



HAL
open science

Intégration de sources urbaines de chaleur fatale au sein d'un réseau de chaleur

Samuel Chiche

► **To cite this version:**

Samuel Chiche. Intégration de sources urbaines de chaleur fatale au sein d'un réseau de chaleur. Génie civil. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC2007 . tel-02880929

HAL Id: tel-02880929

<https://theses.hal.science/tel-02880929>

Submitted on 25 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ECOLE DOCTORALE « VILLE, TRANSPORTS ET TERRITOIRES »

Thèse de doctorat d'Université Paris-Est

Champ disciplinaire : Génie Urbain

Présenté par

Samuel Chiche

Intégration de sources urbaines de chaleur fatale dans les réseaux de chaleur

Analyse du potentiel énergétique de sources urbaines de chaleur fatale et conditions de mise en œuvre de projets de valorisation de ces sources

A soutenir le 10 Janvier 2020

Jury :

Christian Inard, Professeur des Universités, Université de La Rochelle, *Rapporteur*

Stéphane Ginestet, Professeur des Universités, INSA Toulouse, *Rapporteur*

Sigrid Reiter, Professeure des Universités, Université de Liège, Belgique, *Examineur*

Patricia Bonneau, Ingénieure de recherche, EDF R&D, *Examineur*

Didier Roncière, Ingénieur responsable innovation, Engie Réseaux, *Invité*

Youssef Diab, Professeur des Universités, Lab'Urba, Université Paris-Est- Marne la Vallée,
Directeur de thèse

Morgane Colombert, Chercheure, Efficacity et Lab'Urba, *Co-encadrant de thèse*

*A tous ceux
qui m'inspirent*

*« Il est toujours stupide de donner des conseils,
mais en donner de bons est absolument fatal. »*

Oscar Wilde

REMERCIEMENTS

Au-delà des travaux de recherche et de rédaction du manuscrit, cette thèse fut une grande aventure, partagée avec de nombreuses personnes que je souhaite remercier.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement Christian Inard, Stéphane Ginestet et Sigrid Reiter, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail en intégrant mon jury de thèse.

Evidemment, je remercie Youssef Diab, mon directeur de thèse. Ses conseils m'ont permis de me poser les bonnes questions. Merci de m'avoir fait découvrir le génie urbain ! Un grand merci à Morgane Colombert pour l'encadrement de ces travaux depuis si longtemps. Merci pour tous ces détails qui n'en sont pas : les tableaux de synthèse, la méthode, la rigueur sur le fond et la forme.

Je remercie particulièrement Didier Roncière, tuteur d'Engie Réseaux sur cette thèse CIFRE. Cette collaboration n'a pas toujours été simple, mais je n'oublierai pas nos nombreuses discussions et le regard opérationnel porté sur ce travail. Merci également aux autres collaborateurs d'Engie Réseaux et de Cylergie, particulièrement ceux qui m'ont aidé à concrétiser ce travail, Fabrice Renaude et Olivier Racle.

Merci à l'EIVP. En 5 ans avec vous, j'ai pris les conseils des anciens (Martin, Charlotte, Etienne, Alberto, Angel) et je suis devenu conseiller pour les nouveaux (Marie, Anas, Victor). Merci pour les bons moments, les bonnes soirées, le partage au quotidien même dans les moments plus rudes. Merci spécialement à Margo et Margo qui ont apporté du bonheur sur une période trop courte. Merci à Joffrey pour cette belle amitié née à l'EIVP.

Merci également à Pascale, mon dictionnaire mais surtout un de mes plus grands soutiens au moment de la rédaction de ce manuscrit. Il me tarde d'assister à ta soutenance. Merci à ma partenaire de rédaction Constance, on aurait pu soutenir ensemble mais tu as été trop rapide pour moi.

J'ai eu la chance de partager mon temps de thèse entre l'EIVP et Efficacy, que je souhaite remercier particulièrement pour son accueil et cette histoire que nous continuons de vivre. Merci à Patricia Bonneau pour son intégration au tout début d'Efficacy, qui m'a suivi jusqu'au bout en participant au jury de thèse. Merci aux légendes du bureau, Romain et Arnold, et aux non-légendes, Nico D., Nico H, Adèle, Manu, Sophy et tous les autres pour les échanges, les bons moments du quotidien à Efficacy et surtout en dehors !

Enfin, je remercie tous mes proches pour leurs soutiens infaillibles du début à la fin ! Merci aux colocs pour l'amour quotidien, merci à la Team Tchérattes de m'avoir suivi toutes ces années dans ces folles courses, merci à la Team Red Star de croire avec moi en cet idéal, merci à tous les Mystiques pour leur amour depuis 15 ans et plus. Evidemment, je remercie Nico à part, parce qu'il est à part.

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes parents pour tout ce qu'ils m'ont apporté. Un grand merci pour leur soutien, tout comme celui de mes deux frères, mes plus grands supporters.

Je termine ces remerciements avec Rima, dont le soutien, la patience et l'amour ont rendu possible la finalisation de ce travail. Merci du fond du cœur.

Les réseaux de chaleur sont considérés aujourd'hui comme des systèmes clés pour accompagner la transition énergétique des milieux urbains. Leur principal atout est de pouvoir valoriser des sources locales d'énergie renouvelable et de récupération. Les sources de chaleur fatale (ou de récupération) sont encore peu exploitées dans ces réseaux alors qu'il existe un gisement important, notamment en milieu urbain, soit très proche des bâtiments consommateurs.

Ces sources urbaines de chaleur fatale (eaux usées, datacenter, blanchisseries, entrepôts frigorifiques) sont les objets de recherche de cette thèse. Des méthodes ont été développées pour évaluer finement leur potentiel énergétique, sachant que toutes ces sources présentent des caractéristiques techniques différentes (température et variabilité notamment). Ces méthodes ont été intégrées à un outil de simulation, appelé Recov'Heat, qui calcule des indicateurs techniques, économiques et environnementaux permettant de juger la pertinence quant à la valorisation d'une source urbaine de chaleur fatale. Le modèle Recov'Heat a été testé sur divers études de cas et obtient des résultats proches de la réalité malgré une tendance à surestimer l'énergie réellement récupérée. Des simplifications techniques dans le modèle et le calcul du potentiel énergétique maximal justifient ces écarts.

La valorisation d'une source d'énergie fatale dans un réseau de chaleur ne dépend pas que de paramètres technico-économiques, mais également de plusieurs conditions liées au contexte des territoires, qui peuvent remettre en cause la mise en œuvre de tels projets. Plusieurs analyses de cas montrent l'influence du portage des collectivités territoriales sur l'aboutissement de ces projets. Elles ont un rôle décisif pour impulser la concertation entre une multitude d'acteurs concernés par ces projets et appréhender les complexités contractuelles entre ces acteurs.

Mots clés : réseaux de chaleur ; sources de chaleur fatale ; sources urbaines de chaleur fatale ; simulation énergétique ; stratégies énergétiques territoriales ; planification urbaine

ABSTRACT

District heating systems are considered as key tools to contribute to the energy transition in urban areas through their ability to promote waste and renewable energies. Waste heat sources (also named excess heat) are still under-exploited in district heating systems although there is significant potential, especially in urban areas.

Waste heat sources located near or in dense urban areas (wastewater, datacenters, laundries, etc.) are the research topic of this thesis. Methods have been developed to precisely evaluate their energy potential, knowing that all these sources have different technical characteristics (temperature and variability in particular). These methods have been integrated into a simulation tool, named Recov'Heat. It calculates technical, economic and environmental indicators to assess the relevance of an urban heat source. The Recov'Heat model has been tested on various case studies and obtains results close to reality despite a tendency to overestimate the energy recovered. Technical simplifications in the model and the calculation of the maximum energy potential justify these differences.

The viability of integrating a waste heat source in a district heating system depends not only on technical and economic parameters, but also on several conditions linked to the local context, which may affect the implementation of such projects. Several case studies show the influence of local authorities' support on the success of these projects. They have a decisive role to play in stimulating consultation between a multitude of actors involved in these projects and to understand the contractual complexities between them.

Keywords: district heating; waste heat sources; urban waste heat sources; energy simulation; territorial energy strategies; urban planning

Introduction et problématique	27
PARTIE 1 : Réseaux de chaleur et sources de chaleur fatale : description des objets de la recherche	33
Chapitre 1 : Réseaux de chaleur : fonctionnement, état des lieux et évolutions	37
1.1. Définitions	38
1.2. Historique	39
1.3. Fonctionnement d'un réseau de chaleur	41
1.4. Caractérisation des réseaux de chaleur	43
1.5. Coûts et facturation des réseaux de chaleur.....	54
Chapitre 2 : Etat des lieux des réseaux de chaleur et place dans les stratégies énergétiques et la planification urbaine	61
2.1. Etat des lieux des réseaux de chaleur	62
2.2. Place des réseaux de chaleur dans les politiques énergétiques et la planification urbaine en France 70	
2.3. Gouvernance des réseaux de chaleur et accompagnement pour l'aide à la décision.....	76
Chapitre 3 : Description et analyse des sources de chaleur fatale	85
3.1. L'énergie fatale : définition et potentiel	85
3.2. L'énergie fatale et la transition énergétique.....	89
3.3. Description des sources urbaines de chaleur fatale étudiées.....	92
3.4. Comparaison et catégorisation des sources fatales.....	103
 PARTIE 2 : Estimation du potentiel énergétique des sources de chaleur fatale et compatibilité avec les réseaux de chaleur	117
Chapitre 4 : L'approche et le modèle Recov'Heat	121
4.1. Description du modèle et présentation des modules.....	122
4.2. Environnement de développement de l'outil Recov'Heat.....	124
4.3. Module de détermination des besoins thermiques d'un quartier.....	125
4.4. Module de détermination des potentiels énergétiques d'une source fatale et dimensionnement des technologies de valorisation	128
4.5. Module de résultats	152
Chapitre 5 : Validation du modèle Recov'Heat et cas d'étude	159
5.1. Validation du modèle Recov'Heat.....	160
5.2. Etude de cas : récupération de chaleur sur entrepôt frigorifique	166

Chapitre 6 : Conditions d'intégration de sources fatales dans des réseaux de chaleur	177
6.1. Compatibilité en températures et architectures de réseaux de chaleur adaptés	178
6.2. Performances des pompes à chaleur	188
PARTIE 3 : De l'objet technique aux conditions réelles de mise en œuvre de projets de valorisation de sources urbaines de chaleur fatale	197
Chapitre 7 : Influence de la gouvernance et de la concertation entre acteurs sur la faisabilité des projets de valorisation de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur	199
7.1. Les acteurs, leurs rôles et leurs intérêts vis-à-vis du développement d'un réseau de chaleur	200
7.2. Un nouvel acteur : le propriétaire d'une source de chaleur fatale	203
7.3. Illustration de l'importance du jeu d'acteur	207
Chapitre 8 : Perspectives de recherche	223
8.1. La prise en compte de l'énergie fatale dans les stratégies énergétiques territoriales	224
8.2. Analyse multicritère pour l'aide à la décision	233
Conclusions et ouvertures.....	243
Bibliographie.....	247
Annexes	263

