



La chaleur fatale industrielle

ADEME



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

CONNAÎTRE POUR AGIR

Face aux enjeux de la Transition Énergétique et à un secteur Industrie qui représente plus de 20 % des consommations énergétiques de la France, l'accompagnement des acteurs industriels dans leurs efforts de réduction des consommations d'énergie est essentiel. Ceci d'autant plus, qu'à production égale, un potentiel d'efficacité énergétique de l'industrie atteignable d'ici 2030 est estimé par l'ADEME à 20%¹.

La récupération et la valorisation de la chaleur fatale issue de l'industrie constituent un potentiel d'économies d'énergie à exploiter.

Lors du fonctionnement d'un procédé de production ou de transformation, l'énergie thermique produite grâce à l'énergie apportée n'est pas utilisée en totalité. Une partie de la chaleur est inévitablement rejetée. C'est en raison de ce caractère inéluctable qu'on parle de « chaleur fatale », couramment appelée aussi « chaleur perdue ». Cependant, cette appellation est en partie erronée car la chaleur fatale peut être récupérée. C'est seulement si elle n'est pas récupérée qu'elle est perdue.

La récupération de la chaleur fatale conduit à deux axes de valorisation thermique complémentaires :

- une valorisation en interne, pour répondre à des besoins de chaleur propres à l'entreprise ;
- une valorisation en externe, pour répondre à des besoins de chaleur d'autres entreprises, ou plus largement, d'un territoire, via un réseau de chaleur.

Au-delà d'une valorisation thermique, la chaleur récupérée peut aussi être transformée en électricité, également pour un usage interne ou externe.






Ainsi, les procédés industriels peuvent être mis en synergie : la chaleur récupérée sur un procédé peut servir à en alimenter un autre. Ils peuvent aussi constituer une source d'approvisionnement en chaleur pour un bassin d'activité industrielle, tertiaire ou résidentiel. Cette perspective, est d'autant plus intéressante que l'optimisation énergétique et son rôle crucial dans la lutte contre le réchauffement climatique nécessite une cohérence d'action entre tous les acteurs.

Pour mieux prendre en considération le potentiel énergétique disponible issu de l'industrie, à destination d'un bassin de population par exemple, les acteurs chargés de la planification territoriale doivent pouvoir bénéficier d'une information sur les gisements d'énergie récupérable, claire et argumentée par des données fiables.

Fortes de récentes études, l'ADEME met à disposition des chiffres qui montrent l'existence de gisements significatifs pour les industries comme pour les territoires.

¹ Étude *Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050* disponible en téléchargement sur : www.ademe.fr/mediatheque

Sommaire

 La chaleur fatale industrielle	5
La chaleur dans l'industrie	6
La récupération de chaleur fatale industrielle	10
Des gisements identifiés et quantifiés	18
 Gisement national de chaleur fatale industrielle et répartition par région	21
 Gisement de chaleur fatale industrielle pour les réseaux de chaleur existants	27
 Gisement de production d'électricité à partir de chaleur fatale industrielle	33
 Pour aller plus loin : le Fonds Chaleur ADEME	38

La chaleur dans l'industrie	6
La récupération de chaleur fatale industrielle	10
Des gisements identifiés et quantifiés	18

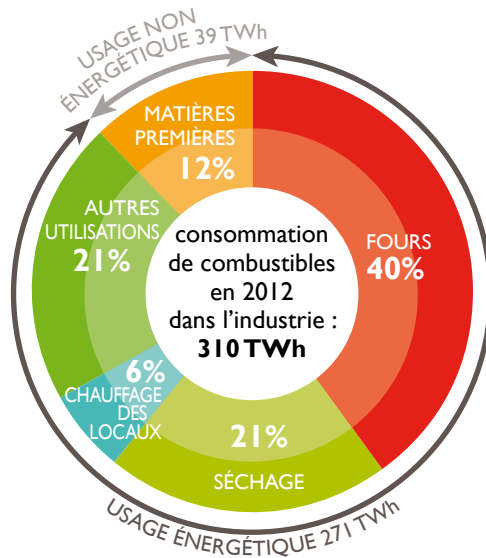
La chaleur fatale
industrielle



La chaleur dans l'industrie

Avec quelles énergies, pour quels usages ?

Les combustibles, essentiellement importés et d'origine fossile représentent la principale énergie utilisée pour la production de chaleur dans l'industrie. Cette énergie provient d'une consommation en combustibles de 271 TWh² dont près de 190 TWh (70%) servent à l'alimentation des fours et des séchoirs.



Source :
Chiffres clés Climat, air
et énergie de l'ADEME,
édition 2014

Une faible part d'électricité (18%, soit 21 TWh en 2012) sert à la production thermique (fours à résistance et à arc principalement)³.

² Les combustibles peuvent être aussi utilisés comme matière première : gaz naturel pour la production d'engrais, coke de pétrole pour la fabrication d'électrodes nécessaires à la production d'aluminium primaire... Les combustibles utilisés dans les réactions thermochimiques – le coke pour les hauts fourneaux qui sert aussi à la réaction de réduction du minerai de fer- sont comptabilisés par convention en usage énergétique.

³ L'essentiel (70%) de l'énergie électrique est destiné à la force motrice.

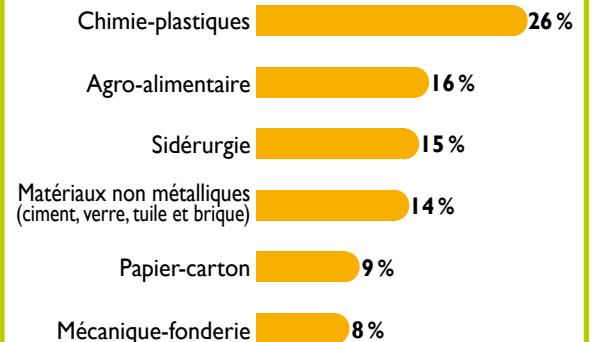
⁴ Hors secteur de l'énergie (raffineries...), mais comprenant les cokeries intégrées à la sidérurgie.

RAPPEL

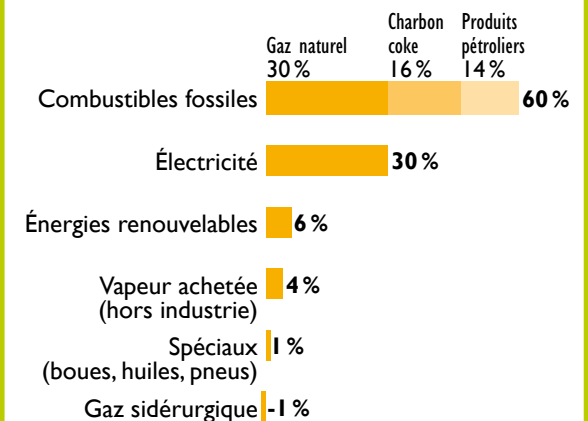
L'industrie⁴ représente 21 % de la consommation nationale d'énergie finale (hors usage en matière première).

L'industrie est la 3^e consommatrice d'énergie après le secteur Résidentiel et le Transport. Cela correspond à une consommation de 31,8 Mtep (sur un total de 154,1 Mtep).

SECTEURS D'ACTIVITÉ LES PLUS CONSOMMATEURS D'ÉNERGIE



L'INDUSTRIE FORTEMENT DÉPENDANTE DES COMBUSTIBLES FOSSILES...

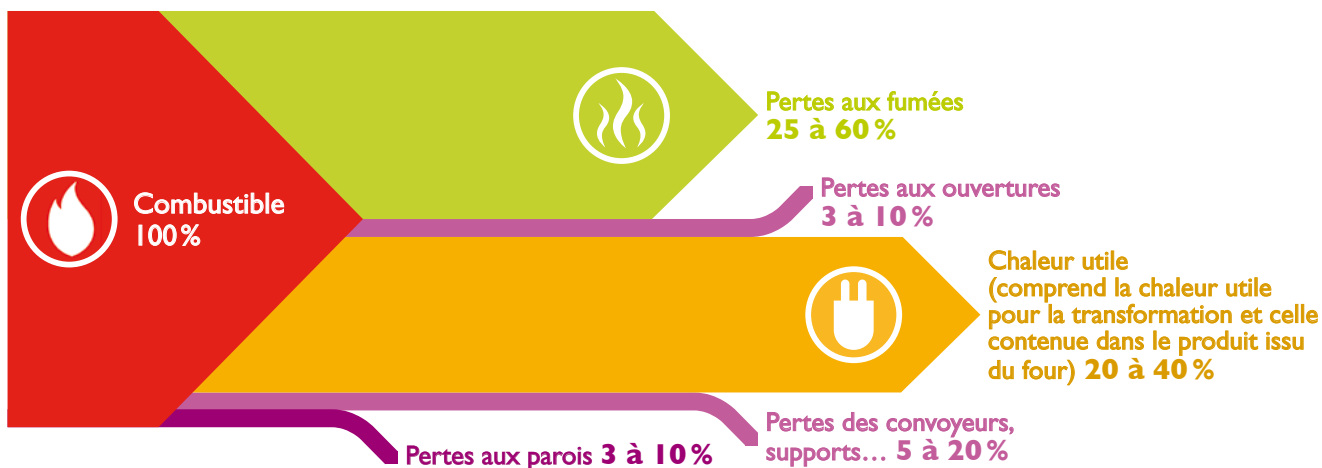


Source : Chiffres clés Climat, air et énergie de l'ADEME édition 2014

La chaleur fatale...

Elle est générée lors du fonctionnement d'un procédé. Par exemple, lors du fonctionnement d'un four, seulement 20 à 40% de l'énergie du combustible utilisé constitue de la chaleur utile, soit 60 à 80% de chaleur fatale potentiellement récupérable.

► Bilan thermique, en régime permanent d'un four à combustible



À SAVOIR

> LA CHALEUR FATALE, PAS QUE DANS L'INDUSTRIE

De façon générale, la chaleur fatale peut être issue :

- des sites industriels ;
- des raffineries ;
- des sites de production d'électricité (centrales nucléaires et thermiques) ;
- des sites tertiaires (hôpitaux, data center) ;
- des sites d'élimination (Usines d'Incinération des Ordures Ménagères - UIOM).

Par comparaison aux 271 TWh de consommation des sites industriels, la consommation de combustibles pour l'activité des raffineries est de 44 TWh.

> CHALEUR DE RÉCUPÉRATION

On utilise également le terme de chaleur de récupération pour désigner la chaleur fatale (ou aussi perdue).

C'est la chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée.

Ainsi, la chaleur issue de la cogénération - dont le but est de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité à partir de combustibles - n'est pas considérée comme une chaleur de récupération d'après le bulletin officiel BOI 3-C-107 n°32 du 8 mars 2007 (relatif aux conditions d'application de la TVA réduite sur les livraisons d'énergie calorifique).

Chaleur fatale : sous quelles formes ?

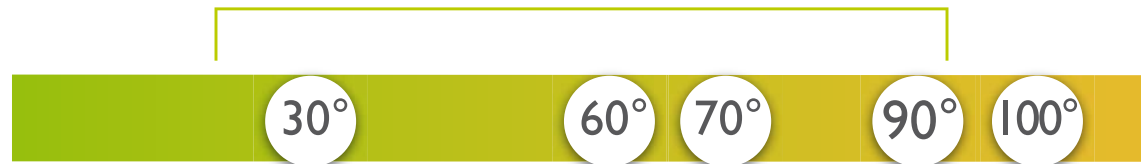
Tout comme l'on parle de rejets, liquides ou solides, pour les déchets, la chaleur fatale se constitue aussi de rejets sous différentes formes :

- rejets gazeux
- rejets liquides
- rejets diffus

Le captage de ces rejets est plus ou moins facile : par exemple, les rejets liquides dans les purges de chaudières sont les plus facilement récupérables, suivis des rejets gazeux dans les fumées des fours et chaudières, Les rejets diffus sont logiquement plus difficiles à capter.

