
Sources de chaleur fatale : quels réseaux de chaleur pour les valoriser ?

Samuel CHICHE^{1,2}, Morgane COLOMBERT², Youssef DIAB²

¹ ENGIE Réseaux (groupe ENGIE), 80, Av du Général de Gaulle 92031 Paris La Défense Cedex
samuel.chiche@eivp-paris.fr

² Université Paris-Est, Lab 'Urba, EA 3482, EIVP, 80 rue de Rébeval, 75019 Paris

RÉSUMÉ. La valorisation d'énergie fatale, principalement sous forme de chaleur, est une filière en plein développement dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité énergétique des territoires. Les réseaux de chaleur, également en essor avec des objectifs de déploiement ambitieux, sont des systèmes énergétiques capables d'intégrer les sources fatales de chaleur. Ces dernières présentent néanmoins des caractéristiques techniques différentes, notamment au niveau de leur température, de leur localisation et de la quantité d'énergie qu'elles contiennent. En fonction de la source, les réseaux pouvant les accueillir diffèrent, de par leur taille, leur régime de température, et le type d'aménagement qu'ils alimentent. Certaines sources, notamment urbaines, ne peuvent répondre qu'aux besoins thermiques de bâtiments nouveaux et rénovés, via des réseaux de chaleur de nouvelles générations, aux plus échelles plus petites que les réseaux plus anciens.

ABSTRACT. Waste heat recovery is a new opportunity envisaged to answer to energy efficiency challenge in territories. District heating systems are also mainly being developed, with ambitious objectives and are possible tools to integrate waste energies. These sources have varied technical characteristics such as temperature, urban location or energy quantity available. According to the source studied, district heating systems can have different size and functioning temperature. Some of these sources only can answer to new or renovated energy buildings with low demand. In this case, the adapted district heating systems are from the new generation and smaller than classic and older district heating.

MOTS-CLÉS : un maximum de six mots significatifs : énergie fatale, réseaux de chaleur, chaleur fatale, boucle d'eau chaude, KEYWORDS: a maximum of six significant words: waste energy, district heating, waste heat

1. Introduction

La valorisation d'énergie fatale, notamment sous forme de chaleur, est un enjeu nouveau, régulièrement évoqué pour participer à la transition énergétique des territoires et des métropoles. Ces sources, multiples, perdues si non-valorisées, sont considérées comme des énergies décarbonées et peuvent participer à l'augmentation de la part d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) d'un territoire.

Au vue de leurs caractères décentralisés et souvent urbains, les sources de chaleur fatales sont valorisables dans des réseaux de chaleur, systèmes de chauffage urbain qui mutualisent à la fois les énergies et les besoins énergétiques. Les réseaux de chaleur sont jugés comme des vecteurs efficaces pour augmenter la part d'EnR&R dans le mix énergétique de territoires urbains, et à ce titre, les stratégies de développement sont ambitieuses, avec des objectifs chiffrés à différentes échelles : européenne, nationale ou encore locale.

A l'échelle européenne, Heat Roadmap Europe propose différents scénarios de développement des réseaux de chaleur alimentés par des EnR&R aux horizons 2030 et 2050 pour diminuer de 80% les émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 1990 et 2050 [CON 2012]. En France, la récente loi Française relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) évoque un plan stratégique où la valorisation d'énergies fatales est l'un des quatre enjeux majeurs [LEG 2015]. Dans ce texte de loi, les objectifs sont de multiplier par cinq la chaleur renouvelable et de récupération dans les réseaux de chaleur et de froid en 2030.

Si la valorisation d'énergie fatale via les réseaux de chaleur est donc une action ciblée par les acteurs de l'énergie, l'application est plus complexe : de par leurs caractéristiques différentes, les sources de chaleur fatale peuvent répondre à des besoins divers et les réseaux de chaleur qui peuvent les accueillir ne sont pas les mêmes.

En effet, les sources de chaleur fatale peuvent être à différents états (eau liquide, vapeur, air), à plusieurs niveaux de températures, localisées en zones plus ou moins denses et sont disponibles à des quantités variables et qui peuvent osciller de façon journalière ou saisonnière.

De même, chaque réseau de chaleur possède des caractéristiques particulières. Les dernières générations de réseaux de chaleur sont plus performantes énergétiquement grâce notamment à la limitation des pertes de distribution. Ces performances sont obtenues grâce à l'utilisation de matériaux isolants sur le réseau de distribution et à l'abaissement des températures de fonctionnement [LUN 2014]. Ces dernières évolutions sont rendues possibles dans les cas où de nouveaux réseaux de chaleur se construisent dans de nouveaux quartiers, où les bâtiments respectent des normes énergétiques lors de leurs conceptions. Ainsi, leur demande d'énergie thermique est réduite. Malgré cette baisse des besoins, de récentes études montrent que le rôle des réseaux de chaleur est significatif si les réseaux sont performants [LUN 2010].