TABLE DES MATIERES

Remerciements	3
Résumé.....	7
Abstract	8
Sommaire court.....	11
Table des Matières	13
Table des Annexes.....	17
Table des Figures.....	18
Table des Tableaux.....	21
Acronymes.....	23
Préambule	25
Introduction et problématique	27
PARTIE 1 : Réseaux de chaleur et sources de chaleur fatale : description des objets de la recherche	33
Chapitre 1 : Réseaux de chaleur : fonctionnement, état des lieux et évolutions	37
1.1. Définitions	38
1.2. Historique	39
1.3. Fonctionnement d'un réseau de chaleur	41
1.4. Caractérisation des réseaux de chaleur	43
1.4.1. Le fluide caloporteur	43
1.4.2. La densité.....	44
1.4.3. Les sources de chaleur.....	45
1.4.4. Longueur des réseaux de chaleur.....	47
1.4.5. Températures des réseaux de chaleur : évolution et enjeux.....	48
1.4.6. Acteurs et modes de gestion des réseaux de chaleur.....	51
1.5. Coûts et facturation des réseaux de chaleur.....	54
1.6. Conclusion du chapitre 1.....	57
Chapitre 2 : Etat des lieux des réseaux de chaleur et place dans les stratégies énergétiques et la planification urbaine	61
2.1. Etat des lieux des réseaux de chaleur	62
2.1.1. Situation dans le Monde, en Europe et en France	62
2.1.2. Nouvelle génération de réseaux de chaleur.....	65

2.1.3.	Avantages des réseaux de chaleur et inconvénients	69
2.2.	Place des réseaux de chaleur dans les politiques énergétiques et la planification urbaine en France	70
2.2.1.	Déclinaison des objectifs de développement des réseaux de chaleur	70
2.2.2.	Prise en compte des réseaux de chaleur dans la planification urbaine	71
2.3.	Gouvernance des réseaux de chaleur et accompagnement pour l'aide à la décision	76
2.4.	Conclusion du chapitre 2	81
Chapitre 3 :	Description et analyse des sources de chaleur fatale	85
3.1.	L'énergie fatale : définition et potentiel	85
3.1.1.	Définition	86
3.1.2.	Potentiel énergétique des sources de chaleur fatale	86
3.2.	L'énergie fatale et la transition énergétique	89
3.2.1.	Objectifs liés à l'énergie fatale	89
3.2.2.	Exemples de réalisations	90
3.3.	Description des sources urbaines de chaleur fatale étudiées	92
3.3.1.	Critères de description	92
3.3.2.	Focus sur les sources étudiées	94
3.4.	Comparaison et catégorisation des sources fatales	103
3.4.1.	Comparaison des sources fatales	103
3.4.2.	Catégorisation des sources fatales	104
3.5.	Conclusion du chapitre 3	109
Conclusion de la partie 1		113
 PARTIE 2 : Estimation du potentiel énergétique des sources de chaleur fatale et compatibilité avec les réseaux de chaleur		117
 Chapitre 4 : L'approche et le modèle Recov'Heat		121
4.1.	Description du modèle et présentation des modules	122
4.2.	Environnement de développement de l'outil Recov'Heat	124
4.3.	Module de détermination des besoins thermiques d'un quartier	125
4.4.	Module de détermination des potentiels énergétiques d'une source fatale et dimensionnement des technologies de valorisation	128
4.4.1.	Données clés pour caractériser une source	128
4.4.2.	Calcul du potentiel énergétique : l'énergie extractible	130
4.4.2.1.	Energie extractible sur les eaux usées	131
4.4.2.2.	Energie extractible sur les blanchisseries industrielles	135
4.4.2.3.	Energie extractible sur les data center	137

4.4.2.4.	Energie extractible sur les entrepôts frigorifiques	139
4.4.2.5.	Energie extractible sur les incinérateurs de déchets d’ordures ménagères	142
4.4.2.6.	Energie extractible sur les verreries	144
4.4.3.	Dimensionnement des technologies de valorisation	146
4.4.3.1.	Les échangeurs de chaleur	147
4.4.3.2.	Remontée du niveau thermique	149
4.4.4.	De l’énergie valorisable à l’énergie distribuable	151
4.5.	Module de résultats	152
4.5.1.	Résultats énergétiques	152
4.5.2.	Résultats économiques	153
4.5.3.	Résultats environnementaux	154
4.6.	Conclusion du chapitre 4	157
Chapitre 5 : Validation du modèle Recov’Heat et cas d’étude		159
5.1.	Validation du modèle Recov’Heat	160
5.1.1.	Validation du modèle sur les UVE	160
5.1.2.	Validation du modèle sur eaux usées et data center	162
5.2.	Etude de cas : récupération de chaleur sur entrepôt frigorifique	166
5.2.1.	Données d’entrée	167
5.2.2.	Résultats de la simulation	170
5.2.3.	Conclusion sur l’étude de cas	174
5.3.	Conclusion du chapitre 5	175
Chapitre 6 : Conditions d’intégration de sources fatales dans des réseaux de chaleur		177
6.1.	Compatibilité en températures et architectures de réseaux de chaleur adaptés	178
6.1.1.	Intégration dans le retour de la boucle et influence des régimes de température	178
6.1.2.	Architectures de réseaux de chaleur adaptées à l’intégration de sources urbaines d’énergie fatale	184
6.2.	Performances des pompes à chaleur	188
6.2.1.	Consommation des auxiliaires	188
6.2.2.	Fonctionnement à charge partielle	189
6.3.	Conclusion du chapitre 6	191
Conclusion de la partie 2		193

PARTIE 3 : De l'objet technique aux conditions réelles de mise en œuvre de projets de valorisation de sources urbaines de chaleur fatale	197
Chapitre 7 : Influence de la gouvernance et de la concertation entre acteurs sur la faisabilité des projets de valorisation de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur	199
7.1. Les acteurs, leurs rôles et leurs intérêts vis-à-vis du développement d'un réseau de chaleur	200
7.2. Un nouvel acteur : le propriétaire d'une source de chaleur fatale	203
7.3. Illustration de l'importance du jeu d'acteur	207
7.3.1. Cas de la ville de Dunkerque	208
7.3.2. Cas de l'écoquartier Sainte Geneviève à Nanterre	210
7.3.3. Cas de la ZAC La Saulaie à Oullins (Grand Lyon).....	212
7.3.4. Cas de l'écoquartier Ginko à Bordeaux	214
7.3.5. Conclusions sur les études de cas	216
7.4. Conclusion du chapitre 7	221
Chapitre 8 : Perspectives de recherche	223
8.1. La prise en compte de l'énergie fatale dans les stratégies énergétiques territoriales	224
8.1.1. Echelle nationale	226
8.1.2. Echelle régionale	226
8.1.3. Echelle locale	228
8.2. Analyse multicritère pour l'aide à la décision	233
Conclusion de la partie 3	239
Conclusions et ouvertures	243
Bibliographie.....	247
Annexes	263

TABLE DES ANNEXES

ANNEXES PARTIE 1

ANNEXE 1.1	Indicateurs majeurs et complémentaires de la qualité d'un réseau de chaleur.....	264
ANNEXE 1.2	Description de la source fatale « eaux usées »	265
ANNEXE 1.3	Description de la source fatale « incinérateurs de déchets »	271
ANNEXE 1.4	Description de la source « data center ».....	278
ANNEXE 1.5	Description de la source fatale « blanchisseries industrielles ».....	286
ANNEXE 1.6	Description de la source fatale « verreries ».....	294
ANNEXE 1.7	Description de la source fatale « entrepôts frigorifiques ».....	299
ANNEXE 1.8	Calcul de l'énergie fatale récupérable au condenseur.....	304

ANNEXES PARTIE 2

ANNEXE 2.1	Zones Climatiques	305
ANNEXE 2.2	Pertes thermique UVE.....	306
ANNEXE 2.3	Détermination du coefficient de déperdition thermique	307
ANNEXE 2.4	Bibliothèque de données techniques, économiques et environnementales.....	308
ANNEXE 2.5	Analyses de sensibilité.....	309
ANNEXE 2.6	La thermofrigopompe	312

ANNEXES PARTIE 3

ANNEXE 3.1	Tableau récapitulatif des avantages/inconvénients du développement d'un réseau de chaleur pour les différents acteurs d'un aménagement (AMORCE & ADEME, 2011)	314
ANNEXE 3.2	Résumé des résultats du projet ReUseHeat, issus des travaux « analyse du marché et des acteurs » (Leonte, 2019)	315

TABLE DES FIGURES

Figure 1-1 Schéma de principe d'un réseau de chaleur (CEREMA, 2016a)	38
Figure 1-2 Photos du développement de la CPCU à Paris (CPCU, 2015).....	39
Figure 1-3 Schéma de principe d'une sous-station (source : auteur)	42
Figure 1-4 Exemple d'un schéma de sous-station (source : auteur)	42
Figure 1-5 Tracé du réseau de chaleur "Rennes Nord" avec en rouge la section haute pression et en bleu la section basse pression (CEREMA 2012).....	44
Figure 1-6 Illustration du concept de 4ème génération de réseaux de chaleur, en comparaison avec les trois générations précédentes (Lund et al. 2014).....	49
Figure 1-7 Températures de sources de chaleur renouvelables et de récupération (Spurr et al. 2014)	51
Figure 1-8 Acteurs principaux des réseaux de chaleur et interactions (Via Seva and ADEME 2009) ...	52
Figure 1-9 Mode de gestion des réseaux de chaleur (en nombre de réseaux à gauche et en énergie finale en GWh/an à droite) (SNCU 2014)	53
Figure 1-10 Exemple de coûts d'investissement de réseaux de chaleur (Lefrère 2014).....	54
Figure 1-11 Part variables et fixes du coût global par mode de chauffage (en 2013 pour des bâtiments types RT 2005, (AMORCE 2016a)	55
Figure 2-1 Pourcentage de citoyens raccordés à un réseau de chaleur en Europe en 2015 (Données Euroheat & Power).....	62
Figure 2-2 Bouquet énergétique des réseaux de chaleur français (SNCU, 2016)	63
Figure 2-3 Evolution des EnR&R utilisées par les réseaux de chaleur français (SNCU, 2016).....	64
Figure 2-4 Illustration du concept de 4ème Génération de réseaux de chaleur et de froid.....	65
Figure 2-5 Représentation de plusieurs architectures de réseau de distribution de chaleur avec épuisement (Köfinger et al., 2017).....	66
Figure 2-6 Exemple d'un réseau de distribution 3 tubes (source : auteur).....	66
Figure 2-7 Exemple d'architecture d'une boucle d'eau tempérée (source : auteur)	67
Figure 2-8 Articulation des documents de stratégie et de planification des territoires (ADEME 2016b)	72
Figure 2-9 Etapes d'élaboration d'un schéma directeur de réseau de chaleur ou de froid.....	74
Figure 3-1 Types de potentiels (Brückner et al., 2015)	88
Figure 3-2 Points de récupération de chaleur sur eaux usées (source : auteur)	95
Figure 3-3 Schéma de principe d'un système frigorifique (source : auteur).....	97
Figure 3-4 Schéma simplifié du processus du traitement du linge (ADEME, 2017b).....	99
Figure 3-5 Process de fabrication du verre creux (Conseil National de l'Emballage, 2013)	100
Figure 3-6 Potentiel énergétique, température et localisation des sources de chaleur fatale	104
Figure 4-1 Fonctionnement modulaire de l'outil Recov'Heat	122
Figure 4-2 Exemple de profil de consommation d'énergie thermique d'un quartier	126
Figure 4-3 Méthode du calcul de la puissance extractible sur eaux usées	131
Figure 4-4 Schéma de fonctionnement de la récupération de chaleur sur eaux usées (source : auteur)	131
Figure 4-5 Exemples de profils de température et de fractions horaires de débit de réseaux d'assainissement d'eaux usées.....	132
Figure 4-6 Exemple d'un résultat de simulation de Recov'Heat : Puissance extractible (kW) sur une année.....	133
Figure 4-7 Zoom de la Figure 4-6 sur une semaine (du mois de Février).....	133
Figure 4-8 Méthode de calcul de la puissance extractible sur blanchisserie industrielle.....	135

