

NOTE DE SYNTHÈSE



La chaleur fatale industrielle en France et en Allemagne

Potentiels de valorisation et mécanismes de soutien

Février 2019

Auteure : Alicia Lerbinger, OFATE
Contact : Marie Boyette, OFATE • marie.boyette.extern@bmwi.bund.de

Soutenu par :



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Soutenu par :





Résumé

La valorisation de la chaleur fatale industrielle constitue un des piliers fixés par l'Europe pour atteindre les objectifs de maîtrise de l'énergie dans le secteur industriel. En France comme en Allemagne, la majorité de la consommation d'énergie finale industrielle correspond à la fourniture de chaleur. On désigne comme chaleur fatale cette production de chaleur dérivée de processus industriels mais n'en constituant pas l'objet premier, et qui est généralement rejetée ensuite dans l'environnement, sans forme de valorisation. Les technologies de récupération de chaleur fatale permettent de l'utiliser sous forme de chaleur ou de la convertir en froid ou en électricité avant de la consommer.

Dans les deux pays, il existe un gisement encore inexploité jusqu'ici. Dans une étude réalisée pour le ministère allemand de l'Économie et de l'Énergie (BMWi), le potentiel annuel de valorisation de cette chaleur dans les réseaux de chaleur est évalué à près de 60 TWh. En France, une étude de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) estime la production totale de chaleur fatale industrielle à 110 TWh, dont 17 TWh à proximité immédiate des réseaux de chaleur en exploitation.

Pour promouvoir les énergies renouvelables et la récupération de chaleur fatale industrielle pour la production de chaleur, la France et l'Allemagne ont instauré un cadre réglementaire et des mécanismes de soutien, notamment le Fonds Chaleur géré par l'ADEME en France et le dispositif « efficacité énergétique et chaleur industrielle renouvelable dans l'économie » piloté par la banque d'investissement KfW et l'Office fédéral de l'économie et du contrôle des exportations en Allemagne (BAFA).

Disclaimer

Le présent texte a été rédigé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique (OFATE). La rédaction a été effectuée avec le plus grand soin. L'OFATE décline toute responsabilité quant à l'exactitude et l'exhaustivité des informations contenues dans ce document.

Tous les éléments de texte et les éléments graphiques sont soumis à la loi sur le droit d'auteur et/ou d'autres droits de protection. Ces éléments ne peuvent être reproduits, en partie ou entièrement, que suite à l'autorisation écrite de l'auteur ou de l'éditeur. Ceci vaut en particulier pour la reproduction, l'édition, la traduction, le traitement, l'enregistrement et la lecture au sein de banques de données ou autres médias et systèmes électroniques.

L'OFATE n'a aucun contrôle sur les sites vers lesquels les liens qui se trouvent dans ce document peuvent vous mener. Un lien vers un site externe ne peut engager la responsabilité de l'OFATE concernant le contenu du site, son utilisation ou ses effets.



Sommaire

I.	Introduction	4
II.	Cartographie des gisements de valorisation de la chaleur fatale	5
	II.1. Allemagne	5
	II.2. France	6
	II.3. Exemples de projets de valorisation de la chaleur fatale industrielle	8
III.	Possibilités et technologies de récupération de chaleur fatale	9
	III.1. Répartition et valorisation des flux de chaleur fatale	9
	III.2. Possibilités et technologies de récupération de chaleur fatale	10
IV.	Cadre réglementaire et programmes de soutien	14
	IV.1. Cadre réglementaire	14
	IV.2. Programmes de soutien	15

I. Introduction

Pour mettre en œuvre la transition énergétique, des mesures d'efficacité énergétique s'avèrent indispensables. Les économies d'énergie permettent d'alléger la facture énergétique, mais aussi de diminuer la consommation de combustibles fossiles. Le renforcement de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel peut s'avérer décisive pour la transition énergétique, car **ce secteur représente 20 % de la consommation annuelle d'énergie finale en Allemagne et 30 % en France**¹.

La Figure 1 indique la consommation énergétique finale de l'industrie allemande par domaine d'application. Près des trois quarts sont destinés à la **fourniture de chaleur sous forme de chauffage, d'eau chaude et de divers autres types de chaleur industrielle**. La Figure 2 montre la consommation de combustibles de l'industrie française par application. Elle constitue environ 60 % de la consommation énergétique du secteur industriel. Les deux tiers de l'énergie consommée sont également utilisés pour la production de chaleur industrielle, notamment pour le chauffage des matériaux dans les fours, les procédés de séchage et le chauffage de locaux.

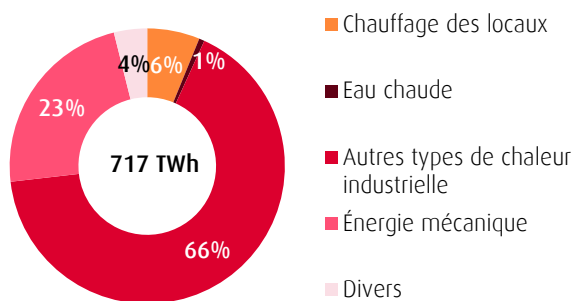


Figure 1 – Consommation énergétique finale de l'industrie allemande en 2016.

Source : AGE², mise en forme OFATE.

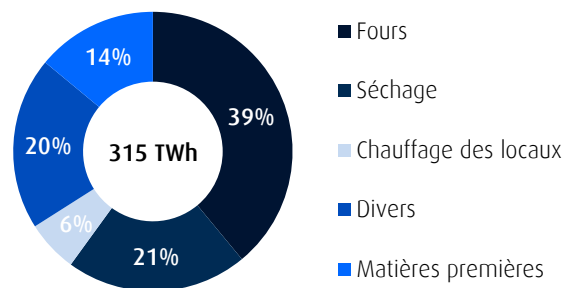


Figure 2 - Consommation de combustibles de l'industrie française en 2013.

Source : ADEME³, mise en forme OFATE.

Outre les processus destinés à la production de chaleur, certains peuvent générer de la chaleur de manière involontaire, comme dans le cas de la production d'air comprimé. **Dans ces deux cas comme dans la quasi-totalité des processus industriels, la majeure partie de la chaleur ainsi créée est rejetée sous forme de chaleur fatale sans qu'elle soit valorisée.** Souvent, cette chaleur fatale n'est pas évitable pour des raisons économiques, techniques ou physiques.

Plutôt que de laisser cette chaleur fatale s'échapper dans l'environnement, il est possible de **la récupérer et de la valoriser. La chaleur fatale est alors réutilisée, soit sous forme de chaleur dans un autre processus ou soit en étant convertie en un autre vecteur énergétique comme l'électricité ou le froid, pour être ensuite valorisée.** Sa récupération permet à l'entreprise d'accroître son efficacité énergétique. Néanmoins, il faut veiller à l'utiliser seulement à l'issue de la mise en œuvre d'autres mesures d'efficacité énergétique, en privilégiant en premier lieu l'évitement des surconsommations manifestes, la diminution des besoins énergétiques et le renforcement du taux de valorisation énergétique.

¹ Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) 09/2018, Chiffres clés de l'énergie. Édition 2018, p. 20 ([lien](#) vers le document).

Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi) 2018, *Energieeffizienz in Zahlen*, p. 18 ([lien](#) vers le document en allemand).

² BMWi 2018, *Zahlen und Fakten Energiedaten*, tableau 7 ([lien](#) vers le document en allemand).

³ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) 2017, La chaleur fatale. Édition 2017, p. 8 ([lien](#) vers le document).

En Allemagne comme en France, la valorisation de la chaleur fatale pour la fourniture de chaleur bénéficie des mêmes soutiens que celui de la chaleur renouvelable. Les deux pays se sont chacun fixé des objectifs de chaleur et de froid renouvelables par rapport à la consommation d'énergie.