La compatibilité entre réseaux de chaleur et sources de chaleur fatale est donc liée à des conditions techniques et dépend également des bâtiments qui se raccordent aux réseaux, et plus généralement, aux projets d'aménagements urbains.

L'objectif de la recherche présentée dans cet article est de déterminer quels sont les contraintes, les limites mais également les bonnes conditions à une intégration plus importante d'énergies fatales dans les réseaux de chaleur.

Dans un premier temps, un travail de catégorisation des sources de chaleur fatale et de description des réseaux de chaleur pouvant les valoriser a été mené. Plusieurs critères pour les différencier sont possibles. Le régime de température est un élément primordial.

Dans un second temps, il s'agit de regarder quels projets d'aménagement sont compatibles avec la récupération de chaleurs fatales et donc avec l'installation des types de réseaux de chaleur identifiés. Quelques retours d'expériences de projets déjà existants permettent d'avoir un aperçu du type de bâtiments, de quartiers ou d'écoquartiers qui composent ces aménagements.

2. Des sources de chaleur fatale multiples

L'énergie fatale, sous forme de chaleur, est présente sous plusieurs états physiques et chaque source se caractérise différemment en fonction de la quantité d'énergie qu'elle contient, de sa continuité ou encore de sa température.

2.1. Du potentiel récupérable à l'utilisation dans des réseaux de chaleur

De nombreux travaux s'intéressent aux sources d'énergie fatale. Tout d'abord au niveau du potentiel énergétique, c'est-à-dire, de la quantité de l'énergie récupérable, dictée non pas par des besoins énergétique mais par l'activité qui crée cette énergie. L'approche est souvent prospective, à différentes échelles géographiques, sur un continent, un pays ou une région. D'autres études s'intéressent à des sources en particulier et décrivent, en plus du potentiel énergétique, leurs caractéristiques physiques.

2.1.1. Potentiel énergétiques des sources de chaleur fatale

A l'échelle du continent, le projet Heat Roadmap Europe ([CON 2012] possède plusieurs objectifs d'efficacité énergétique, le but étant d'orienter ensuite les actions locales vers des projets les plus performants possibles. L'un d'eux est de cartographier et de quantifier l'énergie fatale, principalement issue de l'industrie, valorisable dans des réseaux de chaleur sur toute l'Europe.

Certains travaux sont réalisés sur des territoires nationaux. Plusieurs pays ont par exemple étudié le potentiel de chaleur fatale issue de milieux industriels. Les Etats Unis ont répertorié en 2004 les pertes énergétiques dans leurs industries dans le cadre d'une étude pour augmenter l'efficacité énergétique de ce milieu [PEL 2004]. En France, l'ADEME [ADE 2014] a étudié le potentiel de l'énergie fatale issue de milieux industriels (chimie, agro-alimentaire, sidérurgie, fonderie, etc.) sur tout le territoire région par région. Au total, 51 TWh est rejetée sous forme de chaleur, supérieure à 100°C, avec une répartition inégale en fonction des régions. G.P Hammond a effectué une étude similaire [HAM 2014] pour estimer la valorisation possible d'énergie fatale au Royaume Uni, en 2014. D'autres rapports présentent les potentiels de récupération d'énergie fatale issue de milieux industriels pour la Norvège, la Suède et l'Allemagne [FOR 2016]. Ces études ont un but prospectif, et orientent les futures actions locales en termes d'efficacité énergétique.

Le point commun entre toutes ces études est que l'énergie fatale considérée provient essentiellement des milieux industriels. Elles négligent d'autres sources comme les eaux usées, les datacenter, les blanchisseries, et

autres sources plus décentralisées et aux potentiels énergétiques plus faibles. En effet, à l'échelle d'un pays ou même d'une région, la quantité d'énergie fatale est bien plus importante dans les industries.

En revanche, l'avantage de certaines des sources non-industrielles, négligées par les précédentes études, est leurs localisations, souvent en zones urbaines denses, c'est-à-dire directement sur les lieux de consommations. Ceci en fait des ressources à ne pas négliger.