Figure 4-9 Relevé de débits sur blanchisseries industrielles sur une journée de 15 heures	136
Figure 4-10 Méthode de calcul de la puissance extractible sur data center	137
Figure 4-11 Méthode de calcul de la puissance extractible sur entrepôt frigorifique.....	139
Figure 4-12 Profils journaliers de consommation électrique d'un entrepôt frigorifique.....	140
Figure 4-13 Méthode de calcul de l'énergie extractible sur UVE	142
Figure 4-14 Méthode de calcul du potentiel énergétique sur une verrerie	144
Figure 4-15 Technologies de valorisation d'énergie fatale (ADEME, 2017c)	146
Figure 4-16 Schéma de principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques et joints (Bourret) et à plaques spiralées (Manificat & Megret, 2012)	147
Figure 4-17 Principe général de fonctionnement DEGRÉS BLEUS.....	148
Figure 4-18 Schéma de fonctionnement d'une PAC (source : auteur).....	149
Figure 4-19 Exemple d'un profil de besoins thermiques et de potentiel d'énergie fatale (ici d'une station d'épuration).....	152
Figure 5-1 Ecart absolu et relatifs entre les simulations de Recov'Heat et la réalité (UVE)	161
Figure 5-2 Vue générale du cas d'étude	167
Figure 5-3 Besoins thermique du quartier sur une année et monotone des besoins	168
Figure 5-4 Hypothèses sur la température de distribution de la chaleur	169
Figure 5-5 Superposition des besoins en puissance et de la puissance fatale consommable sur une année.....	171
Figure 5-6 Monotone des puissances consommables	171
Figure 6-1 Exemple de montage d'une chaufferie de réseau de chaleur (source : auteur).....	179
Figure 6-2 Montage utilisé pour l'étude de l'influence de la température au niveau condenseur sur les performances du système	180
Figure 6-3 Influence de la température au condenseur d'une PAC sur le mix énergétique, la part EnR&R de la solution, les émissions de CO ₂ associées et le coût annuel en énergies primaires	182
Figure 6-4 Influence de la température au condenseur d'une PAC avec limitation du débit	183
Figure 6-5 Réseau de chaleur de la communauté urbaine Grand Poitiers avec deux chaufferies distinctes (Grand Poitiers, 2016)	184
Figure 6-6 Schéma type d'une boucle d'eau tempérée (source : auteur).....	185
Figure 6-7 Fonctionnement en mode froid et chaud d'une PAC réversible (ABC CLIM, 2015).....	185
Figure 6-8 Schéma de fonctionnement d'un réseau de chaleur "hybride"	186
Figure 6-9 Schéma du réseau de chaleur et de froid de Paris Saclay (EPA Paris-Saclay, 2016)	187
Figure 6-10 Points de consommation électrique d'une PAC (source: auteur)	188
Figure 6-11 Facteur de performance d'une PAC en fonction de son taux de charge	189
Figure 6-12 Taux de charge des PAC du cas d'étude du chapitre 5	190
Figure 7-1 Acteurs principaux des réseaux de chaleur et interactions	200
Figure 7-2 Jeu d'acteurs lors d'un projet de développement de réseau de chaleur (AMORCE & ADEME, 2011).....	201
Figure 7-3 Réseau de chaleur et sources de production à Dunkerque (Hampikian, 2017a).....	208
Figure 7-4 réseau de chaleur Sainte Geneviève (Ademe, 2015)	210
Figure 7-5 Programmation de la ZAC de la Saulaie (Grand Lyon, 2017c).....	212
Figure 7-6 Tracé du réseau de chaleur de l'écoquartier GINKO (Engie Cofely, 2011).....	215
Figure 7-7 Degré d'implication de la collectivité territoriale (Menanteau & Blanchard, 2013).....	215
Figure 8-1 Evolution du nombre d'équivalents-logements desservis par les réseaux de chaleur(Fedene & SNCU, 2018b).....	224
Figure 8-2 Résultats d'une étude sur le potentiel de chaleur fatale issu des eaux usées en région PACA (Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2013)	227
Figure 8-3 Processus de décision multicritère (Nafi & Wery, 2010)	234

Figure A-1 Profils annuels de températures d'eaux usées	267
Figure A-2 Exemple de tracés de réseaux d'assainissement.....	268
Figure A-3 Profils journaliers de débits d'eaux usées.....	269
Figure A-4 Schéma de fonctionnement d'une usine d'incinération d'ordures ménagères (Megret et al. 2011).....	271
Figure A-5 Conversion de chaleur fatale en énergie électrique (source : auteur).....	272
Figure A-6 Schéma de fonctionnement d'une chaudière d'UVE (source : auteur).....	274
Figure A-7 UVE et unités urbaines en France métropolitaine (source : auteur).....	275
Figure A-8 Evolution du traitement des déchets municipaux (ADEME, 2016b).....	276
Figure A-9 Evolution de l'incinération de déchets et de la valorisation énergétique selon les chiffres de l'ADEME (ADEME, 2016b).....	276
Figure A-10 Evolution du trafic mondial de données mobiles (Cisco, 2017).....	278
Figure A-11 Répartition des data centers par surface des salles IT (InformationWeek, 2010).....	280
Figure A-12 Schéma de principe du système frigorifique.....	281
Figure A-13 Schémas de différents groupes frigorifiques.....	282
Figure A-14 Consommation électrique d'un data center à Espoo, en Finlande (Wahlroos et al., 2017).....	284
Figure A-15 Stratégies pour des data center passifs (Lal Shrestha et al., 2014).....	285
Figure A-16 Répartition du nombre de blanchisseries du secteur public en fonction de la quantité de linge traité.....	286
Figure A-17 Schéma simplifié du processus du traitement du linge (ADEME, 2017b).....	287
Figure A-18 Schéma de l'étape "lavage" du processus de traitement du linge d'une blanchisserie (EFFICACITY, 2015).....	288
Figure A-19 Schéma du système de récupération de chaleur en interne sur les effluents de lavage (EFFICACITY, 2015).....	289
Figure A-20 Schéma de la diffusion d'air classique dans les séchoirs d'une blanchisserie avec reprise de l'air rejetée par une CTA (EFFICACITY, 2015).....	290
Figure A-21 Blanchisseries localisées en Ile-de-France superposées avec les ZAE (source : auteur).....	291
Figure A-22 Mesure du débit des effluents d'une blanchisserie sur une journée.....	292
Figure A-23 Mesures de débit et de température des effluents d'une blanchisserie sur un mois au pas minutaire.....	293
Figure A-24 Evolution de la production de verre en France - données issues de la Fédération des industries du verre (Fédération des industries du verre, 2012).....	294
Figure A-25 Process de fabrication du verre creux (Conseil National de l'Emballage, 2013).....	295
Figure A-26 Verreries et unités urbaines en France métropolitaine (source : auteur).....	297
Figure A-27 Exemple de verrerie en milieu urbain (ici SAVERGLASS, au Havre).....	297
Figure A-28 Entrepôts frigorifiques localisés en Ile-de-France et superposés avec les ZAE (source : auteur).....	301
Figure A-29 Courbe de charge d'un entrepôt frigorifique sur une année (SOURCE : EFFICACITY).....	302
Figure A-30 Zones climatiques selon la RT 2000 (AIDEE, 2000).....	305
Figure A-31 Abaque de Diarès.....	307
Figure A-32 Effets de la variation de la distance source-besoins sur le taux d'EnR&R et le LCOE.....	309
Figure A-33 Effets de la variation de la température de départ sur le taux d'EnR&R et le LCOE.....	310
Figure A-34 Effets de la variation de la température d'entreposage (chambre froide) sur le taux d'EnR&R et le LCOE.....	311
Figure A-35 Schémas de principe d'une thermofrigopompe (Lemale & Gourmez, 2008).....	312