- D'ici 2020, l'Allemagne ambitionne de couvrir 14 % de sa consommation de chaleur et de froid par les énergies renouvelables⁴. Un objectif de 27 % a été provisoirement défini pour 2030⁵. En 2017, elles représentaient 13,9 % après avoir déjà franchi la barre des 14 % entre 2012 et 2015⁶.
- Pour 2030, la France s'est donné un objectif de 38 % de renouvelables dans sa consommation de chaleur et un objectif intermédiaire de 33 % en 2020. En 2016, ce pourcentage s'élevait à 21,2 %⁷.

La Figure 3 illustre le développement de la chaleur renouvelable et les objectifs respectifs des deux pays.

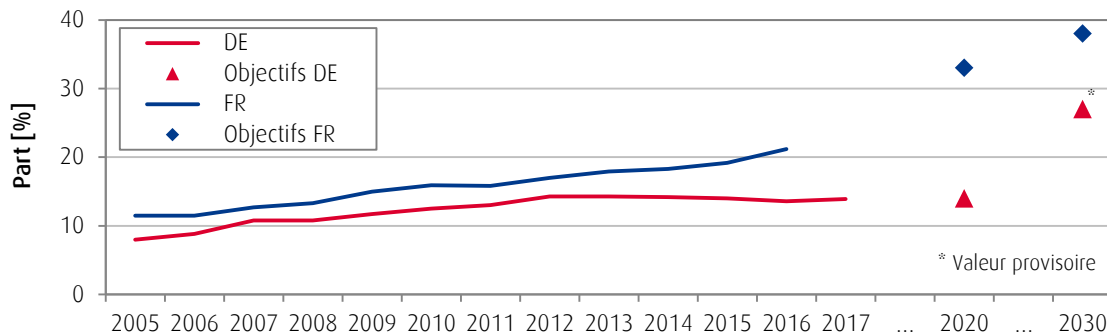


Figure 3 – Objectifs et évolution des EnR dans la consommation énergétique finale de chaleur et de froid en France et en Allemagne. Sources : BMWi et MTES, mise en forme OFATE.

Cette note de synthèse vise dans un premier temps (II) à quantifier le potentiel de la chaleur fatale industrielle de la France et l'Allemagne. Les différentes possibilités de récupération de cette chaleur et les technologies employées sont ensuite expliquées (III). Enfin, la dernière partie revient sur le cadre réglementaire et les programmes de soutien mis en place dans les deux pays (IV).

II. Cartographie des gisements de valorisation de la chaleur fatale

Comme déjà précisé plus haut, la chaleur renouvelable et respectueuse de l'environnement dans les secteurs de l'industrie et du bâtiment est de plus en plus pertinente. Aux côtés des énergies renouvelables, la récupération de la chaleur fatale industrielle peut jouer un rôle. Les parties suivantes présentent le potentiel de récupération de chaleur fatale en Allemagne et en France.

II.1. Allemagne

En Allemagne, un **registre national homogène de recensement des gisements de chaleur fatale** n'est pas encore disponible. Seuls des estimations du potentiel théorique dans le secteur industriel existent à ce jour. Cependant, plusieurs Länder ont déjà mis en place un tel registre au niveau régional, tels la Bavière, la Saxe, la Sarre et Thuringe.⁸

Le projet triennal soutenu par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi) intitulé *EnEff:Wärme – Netzgebundene Abwärmenutzung* (Efficacité énergétique thermique – valorisation de la chaleur fatale par alimenta-

⁴ [Loi allemande sur la chaleur renouvelable](#) (EEWärmeG), article 1 (en allemand).

⁵ BMWi 2019, projet de plan national intégré en matière d'énergie et de climat, p. 32 ([lien](#) vers le document en allemand).

⁶ BMWi 2018, *Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2017* ([lien](#) vers le document en allemand).

⁷ MTES 05/2018, Chiffres clés de l'énergie. Édition 2018, p. 14.

⁸ [Atlas](#) du Land de Bavière, de [Saxe](#), de la [Sarre](#) et de [Thuringe](#).



tion des réseaux de chaleur) a permis d'établir un registre national de tous les sites industriels producteurs de chaleur fatale et de le comparer aux besoins de chaleur du secteur du bâtiment. **Un gisement théorique de 52 TWh par an à basse et moyenne température (jusqu'à 300 °C) et de 11 TWh par an à haute température (plus de 300 °C) a ainsi été identifié**⁹. Ce registre, qui cartographie les gisements technico-économiques de chaleur fatale récupérable pour l'alimentation de réseaux de chaleur, n'a pas encore été publié¹⁰. Les autres voies de valorisation (valorisation thermique en entreprise, production d'électricité et de froid, par exemple) n'ont pas été examinées.

Par ailleurs, sur la base de chiffres de 2008, l'Institut pour les systèmes énergétiques du futur (*Institut für ZukunftsEnergieSysteme*, izes) estime **le gisement théoriquement valorisable sous forme thermique à 226 TWh par an et sous forme électrique à 38 TWh par an** pour l'ensemble de l'industrie allemande¹¹. L'exploitation intégrale de ce potentiel permettrait d'éviter un rejet annuel d'environ 80 MtCO₂. Il s'agit là cependant de chiffres théoriques maximaux, ne tenant pas compte de la faisabilité technique, des niveaux de température et de la disponibilité. Ils constituent plutôt un plafond en matière d'évaluation du gisement de chaleur fatale industrielle récupérable de l'Allemagne.

Selon une étude de l'association allemande de l'efficacité énergétique dans les domaines de la chaleur, du froid et de la cogénération (*Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK*, AGFW), seulement 2 % de la chaleur fatale industrielle alimentent aujourd'hui les réseaux de chaleur allemands¹². Ce chiffre s'expliquerait par la distance locale entre les sources de chaleur fatale et les consommateurs, obligeant à étendre les réseaux de chaleur vers les zones habitées. Il faut également garantir la sécurité d'approvisionnement en chaleur dans le temps. Une diminution de la production de chaleur fatale des entreprises productrices pourrait induire une congestion dans la fourniture de chaleur et donc exiger de trouver des fournisseurs de remplacement.

II.2. France

En 2017, en France, une étude approfondie a permis de quantifier le gisement de chaleur fatale industrielle. Elle chiffre **celui-ci (raffinage inclus) à 109,5 TWh de chaleur fatale au total**. La moitié du gisement concerne les secteurs de l'agroalimentaire, de la chimie et des plastiques. La Figure 4 montre le gisement de chaleur fatale industrielle par niveau de température. Plus de 50 % de ce gisement se situent à un niveau de température supérieur à 100 °C, correspondant au gisement le plus facilement exploitable¹³.

⁹ À titre de comparaison, la consommation énergétique finale des ménages allemands pour les besoins de chauffage avoisinait les 460 TWh en 2016. BMWi 2018, *Energieeffizienz in Zahlen*, p. 36 ([lien](#) vers le document en allemand).

¹⁰ Projet *Energiewendebauen* du 22/08/2018 visant à identifier les gisements de chaleur fatale industrielle récupérables pour l'alimentation des réseaux de chaleur ([lien](#) vers le document en allemand).

¹¹ IZES 2015, *Abwärmenutzung – Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge*, p. 50 ([lien](#) vers le document en allemand).

¹² AGFW 2017, AGFW – *Hauptbericht 2016*, p. 9 ([lien](#) vers le document en allemand).

¹³ ADEME 2017, *La chaleur fatale*. Édition 2017, p. 24.