2.1.2. *Etudes de sources urbaines de chaleur fatale*

Parmi les sources de chaleur fatale précédemment citées, des études permettent de décrire le potentiel énergétique et les caractéristiques des eaux usées, des datacenter ou d'usines d'incinération d'ordures ménagères. Yesiller et al. [YES 2015] recense par exemple les travaux réalisés sur l'incinération d'ordures ménagères. Cette source de chaleur fatale est déjà largement valorisée, en France notamment, où plus de 11 TWh (thermique et électrique) sont redistribués sur des réseaux de chaleur, soit 25% du mix énergétique des réseaux [SNC, 2014] et sur le réseau électrique. L'énergie récupérée, sous forme de vapeur à la sortie du four d'incinération, est à plus de 200°C, soit à haute température.

Hepbasli et al. [HEP 2014] présente un état de l'art sur la récupération de chaleur issue des réseaux d'eaux usées. Il peut s'agir à la fois d'eaux usées domestiques, d'eaux pluviales et d'autres eaux usées. L'utilisation de cette ressource peut être directe pour un bâtiment mais peut aussi être mutualisée via un réseau de chaleur. Dans le cas d'un réseau de chaleur, la source, l'eau du réseau d'assainissement ou de la station d'épuration, est à basse température, entre 10 et 30°C, et nécessite donc des outils techniques pour rehausser la température afin qu'elle corresponde à celle de ou des usage(s) (chauffage ou eau chaude sanitaire). Des pompes à chaleur sont alors utilisées. La température est variable au cours des saisons et dépend de la température extérieure. Le débit dans le réseau d'assainissement est également variable pendant une journée et est lié aux heures de consommation d'eau chaude.

La contrainte est la même pour la chaleur fatale issue des datacenter, basse température [EBR 2014]. Dans un datacenter, les équipements informatiques fonctionnent généralement jusqu'à 27°C et doivent être refroidis au-delà. La chaleur issue des datacenter est principalement issue de groupes froids, responsables de plus d'un tiers de la consommation énergétique. La quantité de chaleur fatale est très élevée et en constante augmentation. Malgré l'amélioration de l'efficacité énergétique des datacenter, les besoins en stockage et en traitement de données sont toujours plus grands. Des collectivités ont entrepris des études sur leurs territoires afin de connaître le gisement énergétique lié aux datacenter déjà installés et aux futures installations [ALE 2013].

D'autres domaines émetteurs de chaleur font également l'objet d'études visant à analyser le potentiel de la chaleur fatale. C'est le cas des services hospitaliers [BUJ 2015] ou des cuisines industrielles [ONY 2012]. Enfin, certaines études présentent des modèles qui caractérisent et évaluent les potentiels de sources fatales urbaines diverses : papeteries, cuisines collectives, industrie textile [SON 2016] ou encore les blanchisseries industriels et les verreries [CHI 2016].

2.2. **Catégorisation des sources de chaleur fatale**

Tous ces travaux permettent de caractériser des sources de chaleur fatale potentiellement valorisables. Plusieurs catégories de chaleur fatale peuvent ainsi être distinguées en fonction des caractéristiques très différentes des sources.

Les sources de chaleur fatale étudiées se distinguent par leur état : air, liquide, vapeur. En fonction de cet état, les rendements lors de la récupération de chaleur sont différents, une récupération sur l'air étant par exemple moins efficace que sur un fluide à l'état liquide.

L'intermittence diffère également selon les sources. Les fluctuations peuvent être saisonnières et/ou journalières. Pour les eaux usées, le débit, qui influe directement sur la quantité d'énergie récupérable, est variable au cours de la journée. La variation de cette source est également saisonnière puisque le niveau de température évolue au cours des saisons, plus froid en hiver qu'en été. La chaleur provenant des datacenter, de l'incinération des déchets ou encore des verreries est beaucoup plus stable dans le temps. En exemple, une usine de verrerie planifie sa production de verre de façon à avoir une activité continue tous les jours de l'année sans interruption la nuit. Seules des opérations de maintenance (qui peuvent durer plusieurs semaines) ou de remplacement de matériels arrêtent les activités et donc la production de chaleur fatale.

Les sources de chaleur fatale peuvent être catégorisées en fonction de leur localisation. L'hypothèse est de regarder leur éloignement des espaces les plus urbanisés, zones où les consommations énergétiques sont les plus importantes. Du fait des pertes thermiques liées au transport de l'énergie, une source de chaleur proche de ces

zones est plus attractive. Ainsi, les réseaux d'assainissement où transitent les eaux usées sont directement en zones urbaines denses. A contrario, l'énergie fatale issue de zones industrielles est souvent à l'écart de ces espaces. Cependant, certaines industries sont parfois localisées en zone périurbaines voire urbaines, comme les verreries ou les usines d'incinération de déchets.