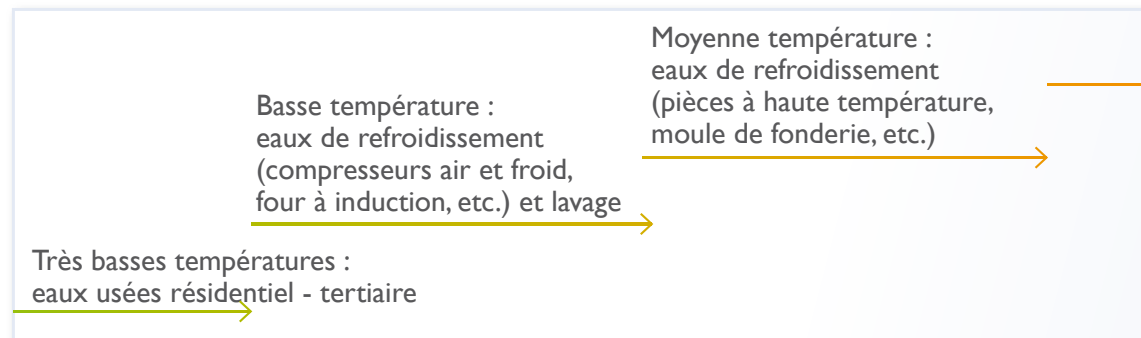
► Origines et caractéristiques des rejets thermiques

Typiquement : industrie agro-alimentaire, papier-carton, chimie

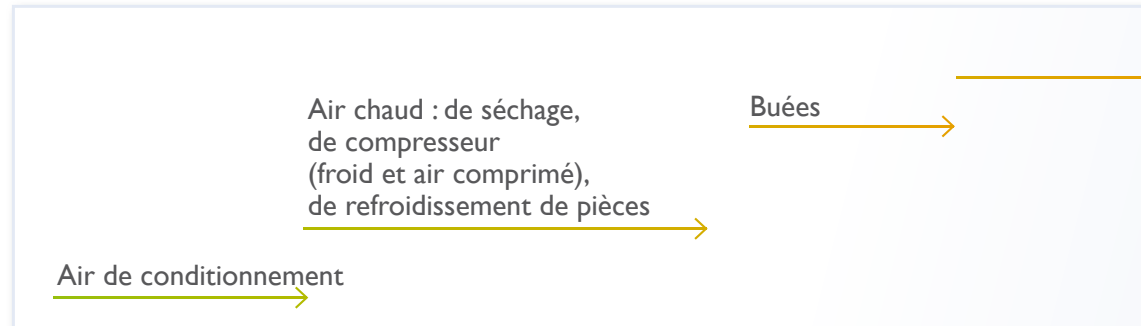


Échelle de température en °C

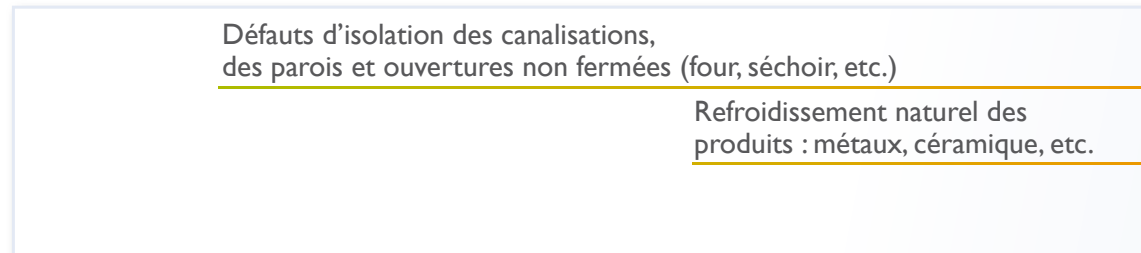
REJETS LIQUIDES



REJETS GAZEUX



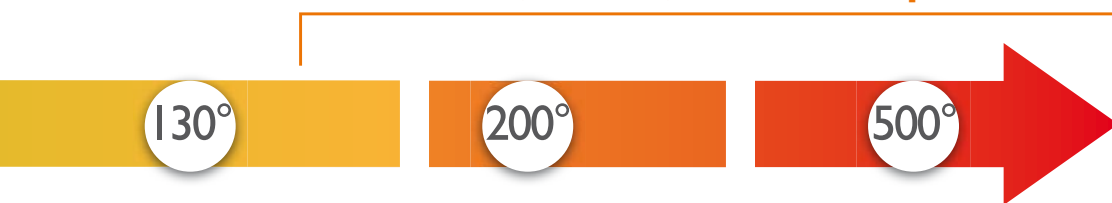
REJETS DIFFUS



Chaleur fatale : à quelles températures ?

Le niveau de température de la chaleur fatale est une caractéristique déterminante de sa stratégie de valorisation. Dans la pratique, les niveaux de température peuvent aller de 30°C (eaux usées) à 500°C (gaz de combustion...).

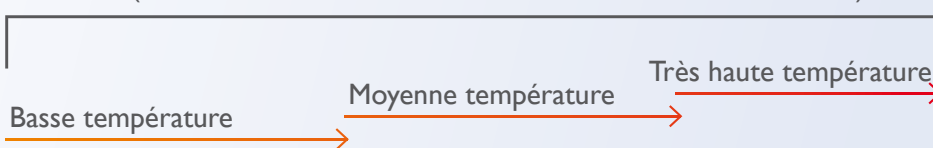
Typiquement : industrie des métaux, verre, ciment, tuiles et briques



Haute température : purges de chaudières, condensats de vapeur, etc.

Vapeur de procédé ou de flash

Essentiellement gaz de combustion (four industriel, chaudière, incinérateur, turbine, etc.)



Chaleur rayonnée (convoyage brame d'acier, etc.)

Secteurs industriels, origines et caractéristiques des rejets thermiques donnés à titre indicatif.

La récupération de chaleur fatale industrielle

Pour quels enjeux ?

Si l'industrie représente 21 % de la consommation d'énergie nationale, elle constitue aussi un secteur des plus innovants en matière d'efficacité énergétique⁶. S'intéresser à la récupération de la chaleur fatale industrielle conduit à intensifier les efforts réalisés, exploiter les nouvelles potentialités offertes en matière d'innovation et d'économies d'énergie, participer à la dynamisation industrielle, et ainsi soutenir la compétitivité des entreprises par le volet majeur que constitue la performance énergétique.

L'intérêt de la récupération et de la valorisation de la chaleur fatale se situe aussi sur 3 niveaux :

PAYS

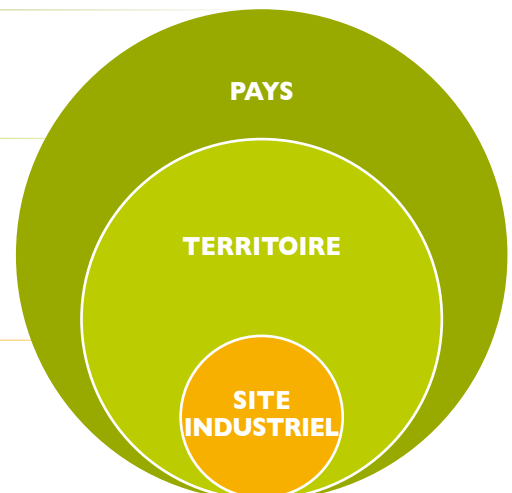
- Indépendance énergétique
- Respect des objectifs environnementaux

TERRITOIRE

- Utilisation de l'énergie récupérée pour un bassin de population
- Politique de maîtrise de l'énergie
- Contribution à la lutte contre le réchauffement climatique

SITE INDUSTRIEL

- Valorisation économique
- Compétitivité



À SAVOIR

> La chaleur fatale perdue peut coûter doublement cher ! Pourquoi ?

- 1 Elle a été produite et a donc un coût : achat de combustible, coût de production...
- 2 Une fois rejetée, elle doit très souvent être refroidie :
 - pour des raisons techniques (pour le traitement des fumées, etc) ;
 - pour des raisons réglementaires (réduction de la température de rejet des eaux usées, etc).

Son refroidissement présente lui aussi un coût qui vient s'ajouter au coût de production pour, au final, une énergie qui ne sert à rien !

Récupération de chaleur fatale : des enjeux sur 3 niveaux

⁶ « L'intensité énergétique (rapport entre la consommation d'énergie et la production, rapport inverse de l'efficacité énergétique) a baissé de 11,1 % entre 2001 et 2012 [...]. La baisse de l'intensité énergétique s'explique pour 87 % par l'amélioration des processus technologiques. ». Chiffres et statistiques n° 542, juillet 2014, disponible sur : www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

Des d'enjeux sur 3 niveaux

1 Au niveau de l'entreprise

- Limiter l'achat d'énergie extérieure. L'énergie thermique est disponible et déjà payée !
- Réaliser un gain économique en valorisant un rejet vers l'externe.
- Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre en utilisant une énergie de récupération à contenu CO₂ nul et réduire dans le même temps l'émission de polluants issus de sa combustion⁶ s'il avait fallu la produire directement.

2 Au niveau d'un territoire

- Créer une synergie économique et environnementale avec le tissu industriel. Synergie qui peut, par exemple s'inscrire dans un projet d'Écologie Industrielle et Territoriale⁷.
- Répondre à un besoin en chaleur d'un bassin de population.
- Limiter les Gaz à Effet de Serre et contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique notamment dans le cadre des Schémas Régionaux Climat-Air-Energie (SRCAE) et des Plans Climat Energie Territoriaux (PCET).

RAPPEL

> PAQUET CLIMAT-ÉNERGIE

Les objectifs* du Paquet-Climat-Énergie (communément appelés *triple 20*) ont été revus en à la hausse par la Commission européenne en 2014. Ils sont désormais les suivants :

- **Réduction des Gaz à Effet Serre :** moins 40 % (contre moins 20 %)
- **Mix énergétique :** 27 % d'énergies renouvelables (contre 20 %)
- **Efficacité énergétique :** plus 27 % d'amélioration (contre plus 20 %).

* Objectifs européens à l'horizon 2030 sur la base de l'année de référence 1990

3 Au niveau d'un pays

- Réduire les importations d'énergie pour dans le même temps, diminuer la dépendance énergétique et améliorer la balance commerciale.
- Favoriser le développement industriel, par l'investissement dans des équipements de valorisation.
- Respecter les engagements environnementaux liés aux politiques européennes de lutte contre le réchauffement climatique.

⁶ Oxyde d'azote (NOx) , oxyde de soufre (SOx), ...

⁷ L'Écologie Industrielle et Territoriale favorise et accompagne le développement d'échanges autour des consommations et des rejets des entreprises et des collectivités. Pour plus d'informations, consulter également :

www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-industrielle-services/passer-a-l'action/lecologie-industrielle-territoriale

Pour quelles valorisations ?

Les axes de valorisation de la chaleur fatale sont multiples et ont différentes motivations. Ils peuvent être :

1 Sous forme de chaleur⁸

- pour répondre à des besoins de chaleur propres à l'entreprise (séchage sur d'autres lignes de procédés, préchauffage de l'air comburant, chauffage des locaux, etc.).
- et/ou
- pour répondre à des besoins de chaleur d'autres entreprises situées à proximité d'un territoire (d'un réseau de chaleur urbain).