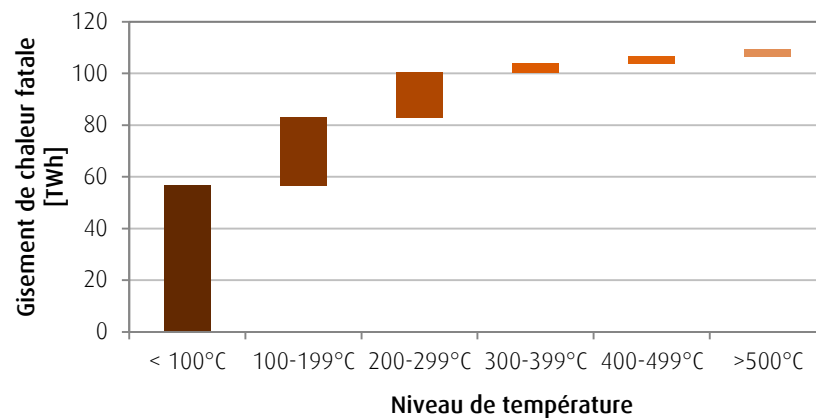


Figure 4 – Gisement de chaleur fatale de l’industrie française par niveau de température.
Source : ADEME¹⁴, mise en forme OFATE.

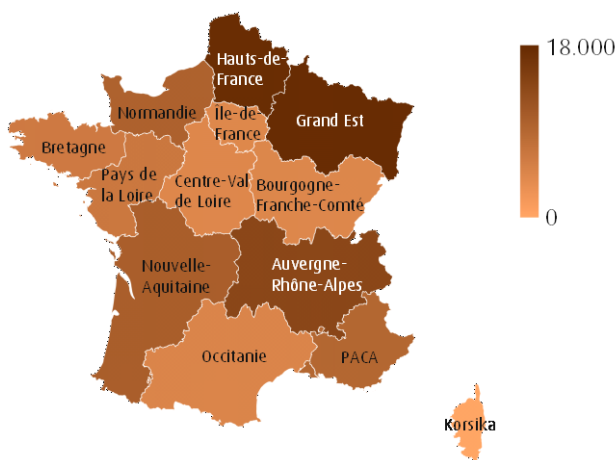


Figure 5 – Répartition du gisement de chaleur fatale industrielle par région et en TWh. Source : ADEME¹⁵, mise en forme OFATE.

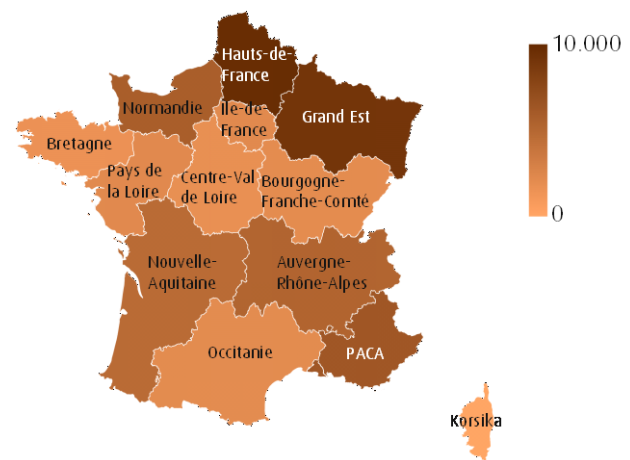


Figure 6 – Répartition du gisement de chaleur fatale industrielle supérieure à 100 °C par région et en TWh. Source : ADEME¹⁶, mise en forme OFATE.

Comme l’indiquent la Figure 5 et la Figure 6, le gisement de chaleur fatale est fortement différencié selon les régions. Les quatre régions Grand Est, Hauts-de-France, Auvergne-Rhône-Alpes et Nouvelle-Aquitaine représentent ensemble plus de la moitié du gisement. Si l’on considère uniquement les températures supérieures à 100 °C, on constate que les trois régions Grand Est, Hauts-de-France et Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA) se classent en tête. À elles trois, elles constituent près de 50 % du gisement.

Outre le gisement total, cette étude a également évalué **le gisement de chaleur fatale à proximité des réseaux de chaleur existants, qui s’élève à environ 17 TWh**. La Figure 7 identifie le gisement de chaleur fatale des différentes régions. Outre le gisement des sites industriels, il tient compte de celui des stations d’épuration des eaux usées, des usines d’incinération des ordures ménagères et des centres de traitement informatique (*data centers*), soit un potentiel valorisable de près de 8 %.

¹⁴ ADEME 2017, La chaleur fatale. Édition 2017, p. 25

¹⁵ Ademe 2017, La chaleur fatale. Édition 2017, p. 26.

¹⁶ ibid.

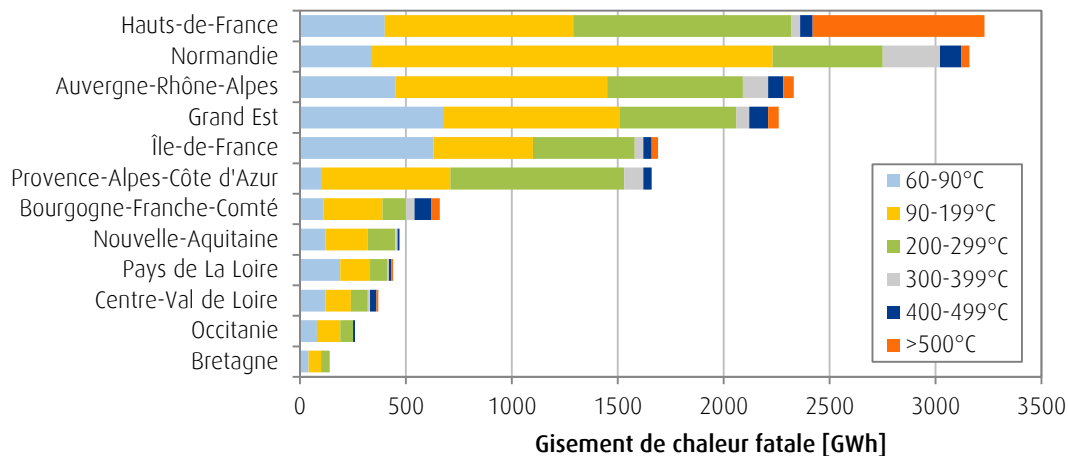


Figure 7 – Gisement de chaleur fatale à proximité des réseaux de chaleur existants par région.
Source : ADEME¹⁷, mise en forme OFATE.

Le gisement de production d'électricité à partir de chaleur fatale a également été évalué. Estimé à 1,1 TWh, il s'avère extrêmement faible par rapport au gisement total.

II.3. Exemples de projets de valorisation de la chaleur fatale industrielle

L'Allemagne et la France ont déjà mis en œuvre des projets de récupération de la chaleur fatale industrielle. En voici trois exemples.

1. Ville de Dunkerque et ArcelorMittal

Dès 1985, la ville de Dunkerque, dans les Hauts-de-France, a construit un réseau de chaleur dont la majeure partie de l'approvisionnement provient du sidérurgiste ArcelorMittal. Au fil des ans, la puissance fournie par la chaleur fatale récupérée sur les procédés de fabrication d'acier et injectée dans le réseau de chaleur a été progressivement augmentée. Le pourcentage de récupération par rapport à la quantité de chaleur alimentant le réseau est généralement compris entre 55 et 65 %. Ce réseau fournit chaque année environ 140 GWh, soit l'équivalent des besoins de chaleur de 16 000 logements et une économie annuelle de quelque 30 000 tCO₂¹⁸.