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Densité de chaleur linéique en France (CEREMA, 2014).....	45
Tableau 1-2 Emissions de CO ₂ associées aux combustibles fossiles (ADEME, 2014a).....	45
Tableau 1-3 Classification en température des réseaux de chaleur	48
Tableau 1-4 Régimes de température des émetteurs de chauffage (données ENGIE)	50
Tableau 1-5 Modes de gestion des réseaux de chaleur (CEREMA, 2014).....	53
Tableau 1-6 Comparatif des systèmes de chauffage en coût global pour trois logements types (AMORCE 2016a).....	56
Tableau 2-1 Récapitulatif des technologies de stockage (AMORCE, 2016b)	67
Tableau 2-2 Avantages et inconvénients des réseaux de chaleur	69
Tableau 2-3 Niveau de prise en compte des réseaux de chaleur dans les documents de planification urbaine après la LTECV (CEREMA, 2017b).....	75
Tableau 2-4 Liste de guides d'accompagnement liés à des actions de transition énergétique sur les territoires urbains et qui abordent les réseaux de chaleur.....	79
Tableau 3-1 Efficacité de la récupération de chaleur en fonction de l'activité industrielle (Persson, 2015).....	87
Tableau 3-2 Description de la source fatale "Eaux usées"	94
Tableau 3-3 Description de la source fatale "UVE"	96
Tableau 3-4 Description de la source fatale "data center"	97
Tableau 3-5 Description de la source fatale "blanchisserie industrielle"	99
Tableau 3-6 Description de la source fatale "verrerie"	101
Tableau 3-7 Description de la source fatale "entrepôts frigorifiques"	102
Tableau 3-8 Comparaison des sources fatales étudiées	103
Tableau 3-9 Catégories de sources de chaleur fatale	104
Tableau 3-10 Caractéristiques de réseaux de chaleur valorisant des sources urbaines de chaleur fatales (exemples)	105
Tableau 4-1 Indicateurs du module de résultats de l'outil Recov'Heat	123
Tableau 4-2 Tranches d'âge des bâtiments.....	125
Tableau 4-3 Hypothèses retenues sur la température de distribution de la chaleur	127
Tableau 4-4 Données dimensionnantes des sources d'énergie fatale.....	128
Tableau 4-5 Données demandées sur l'interface utilisateur de l'outil Recov'Heat	129
Tableau 4-6 Ratios de consommation électrique d'une chambre froide par unité de volume	139
Tableau 4-7 Valeur de l'efficacité frigorifique en fonction de la température d'une chambre froide	141
Tableau 4-8 Part d'énergie dissipée sur les postes majeurs de la fabrication de verre (Woillez, 2015)	145
Tableau 4-9 Récapitulatif des résultats de l'outil Recov'Heat.....	155
Tableau 5-1 Comparaison du modèle Recov'Heat sur dix UVE.....	161
Tableau 5-2 Comparaison du modèle sur deux cas de récupération sur eaux usées	163
Tableau 5-3 Comparaison du modèle sur deux cas de récupération sur data center	164
Tableau 5-4 Surface des bâtiments du cas d'étude	167
Tableau 5-5 Données d'entrée du modèle Recov'Heat.....	169
Tableau 5-6 Indicateurs énergétiques du cas d'étude	170
Tableau 5-7 Indicateurs économiques du cas d'étude.....	172
Tableau 5-8 LCOE de différentes énergies (fossiles et EnR&R) pour le collectif (ADEME, 2016a).....	172
Tableau 5-9 Indicateurs environnementaux du cas d'étude.....	173

Tableau 6-1 Influence de la température au condenseur d'une PAC sur la performance d'un système de récupération de chaleur basse température	181
Tableau 7-1 Pérennité des sources de chaleur fatale étudiées	204
Tableau 7-2 Type d'acteur des sources de chaleur fatale étudiées	205
Tableau 7-3 Conclusions issues de l'analyse des cas d'étude	219
Tableau 8-1 Le cadre réglementaire et les démarches volontaires des études des potentiels (ADEME, 2019).....	225
Tableau 8-2 Prise en compte des sources d'énergie fatale dans les PCAET.....	229
Tableau A-1 Indicateurs de qualité des réseaux de chaleur (AMORCE & ADEME, 2015)	264
Tableau A-2 Description de la source fatale "Eaux usées"	266
Tableau A-3 Description de la source fatale "UVE"	273
Tableau A-4 Critères des différents tiers de data centers (CB Richard Ellis, 2010).....	279
Tableau A-5 Limites d'humidité et de température recommandées dans un data center (ASHRAE, 2016).....	280
Tableau A-6 Description de la source fatale "Data centers"	283
Tableau A-7 Description de la source fatale "Blanchisseries industrielles"	290
Tableau A-8 Ordre de grandeur des consommations énergétiques des fours à régénérateur (Fourment & Fromentin, 2012)	296
Tableau A-9 Description de la source fatale "Verreries"	296
Tableau A-10 Régimes de température des chambres froides d'entrepôts frigorifiques (données issues des rapports du Commissariat Général au Développement Durable (2012) et de l'INRS (INRS, 2010))	299
Tableau A-11 Description de la source fatale "Entrepôts frigorifiques"	300
Tableau A-12 Pertes thermiques lors du processus d'incinération d'une tonne de déchets (Combe & Woillez, 2015).....	306
Tableau A-13 Hypothèses sur la relation entre débit et coefficient de déperdition thermique	307
Tableau A-14 Bibliothèque de données techniques, économiques et environnementales	308
Tableau A-15 Analyse de sensibilité sur la distance entre source de chaleur fatale et bâtiments consommateurs.....	309
Tableau A-16 Analyse de sensibilité sur la température de départ	310
Tableau A-17 Analyse de sensibilité sur la température d'entreposage des chambres froides d'un entrepôt frigorifique.....	311

ACRONYMES

AdCF	Assemblée des communautés de France	LCOE	Levelized Cost of Energy
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie	LOADDT	Loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire
ADMC	Aide à la décision multicritère	LTECV	Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte
AFPG	Association Française des Professionnels de la Géothermie	LTS	Large Technical Systems
AIE	Agence International de l'Energie	MOE	Maitrise d'œuvre
ANRU	Agence nationale pour la Rénovation Urbaine	PAC	Pompe à chaleur
APC	Agence Parisienne du Climat	PCAET	Plan climat-air-énergie territorial
ATEE	Association Technique Energie Environnement	PCI	Pouvoir calorifique inférieur
BBC	Bâtiments Basse Consommation	Pinch	
BET	Boucle d'Eau Tempérée	PLF	Part Load Factor
CCIAG	Compagnie de chauffage de l'Agglomération grenobloise	PLU	Plan local d'urbanisme
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement	POPE	Programme d'Orientation de la Politique Énergétique
CLCV	Consommation Logement Cadre de Vie	PPI	Programme pluriannuel d'investissement
COP	Coefficient of Performance	PUE	Power Usage Effectiveness
CPCU	Compagnie parisienne du chauffage urbain	RAC-F	Réseau Action Climat – France
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment	RC	Réseau de chaleur
CTA	Centrale de traitement d'air	RT	Réglementation thermique
CUB	Communauté urbaine de Bordeaux	SCoT	Schéma de cohérence territoriale
CVC	Chauffage, ventilation et climatisation	SDE	Schéma directeur des énergies
DJU	Degré Jour Unifié	SEM	Société d'économie mixte
DSP	Délégation de Service Public	SNCU	Syndicat national du chauffage urbain
DTLM	Différence de température logarithmique moyenne	SRADDET	Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
ECS	Eau chaude sanitaire	SRB	Schéma régional biomasse
EH	Equivalent-Habitant	SRCAE	Schéma régional climat air énergie
EnR&R	Energies renouvelables et de récupération	STEP	Station d'épuration
FEDENE	Fédération des Services Energie Environnement	THPE	Très Haute Performance Energétique
FNCCR	Fédération nationale des collectivités concédantes et régies	UIOM	Usine d'incinération d'ordure ménagère
GES	Gaz à effet de serre	URBH	Union des responsables de blanchisserie hospitalière
GUE	Grid Usage Effectiveness	UVE	Unité de Valorisation Energétique
ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement	ZAC	Zone d'Aménagement Concerté
ITE	Institut pour la transition énergétique	ZAE	Zone d'Activité Economique

PREAMBULE

Ces travaux de thèse se sont effectués dans le cadre d'un financement de l'ANRT, via une convention CIFRE qui intègre plusieurs entités : l'institut **Efficacity**, la société **Engie Réseaux** et le laboratoire de recherche de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (**EIVP**). Ce dernier est une des cotutelles du laboratoire **Lab'Urba**, avec les Universités Paris-Est Créteil et Marne-la-Vallée (**UPEC** et **UPEM**).

Efficacity est un Institut pour la Transition Energétique (ITE) créé en 2014 dans le cadre du programme des investissements d'avenir. Son fonctionnement repose sur un partenariat entre entités publiques /privées (industriels, ingénieristes, organismes de recherche) et pluridisciplinaires (énergie, environnement, mobilité, construction, urbanisme, sociologie, architecture, économie, etc.). L'objectif d'Efficacity est de développer des outils et méthodes, intégrant des innovations dont la récupération de chaleur fatale fait partie, pour accompagner les territoires urbains dans leurs transitions énergétiques.

Engie Réseaux, du groupe Engie (anciennement GDF Suez), est une société qui finance, construit et exploite des RC en France. Son objectif est de proposer des solutions toujours plus vertueuses en ayant recours à la géothermie profonde, la biomasse et la récupération de chaleur. Le groupe Engie est membre du consortium Efficacity.

Enfin, les équipes de recherche de **EIVP** s'intéressent aux enjeux techniques et environnementaux de l'aménagement urbain et à l'utilisation des techniques urbaines, et à travers trois thèmes majeurs : résilience, espace public et énergie & climat. L'EIVP est également membre de l'institut Efficacity.

Contexte

Le changement climatique est un phénomène lié aux émissions de gaz à effet de serre. La production et la consommation d'énergie, avec 81 % du mix énergétique mondial en 2015 qui est d'origine fossile (DataBank, 2015), est une cause majeure de ces émissions. Dans ce contexte, la transition énergétique est une démarche clé pour enrayer ce dérèglement climatique et consiste à renouveler notre mode de production et de consommation d'énergie à travers plusieurs actions : la sobriété et l'efficacité énergétique, ainsi que la substitution progressive des énergies fossiles par des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R).

Les villes, consommatrices de 70 % de l'énergie produite mondialement et émettrices de la même part de gaz à effet de serre (La fabrique de la Cité, 2014), sont les territoires les plus concernés par ces questions. Le secteur du bâtiment est le plus énergivore et centralise 40 % de la consommation énergétique finale dans l'Union Européenne, selon les chiffres d'URBACT (Lewis et al., 2013). Enfin, en France comme en Europe, près de la moitié de l'énergie est consommée sous forme de chaleur, principalement pour répondre à des besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS). Ce chiffre passe à 80 % dans les bâtiments résidentiels et tertiaires (CEREMA & Bourrat, 2014) malgré une baisse progressive de cette part grâce à une meilleure isolation des bâtiments les plus récents.

Réseaux de chaleur comme systèmes de chauffage en ville

Le chauffage des bâtiments en milieu urbain est donc un enjeu important dans le cadre de la transition énergétique des villes. Les réseaux de chaleur (RC) font partis des systèmes de distribution de chaleur pour les bâtiments en milieu urbain. Ils se composent d'un ensemble de chaufferies (qui produisent la chaleur) et de canalisations enterrées qui approvisionnent les bâtiments raccordés en distribuant de l'eau chaude (historiquement sous forme de vapeur) avant de repartir vers les chaufferies pour se recharger en chaleur.