2 Avec un changement de vecteur énergétique par la production d'électricité

- pour répondre à des besoins électriques au sein même de l'entreprise, en autoconsommation,
- et/ou
- pour répondre à des besoins électriques collectifs externes (production décentralisée d'électricité).

Ces deux formes de valorisation sont cohérentes et complémentaires car les niveaux de température sont différents pour une valorisation sous forme de chaleur et une valorisation par production d'électricité. Dès lors que la chaleur récupérée atteint un certain niveau de température (environ 150 - 200°C), la production d'électricité est envisageable. La récupération de chaleur pour les réseaux de chaleur, elle, ne nécessite pas forcément de si hauts niveaux de température.

⁸ Il est aussi possible de produire du froid à partir de la chaleur perdue.

À SAVOIR

> ÉTUDE DE VALORISATION DE LA CHALEUR FATALE VIA UN RÉSEAU DE CHALEUR :

Une obligation pour les ICPE depuis le 1^{er} janvier 2015

Les installations ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) d'une puissance thermique totale supérieure à 20 MW ont obligation de réaliser une étude coûts-avantages en cas de rénovation substantielle ou d'installation nouvelle.

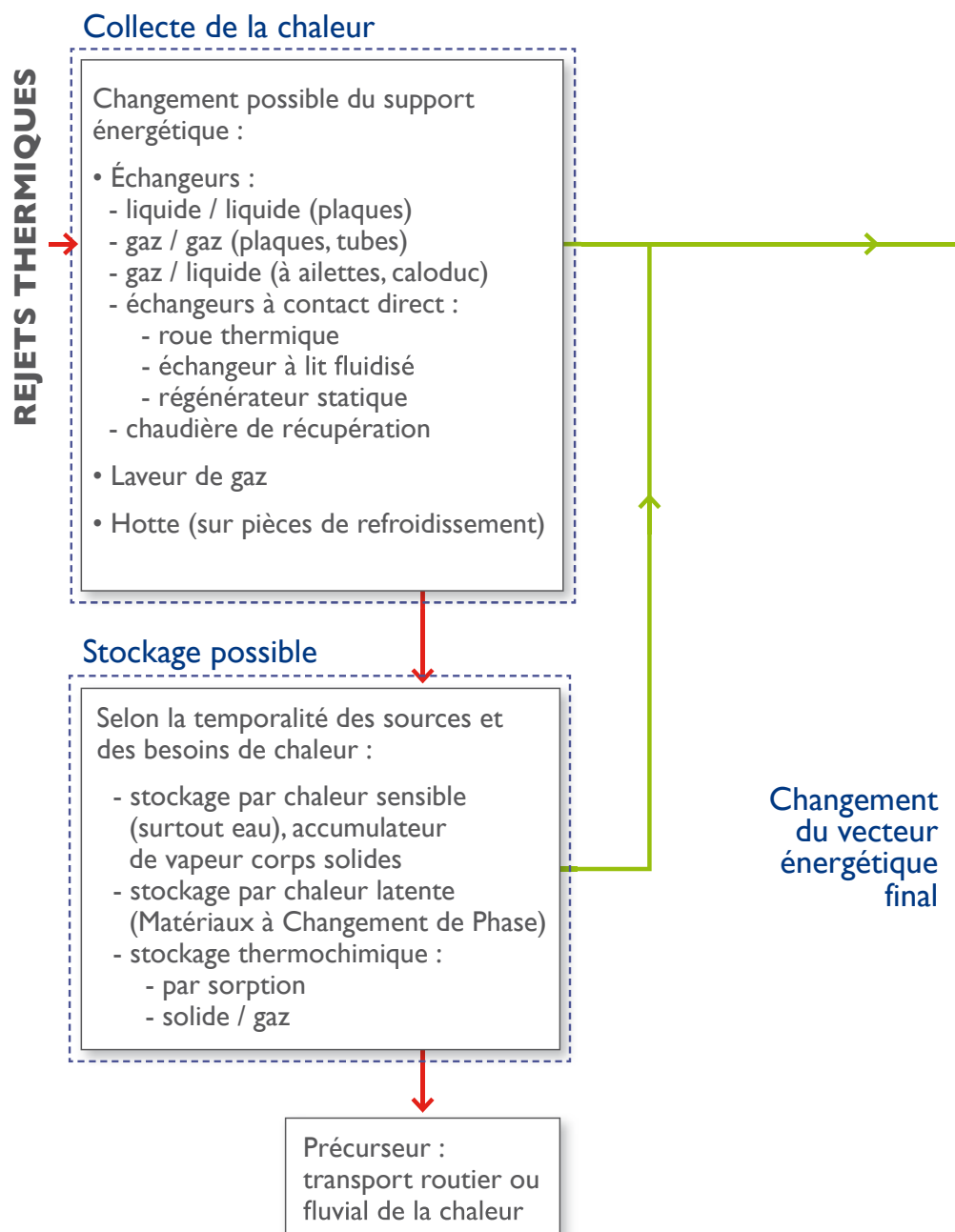
Cette étude permet d'évaluer la rentabilité de valoriser de la chaleur fatale par un raccordement à un réseau de chaleur ou de froid. Le champ de cette étude ne s'applique pas à la valorisation de la chaleur fatale in situ ou à la valorisation entre deux sites industriels voisins.

Références

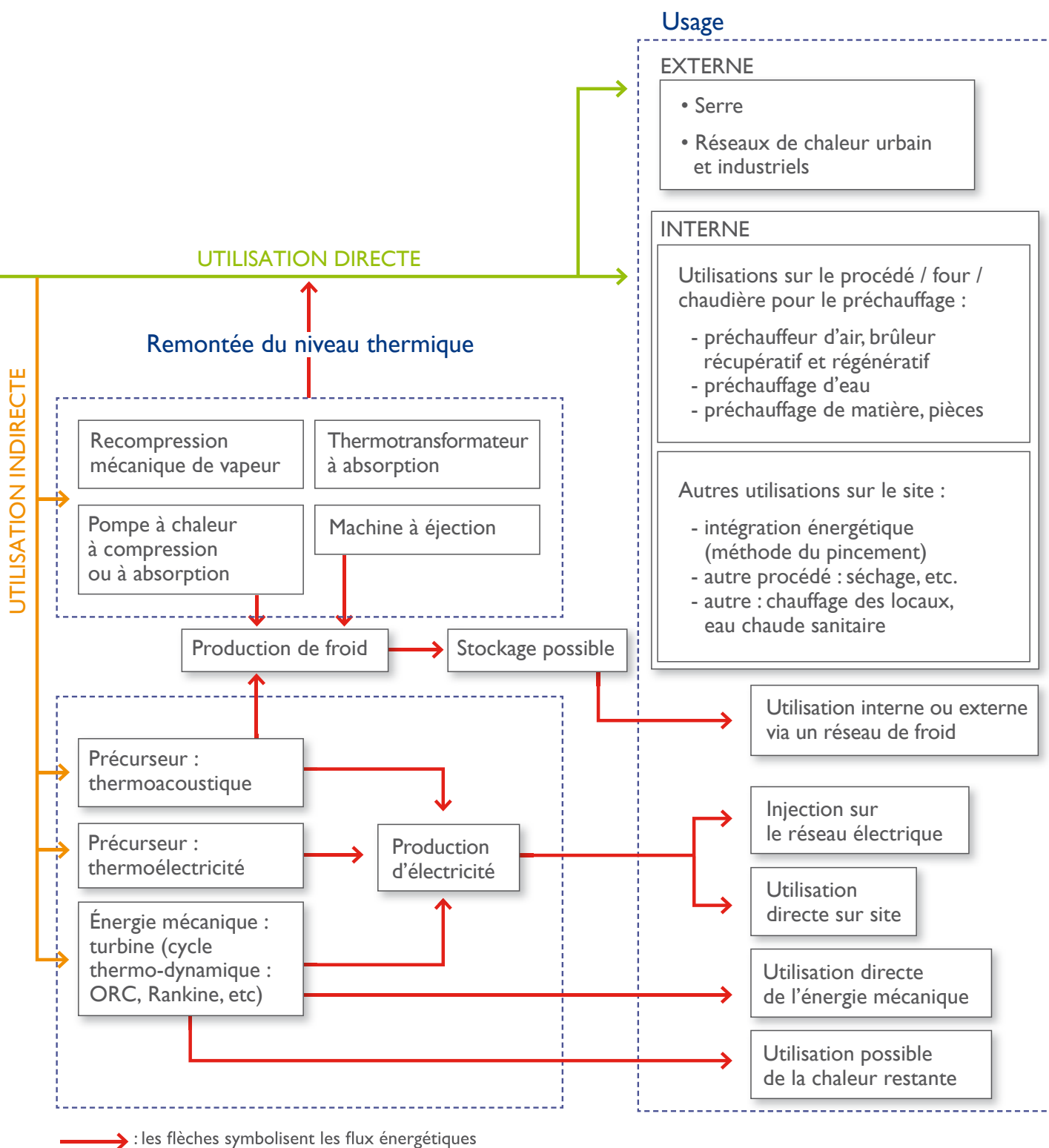
- Décret du 14 novembre 2014 transposant l'article 14.5 de la directive européenne 2012/27/UE sur l'efficacité énergétique.
- Arrêté du 9 décembre 2014 précisant le contenu de l'analyse coûts-avantages

Avec quelles technologies ?

Il existe de nombreuses technologies de valorisation industrielle, allant du captage au stockage d'énergie, que la valorisation soit thermique ou électrique. L'ADEME propose un panorama de ces technologies.



Vous trouvez des recommandations et bonnes pratiques sur : www.ademe.fr/Energie-dans-votre-atelier et sur le site : www.recuperation-chaaleur.fr dédié à la chaleur fatale industrielle, développé par le CETIAT et l'ADEME.



Selon quelles stratégies ?

La récupération de chaleur fatale doit s'inscrire dans une démarche d'efficacité énergétique cohérente.

1 Réduire en amont, le besoin de chaleur utile et la consommation de combustibles. Autrement dit : limiter le plus tôt possible la chaleur fatale qui sera générée. Il est également nécessaire d'optimiser le fonctionnement des équipements existants par des régulations et systèmes permettant de mieux gérer l'énergie (mesure et suivi des performances réelles⁹ des procédés utilisés).

2 Valoriser en interne, la chaleur fatale récupérée car c'est ce qui est le plus cohérent d'un point de vue énergétique et économique pour l'entreprise. Par exemple récupérer le maximum de chaleur utile soit au sein de procédé lui-même (préchauffage des entrants dans le four...), soit dans les procédés ou installations voisines (récupération de chaleur d'un four pour alimenter un séchoir à proximité ou le chauffage des locaux...).

3 Valoriser en externe

De multiples critères vont influencer sur les voies de valorisation à exploiter :

■ s'il s'agit d'un site éloigné d'un réseau de chaleur ou d'un utilisateur potentiel (par exemple un autre site industriel ayant des besoins de vapeur), alors une valorisation électrique peut s'envisager, tout en regardant les capacités d'autoconsommation. L'aptitude au transport de l'électricité sur de longues distances permet en effet d'entrevoir ce type de valorisation dans ce contexte ;

■ s'il s'agit d'un site à proximité d'un réseau de chaleur ou d'un utilisateur potentiel, alors une analyse sur l'adéquation entre le niveau thermique du rejet et le besoin du réseau de chaleur ou d'un utilisateur potentiel se fera prioritairement avant d'envisager une valorisation électrique.