2. Régie municipale de la ville de Karlsruhe et raffinerie pétrolière d'Oberrhein

Depuis 2010, au sud-ouest de l'Allemagne, la régie municipale de Karlsruhe collabore avec la raffinerie pétrolière d'Oberrhein (MiRO). Le projet de récupération de chaleur fatale issue des procédés de production de la raffinerie alimente le réseau de chaleur de la régie municipale. La raffinerie fournit une puissance thermique de 90 MW. Chaque année, la régie municipale peut récupérer près de 520 GWh de chaleur et couvrir plus de 50 % de ses besoins de chaleur urbaine. Jusqu'à 43 000 foyers sont ainsi desservis et 100 000 tCO₂ évités par an¹⁹.

¹⁷ ADEME 2017, La chaleur fatale. Édition 2017, p. 37.

¹⁸ Dunkerque Promotion 2018, Le territoire dunkerquois, précurseur de l'écologie industrielle, ([lien](#) vers le document).

Communauté urbaine de Dunkerque 2016, Opportunités et stratégies de valorisation de la chaleur industrielle fatale, ([lien](#) vers le document).

¹⁹ Régie municipale de Karlsruhe 12/11/2015, communiqué de presse « Raffiniert: MIRO wärmt noch mehr Häuser in unserer Stadt », ([lien](#) vers le document en allemand). Brochure de présentation du projet réalisée par la raffinerie MiRO « Raffiniert: MIRO wärmt unsere Stadt », ([lien](#) vers le document en allemand).



3. Aurubis et réseau de chaleur urbain du quartier HafenCity à l'est de Hambourg

Depuis octobre 2018, la chaleur fatale du producteur de cuivre Aurubis alimente le quartier HafenCity de Hambourg. Ce projet a nécessité la construction d'une conduite d'une capacité de 60 MW reliant le site de l'usine au quartier HafenCity situé sur l'autre rive de l'Elbe. En outre, Aurubis peut injecter chaque année quelque 160 GWh dans le réseau de chaleur, soit l'équivalent des besoins thermiques de 8 000 ménages constitués de quatre personnes. Le gisement total exploitable s'élève à 500 GWh. Pour garantir un approvisionnement en chaleur stable tout au long de l'année et lisser les variations de la production de chaleur fatale, un accumulateur thermique a été intégré au système afin de découpler temporellement la fourniture de chaleur des besoins thermiques²⁰.

III. Possibilités et technologies de récupération de chaleur fatale

III.1. Répartition et valorisation des flux de chaleur fatale

La quasi-totalité des procédés industriels génère de la chaleur fatale, qui ne peut souvent pas être évitée. **Elle résulte de la combinaison de procédés et installations non efficaces et de contraintes thermodynamiques.** Les sources de chaleur et les flux qui en découlent peuvent être divisés et valorisés en fonction de différentes caractéristiques, telles que le vecteur, le niveau de température, la quantité de chaleur fatale et la disponibilité temporelle.

La chaleur fatale est rejetée dans l'environnement soit de manière diffuse, soit par l'intermédiaire d'un **vecteur gazeux ou liquide**, comme des fumées ou de l'eau froide. La chaleur fatale, qui est liée à un milieu ou à un conducteur, est généralement disponible en grande quantité et peut être valorisée au moyen d'un échangeur de chaleur. En revanche, la chaleur fatale diffuse, émise par exemple par la surface d'une installation, est difficilement exploitable.

On distingue en outre **différentes plages de température pour la chaleur fatale.** Cette fourchette de température s'échelonne de 20 °C et 40 °C pour l'air évacué par les systèmes de conditionnement d'air et peut atteindre jusqu'à 600 °C pour les fumées émises par les procédés de chauffage et de combustion. La Figure 8 établit un comparatif des niveaux de température de différentes sources de chaleur et de leurs valorisations possibles. Pour optimiser cette valorisation, il faut veiller à aligner le niveau de température de la source sur les besoins de chaleur du consommateur thermique.

La **quantité de chaleur** décrit la quantité d'énergie disponible d'une source de chaleur qu'il est possible d'exploiter. Elle dépend notamment du volume du flux thermique, des propriétés du vecteur thermique et de la température de refroidissement de ce vecteur.

²⁰ Agence allemande pour l'énergie (dena), Initiative Efficacité énergétique 2018, « *Aurubis AG punktet mit Abwärmenutzung* » ([lien](#) vers le document en allemand). dena, *Leuchttürme energieeffiziente Abwärmenutzung, Projektsteckbrief Aurubis AG & enercity Contracting Nord GmbH*, ([lien](#) vers le document en allemand).

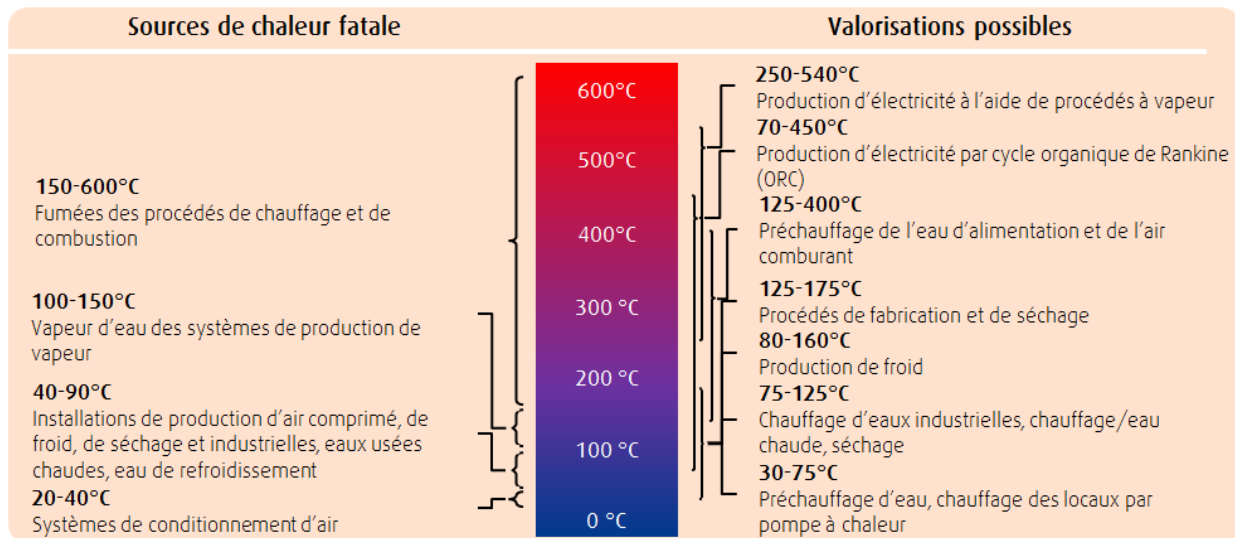


Figure 8 – Panorama des sources de chaleur fatale et leur valorisation possible selon les niveaux de température.

Source : dena, Valoriser la chaleur fatale en entreprise²¹, mise en forme OFATE.

Il faut également tenir compte de la **disponibilité temporelle** de la chaleur fatale : la production thermique est-elle continue ou subit-elle des variations ? Existe-t-il des écarts saisonniers ? À combien s'élèvent les heures de pleine charge par an ? Dans l'idéal, la fourniture de chaleur et les besoins thermiques coïncident dans le temps ; si ce n'est pas le cas, il est nécessaire de stocker la chaleur ou de constituer des réserves pour pallier aux écarts temporels.

III.2. Possibilités et technologies de récupération de chaleur fatale

Selon le niveau de température de la chaleur fatale, les possibilités de valorisation sont larges : par exemple, le refroidissement de la chaleur fatale peut servir à préchauffer de l'eau ou son haut niveau de température peut être utilisé pour la production d'électricité (voir Figure 8, à droite). On distingue généralement trois voies de valorisation :

1. la chaleur fatale peut être **récupérée sous forme de chaleur** (section [III.2.1](#)) ;
2. **convertie en froid** (section [III.2.2](#))
3. **convertie en électricité** (section [III.2.3](#)).