La température des sources de chaleur fatale est un paramètre clé pour les classer. Les températures minimales pour répondre aux besoins de chauffage (dans les bâtiments neufs) sont d'environ 40°C et de 60°C pour l'eau chaude sanitaire (E.C.S). Ces valeurs seuils constituent un élément de caractérisation important pour les sources de chaleur fatale. L'IEA, dans son étude sur l'intégration d'énergies renouvelables et de récupération dans les systèmes énergétiques [IEA 2014], a déjà entrepris ce travail de classification en proposant trois groupes : hautes températures, basses températures et températures en dessous du niveau d'usage. Les sources appartenant au groupe « hautes températures » peuvent s'intégrer directement dans des réseaux d'énergie, celles du groupe « basses températures » sont parfois insuffisantes pour répondre à des besoins thermiques et doivent, par exemple, être couplées à une autre énergie. Enfin, les sources du groupe « températures en dessous du niveau d'usage », nécessitent l'utilisation de pompes à chaleur pour être valorisées.

Enfin, la quantité d'énergie extractible sur une source n'est pas du même ordre de grandeur en fonction des sources. L'énergie extractible d'une usine d'incinération de déchet, même de très petite taille, est bien supérieure à celle d'une blanchisserie industrielle ou d'un datacenter comme le montre l'utilisation de l'outil Recov'Heat [CHI 2016].

Le Tableau 1 résume les caractéristiques détaillées dans cette partie. Il y a clairement une corrélation entre les sources localisées en zones urbaines denses. Elles sont à la fois basses-températures et ont un potentiel énergétique théorique de quelques GWh (en fonction des projets). A l'opposé, les sources périurbaines présentent des caractéristiques différentes : à hautes ou moyennes températures, les quantités d'énergies récupérables sont à une échelle différente (quantité également dépendante de la taille des industries).

Tableau 1 *Catégorisation de sources de chaleur fatale*

	Eaux usées	datacenter	Verreries	Usines d'incinération	Industrie : sidérurgie
Etat	Liquide	Air	Air et liquide	air	air
Variabilité	Journalière et saisonnière	Stable	Stable	Stable, parfois saisonnière	Stable, incertaine sur le long terme
Localisation	Urbain dense	Urbain (ou périurbain)	périurbain	Périurbain	Périurbain ou loin des villes
Température (°C)	Basse (10-30°C)	Basse (~30°C)	Haute (> 100 °C)	Haute (> 100°C)	Haute (> 100°C)
Ordre de grandeur du potentiel énergétique	< 3 GWh	< 30 GWh	> 50 GWh	> 100 GWh	> 100 GWh

En analysant ces critères, deux catégories d'énergies fatales se distinguent : les sources urbaines basses températures et les sources périurbaines à hautes températures. La première catégorie est composée de sources telles que les eaux usées, les blanchisseries ou les datacenter. En plus de leurs températures basses, l'ordre de grandeur de leurs potentiel énergétique est faible comparée aux sources de la deuxième catégorie, plus industrielles.

Dans le cadre du raccordement de ces deux catégories de sources fatales dans les réseaux de chaleur, l'objectif est de savoir, à partir des installations déjà en place, quelles sont les caractéristiques des réseaux qui les peuvent les intégrer.

3. Réseaux de chaleur et sources fatales de chaleur

Un réseau de chaleur fonctionne comme un chauffage central à l'échelle d'une ville ou d'un quartier. Un réseau de canalisations en boucle fermée distribue de l'eau chaude (sous forme liquide ou de vapeur) jusqu'aux pieds des immeubles raccordés. Le réseau secondaire du bâtiment fournit ensuite chauffage et eau chaude sanitaire (ECS) à ses abonnés. Depuis plus d'un siècle, des réseaux de chaleur alimentent différentes échelles de territoires dans le monde et leurs évolutions ont petit à petit amélioré les performances de ces systèmes. Une

analyse de quelques caractéristiques techniques de ces chauffages urbains permet de les différencier entre eux pour ensuite voir quels types de systèmes peuvent intégrer des énergies fatales.

3.1. Caractéristiques des réseaux de chaleur

Techniquement, un réseau de chaleur peut se définir par plusieurs caractéristiques, notamment l'état de son fluide caloporteur, son mix énergétique, sa taille, sa densité et surtout son régime de température.

