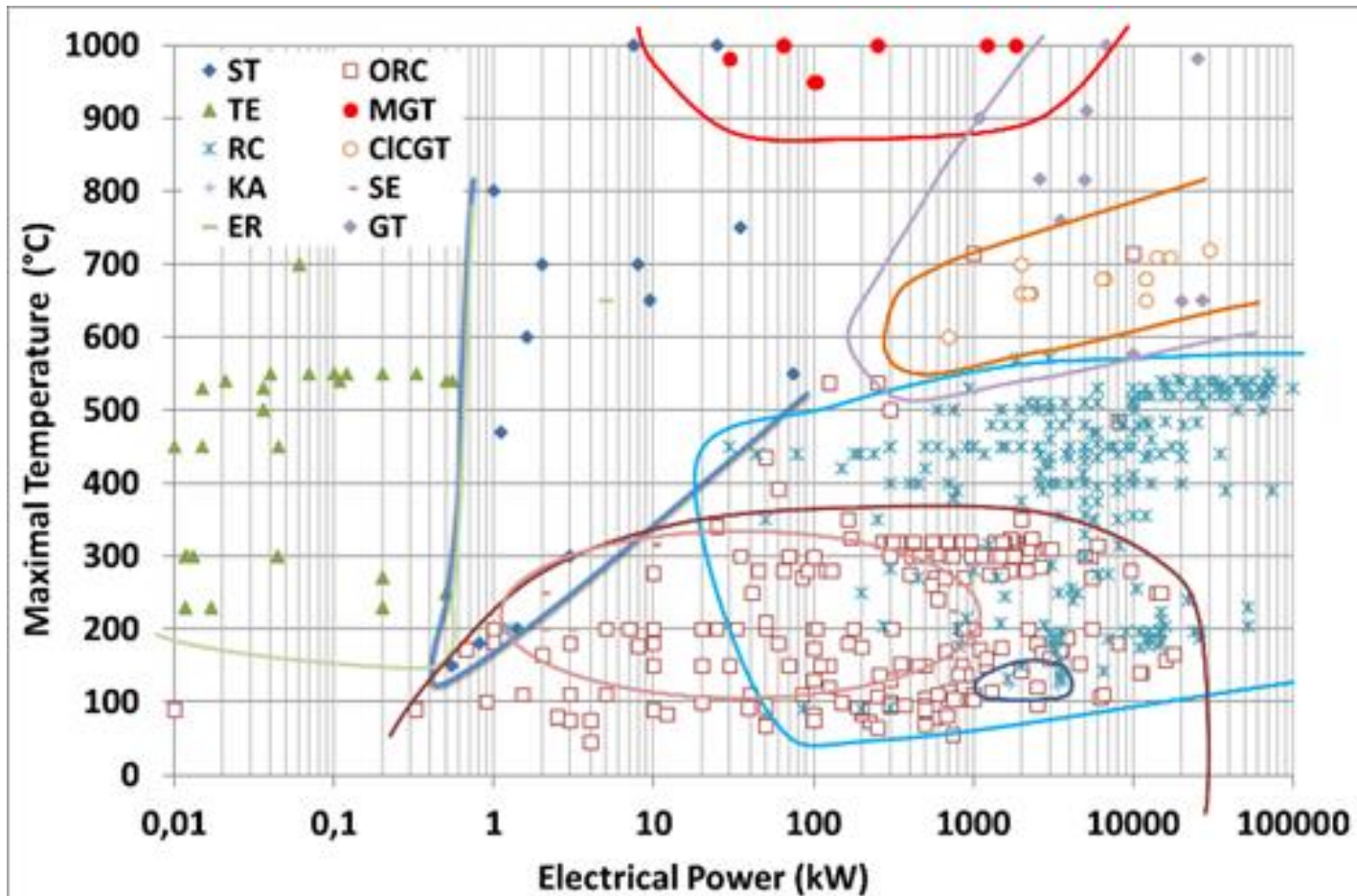
Installation démonstration CEA avec du bromure de strontium du stockage saisonnier pour l'habitat

45°C

Réactions utilisées (hydratation/déshydratation) 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