Diverses technologies sont employées pour les différents modes de valorisation. La Figure 9 illustre certaines de ces technologies et applications en fonction de la puissance du flux thermique et du niveau de température de la chaleur fatale.

²¹ dena 2015, *Erfolgreiche Abwärmenutzung im Unternehmen*, p.8 ([lien](#) vers le document en allemand).

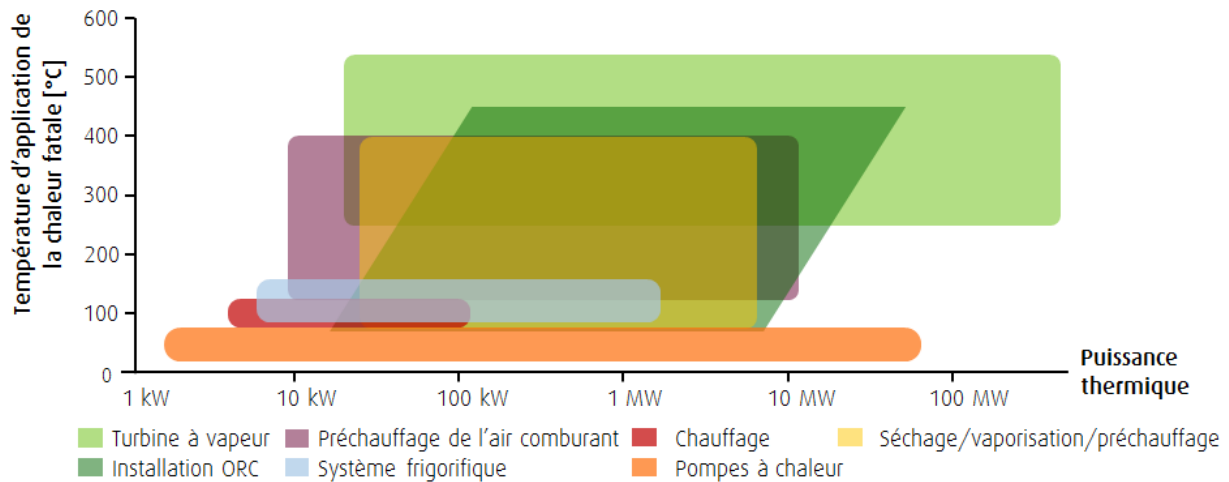


Figure 9 – Technologies et applications de récupération de chaleur selon la puissance et la température de la chaleur fatale.
 Source : dena²², mise en forme OFATE.

III.2.1. Valorisation de la chaleur fatale pour des usages chaleur

La valorisation thermique de la chaleur fatale se décline selon trois domaines d'application :

1. Avec la **valorisation sur des processus internes**, la chaleur fatale est réutilisée à l'intérieur de la même installation ou du procédé qui l'a générée. Par exemple, les fumées des fours servent à préchauffer l'air de combustion pour ainsi diminuer les quantités de combustibles utilisés.
2. La chaleur fatale peut aussi être valorisée pour un **usage interne à l'entreprise**. Dans ce cas, elle est intégrée à un autre procédé ou utilisée pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude en entreprise. Si sa température est insuffisante, elle peut bénéficier d'un apport en énergie pour remonter son niveau de température.
3. Enfin, la chaleur fatale peut être **cédée à des tiers**, c'est-à-dire être valorisée en dehors de l'entreprise. Elle alimente alors une boucle de chauffage locale ou un réseau de chaleur en desservant des entreprises implantées à proximité immédiate ou en chauffant des bâtiments résidentiels ou non résidentiels. Sa valorisation externe nécessite une infrastructure de transport.

En temps normal, la chaleur fatale (ou son flux) ne peut pas être directement récupérée parce que le vecteur est, par exemple, pollué par de la poussière, de l'huile ou de la suie. Il faut d'abord qu'elle soit convertie en un autre vecteur avant d'envisager un usage différent. Par exemple, la chaleur des fumées d'un four de combustion doit être transformée en air frais pour alimenter la combustion. Cette opération s'effectue au moyen d'un **échangeur thermique** qui permet de **transférer la chaleur d'un vecteur plus chaud à un vecteur plus froid**. Les échangeurs de chaleur sont une partie essentielle de tout système de récupération de chaleur et disponibles dans de nombreux modèles, se distinguant par leurs caractéristiques (performances, vecteurs utilisés, températures et coût)²³.

Les pompes à chaleur permettent de **relever le niveau de température de la chaleur fatale par apport d'énergie**. Ceci permet de satisfaire les besoins en températures plus élevées de consommateurs. On distingue deux catégories de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à compression et à absorption. Les premières permettent de rehausser la température de l'ordre de 40 à 50 °C et d'atteindre ainsi des températures maximales de 65 °C tandis que les secondes

²² dena 2015, *Erfolgreiche Abwärmenutzung im Unternehmen*, p. 8.

²³ Pour plus de détails sur les différents modèles d'échangeurs de chaleur, voir : Agence de l'énergie de Saxe (saena) 2016, *Technologien der Abwärmenutzung*, p. 14 ([lien](#) vers le document en allemand).

et leur conception particulière peuvent atteindre des températures jusqu'à 300 °C. Comme l'indique la Figure 9, **la plage de puissance des pompes à chaleur s'avère large : de quelques kW à près de 20 MW. En 2016, leur coût s'établit entre 150 €/kWh et 1 500 €/kWh**²⁴.

Les **systèmes de stockage de la chaleur** comptent également parmi les dispositifs de valorisation thermique de la chaleur fatale. Ils permettent de flexibiliser l'usage temporel et spatial de la chaleur en l'emmagasinant dès son émission et en la restituant à la demande. **Ils découplent ainsi la fourniture de chaleur des besoins** et contribuent à élargir les possibilités de valorisation des sources thermiques. Selon leur principe de fonctionnement, ils se classent en trois catégories : systèmes de stockage thermique par chaleur sensible, par chaleur latente et à absorption. Ces différents types de stockage se distinguent par leurs caractéristiques, leur coût et leurs possibilités d'application²⁵. Ils se différencient en outre en fonction de leur durée de stockage. Les systèmes de stockage à court terme accumulent l'énergie thermique pour quelques minutes, voire plusieurs jours. Les systèmes de stockage à long terme offrent eux des durées de stockage de plusieurs mois, rendant possible un stockage saisonnier. Ce sont essentiellement les systèmes de stockage à court terme qui s'avèrent intéressants pour la récupération de chaleur fatale industrielle : du fait du nombre de cycle de stockage plus élevé, le prix du stockage thermique rapporté à la durée de vie du stockage est inférieur à celui des systèmes de stockage à long terme.

III.2.2. Production de froid à partir de chaleur fatale

Si l'entreprise n'a pas de besoin thermique ou si elle n'est pas en mesure de couvrir raisonnablement ses besoins de chaleur en récupérant la chaleur fatale, **elle peut utiliser cette chaleur fatale pour produire du froid à l'aide de systèmes frigorifiques à alimentation thermique**. Pour cela, il est préférable que ses besoins de froid pour la production soient relativement constants. Dans ce cas, elle peut en effet valoriser sa chaleur fatale tout au long de l'année pour la fourniture de froid. En revanche, l'utilisation de la chaleur fatale pour la climatisation des bâtiments étant saisonnière et limitée à l'été, il est nécessaire de lui trouver d'autres modes de valorisation pendant la saison de chauffe.

La production de froid à partir de chaleur fatale repose sur des **procédés à absorption** qui mettent en jeu le même circuit thermodynamique que les pompes à chaleur. Des systèmes frigorifiques à absorption peuvent déjà fonctionner à des températures de 55 °C. **La plage de puissance s'échelonne de quelques kW à 12 MW. En 2016, leur coût d'investissement s'établit entre 200 €/kWh et 1 500 €/kWh**²⁶.