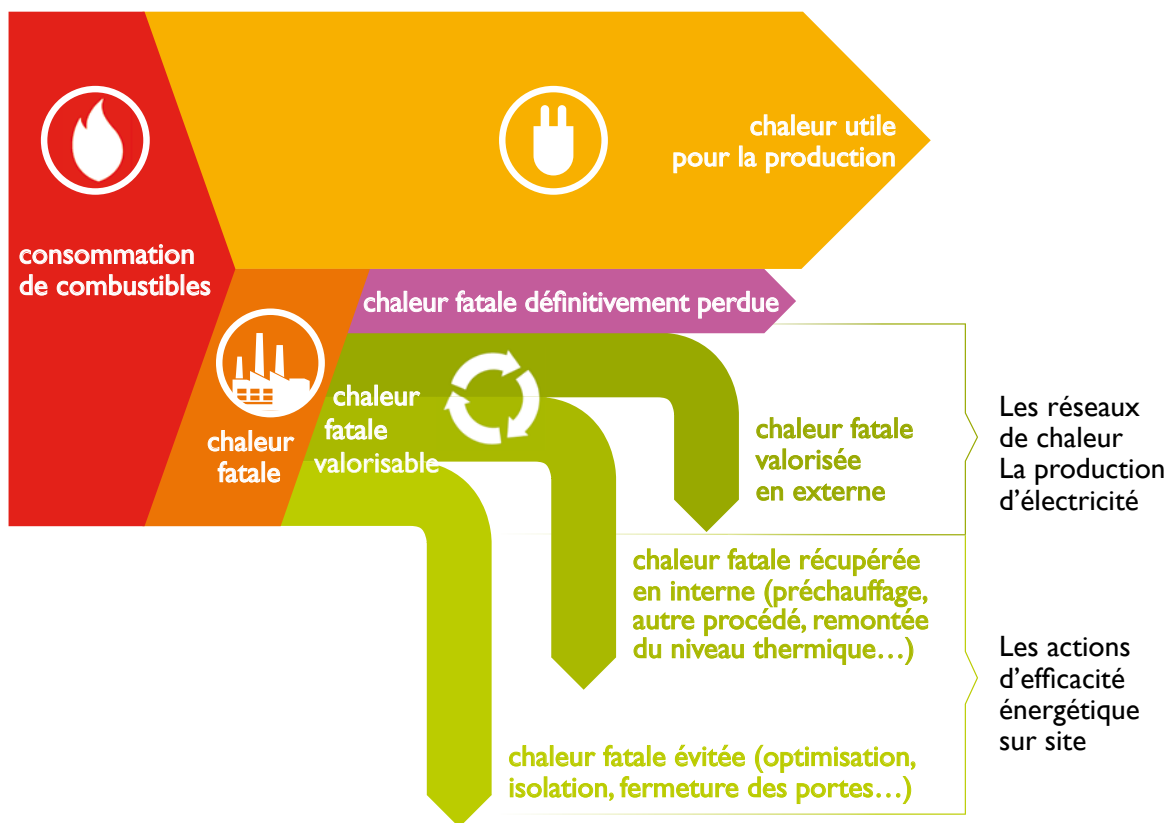
À SAVOIR

Seules des études personnalisées au contexte pourront réellement déterminer les conditions de valorisation de la chaleur fatale, avec cependant un objectif commun à tous les cas : exploiter au mieux une énergie disponible.

⁹ Voir le guide *Le comptage de l'énergie : amélioration de la performance énergétique dans l'industrie*. ADEME-DUNOD, 2014

► Répartition de la consommation de chaleur sur un site industriel

Avant toute chose, s'assurer du besoin réel de chaleur utile.



Des gisements identifiés et quantifiés

Pour projeter des politiques et des stratégies de valorisation de la chaleur fatale, à l'échelle d'un périmètre industriel ou d'un territoire, il est important d'avoir connaissance des potentialités existantes.

C'est pourquoi, une cartographie des gisements identifiés et quantifiés pour les industriels comme pour les territoires, a été réalisée. Ces gisements ont de plus été caractérisés en fonction de leur température afin de pouvoir en apprécier les stratégies de valorisation les plus appropriées.

Un périmètre d'évaluation argumenté et inédit

Pour évaluer un gisement sur un périmètre large, tel le secteur industriel comprenant des secteurs d'activité très diversifiés parmi lesquels chaque entreprise constitue une entité unique, il a été nécessaire de tracer une grille de critères afin d'établir un périmètre d'étude cohérent.

Cible industrielle :

les industries manufacturières et les industries du raffinage du pétrole de la France métropolitaine

Ce ne sont pas 50, 100 ou 500 sites qui ont constitué le socle de l'étude mais l'ensemble des industries de plus de 10 salariés, pour tous les secteurs, chimie, agroalimentaire, métaux, sidérurgie, verre, cimenterie... répertoriées dans la base de données du CEREN, soit un total de plus de 7000 établissements pour 130 secteurs d'activités. À ceux-ci, ont été ajoutées les 8 raffineries pétrolières de la France métropolitaine en activité en raison de la similitude des procédés thermiques utilisés.

Il s'agit donc d'un périmètre à la fois large et pointu permettant d'appuyer de réelles réflexions pour construire un projet de valorisation énergétique.

À SAVOIR > ORIGINE DES CHIFFRES : LE CEREN

Le CEREN (Centre d'Études et de Recherche Economiques sur l'éNergie) est un observatoire statistique créé il y a plus de 50 ans. Groupement d'Intérêt Economique dont les membres sont RTE, EDF, ERDF, GDF-Suez, GRTgaz, GrDF et l'ADEME. Une de ses missions consiste à mieux comprendre les flux énergétiques et les usages de l'énergie dans l'industrie.

Le CEREN s'appuie notamment sur les données de l'INSEE (enquêtes EACEI sur les consommations d'énergie dans l'industrie), complétées par un ensemble d'enquêtes réalisées par correspondance et en face à face. Le Ceren a construit une base solide sur les consommations d'énergie de plus de 30000 sites industriels dont les **7000** plus gros consommateurs sont caractérisés, de façon plus fine, sur la connaissance de leurs flux et usages énergétiques, et les caractéristiques techniques des équipements thermiques.

Filtres de sélection

Après la définition de ce périmètre d'investigation 3 filtres de sélection ont été établis afin de réaliser une évaluation de gisements optimale¹⁰.

FILTRE 1 S'attaquer aux procédés les plus énergivores : fours, séchoirs, chaudières

La consommation de combustibles dans l'industrie pour un usage énergétique se partage en effet entre :

- les fours et les séchoirs (en usage direct de combustibles) qui représentent, à eux deux, près de **51 %** de cette consommation,
- les chaudières qui en représentent **39 %**.

Les fours à arc de la sidérurgie, utilisant 4 TWh d'énergie électrique, ont aussi été considérés. Ils génèrent également des fumées à hautes températures (> 250°C après traitement) qu'il est possible de valoriser.

FILTRE 2 Viser les rejets les plus accessibles : fumées et buées

Il s'agit des rejets gazeux constitués par les fumées (des fours et des chaudières) et les buées (des séchoirs).

FILTRE 3 Se concentrer sur un niveau de température le plus efficace : > 100°C

Pourquoi 100°C ? Tout d'abord parce que ce niveau de température est présent dans un grand nombre d'industries. La notion de seuil est toujours relative et peut porter à débat : pourquoi pas 90 ou 110°C ? En fixant ce seuil, la volonté de l'ADEME est de cibler, dans un premier temps, les gisements dont le potentiel d'exploitation est le plus prometteur. Cela ne signifie pas qu'il faille se désintéresser des températures plus basses. Pour celles-ci, les voies de valorisation sont multiples, notamment grâce aux Pompes à Chaleur mais encore très peu répandues dans l'industrie.

RAPPEL MÉTHODOLOGIQUE

- Il faut tout d'abord se rappeler que toute étude a une temporalité. Les différents chiffres (gisements, nombres de réseaux de chaleur...) peuvent donc varier dans le temps mais permettent déjà de définir les enjeux principaux.
- Des chiffres comme les températures des effluents sont ceux identifiés à une période donnée d'après les informations fournies par industriels interrogés ou à dire d'expert. Puis les chiffres ont fait l'objet d'une extrapolation statistique permettant d'appréhender l'ensemble de l'industrie.

EN RÉSUMÉ >

Les gisements de chaleur fatale identifiés correspondent aux caractéristiques suivantes :

Périmètre de consommation en équivalent TWh

319 TWh

dont **275 TWh¹¹** issus de l'industrie et **44 TWh** issus du raffinage.



Procédés :
fours, séchoirs, chaudières



Rejets :
fumées et buées



Niveau de température : > 100°C

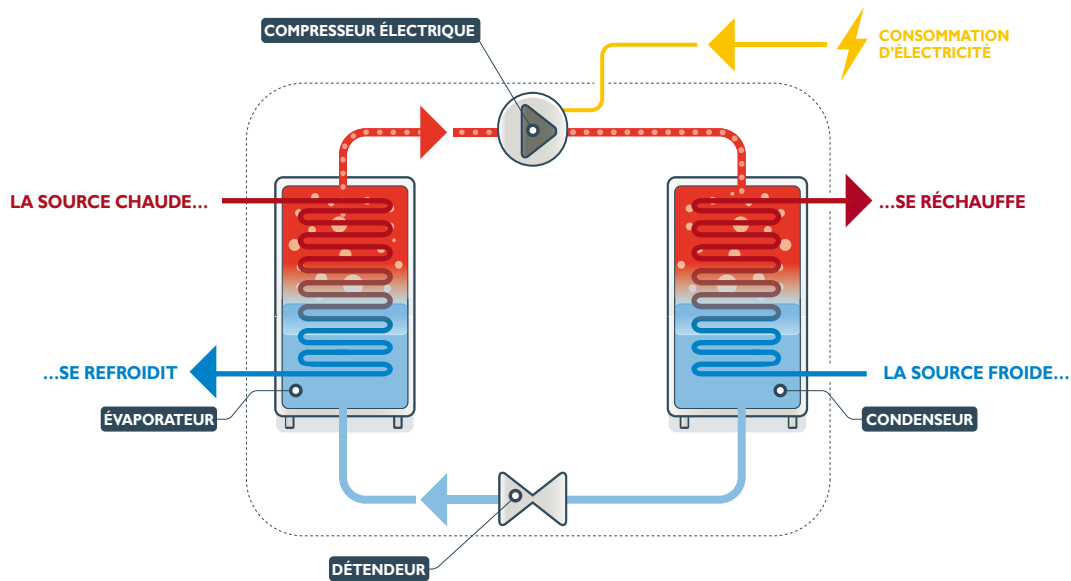
¹⁰ Des critères supplémentaires ont été définis pour l'évaluation du gisement pour la production électrique (voir page 35).

¹¹ 271 TWh de combustibles en usage énergétique (voir page 6) et 4 TWh d'électricité des fours à arc de la sidérurgie.