L'eau qui circule dans le réseau de distribution, le fluide caloporteur, peut être sous forme de vapeur, d'eau surchauffée ou d'eau chaude. Seul un réseau en France fonctionne avec de la vapeur d'eau, celui de Paris, ce qui induit des températures de fonctionnement très élevées. L'eau surchauffée est mise sous pression. Laisser l'eau sous forme liquide permet de limiter les pertes de distribution. Plus la température est basse, moins les pertes thermiques sont importantes.

Les mix énergétiques des réseaux de chaleur sont variés. De nombreuses énergies peuvent approvisionner un réseau, les sources pouvant être fossiles (gaz, fioul, charbon), renouvelables (géothermie, biomasse, solaire), de récupération (chaleur fatale, biogaz). La plupart des réseaux utilisent plusieurs énergies et l'un des objectifs actuels est d'augmenter la part des EnR&R. En France, si un réseau de chaleur est alimenté par 50% d'EnR&R ou plus, il peut bénéficier d'aides à l'investissement et d'une taxe réduite pour l'opérateur et le client.

Il existe différentes échelles de réseaux de chaleur. Certains alimentent des villes entières et mesurent plusieurs dizaines et centaines de kilomètres. Ainsi, le réseau de chaleur de Paris est composé de 450 km de canalisation, celui de Grenoble mesure 168 km, celui de Brest 25 km. D'autres réseaux alimentent des zones plus restreintes et des quartiers, voire des îlots et mesurent seulement quelques centaines de mètres. La quantité d'énergie qui transite dans ces réseaux est alors plus faible. La densité linéique est un indicateur qui permet d'évaluer la performance des réseaux. Il s'agit de la quantité moyenne d'énergie qui circule dans le réseau par mètre linéaire de canalisation (exprimé en MWh/ml). Plus ce rapport est grand, plus la densité est importante. En France, la densité moyenne des réseaux est autour de 8MWh/an [CER 2014], un chiffre en baisse depuis plusieurs années, les zones les plus denses étant déjà raccordées.

Pour les réseaux de petites tailles qui alimentent quelques bâtiments seulement, un îlot ou un quartier, on parle de micro-réseaux ou de boucles d'eau chaude. Ils sont alimentés par des énergies locales, souvent renouvelables ou de récupération. Ces systèmes sont de plus en plus préconisés depuis le début du XXI^{ème} siècle. Pour Coutard, la raison principale est l'intégration de la problématique environnementale dans les projets énergétiques [COU 2010]. Dans ses recherches, il explique que les macro-systèmes deviennent obsolètes et ont des implications environnementales négatives à long terme. Cela conduit à préférer ces systèmes énergétiques alternatifs, de plus petites tailles les « soft energy paths » de AB. Lovins [GLE 2003].

Enfin, le régime de température d'un réseau de chaleur est un élément clé pour le définir. Il décrit la température aller et retour du réseau. Historiquement, les réseaux fonctionnaient à hautes températures (200°C pour l'aller, sous forme de vapeur). Grâce notamment à l'évolution des matériaux des canalisations et à la meilleure isolation des bâtiments, des réseaux récents fonctionnent à 60/45°C. Pour des raisons sanitaires, la livraison de chaleur pour l'ECS doit se faire à une température minimale d'environ 60°C. Des micro-réseaux fonctionnent tout de même à très basses températures, entre 15 et 35°C pour la température aller. Ce niveau de température est trop faible pour répondre à des besoins en chauffage et ECS mais des pompes à chaleur, placés en pied d'immeubles, rehaussent cette température avant consommation. Dans la même étude qui classe les énergies fatales par température, l'IEA a proposé une catégorisation des réseaux de chaleur par rapport à leurs températures aller [IEA 2014]. Un réseau de chaleur est considéré basse température en dessous de 70°C, moyenne température entre 70 et 100°C et haute température au dessus de 100°C. La 4^{ème} génération de réseaux de chaleur présentée par Lund [LUN 2014] fonctionne à basse température, sous les 70°C, ce qui lui permet d'avoir une meilleure efficacité énergétique (moins de pertes en distribution notamment) que les générations précédentes.

L'abaissement des températures est un enjeu crucial pour les réseaux de chaleur, mais ce progrès n'est possible que sur des constructions neuves ou rénovées. En effet, les bâtiments anciens, qui composent une part très majoritaire dans le parc de bâtiments en zone urbaine, ne sont pas adaptés au passage basse température car leur besoins en chaleur sont trop importants.