III.2.3. Production d'électricité à partir de chaleur fatale

La troisième option de valorisation de la chaleur fatale est la production **d'énergie mécanique destinée à être convertie en électricité par un générateur**. Ce mode de production réclame cependant des températures élevées et une forte puissance thermique. Pour l'entreprise, cette forme de valorisation présente l'avantage de s'affranchir des consommateurs de chaleur et de froid et d'être moins soumise aux variations de la production thermique que dans les deux autres méthodes de valorisation.

La Figure 10 illustre le principe de fonctionnement de la **force motrice de la vapeur**. Également employée dans les centrales conventionnelles, il s'agit de la technologie la plus utilisée pour transformer la chaleur en énergie mécanique/en électricité. La chaleur peut être récupérée à différents stades du processus (voir Figure 10). Ce dernier nécessite des températures d'au moins 150 °C (option 2). Toutefois, le rendement électrique, et donc la rentabilité, aug-

²⁴ Pour plus de détails sur les modèles de pompes à chaleur, voir : saena 2016, *Technologien der Abwärmenutzung*, p. 32.

²⁵ Pour plus de détails sur les différentes technologies de stockage thermique, voir : saena 2016, *Technologien der Abwärmenutzung*, p. 22.

²⁶ Pour plus de détails sur les principes de la production de froid, voir : saena 2016, *Technologien der Abwärmenutzung*, p. 35 et s. et Institut Fraunhofer ISI (*Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, ISI*) 2013, *Industrielle Abwärmenutzung*. Étude synthétique, p. 19 ([lien vers le document en allemand](#)).

mentant en fonction de la température de service, la température idéale est de l'ordre de 500 °C. **Les coûts d'investissement peuvent atteindre jusqu'à 5 000 €/kW_{el}**. Les systèmes de turbines à vapeur présentent généralement des rendements globaux compris entre 20 et 35 %²⁷.

Le **procédé ORC** (cycle organique de Rankine) a le même principe que celui de la force motrice de la vapeur. L'eau utilisée comme fluide actif est cependant remplacée par un fluide organique. Ce procédé autorise des températures de service plus basses que pour la force motrice de la vapeur, la température minimale de la chaleur approchant les 100 °C. Pour autant, son rendement global est faible puisqu'il est seulement de l'ordre de 5 à 15 %. **En 2016, le coût d'investissement d'une installation ORC s'échelonne entre 3 000 et 7 500 €/kW_{el}**.

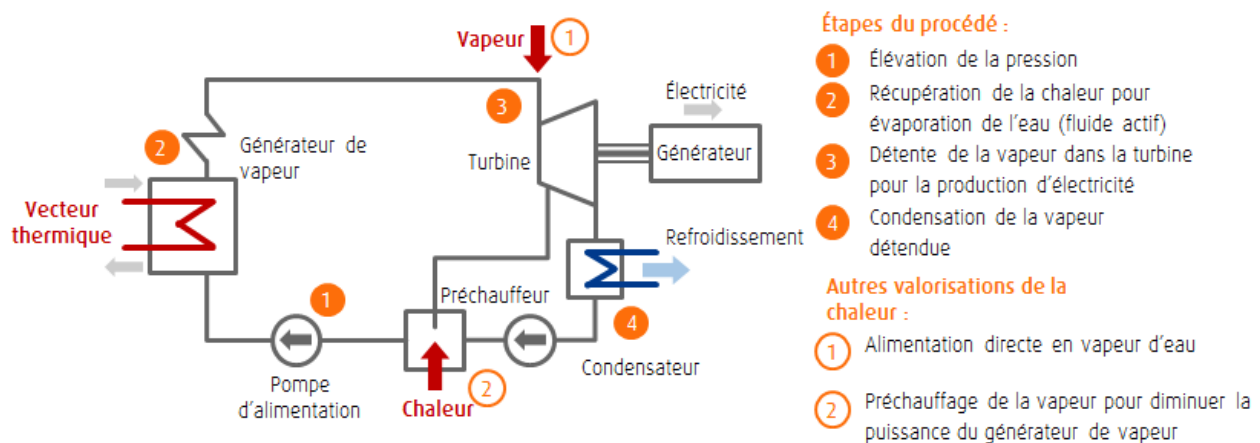


Figure 10 – Schéma d'un procédé de force motrice de la vapeur.
Source : saena 2016²⁸, mise en forme OFATE.

Le cycle de Kalina fonctionne également selon le même principe. **Son circuit met cependant en œuvre un mélange d'eau et d'ammoniac**. D'un fonctionnement plus souple que le procédé ORC, il permet d'atteindre des rendements plus élevés. **Plus coûteuse, sa technologie réclame toutefois des investissements plus importants que dans le procédé ORC²⁹**.

Par ailleurs, il est possible de recourir à un **moteur Stirling** pour produire de l'électricité à partir de la chaleur récupérée. Le niveau de température nécessaire se situe entre 650 et 1 100 °C. Silencieux et à faible maintenance, les moteurs Stirling affichent des rendements de l'ordre de 10 à 16 %. **Les coûts d'investissement sont plus bas que pour les autres technologies de production d'électricité et oscillent entre 1 400 et 1 700 €/kW_{el}**.

²⁷ Pour plus de détails sur le principe de force motrice de la vapeur, voir : saena 2016, *Technologien der Abwärmenutzung*, p. 41 et s.

²⁸ saena 2016, *Technologien der Abwärmenutzung*, p. 41.

²⁹ Pour plus de détails sur le cycle organique de Rankine et le cycle de Kalina, voir : saena 2016, *Technologien der Abwärmenutzung*, p. 43 et s. et ISI 2013, *Industrielle Abwärmenutzung*. Étude synthétique, p. 21



IV. Cadre réglementaire et programmes de soutien

L'Allemagne, comme la France, a adopté une législation et des mesures de soutien destinées à promouvoir et à soutenir l'intégration de la chaleur résiduelle industrielle dans l'approvisionnement énergétique.

IV.1. Cadre réglementaire

Réglementation thermique pour les bâtiments neufs

En 2008, l'Allemagne a voté une [loi sur la chaleur renouvelable \(Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich\)](#) (EEWärmeG), dont la dernière réforme date d'octobre 2015. Celle-ci entérine notamment l'obligation d'utiliser les énergies renouvelables dans les constructions neuves. Outre l'utilisation des énergies renouvelables comme le solaire thermique et la géothermie, cette obligation peut être remplie si au moins 50 % de chaleur fatale assurent la couverture des besoins de chaleur et de froid ou si le bâtiment est raccordé à un réseau de chaleur ou de froid utilisant au moins 50 % de chaleur fatale industrielle (article 7 de la loi EEWärmeG).

En France, la dernière [réglementation thermique](#) (RT) pour les bâtiments neufs date de 2012. Elle impose l'obligation d'utiliser les énergies renouvelables pour les maisons individuelles neuves. Cette obligation peut notamment être respectée lorsque le bâtiment couvre ses besoins de chaleur en se raccordant à un réseau de chaleur valorisant au moins 50 % de chaleur fatale industrielle³⁰.

Études de faisabilité

En 2012, l'Union européenne a promulgué une [directive relative à l'efficacité énergétique](#). Pour les cas énumérés ci-dessous, son article 14 stipule l'obligation de réaliser une analyse coûts-avantages relative aux possibilités de valorisation de la chaleur :

- **planification ou rénovation substantielle d'une installation industrielle** d'une puissance thermique totale supérieure à 20 MW génératrice de chaleur fatale à un niveau de température utile ;
- **planification d'un nouveau réseau de chaleur ou de froid, d'une nouvelle installation de production d'énergie** d'une puissance thermique totale supérieure à 20 MW raccordée à un réseau de chaleur ou de froid existant ou de la **rénovation substantielle d'une telle installation** ; dans ce cas, les possibilités de valorisation de la chaleur fatale provenant des installations industrielles situées à proximité doivent être étudiées.