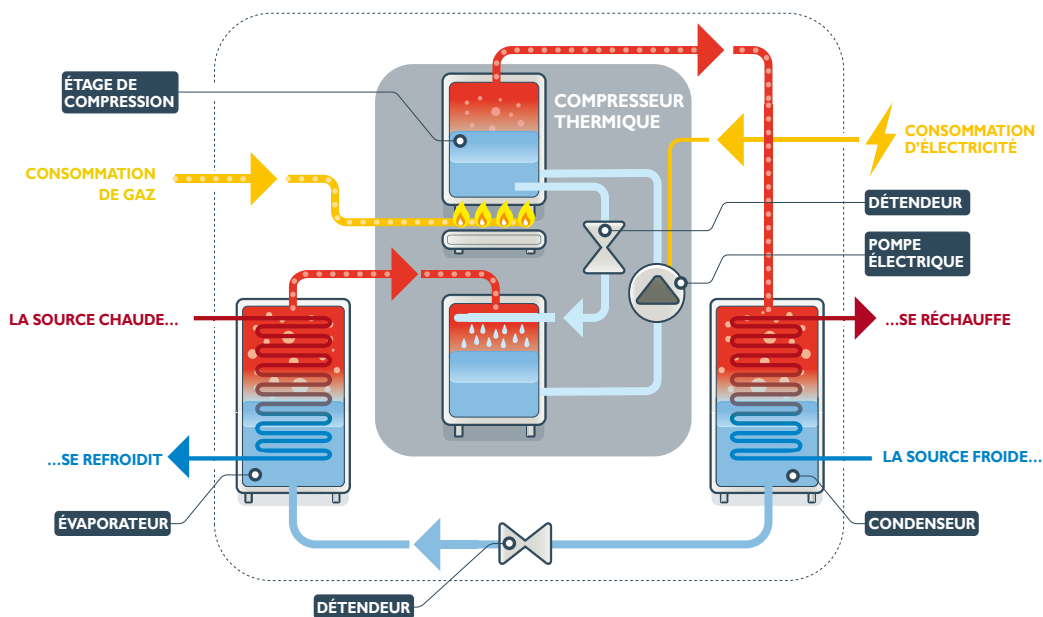
À SAVOIR > LES POMPES À CHALEUR

Deux types de pompes à chaleur (PAC) existent : les pompes à chaleur à compression électrique et les pompes à chaleur à compression thermique. Dans les deux cas, l'origine de la source dite « froide au condenseur » correspond à de la chaleur fatale. La PAC permet ainsi d'élever le niveau thermique de la chaleur récupérée, et de satisfaire des besoins en chaleur de température plus élevée.

► Pompes à chaleur électrique : principe de fonctionnement



► Pompes à chaleur gaz à absorption : principe de fonctionnement



Gisement national
de chaleur fatale
industrielle et
répartition par région

16% de la consommation
de combustibles dans l'industrie

51 TWh



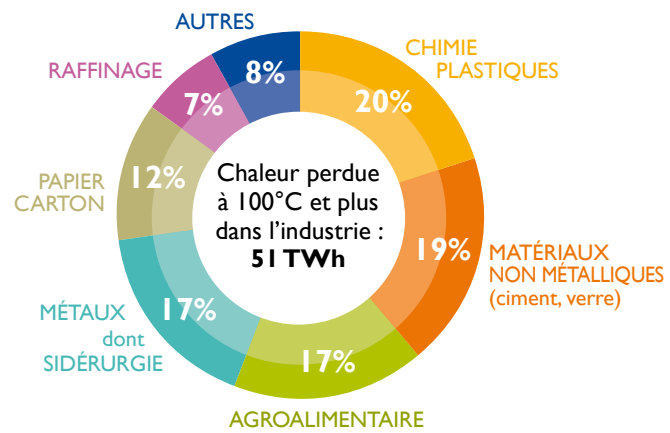
Résultat national

51 TWh, soit 16% de la consommation de combustibles dans l'industrie¹², rejetés sous forme de chaleur fatale >100°C

Origine du gisement

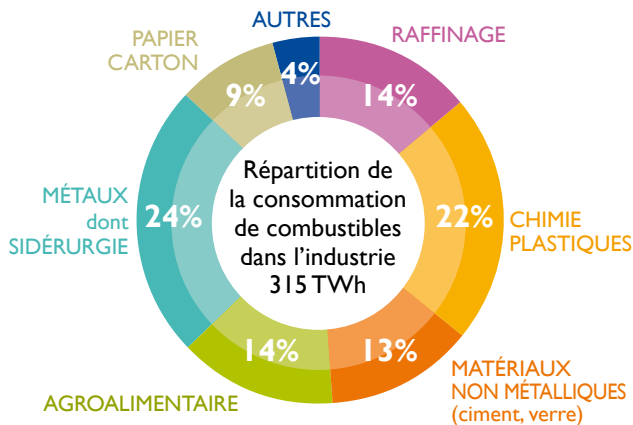
Les 3/4 du gisement concernent 4 grands secteurs d'activité :

- la chimie-plastiques (dont la plasturgie),
- les matériaux non métalliques, (le verre, le ciment)
- l'agro-alimentaire,
- les métaux (dont la sidérurgie).



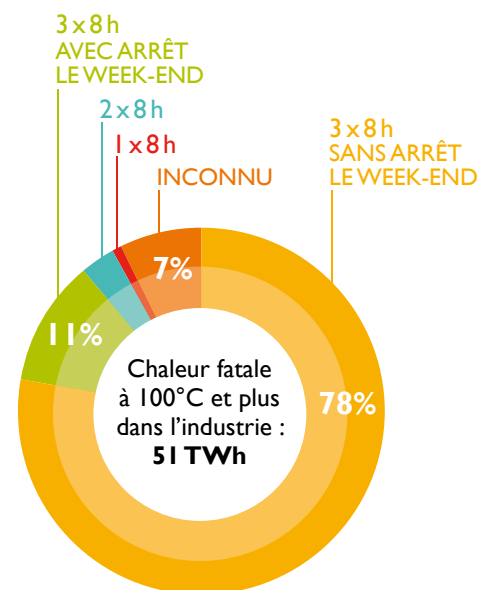
RAPPEL

> RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION DE COMBUSTIBLES DANS L'INDUSTRIE



Les pourcentages de consommation et de gisement de chaleur fatale par secteur ne sont donc pas similaires. Par exemple, le secteur du raffinage qui concentre 14% de la consommation de combustibles ne représente que 7% du gisement de chaleur fatale.

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.

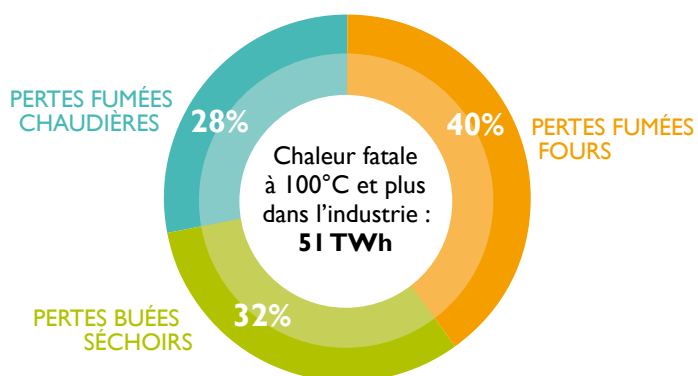


¹² Hors usage en matière en première, mais y compris le secteur du raffinage

Types de rejets

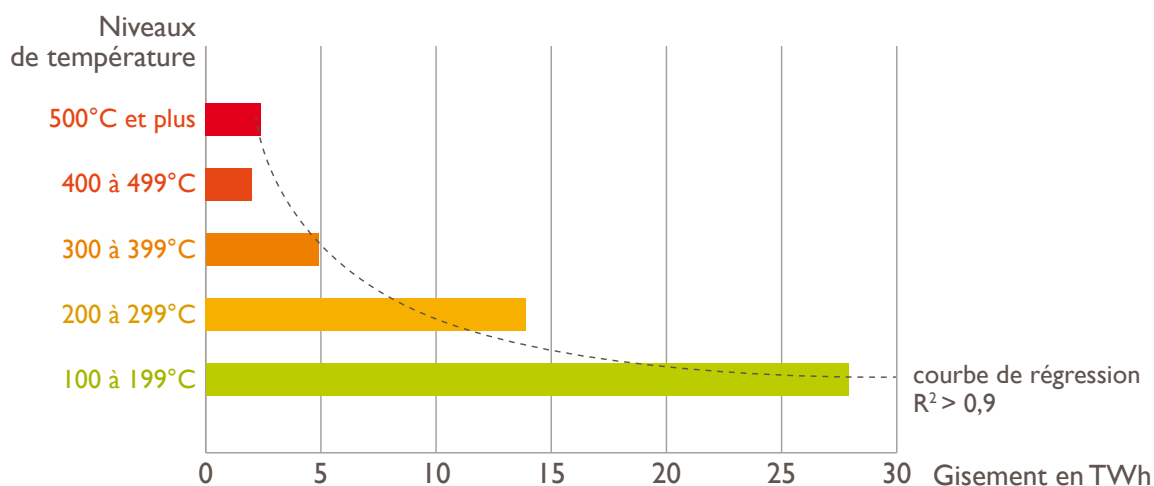
Ce gisement provient, dans l'ordre :

- des fumées de fours
- des buées de séchoirs
- des fumées de chaudière



Niveaux de température

Plus de 50% du gisement de chaleur perdue se situe entre 100 et 200 °C.



► Chaleur fatale à 100°C et plus dans l'industrie : 51 TWh

Résultat en régions

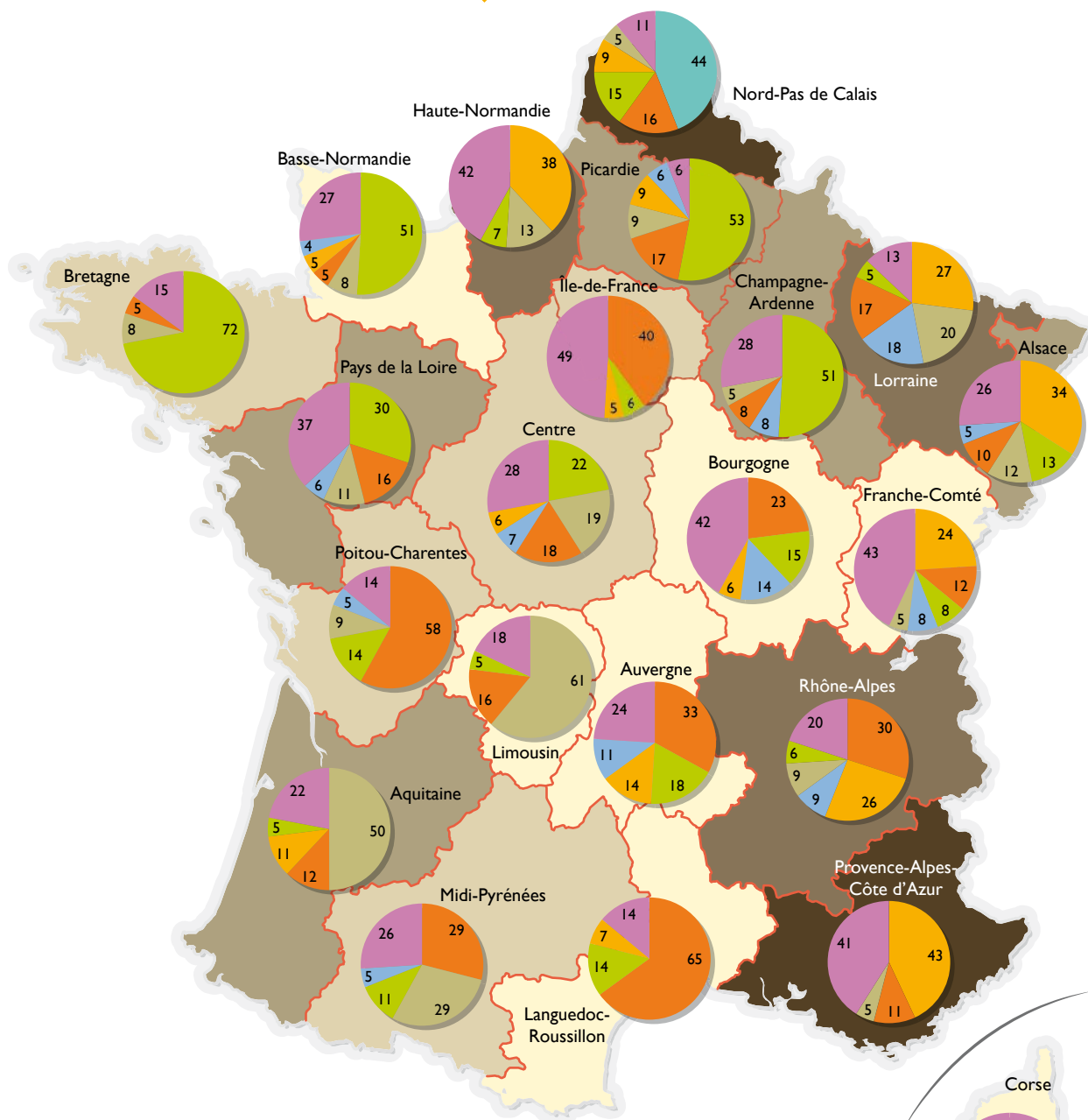
Répartition des 51 TWh de gisement de chaleur fatale (> 100°C) par région