3.2. Comptabilité entre réseaux et énergies fatales

A partir de la catégorisation des énergies fatales proposée dans cet article [2.2 Catégorisation des sources de chaleur fatale], nous pouvons y associer les réseaux de chaleur compatibles.

3.2.1. Les sources « périurbaines »

La première catégorie d'énergie fatale correspond aux sources périurbaines, à hautes températures et avec un potentiel énergétique pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de GWh/an. La chaleur récupérée provient de procédés industriels.

Aujourd'hui en France, les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) ou usines de valorisation énergétique (UVE) sont les fournisseurs quasi-exclusifs de chaleur fatale industrielle. La chaleur récupérée est sous forme de vapeur, à plus de 200°C, elle peut donc être valorisée dans des réseaux de chaleur à haute température, sous forme de vapeur (ex : CPCU, réseau de chaleur de la Ville de Paris) ou liquide (Créteil, Brest, etc.). Ces usines sont souvent localisées à la périphérie des villes, à quelques centaines de mètres de zones denses et répondent à une grande part des besoins thermiques.

La récupération de chaleur sur une usine de sidérurgie pour le réseau de chaleur de Dunkerque est un autre exemple de valorisation d'une source périurbaine. 60% du réseau de chaleur est alimenté par cette source, soit plus de 80 GWh/an. Lors du processus de transformation du minerai de fer en aggloméré, les températures de fonctionnement sont supérieures à 400°C. Une hotte aspire cette chaleur et chauffe l'eau du réseau de chaleur, à haute température. Là encore, il s'agit d'un réseau de chaleur de grande échelle, une ville. Il mesure 34 km et dessert près de 13 000 équivalents-logements, de tout type, bâtiments anciens compris [VIA 2015].

Le potentiel des sources périurbaines est important. Du fait des caractéristiques techniques de ces sources (haute température, production stable), la compatibilité avec des réseaux de chaleur n'est pas un frein. La difficulté se situe plus généralement au niveau de la distance entre l'industrie et les zones urbaines denses, qui peuvent être longues, ce qui rend le projet coûteux. L'autre limite est contractuelle entre le producteur de chaleur fatale et l'opérateur d'un réseau. La pérennité de la ressource dépend de l'activité industrielle qui peut fluctuer au fil des ans, ce qui pose problème pour l'opérateur du réseau qui répond à une demande sur le long terme, avec des temps de retour sur investissement qui peuvent être importants.

3.2.2. Les sources « urbaines »

La seconde catégorie d'énergie fatale est celle des sources urbaines, à basse température comme la chaleur provenant des eaux usées, de datacenter (seulement ceux implantés en ville), de cuisines collectives, ou encore de blanchisseries d'hôpitaux. Le retour d'expérience sur ces sources est plus limité, la valorisation de ces ressources étant assez nouvelle. Seuls quelques réseaux de chaleur valorisent la chaleur issue des eaux usées.

Depuis 2011, un écoquartier à Nanterre (Ile-de-France) récupère de la chaleur du réseau d'assainissement qui passe à moins de 200m. Ce dernier transporte les eaux usées déversées par les habitants d'autres quartiers de la ville vers une station d'épuration. Les calories de ces eaux usées servent à préchauffer l'eau du réseau de chaleur de l'écoquartier. Des pompes à chaleur, avec un apport électrique, augmentent la température de l'eau à 65°C pour correspondre aux besoins de l'écoquartier. Le réseau de chaleur est alimenté à 40% par la chaleur des usées. Le reste provient d'un puits géothermique et de chaudières à gaz. Il mesure 800m, pour une distribution d'énergie annuelle de 4500 MWh [CER 2012]. D'autres montages de ce type existent en France (écoquartier Cap Azur) et dans le monde (Sandvika en Norvège, Vancouver au Canada, Stockholm en Suède) avec des contextes similaires, c'est-à-dire l'alimentation d'écoquartiers neufs et faiblement consommateurs d'énergie. Les réseaux de chaleur de ces projets sont donc basses températures ou de simples boucles d'eau chaude (c'est-à-dire des réseaux très basses températures avec des pompes à chaleur pour chaque immeuble raccordé).

La valorisation de la chaleur issue des datacenter dans des réseaux de chaleur rencontre les mêmes limites que pour les eaux usées. Les températures de fonctionnement sont plus élevées mais des pompes à chaleur sont nécessaires pour parvenir aux températures d'usage. Un datacenter en Ile-de-France vend sa chaleur fatale à l'opérateur d'un réseau de chaleur qui alimente une piscine et des bureaux en chauffage. La quantité d'énergie récupérable est potentiellement plus conséquente, mais la question de la pérennité se pose sur cette ressource. Le secteur du stockage et traitement des données est en pleine mutation et les gestionnaires de datacenter ne s'engagent pas à rester sur un territoire sur de longues périodes.