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

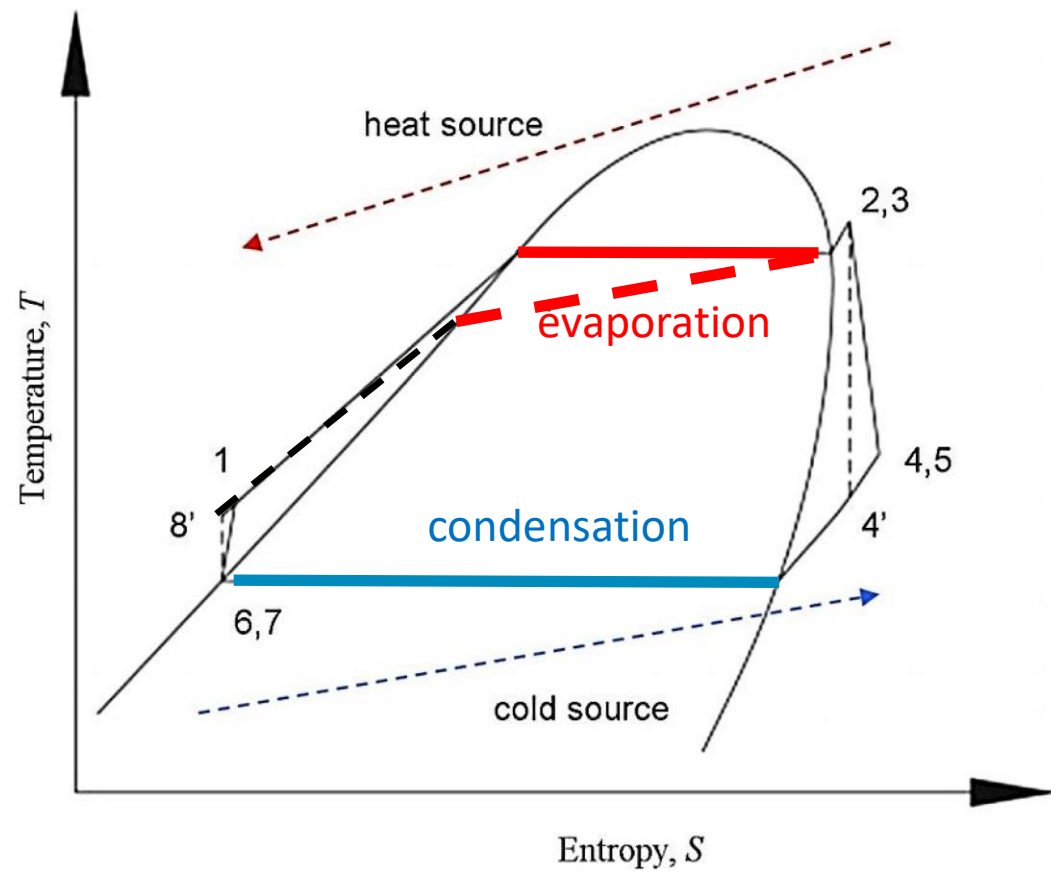


Rankine cycle plant (RC)
Steam engine (SE)
Organic Rankine Cycle plant (ORC)
Kalina cycle plant (KA)
Gas turbine plant (GT) and Micro gas turbine (MGT)
: Brayton cycle
Closed cycle gas turbine plant (CICGT)
Combined cycle plant (CCGT)
Ericsson engine (ER)
Stirling engine (ST)
Thermogenerator (TE),
Thermoacoustic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



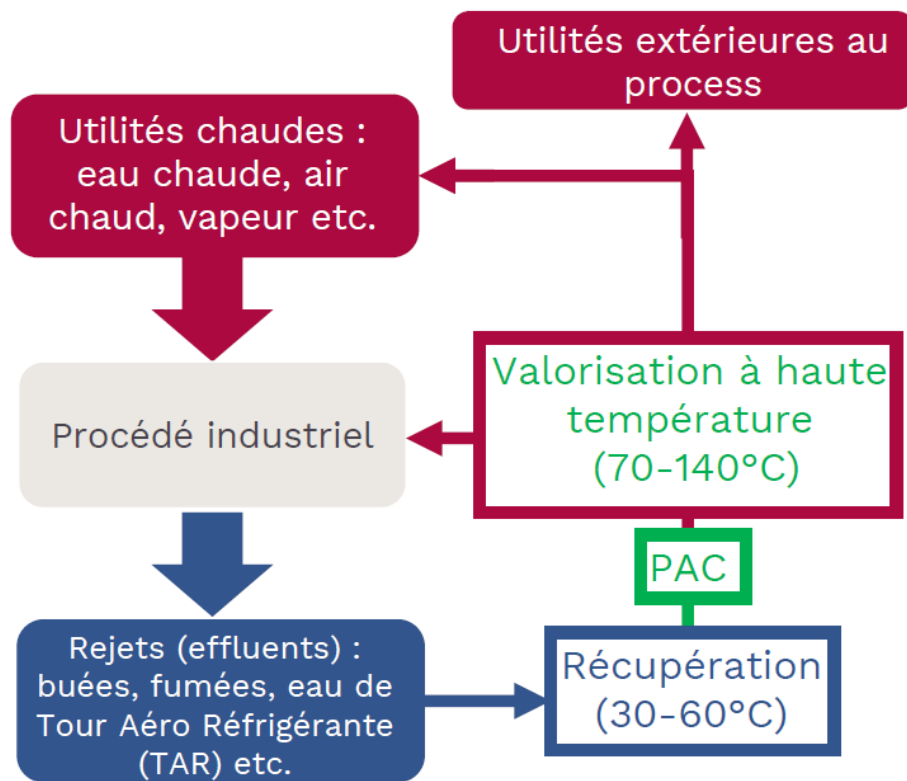
Possibilité d'adaptation à la source chaude disponible en changeant le fluide et le niveau de pression.