Les premiers RC sont apparus à la fin du XIX^{ème} siècle aux Etats-Unis (New York en 1882) et au début du XX^{ème} siècle en Europe (Paris en 1927) mais c'est surtout depuis les années 2010 que ces systèmes font l'objet d'une politique de développement massif. En effet, depuis les lois Grenelle (2009 et 2010), les RC sont des outils jugés efficaces pour participer à la transition énergétique des villes, grâce à leur capacité à mobiliser des EnR&R locales dans des zones urbaines. Cette opportunité vient de l'évolution technologique des RC au fil des années (Lund et al., 2014) : d'une distribution de la chaleur sous forme de vapeur à plus de 200 °C via des canalisations en fonte et un mix énergétique presque exclusivement fossile, ils deviennent des systèmes performants grâce à l'isolation des réseaux de distribution, la baisse des températures de fonctionnement (sous les 65 °C pour les dernières générations de RC), l'installation de systèmes de stockage thermique et donc l'intégration de sources de chaleur renouvelables et de récupération. Aujourd'hui en France et dans certains pays européens (Islande,

Norvège, Danemark), la part d'EnR&R dans le mix énergétique des RC est de 50 % ou plus, avec l'utilisation de sources d'énergies comme le solaire thermique, la géothermie (profonde ou superficielle), la biomasse et la chaleur de récupération, appelée chaleur fatale.

Malgré ces avantages, les RC restent un mode de chauffage très minoritaire, avec 13 % des citoyens européens raccordés, et seulement 7 % en France (Euroheat & Power, 2015). Les raisons sont principalement les coûts d'investissement élevés pour les construire, des travaux contraignants en milieux urbains (fermetures de voies routières, nuisances sonores) et la difficulté de mise en œuvre de ces réseaux locaux. Ce dernier point est lié à une programmation amont nécessaire pour développer les RC et l'interaction de cette programmation avec la planification urbaine des territoires. Cette interaction est parfois complexe, notamment du fait de la multiplicité d'acteurs concernés par de tels projets (collectivité territoriale, élus, services techniques, opérateurs de RC, aménageurs, copropriétés, bailleurs, citoyens).

En France, plusieurs incitations récentes accompagnent le développement de RC. Elles sont règlementaires et politiques, avec la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV en 2015) qui fixe des objectifs ambitieux comme le triplement des raccordements en 2020 par rapport à 2005 ou avec les lois NOTRe¹ (2015) et Maptam² (2014), qui confèrent aux collectivités territoriales un rôle central en matière de planification énergétique, notamment pour impulser des projets de RC sur les territoires. Les incitations sont également financières, avec des dispositifs de subvention comme le Fonds Chaleur de l'ADEME³ qui participe au financement de projets de production de chaleur à partir d'EnR&R, ou des TVA réduites pour les RC fonctionnant à plus de 50 % d'EnR&R.

L'énergie fatale comme source potentielle des réseaux de chaleur

Toutes ces évolutions ont permis également de motiver les innovations autour du chauffage urbain. L'une d'elles concerne la valorisation de sources de chaleur fatale locale et leur intégration à des RC. Ce terme désigne de l'énergie sous forme thermique, issue de procédés dont l'objet initial n'est pas la production d'énergie, et qui est rejetée dans l'atmosphère. L'énergie fatale, considérée comme décarbonée, provient de multiples sources comme la chaleur des usines d'incinération d'ordures ménagères (les UIOM, aujourd'hui appelées UVE pour « Unités de Valorisation Énergétique ») déjà valorisées en France et dans le monde.

Devant l'intérêt de valoriser cette énergie, plusieurs études prospectives, aux échelles continentales, nationales ou régionales, ont été menées sur le potentiel énergétique de sources de chaleur fatale. Elles mettent en avant le fort potentiel issu de certains secteurs industriels comme la chimie, la sidérurgie ou l'agro-alimentaire (ADEME, 2015b). D'autres sources, issues d'activités ou d'infrastructures localisées en milieux urbains, contrairement aux industries précédemment citées, présentent également un intérêt aux vues de leur proximité avec des bâtiments consommateurs de chaleur et sont les objets de recherche de cette thèse.

¹ NOTRe : Nouvelle organisation territoriale de la République

² Maptam : Modernisation de l'action publique territoriale et affirmation des métropoles

³ ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

Problématique de la thèse

L'ambition générale de cette thèse est de proposer des méthodes permettant d'analyser l'intérêt et les conditions de valorisation des sources de chaleur fatale via des RC pour répondre à des besoins thermiques en milieu urbain. Parmi elles, citons la chaleur provenant des eaux usées, distribuées par des réseaux d'assainissement jusqu'à des stations d'épurations, ou encore la chaleur extractible des data center⁴. A noter que la plupart des sources issues d'industries (sidérurgies, raffineries, etc.) ne sont volontairement pas traitées dans cette thèse puisque le postulat est de s'intéresser aux sources disponibles le plus proches possibles des milieux urbains denses où les RC sont les plus pertinents.

Cette analyse pose dans un premier temps des questions techniques, économiques et environnementales. Les sources de chaleur fatale sont toutes différentes et nécessitent une description fine. ***Quelles sont leurs caractéristiques physiques (état, température, disponibilité, etc.) et leurs potentiels énergétiques ? Sont-elles compatibles avec des besoins de chauffage et d'ECS ? Par quels moyens et à quels coûts ces sources d'énergie sont-elles valorisables ? Quels sont les gains environnementaux de leurs valorisations ? Quelles typologies et quelles performances pour les RC intégrant ce type de sources ?***

Pour répondre à ces questions, des algorithmes de calcul du potentiel énergétique sur chaque type de sources fatales ont été développés en s'appuyant sur la littérature scientifique et sur des retours d'expériences. Ces potentiels sont ensuite comparés (qualitativement et quantitativement) avec des besoins thermiques à l'échelle d'un quartier à travers un outil de simulation. Les sorties de cet outil sont techniques, énergétiques, économiques et environnementales et permettent d'évaluer la faisabilité d'un projet de récupération de chaleur fatale.

Cependant, la mise en œuvre de tels projets ne dépend pas seulement de critères technico-économiques. Elle est également liée à un jeu d'acteurs complexe puisqu'il intègre une multitude d'entités aux objectifs différents. L'ajout du propriétaire d'une source de chaleur fatale dans la réalisation d'un projet de développement de réseau de chaleur amplifie cette complexité. La dernière partie de cette thèse est de s'intéresser à ces conditions de mise en œuvre. ***Quels sont les freins actuels au développement de ce type de projets ? Quelle est la place de l'énergie fatale dans l'élaboration des stratégies énergétiques locales qui pourraient permettre d'impulser la valorisation de cette énergie ? Comment résoudre ces freins ?***

Ces questions sont traitées par une analyse de plusieurs cas d'études permettant de mettre en avant l'importance du portage des collectivités dans la faisabilité de ce type de projets. La prise en amont de ces sources d'énergie est tout aussi importante et implique leur prise en compte dans la planification urbaine et les stratégies énergétiques territoriales. Ce sujet est introduit comme une perspective de recherche, tout comme l'apport de l'aide à la décision multicritère pour résoudre les freins à la généralisation de projets de valorisation de chaleur fatale dans les réseaux de chaleur.

⁴ Data center : aussi appelé « centres de données » en français

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit présente les recherches effectuées au cours de cette thèse. Il est décomposé en trois parties.

La **première partie** vise à décrire en détail les objets de recherche de cette thèse.

- Dans le premier chapitre, le fonctionnement des RC est expliqué afin de comprendre les enjeux, principalement techniques, qui pourraient influencer la faisabilité de la valorisation de sources de chaleur fatale (**Chapitre 1**).
- Le deuxième chapitre aborde la question de la mise en œuvre des RC et la façon dans ils sont pris en compte dans les stratégies énergétiques ainsi que dans la planification urbaine. L'influence des aspects politiques et de gouvernance des RC est mise en lumière à travers une série d'études issues de la littérature scientifique (**Chapitre 2**).
- Le troisième chapitre de cette première partie revient précisément sur la chaleur fatale, sa définition et les enjeux nouveaux de ces sources énergétiques. Six sources sont particulièrement étudiées et décrites : les eaux usées, les incinérateurs de déchets (UVE), les data center, les blanchisseries industrielles, les verreries et les entrepôts frigorifiques. Ces descriptions permettent de catégoriser les sources fatales selon plusieurs critères et notamment leurs températures (**Chapitre 3**).

La **deuxième partie** reprend les travaux réalisés pour répondre aux questions techniques, économiques et environnementales sur le sujet. Elles sont traitées à travers le développement d'un outil de simulation, appelé Recov'Heat.

- Le premier chapitre de cette partie détaille les différents modules de calcul de l'outil qui déterminent le profil de besoins thermiques d'un quartier, le profil énergétique d'une source de chaleur fatale étudiée, le dimensionnement des éléments de valorisation de cette énergie, et des indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux permettant de juger l'intérêt d'une éventuelle valorisation d'une source pour répondre à des besoins thermiques d'un quartier (**Chapitre 4**).
- Dans le chapitre qui suit, l'outil est testé et comparé avec des cas réels de récupération de chaleur fatale, notamment sur les UVE en France, et également sur des projets de récupération de chaleur sur eaux usées et data center. Un cas fictif d'étude de récupération de chaleur sur un entrepôt frigorifique est ensuite présenté (**Chapitre 5**).
- Le dernier chapitre de cette partie traite une question non prise en compte dans l'outil Recov'Heat : les conditions réelles d'intégration de l'énergie fatale dans un RC. La méthode est de regarder certaines caractéristiques techniques des RC qui peuvent accueillir des sources fatales (typologies de réseaux, régimes de températures, performances globales des systèmes) afin de montrer des points techniques de vigilance et des scénarios qui peuvent altérer la faisabilité de ce genre de projets (**Chapitre 6**).

Enfin, la **troisième partie** revient sur les questions liées à la mise en œuvre des projets de valorisation de sources de chaleur fatale dans des RC.

- Le premier chapitre de cette partie étudie l'importance du jeu d'acteur dans la faisabilité de projets de valorisation de sources de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur. L'analyse de plusieurs cas d'étude permet de comprendre les paramètres prépondérants qui favorisent ou contraignent la réalisation de tels projets (**Chapitre 7**).
- Enfin, le dernier chapitre propose des pistes de recherche destinées à contribuer à la généralisation de la valorisation de chaleur fatale en abordant notamment l'intégration de ces sources d'énergie dans les stratégies énergétiques territoriales (**Chapitre 8**).

PARTIE 1 : RESEAUX DE CHALEUR ET SOURCES DE CHALEUR FATALE : DESCRIPTION DES OBJETS DE LA RECHERCHE

La première partie vise à décrire les objets de ces travaux de recherche, à savoir les réseaux de chaleur, dans les chapitres 1 et 2, et les énergies fatales pouvant alimenter ces réseaux, dans le chapitre 3.

Systèmes de chauffage à l'échelle d'un quartier, d'une ou plusieurs ville(s), diverses définitions juridiques ou techniques décrivent les réseaux de chaleur, appelés également chauffages urbains. D'un point de vue technique, si tous les réseaux de chaleur ont le même fonctionnement global, leur caractérisation permet de faire ressortir les éléments principaux permettant de les différencier. Du fait de sa taille, sa densité, son alimentation énergétique, son architecture ou ses régimes physiques de fonctionnement, chaque réseau de chaleur est unique. Le chapitre 1 présente ces paramètres (Chapitre 1 Réseaux de chaleur : fonctionnement, état des lieux et évolutions).