En prenant un exemple réel pour quatre sources fatales, le Tableau 2 synthétise les observations faites sur les caractéristiques des réseaux de chaleur qui les valorisent. Les ordres de grandeur permettent de mettre en

évidence la différence entre les réseaux qui peuvent accueillir les deux familles de chaleur fatale précédemment décrites.

Tableau 2 Caractéristiques des réseaux de chaleur valorisant des sources fatales de chaleur

Caractéristiques du réseau de chaleur	Sources « périurbaines »		Sources urbaines	
	UIOM (Rennes)	Usine sidérurgique (Dunkerque)	Datacenter (Val d'Europe)	Eaux usées (Nanterre Sainte Genesève)
Taille	18,8 km	34 km	4 km	800 m
MWh livrés	131 156 MWh (87% par l'UIOM)	136 778 MWh (60 % par l'usine sidérurgique)	Jusqu'à 26 000 MWh (100% datacenter)	4 500 MWh (40% par les eaux usées)
Températures	110°C	110°C	55°C	65°C
Echelle urbaine	Grande ville	Grande ville	Quelques bâtiments	Ecoquartier

Les réseaux de chaleur pouvant valoriser les sources "périurbaines" sont ceux qui composent déjà le parc de chauffage urbain en France. La quantité d'énergie valorisable issue de ces sources est très importante et permet de répondre aux besoins thermiques de nombreux bâtiments, neufs comme anciens, sans changer les systèmes de distribution. La distance de ces industries avec les zones urbaines, allant jusqu'à plusieurs kilomètres, est le premier frein à cette valorisation. Les pertes de distribution et les coûts pour faire parvenir la chaleur aux points de consommation sont des obstacles importants. De plus, la pérennité des industries sur le long terme (20-30 ans) est regardée par les opérateurs de réseaux.

La valorisation des sources urbaines de chaleur fatale n'est possible qu'avec les nouvelles générations de réseaux de chaleur. Ces derniers, à basses températures, disposent de matériaux isolants qui limitent les pertes de distribution. Les bâtiments raccordés à ce type de réseaux sont neufs ou rénovés, ils possèdent donc des performances énergétiques supérieures et consomment moins de chauffage. Ces systèmes sont également de plus petites tailles, et valorisent plus d'énergies locales, renouvelables ou de récupération. L'apport de pompes à chaleur est souvent nécessaire, ce qui induit une consommation électrique plus importante. En plus de coûts importants, l'intégration de sources urbaines de chaleur fatale dans de tels systèmes est donc dépendante de conditions techniques (bâtiments neufs et réseaux de chaleur basse température à proximité) parfois difficiles à réunir.

4. Conclusion

Le potentiel énergétique des sources fatales de chaleur n'est pas négligeable. Plusieurs études prospectives, à diverses échelles, ont montré qu'une grande quantité de chaleur était aujourd'hui non valorisée. Comme l'explique Brueckner [BRU 2014], le potentiel théorique estimé ne se transforme pas forcément en réalisations. En effet, de nombreuses limites techniques et économiques peuvent freiner la valorisation de ces énergies, notamment dans le cadre de leur intégration à des réseaux de chaleur. En catégorisant les sources d'énergies fatales et en analysant les réseaux de chaleur qui peuvent les valoriser, des freins techniques et contractuels différents sont perceptibles en fonction de la source étudiée.

Les sources « périurbaines », aux potentiels plus importants et températures compatibles avec les réseaux actuels sont souvent situées trop loin des zones urbaines, ce qui implique des coûts de raccordement élevés. Les sources « urbaines » ont un potentiel énergétique moins grand et s'intègrent dans un contexte particulier. Ils répondent à de faibles besoins énergétiques dans des quartiers neufs, aux bâtiments déjà performants énergétiquement. Les retours d'expérience sur les premiers montages de ce type ont montré que, même quand les conditions techniques sont réunies, l'intégration de sources fatales de chaleur n'est possible que si la solution est pensée en amont du projet d'aménagement.

Enfin, la question de la pérennité des sources fatales de chaleur se pose pour presque toutes les sources de chaleur fatale. Les opérateurs gèrent les réseaux de chaleur sur des périodes 20 à 30 ans et doivent pouvoir compter sur une ressource fiable dans le temps. Or la quantité d'énergie récupérable dépend aussi des activités génératrices de chaleur fatale, activités qui peuvent fluctuer sur de telles périodes.