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

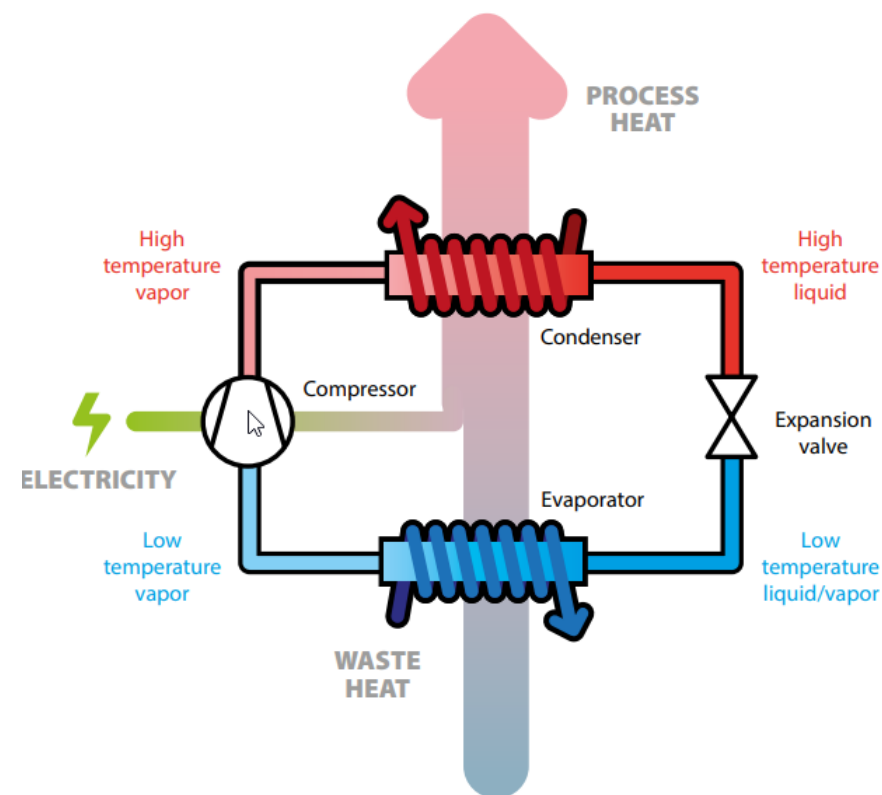
→ Meilleure utilisation de la source chaude