Pour transposer cette directive, l'Allemagne a promulgué l'[ordonnance relative à la comparaison des coûts et des avantages de la cogénération et de la récupération de chaleur fatale industrielle pour l'approvisionnement en chaleur et en froid](#). En France, cette directive a été transposée grâce au [décret n° 2014-1363](#) et à l'[arrêté du 9 décembre 2014](#) dans le [Code de l'environnement](#) et amendée par l'[arrêté du 3 août 2018](#).

Autorisation

En Allemagne, en vertu de la [loi fédérale de protection contre les nuisances environnementales](#) (BImSchG) en vigueur, la construction et l'exploitation d'une installation à risque pour l'environnement sont soumises à une autorisation administrative. Le 4^{ème} décret d'application de cette loi (BImSchV) relative aux installations soumises à autorisation recense ces installations. En principe, cette loi oblige tous les exploitants de ce type d'installations à économiser et à optimiser l'énergie lors de leur construction et de leur exploitation, notamment en s'efforçant, dans la mesure du possible, de valoriser la chaleur fatale.

³⁰ Pour plus de détails sur les réglementations thermiques adoptées par la France et l'Allemagne, voir la note de synthèse de l'OFATE à ce sujet ([lien vers le document](#)).

Les aménagements simplement destinés à améliorer la récupération de chaleur ne nécessitent aucune autorisation si les éventuelles nuisances sont réduites et si les obligations découlant de l'ordonnance BImSchV continuent d'être respectées. Néanmoins, ils doivent être déclarés et toutes les questions relatives à l'autorisation doivent être clarifiées dans les délais auprès de l'administration compétente.

Directive européenne relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables

Le 11 décembre 2018, dans le cadre du paquet énergie-climat, l'UE a adopté une nouvelle [directive relative au développement des énergies renouvelables dans l'Union](#)³¹. Elle fixe notamment une trajectoire de développement des énergies renouvelables dans les secteurs de la chaleur et du froid. Les États membres s'engagent à augmenter la part de chaleur renouvelable de 1,3 % par an ici 2030. La chaleur fatale doit contribuer à l'objectif visé jusqu'à un plafond de 40 %. En outre, les États membres sont tenus d'effectuer une évaluation de leur potentiel national en matière de sources d'énergies renouvelables et d'utilisation de chaleur et de froid pour le chauffage et le refroidissement. Pour garantir l'intégration de la chaleur fatale lors de la conception, de la construction et de la rénovation d'infrastructures urbaines, d'espaces industriels ou résidentiels et d'infrastructures énergétiques, des dispositions en ce sens sont introduites à tous les niveaux administratifs.

IV.2. Programmes de soutien

L'Allemagne, comme la France, a mis en place des programmes de soutien mobilisables pour la réalisation de projets de valorisation de la chaleur fatale industrielle. La plupart de ces projets ont pour objectif d'encourager la modernisation, l'extension ou la création de mesures individuelles. Certains d'entre eux prennent aussi en charge des systèmes dans leur intégralité ou les études de faisabilité réalisées en amont.

Le Tableau 1 répertorie certaines mesures de soutien. Cette liste n'est cependant pas exhaustive. En Allemagne, une base de données permet de rechercher les programmes de soutien (*Förderdatenbank*)³². En France, le portail des aides à l'économie circulaire³³ et le répertoire national des aides aux entreprises³⁴, par exemple, présentent les différents programmes d'aides disponibles.

³¹ Pour plus de détails sur le paquet d'hiver, voir la note de synthèse de l'OFATE à ce sujet ([lien](#) vers le document).

³² BMWi 2019, base de données des soutiens. Programmes de soutien et aides financières de l'État fédéral, des Länder et de l'UE, ([lien](#) vers le site en allemand).

³³ MTES 2018, Portail des aides à l'économie circulaire, ([lien](#) vers le site).

³⁴ Institut Supérieur des Métiers 2019, aides-entreprises.fr, ([lien](#) vers le site).



	Allemagne	France
Niveau national	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité énergétique et chaleur industrielle renouvelable dans l'économie - Projet pilote Systèmes de réseaux de chaleur 4.0 - Programme de stimulation de la chaleur renouvelable - Programme d'efficacité énergétique de la KfW – Procédés et installations de production - IKU - Rénovation énergétique urbaine - Approvisionnement des quartiers urbains - Conseil en énergie pour les PME 	<ul style="list-style-type: none"> - Fonds Chaleur - Certificats d'économies d'énergie - Prêt éco-énergie - Appel à projets « Nouvelles technologies émergentes »
Niveau régional	<ul style="list-style-type: none"> - Financement de l'efficacité des ressources (Bade-Wurtemberg) - Efficacité énergétique et énergies renouvelables en entreprise (Bavière) - Brandebourg – Crédit efficacité énergétique - Basse-Saxe - Crédit efficacité énergétique production - Progres.nrw – Programme pour l'usage rationnel de l'énergie, les énergies renouvelables et les économies d'énergie (Rhénanie-du-Nord-Westphalie) - Augmentation de l'efficacité énergétique des ressources dans les entreprises industrielles (Rhénanie-Palatinat) - Infrastructures énergétiques du futur (Rhénanie-Palatinat) - GREEN invest – Soutien des mesures d'efficacité énergétique (Thuringe) 	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité énergétique des procédés (Grand-Est) - Appel à projets énergie « Réseaux de chaleur » (Auvergne-Rhône-Alpes)
UE	Fonds européen de développement régional	

Tableau 1 – Sélection de différents programmes de soutien à la valorisation de la chaleur fatale industrielle.

Source : Base de données des soutiens allemands, Portail des aides à l'économie circulaire, Répertoire National des Aides aux Entreprises.

IV.2.1. Exemples de programmes en Allemagne

Efficacité énergétique et chaleur industrielle renouvelable dans l'économie³⁵

Ce programme de soutien est en vigueur depuis janvier 2019. Il encourage les mesures d'économie d'énergie et de réduction des émissions de CO₂ en Allemagne. Dans le cadre de quatre modules différents, une multitude de technologies et de mesures ne se limitant pas seulement à la valorisation de la chaleur fatale industrielle bénéficie d'aides :

1. **technologies transversales** : par exemple, isolation des équipements industriels et de leurs composants et des installations de récupération de chaleur industrielle et sur eaux usées (échangeurs thermiques) ;
2. **production de chaleur industrielle renouvelable** : par exemple, par pompes à chaleur fonctionnant à partir de chaleur fatale ;
3. **systèmes de mesure, de commande et de régulation, capteurs et logiciels de gestion d'énergie** ;
4. **optimisation énergétique des installations et procédés** : par exemple, mesures de valorisation de la chaleur fatale : récupération des rejets thermiques pour le chauffage, alimentation des réseaux de chaleur, y compris des interconnexions, mesures de conversion de la chaleur industrielle en électricité.

³⁵ Groupe bancaire KfW 2019, fiche thématique. Efficacité énergétique et chaleur industrielle renouvelable dans l'économie, ([lien](#) vers le document en allemand).

BAFA 2019, Efficacité énergétique et chaleur industrielle renouvelable dans l'économie, ([lien](#) vers le document en allemand).

Ce programme s'adresse à toutes les entreprises implantées en Allemagne désireuses d'engager des mesures d'efficacité énergétique, quels que soient leur secteur d'activité et leur taille. Cette aide prend la forme d'un crédit avec un soutien au remboursement ou d'une subvention à l'investissement.