Les chauffages urbains existent depuis plus d'un siècle mais sont finalement assez peu répandus en France par rapport à d'autres voisins européens, notamment scandinaves (Suède, Danemark, Islande, etc.). Ils ont tout de même évolué et sont aujourd'hui des outils jugés pertinents pour accompagner la transition énergétique des milieux urbains, capables de mobiliser des énergies locales et décarbonées : renouvelables et de récupération.

Plusieurs freins existent au développement des réseaux de chaleur. Le coût à l'investissement, très élevé, en est le principal. Les contraintes liées aux travaux en zones urbaines, sont d'autres freins, anticipés à travers une planification complexe dans le sens où elle concerne plusieurs acteurs (opérateurs, services de la ville) et s'effectue sur le long terme à travers des documents de planification et d'urbanisme. Il est nécessaire de parler de la nouvelle place prépondérante des réseaux de chaleur dans la planification énergétique et de comment, de l'échelle nationale à locale, ces réseaux de chauffages urbains et les sources qui l'alimentent sont abordés. L'intérêt est de savoir si cette planification est efficace. La question de la gouvernance de ces réseaux est alors fondamentale pour comprendre, au-delà des aspects technico-économiques, les leviers politiques qui influent sur la prise de décision.

Dans le chapitre 2, un état des lieux des réseaux de chaleur est proposé, dans le monde et en France, en termes de chiffres (nombre, part dans les systèmes de chauffage, mix énergétique), de prise en compte dans les aspects réglementaires et de rôle dans la transition énergétique des villes. Leur prise en compte dans les politiques de stratégies énergétiques et la planification urbaine est ensuite détaillée. Toute cette description a pour objectif de mettre en lumière la complexité et les évolutions de la mise en œuvre de projets de développement de réseaux de chaleur sur les territoires urbains. L'intégration éventuelle de sources d'énergies fatales rajoute une complexité supplémentaire. La dernière section du chapitre aborde l'importance de la gouvernance des réseaux de chaleur dans les choix de développement de ces systèmes. L'accompagnement des acteurs de l'énergie, et notamment des collectivités, est une action nécessaire dans un contexte d'interaction entre l'aménagement urbain et la question énergétique. Cette section introduit la troisième partie de ce manuscrit, portant sur l'élaboration d'un guide d'accompagnement sur la valorisation de l'énergie fatale sur les territoires (Chapitre 2 Etat des lieux des réseaux de chaleur et place dans les stratégies énergétiques et la planification urbaine).

Les énergies fatales (ou énergies de récupération) sont de plus en plus mises en avant pour alimenter les réseaux de chaleur par l'état, les collectivités et les professionnels de l'énergie. Décentralisées, décarbonées et perdues si non valorisées, ces sources, principalement sous forme de chaleur, sont multiples mais très hétérogènes et doivent être décrites finement afin de pouvoir déterminer leur potentiel énergétique, leur compatibilité avec les systèmes de chauffage et la faisabilité de leur raccordement à un réseau.

Dans le chapitre 3, des critères d'analyse ont été définis pour effectuer une description des sources étudiées. Dans ces travaux de recherche, un intérêt particulier est porté aux sources situées en zones urbaines ou péri-urbaines, dont la proximité avec les bâtiments consommateurs de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire (ECS) en font un atout. L'état physique, l'intermittence ou la variabilité de l'activité qui produit cette chaleur fatale, la température de rejet ou encore la pérennité de cette activité sont les caractéristiques particulièrement regardées pour décrire et catégoriser les différentes sources étudiées : les eaux usées, les data center, les blanchisseries industrielles, les entrepôts frigorifiques, les incinérateurs de déchets ou encore les verreries (Chapitre 3 Description et analyse des sources de chaleur fatale).

CHAPITRE 1 : RESEAUX DE CHALEUR : FONCTIONNEMENT, ETAT DES LIEUX ET EVOLUTIONS

Les réseaux de chaleur sont des systèmes de chauffage à l'échelle de plusieurs bâtiments. Ils fournissent ECS et chauffage à de nombreuses villes dans le monde depuis le début du XXème siècle. Depuis les chocs pétroliers dans les années 1970, dans l'optique de trouver des alternatives au pétrole (Woods & Overgaard, 2016) et surtout depuis la prise en compte du changement climatique dans les politiques urbaines, le réseau de chaleur est considéré comme un des outils de la transition énergétique, capable de répondre à des problématiques à la fois énergétiques, économiques et sociales.

Ce chapitre commence par une définition générale des réseaux de chaleur (1.1 Définitions). Le paragraphe qui suit retrace l'historique de développement de ce système d'énergie (1.2 Historique).

Les paragraphes trois et quatre décrivent ensuite en détail le fonctionnement et les caractéristiques de ces systèmes (1.3 Fonctionnement d'un réseau de chaleur et 1.4 Caractérisation des réseaux de chaleur): Quels sont les éléments qui composent un réseau de chaleur? Quelles sont les caractéristiques majeures qui décrivent un réseau et permettent d'évaluer ces performances?

Le coût est également un des critères qui détermine la viabilité d'un chauffage urbain. Le modèle économique et la tarification des réseaux de chaleur sont décrits dans le dernier paragraphe de ce chapitre (1.5 Coûts et facturation des réseaux de chaleur).

1.1. Définitions

Un réseau de chaleur est un système qui fournit chauffage et/ou ECS aux usagers. Il s'agit d'un chauffage à l'échelle d'une ville, d'un quartier, d'un îlot ou de quelques bâtiments, de tous les usages (logement, bureaux, commerce, équipements publics, etc.).

Aucune définition officielle juridique n'existe, mais toutes celles proposées par différents syndicats et professionnels des réseaux de chaleur (FEDENE, ADEME, FNCCR, AMORCE, Via Seva, CEREMA...) convergent. Voici une définition donnée par le Syndicat National du Chauffage Urbain (SNCU) français, résumé dans le schéma de la Figure 1-1 :

« Le réseau de chaleur fonctionne comme un chauffage central à l'échelle d'une ville ou d'un quartier. La chaleur est produite dans un ou plusieurs sites de production à partir de plusieurs sources d'énergie ; elle est ensuite transportée sous forme d'eau ou de vapeur via des canalisations souterraines jusqu'aux bâtiments raccordés. Un réseau de chaleur fonctionne en circuit fermé : une fois que le fluide chaud a cédé ses calories, il est retourné sous forme d'eau refroidie vers les sites de production qui assurent son retraitement.

Chaque bâtiment est équipé d'un poste de livraison (appelé aussi « sous-station ») qui récupère directement la chaleur sous forme d'eau chaude et la transfère au réseau de chauffage collectif de l'immeuble » (SNCU, 2016).



Figure 1-1 Schéma de principe d'un réseau de chaleur (CEREMA, 2016a)

Le producteur de chaleur exploitant la chaufferie est juridiquement distinct des usagers consommateurs de l'énergie thermique (au moins deux usagers).

Au sens de la réglementation thermique française, « Une génération⁵ est considérée comme étant un réseau de chaleur pour l'opération de construction ou de rénovation au sens de la réglementation thermique si le bâtiment concerné est desservi par une sous-station intégrée au bâtiment » (CSTB, 2012).

La création, le développement, le pilotage ou la maintenance de réseaux de chaleur nécessitent des compétences dans divers domaines comme l'énergie, l'économie, la construction ou l'urbanisme. La définition des réseaux de chaleur est perçue différemment en fonction des acteurs qui s'intéressent aux technologies, à la réglementation ou encore à la gouvernance.

⁵ Ici, le terme génération est utilisée comme « chaufferie », quel que soit son type.

1.2. Historique

Les premiers réseaux de chaleur français sont apparus dans les années 1930 dans les centres urbains des grandes villes où les besoins de chaleur étaient élevés. Ils ont vu le jour à Paris en 1928, Chambéry en 1949, Grenoble en 1960 et Villeurbanne en 1971. Ces systèmes, fonctionnant à vapeur, s'inspirent des premiers réseaux de chaleur mondiaux construits vers 1880 aux Etats-Unis (New York en 1882). Dans un premier temps, ils desservent exclusivement les bâtiments publics à une époque où les livreurs de bois et charbons inondent les rues et où les tonnes de combustibles s'entassent (Figure 1-2). A Paris, les premiers bâtiments raccordés sont ainsi l'Hôtel de Ville, le Louvre, le Palais Royal ou encore les bureaux de la RATP, situés Gare de Lyon, juste à côté de la première chaufferie du réseau de chaleur de Paris appelé Compagnie Parisienne du Chauffage Urbain (CPCU) (Raoult, 2008)

Livraison de charbon – 1940



Chaufferie CPCU à droite de la Gare de Lyon - 1950



Figure 1-2 Photos du développement de la CPCU à Paris (CPCU, 2015)

A noter que, si les premiers réseaux de chaleur, tels que connus aujourd'hui, arrivent entre la fin du XIX^{ème} et le début du XX^{ème} siècle, l'idée du chauffage collectif est plus ancienne. Ainsi, le premier chauffage urbain de l'histoire est attribué à la France, et plus précisément à la ville de Chaudes-Aigues, qui, au 14^{ème} siècle, utilisa la chaleur géothermique pour alimenter un réseau d'eau chaude vers une trentaine de maisons alentours (Woods & Overgaard, 2016).

La seconde période de développement intervient lors d'un important mouvement d'urbanisation en France, entre les années 1950 et 1970. La grande majorité des réseaux utilisent alors le charbon comme combustible. Ces systèmes de chauffage sont encouragés puisqu'ils permettent d'une part de réduire l'encombrement des voies publiques dû au transport et la livraison de combustibles et d'autre part de gagner en sécurité, propreté et surfaces dans les immeubles grâce à l'absence de combustion.

Les années 1980 relancent les projets de réseau de chaleur, après les crises pétrolières de 1973 et 1979. En France comme en Europe, un développement massif de réseaux de chaleur est observé. Ils sont alimentés par de nouvelles sources en plus du charbon : la géothermie profonde, la cogénération (surtout dans les pays scandinaves) ou la chaleur produite par l'incinération de déchets. C'est à cette période que, pour la première fois, les réseaux de chaleur apparaissent dans les textes de lois français et sont repris dans le Livre VII du code de l'énergie (Legifrance, 1980).