Régions	Gisement de chaleur fatale en GWh selon la gamme de température					Total
	100-199°C	200-299°C	300-399°C	400-499°C	> 500°C	
Nord-Pas de Calais	2 400	3 030	580	210	1 000	7 220
Provence-Alpes-Côte d'Azur	2 690	2 100	720	350	470	6 330
Haute-Normandie	2 660	1 330	640	320	160	5 110
Rhône-Alpes	1 910	1 100	590	210	150	3 960
Lorraine	2 340	860	300	100	80	3 680
Aquitaine	1 920	710	80	40	30	2 780
Champagne-Ardenne	2 140	340	150	60	60	2 750
Pays de la Loire	1 250	680	230	130	10	2 300
Picardie	1 590	350	160	50	70	2 220
Alsace	1 300	500	230	80	50	2 160
Île-de-France	1 080	540	180	70	50	1 920
Centre	1 110	430	130	60	30	1 760
Bretagne	1 080	270	30	30	10	1 420
Poitou-Charentes	740	360	190	40	30	1 360
Midi-Pyrénées	710	240	120	40	20	1 130
Bourgogne	610	160	100	50	50	970
Franche-Comté	650	190	80	30	10	960
Auvergne	420	170	120	40	30	780
Basse-Normandie	490	180	40	20	10	740
Limousin	490	160	50	20	10	730
Languedoc-Roussillon	310	210	120	40	30	710
Corse	< 10	0	0	0	0	< 10
Toutes régions métropolitaines	27 900	13 910	4 840	1 990	2 360	51 000

Il y a un rapport 10 entre la région contribuant le plus au potentiel de chaleur perdue dans l'industrie (Nord-Pas de Calais) et celle y contribuant le moins (Languedoc-Roussillon).

Certaines régions étant peu pourvues de ressources en biomasse et/ou géothermales et/ou ensoleillement, la chaleur fatale industrielle peut ainsi être une ressource locale d'énergie récupérable.

Répartition de la chaleur fatale industrielle (> 100°C) par région et par secteur industriel



Potentiel de chaleur fatale industrielle en TWh



Répartition* des gisements par secteur industriel, en %

- Minéraux non-métalliques
- Industries agro-alimentaires
- Sidérurgie
- Chimie (dont plastiques)
- Industries mécaniques et fonderies
- Papier-carton
- Autres (dont raffinage et secteur en secret-statistique)*

* Les secteurs considérés en secret-statistique par région sont comptabilisés dans *autres*. La catégorie *autres* n'est donc pas identique pour toutes les régions.

5 régions industrielles, le Nord-Pas de Calais, Provence-Alpes-Côte d'Azur, la Haute-Normandie, Rhône-Alpes et la Lorraine concentrent la moitié du potentiel national.

Des spécificités sectorielles existent entre les différentes régions. Par exemple :

Nord-Pas de Calais	Une très forte contribution de la sidérurgie (1 ^e et 2 ^e fusion, production de ferroalliages) dans le potentiel de chaleur fatale. Tous les secteurs industriels sont représentés.
Provence-Alpes-Côte d'Azur	La chimie et le raffinage contribuent à 60% du potentiel de chaleur fatale.
Haute-Normandie	Un profil similaire à Provence-Alpes-Côte d'Azur pour la chimie avec 2 différences : un secteur papetier plus important, et un secteur des minéraux non métalliques plus modeste.
Rhône-Alpes	Une région industrielle diversifiée. La chimie et l'industrie des minéraux concentrant plus de la moitié du potentiel régional.
Lorraine	Le profil de la Lorraine se singularise par le poids important du papier-carton et du secteur de la mécanique et de la fonderie, en plus de celui de la chimie.
Aquitaine	L'Aquitaine se distingue des autres régions par un profil très concentré. Le secteur du papier-carton concentre en effet la moitié du gisement régional.

Gisement de chaleur
fatale industrielle
pour les réseaux
de chaleur existants

20% du gisement national
10,2 TWh



Résultat national

Le gisement total estimé de chaleur fatale (>100°C) dans les réseaux de chaleur existants est de : **10,2 TWh**, soit **20%** du gisement national.

Cette estimation du potentiel de récupération de chaleur à proximité des réseaux de chaleur existants a été faite dans les 462 communes desservies dont :

- 271 possédant une chaufferie d'un réseau de chaleur tel que décrit dans le recensement de Via Seva¹⁸.
- 191 sont des communes limitrophes et sont desservies par un de ces mêmes réseaux de chaleur¹⁹.

La chaleur fatale provient des sites industriels présents géographiquement sur l'ensemble de ces communes.

Pour les communes disposant de plusieurs réseaux de chaleur (Strasbourg ou Montpellier par exemple), un seul réseau apparaît sous la dénomination du nom de la ville, dans la mesure où le critère géographique d'identification des sites industriels se limite à la commune d'appartenance.

RAPPEL

Les gisements présentés sont des gisements techniques prospectifs. Ils servent à identifier les enjeux industriels et territoriaux. Ils permettent de définir et planifier les études technico-économiques qui valideront la possibilité de raccordements d'industriels à des réseaux de chaleur.

Il existe des conditions de réalisations à étudier au cas par cas pour pouvoir lever les principaux freins identifiés :

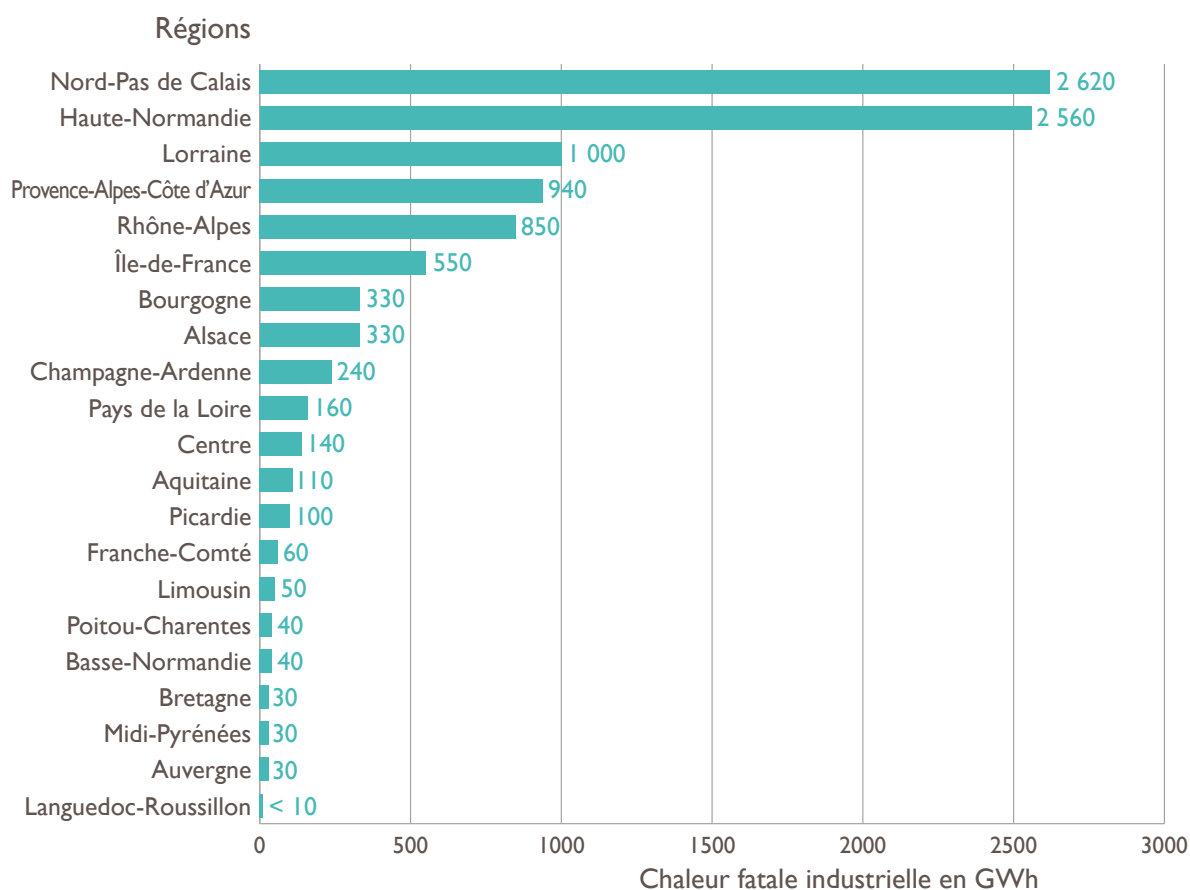
- les difficultés technico-économiques de la récupération de chaleur. Par exemples : la récupération de chaleur sur des fumées introduit des pertes de charge qu'il faut compenser, la totalité de la chaleur ne peut pas être récupérée pour éviter l'apparition d'acide¹⁵ dommageable pour les équipements, etc.
- la distance entre zones industrielles et urbaines ;
- l'inadéquation entre la disponibilité de chaleur et les besoins des réseaux de chaleur ;
- les difficultés de contractualisation entre deux entités différentes (public-privé).

¹⁸ *Annuaire des réseaux de chaleur et de froid*, 2012.
www.viaseva.org

¹⁹ D'après les recensements annuels de la population réalisés par l'INSEE.

¹⁵ En cas de diminution trop importante de la température du flux de chaleur récupéré, le point de rosée de certains composés acides contenus dans le flux de chaleur peut être atteint.

Répartition du potentiel de chaleur fatale dans les réseaux de chaleur existants par région



Le gisement de chaleur fatale est fortement concentré :

- le Nord-Pas de Calais et la Haute-Normandie en concentrent à elles seules, en deux parts sensiblement égales, un peu plus de la moitié.
- Si l'on y ajoute trois autres régions importantes, la Lorraine, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes, à contributions relativement proches, en termes de chaleur fatale, on atteint 78 % du gisement total, les 16 autres régions se partageant les 22 % restants.