La valorisation de sources fatales de chaleur via des réseaux de chaleur dépend donc de nombreux paramètres, à la fois techniques, organisationnels et temporels. Le potentiel dépend des ressources du territoire et de la stratégie énergétique qu'elle élabore. La rénovation des bâtiments ou le développement d'autres énergies renouvelables locales peuvent être des solutions plus adaptées pour le développement de l'efficacité énergétique d'un territoire. L'intégration de ressources de chaleur fatale s'inscrit donc dans une réflexion plus large sur le mix énergétique du territoire et l'évolution de ses besoins.

5. Bibliographie

- [ADE 2014] ADEME. «Les déchets en chiffres_2014.» 2014.
- [ALE 2013] ALEC Plaine Commune. "Les data centers sur Plaine Commune" 2013.
- [BRU 2014] Brueckner S., Miró. L., Cabeza L.F., Laevemann E. «Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, 2014: 164–171.
- [BUJ 2015] Bujak JW. «Production of waste energy and heat in hospital facilities.» *Energy*, 2015: 350-362.
- [CER 2012] CEREMA. *Ecoquartier Centre Sainte-Geneviève - Nanterre (Hauts-de-Seine)* <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/ecoquartier-centre-sainte-genevieve-nanterre-hauts-de-seine>
- [CER 2014] CEREMA. *Densité thermique - réseaux de chaleur et territoires* <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/densite-thermique>.
- [CHI 2016] Chiche S., Goumba A., Bonneau P., Guo X., Colombert M. «Recov'Heat: Outil d'estimation du potentiel de sources de chaleur fatale en milieu urbain.» *Congrès Français de Thermique*. Toulouse, Juin 2016. *A paraître*
- [CON 2012] Connolly, David, Brian Vad Mathiesen, Poul Alberg Østergaard, Bernd Møller, et Nielsen. «Heat Roadmap Europe 1.» 2012.
- [COU 2010] Coutard, Olivier. «Services Urbains : la fin des grands réseaux.» Dans *Ecologies Urbaines*, de Jean Pierre Levy Olivier Coutard. 2010.
- [EBR 2014] Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S. «A review of datacenter cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014: 622-638.
- [FOR 2016] Forman C., Muritala I.K., Pardemann R., Meyer B. «Estimating the global waste heat potential.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016: 1568-1579.
- [GLE 2003] Gleick, Peter H. «Global Fresh water Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century.» *Science*, vol. 302, 2003: 1524-1528.
- [HAM 2014] Hammond G.P., Norman J.B. «Heat recovery opportunities in UK industry.» *Applied Energy Volume 116*, 2014: 387–397.
- [HEP 2014] Hepbasli A., Biyik E., Ekren O., Gunerhan H., Araz M. «A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems.» *Energy Conversion and Management* 88, 2014: 700-722.
- [IEA 2014] IEA; FVB Energy. «Economic and Design Optimization in Integrating Renewable Energy and Waste Heat with District Energy Systems.» 2014.
- [LEG 2015] Legifrance. *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte*. 17 Août 2015. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385&categorieLien=id>
- [LUN 2010] Lund H., Möller B., Mathiesen B.V., Dyrelund A. «The role of district heating in future renewable energy systems.» *Energy Volume 35*, 2010: 1381–1390.
- [LUN 2014] Lund, Henrik, et al. «4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems.» *Energy Vol. 68*, 2014: 1-11.
- [ONY 2012] Onyango J., McGeough C., Hadjri K. «Waste to Worth: Evaluation of potential waste heat recovery system within Commercial Kitchens in Northern Ireland.» *Journal of Green Building*, 2012: 62-69.
- [PEL 2004] Pellegrino J., Quinn J., Thekdi A., Justiniano M. «Energy Use, Loss and Opportunities Analysis for U.S Manufacturing and Mining.» 2004.
- [SNC, 2014] SNCU. «Enquête annuelle sur les réseaux de chaleur et de froid.» 2014.
- [SON 2016] Song J., Yang W., Li Z., Higano Y., Wang X. «Discovering the energy, economic and environmental potentials of urban wastes : An input-output model for a metropolis case.» *Energy Conversion and Management* 114, 2016: 168 - 179.
- [VIA 2015] Via Sèva. *L'annuaire des réseaux de chaleur et de froid*. 2015.
- [YES 2015] Yeşiller N., Hanson J.L., Yee E.H. «Waste heat generation: A comprehensive review.» *Waste Management Volume 42*, 2015: 166–179.