La dernière phase de développement des réseaux en France date des années 2000. Le Grenelle de l'environnement et le contexte de développement des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) permettent à ces systèmes de retrouver une place importante dans les politiques énergétiques, nationales comme locales. Ils sont vus comme des moyens efficaces d'acheminer en grande quantité des EnR&R dans des zones urbaines, et, à ce titre, voient leurs contributions largement

augmentées dans les objectifs nationaux aux horizons 2020, 2030 et 2050. La récente loi française de transition énergétique des villes pour la croissance verte (LTECV), votée en 2015, va dans ce sens et propose à la fois une base juridique (article 194) aux réseaux de chaleur et des objectifs chiffrés ambitieux pour 2030 (article 1).

Les réseaux de chaleur du XXI^{ème} siècle présentent de nombreuses différences avec les premiers réseaux construits par le passé. De la vapeur d'eau à l'eau chaude, de régimes de températures très hauts à plus bas et d'échelles spatiales différentes (des réseaux de plus petites tailles se créent), leurs caractéristiques varient, ce qui fait de chaque réseau un système unique. Lund et al. (Lund et al., 2014) ont effectué un travail de catégorisation historique des réseaux en quatre générations qui retracent notamment l'évolution des sources de production de chaleur, le changement d'état du fluide caloporteur ou encore la baisse des régimes de température dans le réseau de distribution. La Figure 1-6 (page 49) illustre ces quatre générations.

Avant d'exposer un état des lieux des réseaux de chaleur de France et de l'intérêt croissant de développer ces systèmes, le prochain paragraphe détaille les éléments caractéristiques d'un réseau.

1.3. Fonctionnement d'un réseau de chaleur

Comme stipulé dans l'introduction de la Partie 1, de nombreuses architectures de réseaux de chaleur existent. Le fonctionnement des réseaux de chaleur les plus courants est expliqué dans ce paragraphe.

Un réseau de chaleur est donc composé d'unité(s) de production de chaleur, d'un réseau de distribution et de points de livraison (sous-stations).

Unité(s) de production

Les **unités de production** de chaleur produisent l'énergie thermique nécessaire qui alimente le réseau. Elles garantissent la température et la pression de l'eau dans les canalisations jusqu'aux consommateurs. Ces unités peuvent être de toute taille en fonction des besoins. La chaleur peut être produite sur un ou plusieurs sites. Dans les réseaux importants, la multiplicité des centrales permet de réduire les pertes dues à la distribution et d'améliorer la sécurité de la production. Dans de nombreux cas, il existe aussi des chaufferies d'appoint et/ou de secours en cas de dysfonctionnement des chaufferies principales. Les sources d'énergie utilisées dans les réseaux de chaleur sont multiples et détaillées dans ce chapitre (1.4.3 **Les sources de chaleur**).

Réseau de distribution

L'eau, chauffée dans les unités de production, est transportée via un réseau presque toujours souterrain et de canalisations isolées. Ce réseau atteint les différents points de livraison situés aux pieds des immeubles raccordés. Un réseau de chaleur étant un circuit fermé, il y a donc les canalisations allers qui transportent l'eau remplie de calories, et les canalisations retours, qui redirigent l'eau vidée de calories par la sous-station vers la chaufferie.

Il existe plusieurs matériaux de canalisations. Historiquement, elles sont en fonte mais les pertes thermiques et les risques de casse et de corrosions en font un matériau peu avantageux. L'atout de la fonte est qu'elle est capable de transporter les hautes températures et l'eau sous forme de vapeur (> 110°C). L'acier est ce qu'on retrouve le plus couramment dans les réseaux de chaleur, avec une couche d'isolation par-dessus pour limiter au maximum les pertes de chaleur lors de la distribution. D'autres matériaux équipent peu à peu les canalisations de réseaux de chaleur, comme le plastique pré-isolé ou des matériaux composites type fibre de verre (Nilsson, 2015). Ces matériaux sont utilisés lorsque la température de l'eau qui circule est plus faible, sous les 100°C.

Sous-stations

Chaque bâtiment raccordé au réseau de chaleur possède une sous-station, appelé également poste de livraison. Son rôle est de transférer la chaleur de l'eau du réseau de canalisation vers les réseaux propres au bâtiment qui fournissent chauffage et ECS aux usagers. Le transfert de chaleur se fait grâce à un ou plusieurs échangeur(s) thermique(s).

Les configurations d'une sous-station sont multiples. Le cas le plus simple est celui du simple échangeur de chaleur suivi d'un circuit secondaire, comme illustré en Figure 1-3.

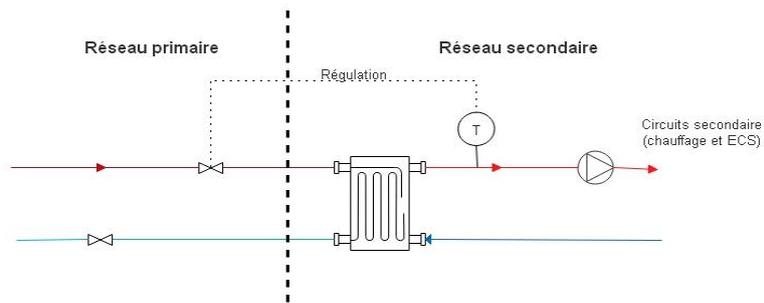


Figure 1-3 Schéma de principe d'une sous-station (source : auteur)

Dans de nombreux cas, le réseau secondaire est en fait un système qui sépare les canalisations acheminant l'ECS de celles du chauffage, les conditions de température n'étant pas toujours les mêmes (Figure 1-4). En effet, la température de l'eau pour le chauffage dépend des émetteurs (convecteur, radiateur ou planchers chauffants). La sous-station est alors équipée de deux échangeurs, un pour l'ECS et un pour le chauffage. Des ballons de stockage sont souvent ajoutés pour l'ECS dont les besoins fonctionnent par pics.

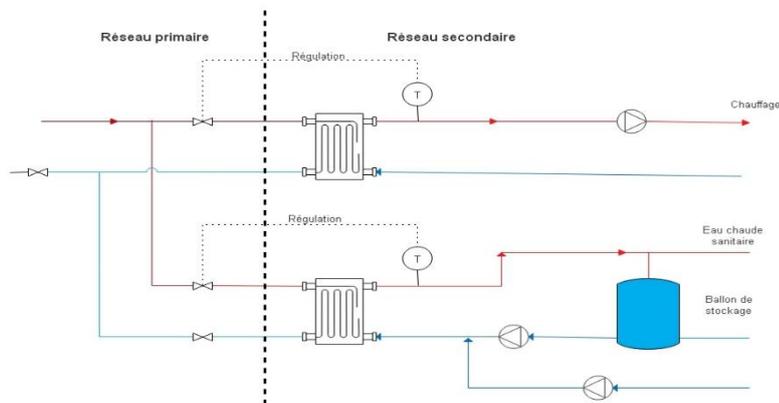


Figure 1-4 Exemple d'un schéma de sous-station (source : auteur)

En plus des échangeurs de chaleur, une sous-station est équipée de plusieurs outils nécessaires à la régulation. Il s'agit surtout d'instruments de relevés de températures, débits et pressions des circuits primaires et secondaires. Des pompes de circulations et des vannes de régulation permettent de faire fonctionner le système.

1.4. Caractérisation des réseaux de chaleur

Il est possible de différencier les réseaux de chaleur selon plusieurs critères, qui peuvent être techniques, économiques ou juridiques. Les critères de caractérisation qui suivent sont les critères principaux et reprennent ceux proposés par Rezaie et Rosen (2011) lors de leur revue des nouvelles technologies et les évolutions des réseaux de chaleur et de froid. Ils permettent de décrire ces systèmes au-delà de leur fonctionnement. Les critères explicités sont le fluide caloporteur du réseau de chaleur (1.4.1), sa densité (1.4.2), les sources de chaleur qui l'alimentent (1.4.3), sa taille (1.4.4), son régime de température (1.4.5) et son mode de gestion (1.4.6).

1.4.1. Le fluide caloporteur

L'eau est le fluide caloporteur qui circule dans les réseaux de distribution de chaleur. Il peut être sous forme de vapeur, liquide sous pression ou simplement liquide (eau chaude ou eau tempérée).

Comme dit dans l'historique des réseaux de chaleur (1.2 **Historique**), les premiers réseaux de canalisation transportaient exclusivement de l'**eau sous forme de vapeur**, avec une pressurisation pouvant aller jusqu'à 25 bars en fonction de la taille des réseaux (Narjot, 2012). La température de la vapeur est supérieure à 120°C mais peut monter bien plus haut pour certains besoins, notamment industriels. Aujourd'hui, seule une minorité de réseaux fonctionnent à la vapeur. En France il s'agit des réseaux les plus anciens comme celui de Paris et de Grenoble.

Il existe également des réseaux de chaleur à **eau surchauffée** : ce type de chauffage est utilisé lorsqu'il est nécessaire de transporter de la chaleur vers des postes de consommations importants (hôpitaux, industries, grands bâtiments publics, etc.) aux besoins sont très élevés. L'eau est produite sous pression avec des températures allant de 110°C à plus de 200°C.

La majorité des réseaux de chaleur sont à **eau chaude**, la température de départ du réseau est alors inférieure à 110°C. Tous les réseaux nouvellement construits sont à eau chaude, l'avantage est la réduction de pertes thermiques liées à l'abaissement des températures. Certains réseaux de chaleur modernes sont d'ailleurs basse-températures (60°C au départ par exemple).

A noter que certains réseaux de chaleur possèdent plusieurs branches de distribution qui fonctionnent avec des fluides caloporteurs aux états différents. Ainsi, certains quartiers, plus anciens ou aux besoins élevés sont alimentés par une branche à eau surchauffée alors que d'autres quartiers, connectés au même réseau de chaleur sont raccordés sur une branche à eau chaude. C'est par exemple le cas du réseau de chaleur Rennes Nord, comme illustré sur la Figure 1-5. En rouge, il s'agit du réseau à haute pression avec de l'eau surchauffé tandis que le réseau bleu correspond à la section basse pression à eau chaude.

En France et en 2014, 86% des réseaux de chaleur fonctionnent à eau chaude. Ce fonctionnement ne représente que 43% de la chaleur livrée car les réseaux des principales grandes villes les plus consommatrices sont encore à eau surchauffée ou en vapeur (SNCU, 2015).