- Elle est accordée par la banque d'investissement KfW sous forme d'un crédit à taux bonifié d'un montant maximal de 25 millions d'euros et d'un soutien au remboursement dont le montant maximal varie entre 30 % et 55 % selon le module et la taille de l'entreprise. En place depuis janvier 2019, il succède aux deux programmes d'efficacité énergétique pilotés par la KfW « Chaleur industrielle » et « Chaleur industrielle – Subvention à l'investissement ».
- Dans le deuxième cas, l'aide est consentie par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi) par l'intermédiaire de l'Office fédéral de l'économie et du contrôle des exportations (BAFA). En règle générale, entre 30 % et 55 % des coûts d'investissement éligibles sont pris en charge. Le montant maximal de l'aide varie entre 200 000 et 10 millions d'euros par module.

Projet pilote « Systèmes de réseaux de chaleur 4.0 »³⁶

Depuis juillet 2017, le projet pilote « Systèmes de réseaux de chaleur 4.0 » soutient les projets d'infrastructures dans le domaine des réseaux de chaleur qui intègrent un taux important d'énergies renouvelables, optimisent la récupération de chaleur fatale et fonctionnent à un niveau de température sensiblement inférieur à celui des réseaux classiques. L'aide porte sur l'intégralité d'un système : sources thermiques, canalisations du réseau de chaleur, accumulateurs thermiques, aménagement des puits thermiques et technologies de mesure, de régulation et de commande. Elle s'adresse aux entreprises, aux régies municipales et syndicats intercommunaux, ainsi qu'aux associations et aux coopératives envisageant ce type de projet en Allemagne. Cette mesure d'aide se décline en deux modules :

1. une aide financière pour des études préliminaires de faisabilité : analyse de la faisabilité et de la rentabilité économique du projet ;
2. réalisation d'un système de réseaux de chaleur 4.0 par construction ou rénovation d'un réseau de chaleur.

L'étude de faisabilité est subventionnée jusqu'à 60 % des coûts éligibles ou pour un montant maximal de 600 000 euros ; la réalisation du réseau de chaleur bénéficie d'une aide pouvant atteindre jusqu'à 50 % des coûts ou d'un montant maximal de 15 millions d'euros.

Conseil en énergie pour les PME³⁷

Ce programme de conseil en énergie s'adresse aux PME et vise à mieux les informer en leur apportant des conseils avisés et à identifier des possibilités d'économie et des mesures d'amélioration de leur efficacité énergétique. Parmi celles-ci figurent notamment la récupération de chaleur industrielle lorsque cette mesure se justifie et l'élaboration éventuelle d'un plan de valorisation. Ce programme doit permettre de réaliser des économies d'énergie de l'ordre de 10 à 20 % par entreprise conseillée.

L'Office fédéral de l'économie et du contrôle des exportations (BAFA) subventionne les frais de conseil éligibles à hauteur de 80 %. L'aide maximale est de 6 000 euros pour les entreprises dont la facture énergétique annuelle dépasse 10 000 euros et de 1 200 euros pour celles dont la facture énergétique est inférieure à ce montant.

³⁶ BMWi 2017, communiqué de présentation du programme de soutien Projets exemplaires Systèmes de réseaux de chaleur 4.0, ([lien](#) vers le document en allemand).

³⁷ BAFA, Conseil en énergie pour les PME, ([lien](#) vers le document en allemand).



IV.2.2. Exemples de programmes en France

Fonds Chaleur³⁸

L'ADEME a mis en place le Fonds Chaleur dès 2009. Il soutient les projets favorisant la production de chaleur renouvelable et de récupération de chaleur, ainsi que les réseaux de chaleur raccordés aux installations prises en charge. Dans le domaine de la chaleur fatale industrielle, de nombreuses initiatives et technologies peuvent être aidées :

- systèmes de captage de chaleur sur un procédé unitaire pour une valorisation vers un autre procédé unitaire ;
- systèmes de stockage thermique, systèmes d'augmentation du niveau de température (pompes à chaleur, par exemple) et installations de production de froid sur chaleur fatale ;
- transport et distribution de chaleur fatale (conduites, échangeurs thermiques, etc.) pour une valorisation interne ou externe (alimentation d'un réseau de chaleur urbain ou d'entreprises voisines) ;
- construction et extension de réseaux de chaleur à usage interne et externe.

L'ADEME conseille et soutient les études et la conception de ces projets, notamment en subventionnant les études de faisabilité, et aide les entreprises à les réaliser. Ce dispositif s'adresse à toutes les entreprises, quels que soient leur taille et leur secteur d'activité. Le montant des aides dépend de la taille de l'entreprise et des mesures mises en œuvre. Elles varient de 50 à 70 % des coûts éligibles pour les études de faisabilité et de 30 à 60 % des coûts d'investissement éligibles. Le détail sur le calcul des taux de subvention est donné dans des fiches thématiques³⁹.

Certificats d'économies d'énergie (CEE)⁴⁰

Depuis 2006, les distributeurs d'énergie doivent remplir une obligation de soutien en matière d'économie et de maîtrise de l'énergie via les certificats d'économies d'énergie⁴¹. Des mesures d'économie d'énergie standardisées peuvent permettre de remplir leur obligation. Chaque mesure d'économie d'énergie s'accompagne d'une fiche technique détaillée qui recense le secteur (industrie, agriculture, transport, etc.), le détail de la mesure, les conditions d'émission des certificats, ainsi que la durée et la formule de calcul du nombre de certificats d'économies d'énergie obtenus.

Quatre de ces mesures standardisées d'économies d'énergie concernent la valorisation de la chaleur fatale industrielle :

- **brûleur avec dispositif de récupération de chaleur sur four industriel** en vue d'utiliser la chaleur dégagée par les fumées pour le préchauffage de l'air comburant⁴² ;
- **système de récupération de chaleur sur une tour aéroréfrigérante** pour une utilisation sur site⁴³ ;
- **système de récupération de chaleur sur un compresseur d'air** pour une valorisation sur site en chauffage de locaux, production d'eau chaude sanitaire ou dans un procédé industriel⁴⁴ ;
- **système de récupération de chaleur sur un groupe de production de froid** afin de chauffer ou préchauffer, sur site, de l'eau ou de l'air⁴⁵.

Dans le cadre des CEE, seules les mesures mises en œuvre sont aidées. Les études de faisabilité et la phase d'étude amont sont exclues du dispositif.

³⁸ ADEME 2018, Le Fonds Chaleur en bref, ([lien](#) vers le document).

³⁹ ADEME 2018, Fonds Chaleur 2018 : Récupération de chaleur fatale, ([lien](#) vers le document).

ADEME 2018, Fonds Chaleur 2018 – secteur réseaux de chaleur, ([lien](#) vers le document).

ADEME 2017, Cahier des charges. Étude de faisabilité récupération de chaleur fatale pour valorisation interne et/ou externe, ([lien](#) vers le document).

⁴⁰ MTES 2018, Dispositif des Certificats d'économies d'énergie, ([lien](#) vers le document).

⁴¹ Pour plus de détails sur l'origine et le fonctionnement du marché des certificats d'économies d'énergie, voir la note de synthèse en allemand de l'OFATE de 2017 sur les Certificats d'économies d'énergie en France, ([lien](#) vers le document).

⁴² MTES 2014, Brûleur avec dispositif de récupération de chaleur sur four industriel, ([lien](#) vers le document).

⁴³ MTES 2014, Système de récupération de chaleur sur une tour aéroréfrigérante, ([lien](#) vers le document).

⁴⁴ MTES 2014, Système de récupération de chaleur sur un compresseur d'air, ([lien](#) vers le document).

⁴⁵ MTES 2018, Système de récupération de chaleur sur un groupe de production de froid, ([lien](#) vers le document).