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

Climatisation
Réfrigération



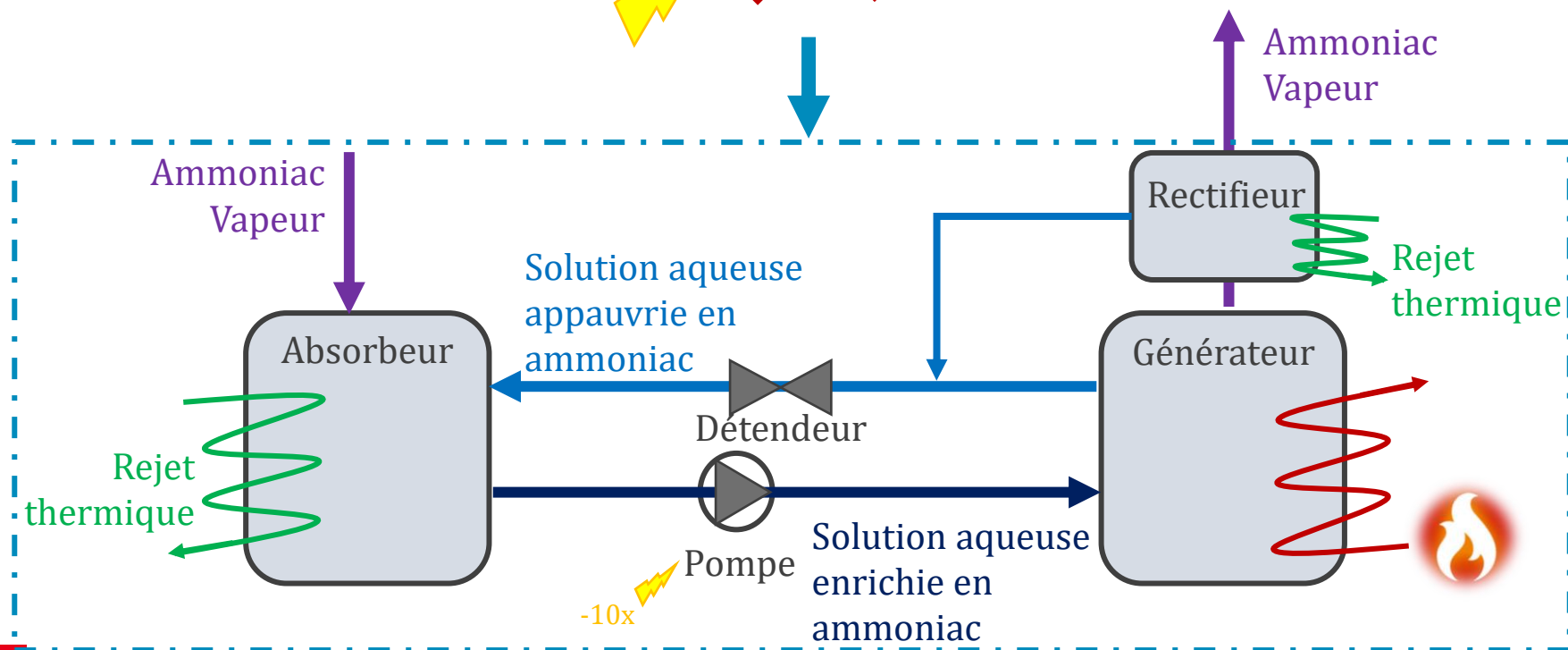
Electricité

Compresseur

Ammoniac
vapeur

Basse
Pression

Haute
Pression



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%

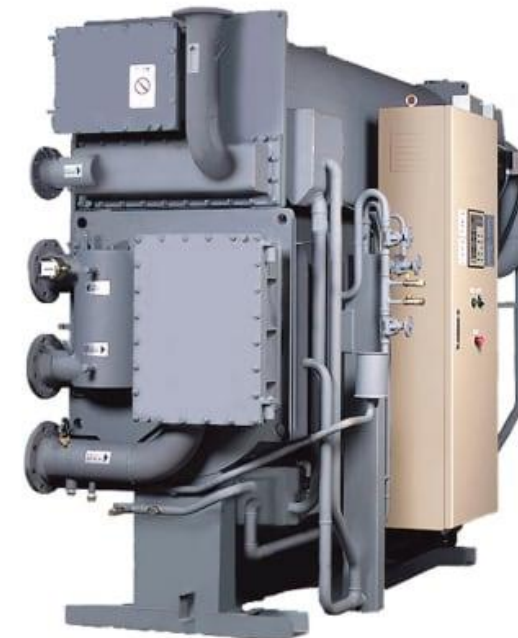
La conversion de chaleur fatale en froid

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

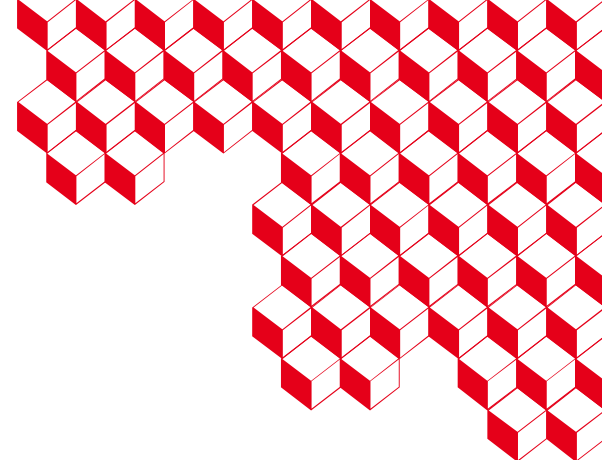


PROGRAMME
DE RECHERCHE
DÉCARBONATION
DE L'INDUSTRIE

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 CO₂**
- **Axe 4 : stockage et valorisation du CO₂**

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



Merci

Jean-François Fourmigué

CEA-Liten, Grenoble, France

liten.cea.fr

jean-francois.fourmigue@cea.fr

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

in