Répartition par région et niveaux de température

Régions	Gisement de chaleur fatale en GWh selon la gamme de température						Les principaux réseaux de chaleur disposants d'un potentiel de chaleur fatale industrielle
	100 à 199°C	200 à 299°C	300 à 399°C	400 à 499°C	500°C et plus	Total	
Nord-Pas de Calais	540	1 100	90	70	820	2 620	Dunkerque, Lille, Calais, Maubeuge
Haute-Normandie	970	650	530	280	130	2 560	Le Havre, Le Petit-Quevilly, Rouen, St-Étienne du Rouvray
Lorraine	480	280	110	80	50	1 000	St-Avold, Épinal, Verdun, Forbach
Provence-Alpes-Côte d'Azur	470	180	130	100	60	940	Martigues, Vitrolles, Toulon, Aix-en-Provence
Rhône-Alpes	450	280	90	20	10	850	Vénissieux, Chambéry, Villeurbanne, Roanne
Île-de-France	250	210	50	30	10	550	CPCU, St-Germain-en-Laye, Sucy-en-Brie, Aulnay-sous-Bois
Bourgogne	210	20	40	30	30	330	Auxerre, Chalon-sur-Saône, Macon, Dijon
Alsace	200	120	10	0	0	330	Strasbourg, Rixheim, Colmar, Cernay
Champagne-Ardenne	120	40	30	30	20	240	Reims, Troyes, Charleville-Mézières, St-Dizier
Pays de la Loire	100	50	10	0	0	160	Nantes, Allones, Laval, Le Mans
Centre	80	40	10	10	0	140	Montereau, Pithiviers, Joué-lès-Tours, Blois
Aquitaine	70	40	0	0	0	110	Cenon, Le Passage, Bordeaux, Dax
Picardie	50	50	0	0	0	100	Montataire, Compiègne, Amiens, Laon
Franche-Comté	30	30	0	0	0	60	Montbéliard, Dole, Besançon, Belfort
Limousin	20	10	10	10	0	50	Limoges, Felletin
Poitou-Charentes	30	10	0	0	0	40	La Rochelle, Pons, Niort
Basse-Normandie	30	10	0	0	0	40	Lisieux, Argentan, Caen, Hérouville-St-Clair
Bretagne	20	10	0	0	0	30	Rennes
Midi-Pyrénées	20	10	0	0	0	30	Montauban, Mazamet, Blagnac, Toulouse
Auvergne	20	10	0	0	0	30	Clermont-Ferrand, Montluçon
Languedoc-Roussillon	< 10	0	0	0	0	< 10	Avignon, Narbonne
Corse	0	0	0	0	0	0	
Total	4 160	3 150	1 110	660	1 130	10 210	

EXEMPLE DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR INDUSTRIELLE POUR ALIMENTER UN RÉSEAU DE CHALEUR

Mis en service en 1986, le réseau de chaleur de chauffage urbain de Dunkerque qui dessert plus de 11 000 équivalents logements¹⁶ est le plus grand réseau de France de récupération de chaleur industrielle fatale. 60% (environ 90 GWh) de la chaleur provient des fumées captées au niveau des chaînes d'agglomération¹⁷ de l'aciérie d'ArcelorMittal.

À SAVOIR >

GISEMENT DE CHALEUR FATALE D'UNE TEMPÉRATURE COMPRISE ENTRE 100 ET 200°C : 4 TWh

Soit 9% de la consommation des combustibles dans les sites industriels étudiés.

Il s'agit d'un niveau de température énergétiquement intéressant pour un réseau de chaleur.

¹⁶ Source : *L'annuaire des réseaux de chaleur et de froid*, Viaseva, 2012.

¹⁷ Une chaîne ou usine d'agglomération est une installation d'un site sidérurgique permettant de fripper le minerai de fer avant son utilisation dans le haut fourneau.

Gisement de production
d'électricité à partir
de chaleur fatale
industrielle

140 MWe de puissance installée
1,1 TWh
pour 250 sites



Valorisation par la production d'électricité

La valorisation électrique de la chaleur fatale est considérée comme la solution à étudier dans le cas où, pour de multiples raisons, toute autre possibilité de valorisation par la chaleur ne peut être réalisée.

La valorisation par une production d'électricité ne peut être envisagée que pour des niveaux de température relativement élevée (>150°C).

La chaleur fatale transformée en électricité pourra être utilisée :

- in situ, sur le site industriel, pour l'alimentation électrique d'équipements ;
- en externe dans une perspective de production décentralisée.

AVANTAGES ET LIMITES DE LA TRANSFORMATION DE LA CHALEUR FATALE EN ÉLECTRICITÉ

AVANTAGES

- un coût environnemental faible (source d'énergie produite à partir d'une énergie de récupération de contenu zéro CO₂), et meilleure utilisation de l'énergie des combustibles (à l'origine de la chaleur fatale) le plus souvent importés ;
- une mise en œuvre indépendante des conditions géographiques et du contexte local, (ce qui n'est pas le cas pour une valorisation via un réseau de chaleur) : l'électricité est un vecteur énergétique facile à transporter, même sur des grandes distances (il suffit d'élever la tension via un transformateur) contrairement à la chaleur ;

LIMITES

- un coût des investissements (notamment par rapport au gain attendu grâce à l'autoconsommation d'électricité) et manque de mécanismes incitatifs à ce jour.

L'évaluation des gisements de chaleur fatale pour une production d'électricité s'est faite sur un périmètre bénéficiant de critères plus affinés. Cela a été possible grâce aux caractéristiques plus souples d'une installation de production électrique par rapport à un besoin thermique local. Des différences de critères sont également justifiées, en raison du coût d'investissement qui nécessite d'avoir à faire face à des enjeux énergétiques forts.

Une méthode d'évaluation des gisements en 4 étapes

1 Estimation

de la consommation d'énergie à partir de la consommation constatée de 319 TWh (cf. page 19) et après déduction des optimisations et des économies d'énergie possibles et économiquement accessibles.

2 Identification

des différents flux de chaleur susceptible de permettre une production d'électricité : caractérisations en température supérieure à 150°C et en volume.

3 Première sélection

selon des critères de volume :

- volume du niveau de consommation énergétique : ne sont retenus que les sites dont la consommation énergétique est supérieure à 50 GWh (Ces sites représentent 80% de la consommation énergétique de l'industrie) ;
- volume du niveau de potentiel de gisement : sont exclus les sites représentant moins de 1 % du gisement total ;
- analyse croisée entre les volumes ainsi identifiés et les technologies disponibles et opérationnelles de récupération de chaleur.

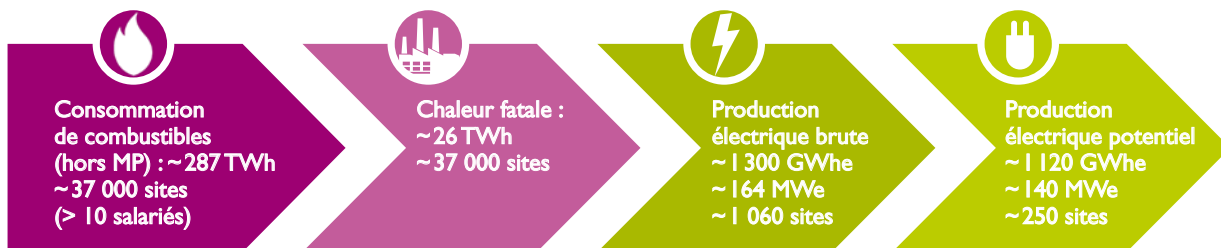
4 Deuxième sélection

pour exploiter le gisement sur un nombre limité de sites, sélection des sites de consommation énergétique supérieure à 200 GWh et qui représentent plus de 80% du gisement.

À SAVOIR >

À l'issue de ces 4 étapes, la production d'électricité nette est de : 1 120 GWh sur environ 250 sites pour une puissance installée de 140 MWe.

Les principaux secteurs retenus sont les métaux, ciment, verre, chimie et pétrochimie.



- Prise en compte d'actions d'économie d'énergie, y compris de récupération de chaleur avant une production électrique

- Gisements de chaleur fatale pour les effluents > 150°C des fours, chaudières, séchoirs

- Analyse complémentaire sur les procédés électriques (fours à arc...)

- Analyse complémentaire sur les secteurs énergivores

- Restriction sur la chaleur pour une production en 3x8

- Prise en compte d'une taille minimum de site (> 50 GWh)

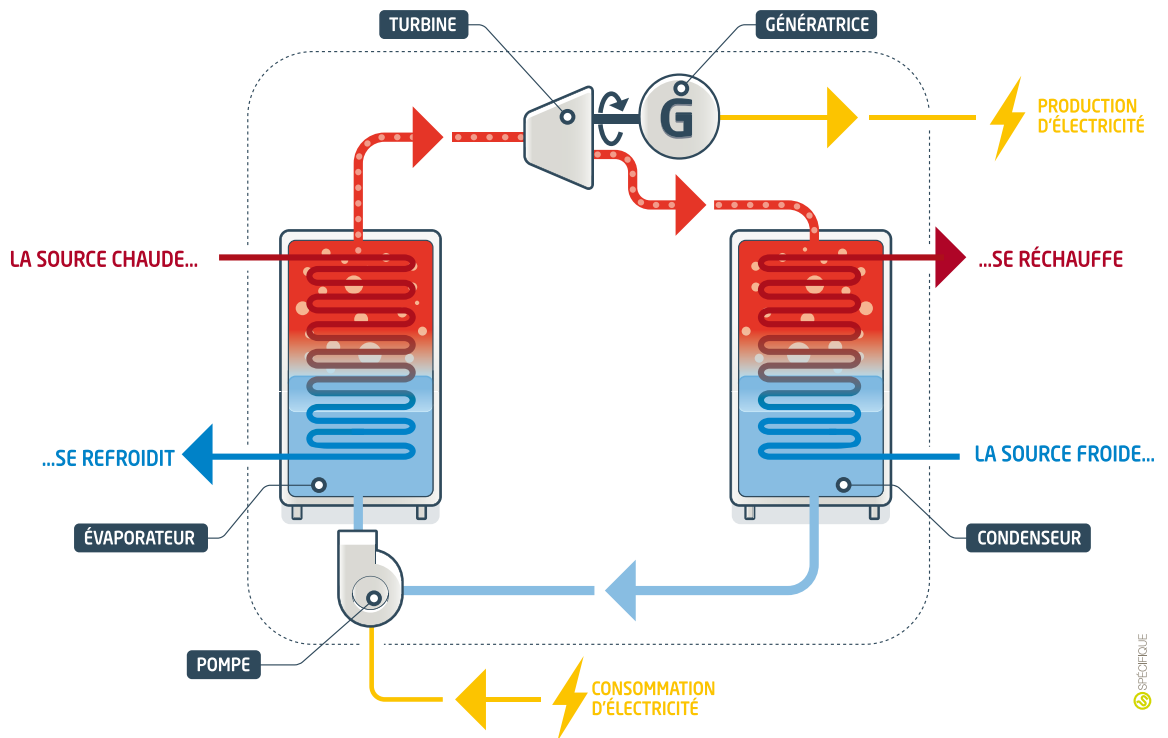
- Prise en compte des technologies et des rendements

- Concentration sur les sites (> 200 GWh)

- Identification des secteurs représentatifs

Quelle technologie pour la production d'électricité ?

► Cycle Organique de Rankine : principe de fonctionnement



Un cycle organique de Rankine est un cycle thermodynamique avec changement de phase du fluide de travail : un fluide organique se vaporise en récupérant de la chaleur à l'évaporateur puis est détendu dans une turbine accouplée à une génératrice. L'utilisation d'un condenseur et d'une pompe sont également nécessaires pour garantir le fonctionnement du cycle thermodynamique.

Similaire sur le principe au cycle de Rankine utilisant de l'eau, l'intérêt de l'utilisation d'un fluide organique réside dans sa capacité à valoriser une source chaude à basse température (< 400°C) - par exemple de la chaleur fatale industrielle - car la température d'ébullition du fluide organique est inférieure à celle de l'eau.

Les machines ORC (Organic Rankine Cycle) constituent la technologie la plus prometteuse pour valoriser les flux thermiques industriels dont la température est supérieure à 150°C.

À SAVOIR

La production d'électricité à partir de chaleur perdue peut être aussi associée à une valorisation complémentaire de la chaleur résiduelle.

Par exemple, la chaleur récupérée au niveau du condenseur - et qui est à plus basse température que la chaleur fatale - peut être utilisée pour le chauffage de locaux à l'intérieur du site ou pour alimenter un réseau de chaleur.

Exemple de machine ORC dans l'industrie française

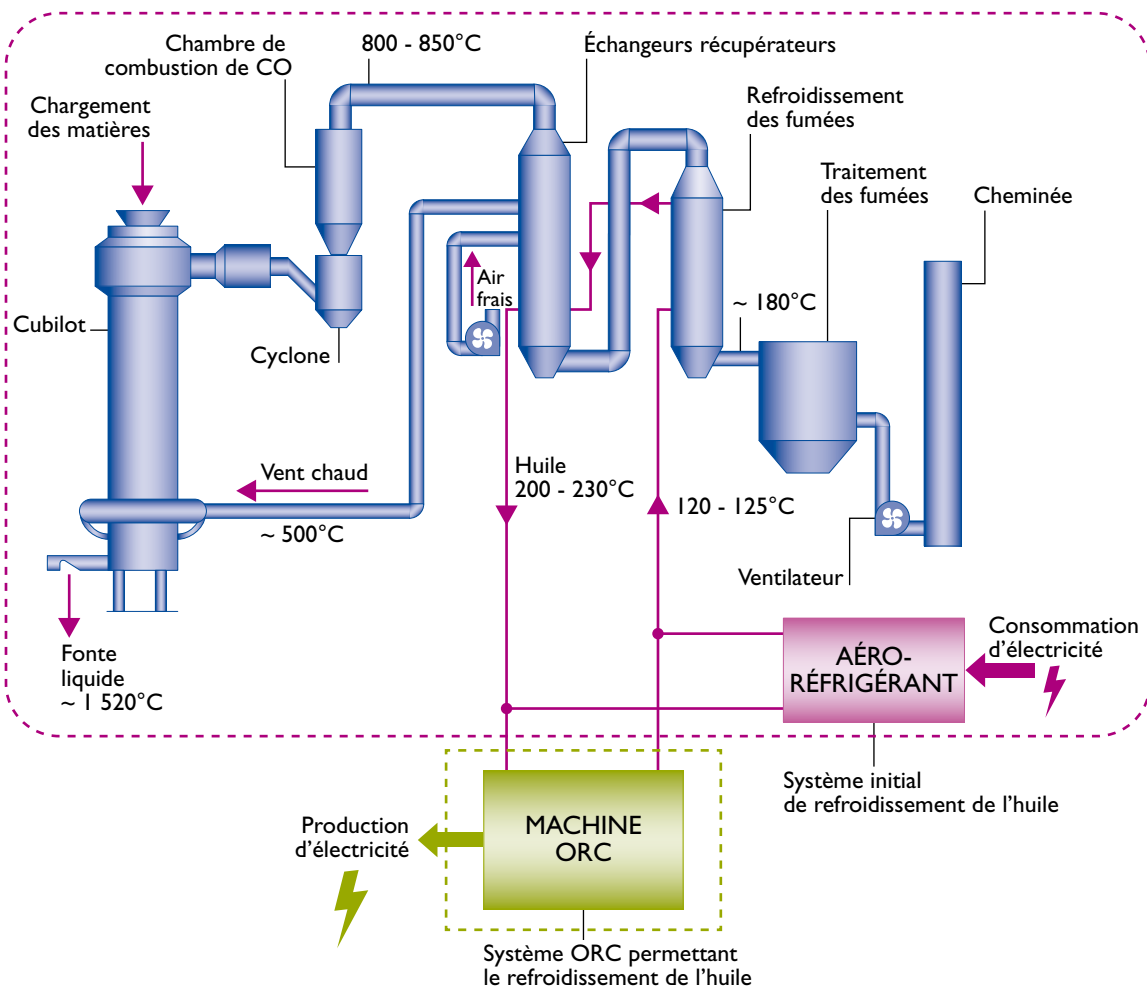
Soutenu par le programme ADEME-Total sur l'efficacité énergétique dans l'industrie, un démonstrateur de machine ORC a été construit en 2012 sur le site FMGC (Fonderie et Mécanique Générale Castelbriantaise) à Soudan (Loire-Atlantique) par la société Enerntime.

D'une puissance électrique de 1 000 kW, la machine permettra de produire à termes

environ 30% de la consommation électrique du site industriel.

Cette machine ORC permet de valoriser de la chaleur perdue (à 200°C) issue de la boucle d'huile de refroidissement des fumées du cubilot à vent chaud¹⁸ de FMGC. Auparavant, la chaleur de cette huile était perdue dans l'atmosphère et nécessitait l'usage d'aéro-réfrigérants consommateurs d'électricité.

Cubilot à vent chaud



Il existe actuellement 7 autres cubilots à vent chaud en France, susceptibles d'accueillir la technologie ORC. Elle peut aussi s'appliquer à d'autres secteurs industriels recensés tels la production de métaux, les cimenteries...

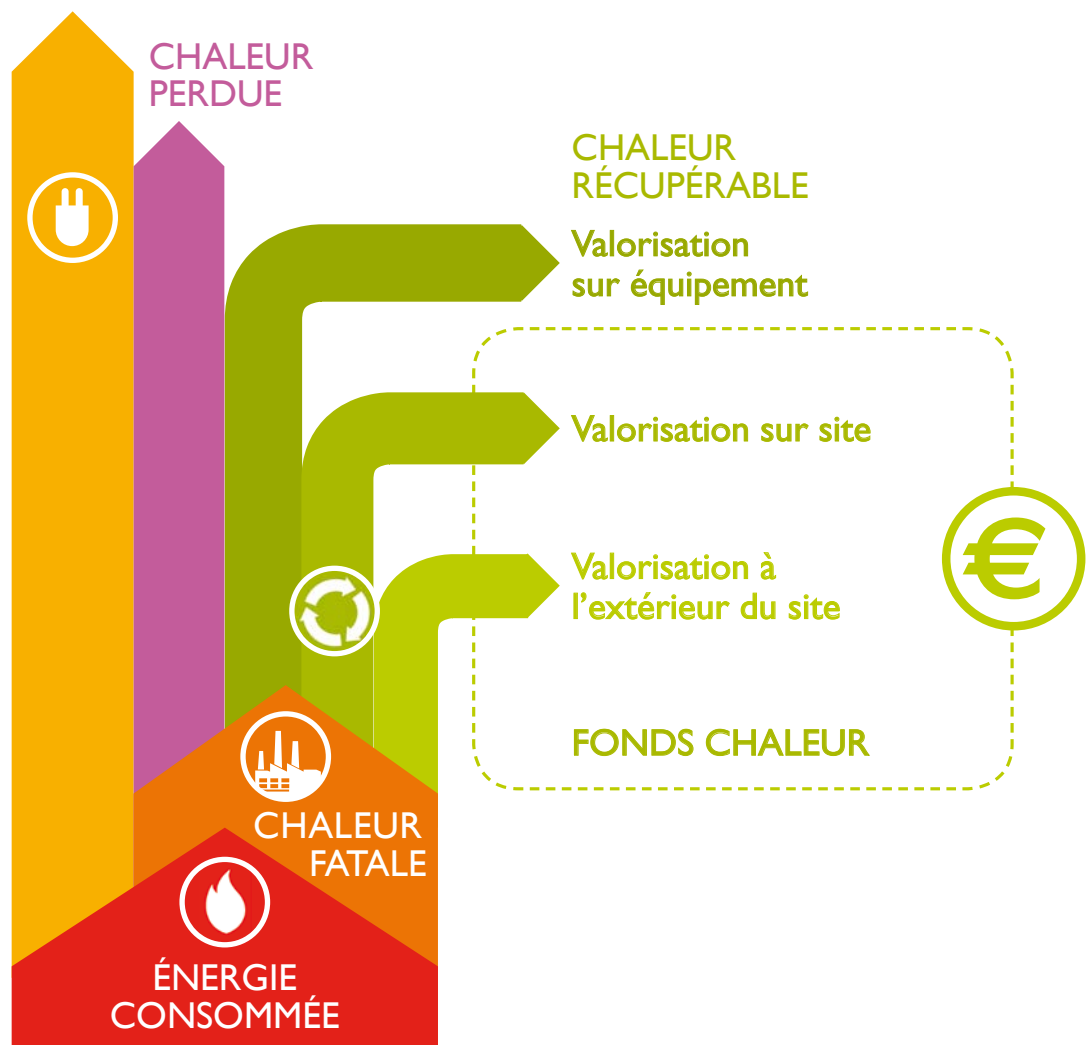
¹⁸ Un cubilot est un four permettant la fusion de la fonte à partir notamment de ferrailles de récupération. Il est dit à vent chaud lorsqu'il est équipé d'une récupération de chaleur perdue permettant de préchauffer l'air de combustion.

Pour aller plus loin : le Fonds Chaleur ADEME

L'ADEME a mis en place différentes modalités de soutien de l'industrie via le Fonds Chaleur pour le soutien à la production de chaleur renouvelable à partir de biomasse, géothermie, solaire thermique ainsi que **le soutien à la récupération de chaleur industrielle et au développement des réseaux de chaleur.**

► La chaleur de récupération industrielle :
un gisement à exploiter

CHALEUR UTILE
POUR LA PRODUCTION



En pratique

L'ADEME accompagne les projets de récupération de chaleur fatale sur les sites industriels en aidant financièrement des équipements de captage, transport et distribution de chaleur à l'intérieur d'un site industriel entre différents procédés, ou vers un réseau de chaleur externe.

Les équipements permettant la remontée du niveau thermique peuvent aussi être aidés :

- les pompes à chaleur électrique ou à absorption ;
- les recompressions de vapeur ;
- les machines à éjection.

L'instruction des demandes de financement se fait via les Directions Régionales :

- de gré à gré ;
- ou par appels à projets.

Ne sont pas éligibles :

- les installations de récupération et valorisation sur un même équipement,
- les installations de valorisation de la chaleur produite par cogénération.

Pour en savoir plus :

www.ademe.fr/fondschaleur

www.ademe.fr/appels-propositions

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et du ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

“

Face aux enjeux de la Transition Energétique et à un secteur Industrie qui représente plus de 20 % des consommations énergétiques de la France, l'accompagnement des acteurs industriels dans leurs efforts de réduction des consommations d'énergie est essentiel. Ceci d'autant plus, qu'à production égale, un potentiel d'efficacité énergétique de l'industrie atteignable d'ici 2030 est estimé par l'ADEME à 20 %.

”

ADEME



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



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE,
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE

MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION NATIONALE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

ADEME
20 avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr



979-10-297-0035-4