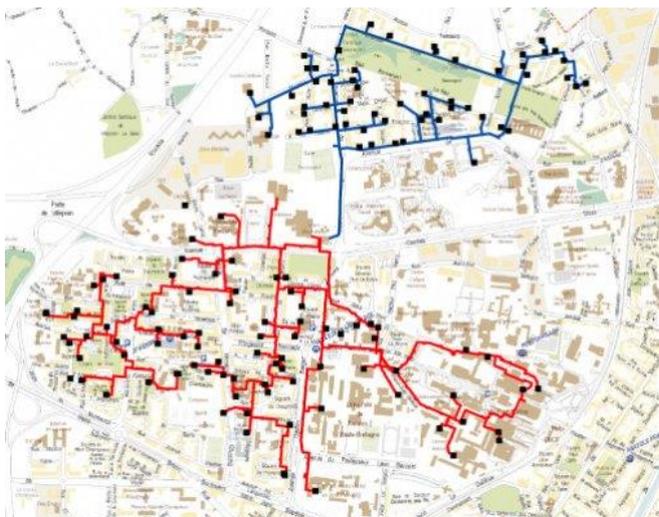


Figure 1-5 Tracé du réseau de chaleur "Rennes Nord" avec en rouge la section haute pression et en bleu la section basse pression (CEREMA 2012)

L'**eau tempérée** est également une possibilité. Les réseaux associés sont également appelés des boucles d'eau tempérée. Souvent de petites tailles, ils fonctionnent avec des températures de distribution inférieures aux températures d'usage de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Les sous-stations sont alors équipées de pompes à chaleur (PAC) qui rehaussent les températures en fonction du besoin du bâtiment desservi. La boucle d'eau tempérée est alors entre 10 et 25°C.

Ce premier critère de description d'un réseau de chaleur montre l'importance des températures de fonctionnement. La partie « Température » (1.4.5) revient en détail sur les enjeux liés à l'abaissement des températures dans les réseaux de chaleur.

1.4.2. La densité

La densité est une notion importante pour évaluer la viabilité d'un réseau de chaleur aux phases de création, de densification ou d'extension.

Rezaie et Rosen (2011) utilisent la densité d'usage, qui différencie les zones urbaines alimentées par des réseaux avec les catégories suivantes :

- Les aires urbaines densément peuplées où les consommateurs sont à la fois des logements, des bureaux, des industries, des équipements publics, etc. ;
- Les ensembles de bâtiments à haute densité avec des immeubles résidentiels, institutionnels ou des centres commerciaux ;
- Les complexes industriels ;
- Les aires résidentielles à faibles densités où la puissance du réseau est inférieure à 10 MW.

La principale densité utilisée pour évaluer la pertinence d'un réseau de chaleur sur un territoire est la densité linéique. Il s'agit de la quantité d'énergie qui passe en moyenne dans un réseau par mètre linéaire de canalisation (MWh/ml). Plus elle est élevée, plus le coût d'investissement est amorti par la quantité d'énergie vendue, et le réseau est donc plus viable.

Historiquement plus élevée, cette densité baisse en moyenne en France, comme le montre le Tableau 1-1. Plusieurs raisons justifient cette diminution, et notamment l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, moins consommateurs ainsi que le raccordement de bâtiment plus

éloignés des centres urbains. La densité minimale acceptée par l'ADEME pour l'obtention de subvention est de 1,5 MWh/ml/an (ADEME, 2016).

Tableau 1-1 Densité de chaleur linéique en France (CEREMA, 2014)

Repère	Densité de chaleur linéique (MWh/ml)
Moyenne française actuelle	8 MWh/mètre/an
Réseaux dans les années 60-70	15 à 20 MWh/mètre/an
Réseaux nouvellement créés	3 à 6 MWh/mètre/an
Certaines zones rurales	1,5 voire 1 MWh/mètre/an

1.4.3. Les sources de chaleur

De nombreuses sources d'énergie peuvent alimenter un réseau de chaleur. Il y a les énergies fossiles (gaz, fioul, charbon), et les EnR&R. Les systèmes peuvent posséder plusieurs chaufferies et plusieurs sources d'énergies. Un réseau de chaleur peut se définir par son mix énergétique et la part d'EnR&R qu'il distribue.

Les **énergies fossiles** composent encore la moitié du mix énergétique français des chauffages urbains (Via Sèva, 2017). Le gaz naturel est la source la plus utilisée, notamment du fait de son prix et du rejet d'émissions de CO₂, plus faible que pour le fioul et le charbon (Tableau 1-2). Ces derniers sont tout de même toujours utilisés, surtout en appoint et en secours d'autres sources renouvelables. Le fioul utilisé dans les réseaux est le fioul lourd ou domestique.

Tableau 1-2 Emissions de CO₂ associées aux combustibles fossiles (ADEME, 2014a)

Emissions unitaires	Charbon	Pétrole	Gaz naturel
kg CO ₂ émis/kWh fourni	0,343	0,271	0,206

Il faut distinguer parmi les énergies fossiles la production de chaleur en **cogénération**, c'est-à-dire en simultanée avec de la production d'énergie électrique. Cette technologie aux rendements élevés (80-90%) est largement utilisée en France et dans le monde (Nuorkivi, 2016) et présente deux catégories de combustion : la combustion externe à part non EnR&R lorsque le combustible est fossile et la combustion externe à part EnR&R lorsque la cogénération se fait depuis une EnR&R (biomasse, géothermie, énergie de récupération).

La biomasse, considérée comme une énergie renouvelable et décarbonée, est également une source possible pour les réseaux de chaleur. La biomasse est la filière bois-énergie en majorité (biomasse forestière et sous-produits du bois : palettes, bois de construction), mais il peut également s'agir de biomasse agricole (résidus de récolte, déchets agroalimentaires) ou de déchets organiques. L'avantage de cette filière est qu'elle fonctionne comme les combustibles fossiles, à savoir que la biomasse est brûlée dans des chaudières centralisées et permet une combustion à haute température et à des puissances installées conséquentes (Maes, 2014).

La géothermie, méthode qui consiste à puiser de la chaleur contenue dans le sous-sol, est également une source d'énergie possible. Cependant, cette ressource est inégalement répartie et n'est pas disponible sur tous les territoires. Plusieurs types de géothermie existent :

- La géothermie dite superficielle ou de faible profondeur où les températures de récupération sont basses (10°C minimum, jusqu'à 50/60°C). A ces niveaux de températures, la chaleur est rehaussée grâce à des PAC.

- La géothermie profonde, où l'on puise les calories de nappes phréatiques à 2000 m de profondeur et plus. La température y est alors élevée, pouvant aller jusqu'à 150°C.

Le solaire thermique est une option de plus en plus envisagée pour les réseaux de chaleur, mais sa part reste encore marginale (2.1.1). Les installations de ce type sont centralisées (on parle de ferme solaire) et présentent l'avantage d'être plus efficaces que des installations de solaire photovoltaïque pour la même surface de capteurs (Stéfan Le Dû, 2014). La maintenance est également simplifiée. En France, de nouvelles installations sont fonctionnelles (dans les communes de Balma-Gramont et Juvignac) alors qu'au Danemark, cette source thermique est déjà exploitée depuis les années 1980. En Europe, l'Europe compte 165 réseaux de chaleur alimentés en partie par des installations solaire thermique (AMORCE, 2011b).

Enfin, **l'énergie fatale** (ou de récupération) est une source de chaleur pouvant alimenter des réseaux de chaleur. Il s'agit de sources énergétiques provenant de diverses activités qui rejettent de la chaleur à des états, températures et quantités différentes. Par exemple, les rejets de process industriels (cimenteries, sidérurgies, etc.) sont déjà valorisés en France et à l'étranger. Ainsi, en 2014, 8% du mix énergétique des réseaux de chaleur de Suède proviennent de sources fatales industrielles (Wahlroos et al., 2017).

En France, plusieurs usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) fournissent de grandes quantités de chaleur à des chauffages urbains. D'autres sources de chaleur fatale, plus urbaines, ont également un potentiel énergétique valorisable dans des réseaux de chaleur. Le chapitre 3 (Description et analyse des sources de chaleur fatale) définit en détail certaines sources et l'énergie fatale.

Les énergies fossiles sont toujours majoritaires dans le mix énergétique des réseaux de chaleur en Europe mais les politiques (européennes comme nationales) convergent vers le verdissement de ce mix et la part des énergies renouvelables est en constante augmentation. En France, 50% du mix énergétique des réseaux de chaleur provient de sources renouvelables et de récupération en 2017 contre 30% en 2005 (Via Seva, 2017). La répartition des sources d'énergie alimentant les réseaux de chaleur est détaillée dans la partie « Etat des lieux des réseaux de chaleur » (2.1.1).

1.4.4. Longueur des réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur peuvent s'étendre à plusieurs échelles urbaines. Certains s'étalent sur des villes entières alors que d'autres alimentent des quartiers ou des îlots de petites tailles. Un réseau peut se définir par la longueur du réseau de distribution. Cette taille correspond à la longueur aller et retour des canalisations. Le réseau de chaleur de Paris, le plus grand de France, mesure 490 km (CPCU, 2017), celui de Grenoble 170 km (CCIAG, 2016). A contrario, certains réseaux, dans des petites communes ou à l'échelle d'îlots n'alimentent que quelques bâtiments (par définition, deux bâtiments minimum). L'annuaire Via Seva (2017) propose annuellement un recensement des réseaux de chaleur en France et indique notamment la longueur de chaque réseau. Près de 30 réseaux mesurent moins de 500m. Par exemple, le micro chauffage urbain de la commune de Gaillac (Tarn, Occitanie) distribue de la chaleur pour 81 équivalent-logements bâtiments avec une chaufferie biomasse et 300m de canalisations.

Pour différencier les grands des petits réseaux de chaleur, la SNCU, dans son enquête annuelle et nationale sur les réseaux de chaleur et de froid, les sépare en fonction de leurs puissances installées avec 3,5 MW comme limite. Selon leurs chiffres de 2014, les réseaux ayant une puissance installée inférieure à 3,5 MW sont au nombre de 132 et représentent en tout 202 km de réseau, soit 4% de l'ensemble (SNCU, 2014).

Les petits réseaux sont naturellement moins nombreux mais l'évolution du chauffage urbain tend au développement plus important de ces systèmes. D'une part, 650 villes sont déjà équipées d'un réseau de chaleur et logiquement, il s'agit surtout des plus villes les plus peuplées. Tous les bâtiments ne sont pas raccordés mais les problématiques de ces réseaux sont alors l'extension⁶ et/ou la densification⁷. D'autre part, les micro-réseaux de chaleur se développent de plus en plus, à des échelles urbaines plus réduites : des quartiers, écoquartiers et îlots. Coutard et Rutherford (2013) l'expliquent dans leur article « Vers l'essor de villes « post-réseaux » : si les réseaux urbains (énergétiques, d'eaux ou de transport) se sont développés de façon à recouvrir les villes entières, les évolutions technologiques, dans l'énergie notamment, laissent place à une évolution décentralisée. Les micro-réseaux de chaleur, alimentant des quartiers ou des îlots, font partis de ces évolutions.

Il est possible d'expliquer l'essor de ces systèmes de petites échelles par l'accumulation d'innovations dans les réseaux de chaleur : nouvelles sources d'alimentations décentralisées (énergie fatale, solaire thermique, géothermie superficielle notamment), stockage thermique, nouveaux équipements de communications (relevé des consommations pour mieux adapter besoins et productions), matériaux isolants ou encore réseaux fournissant du chaud et du froid. Toutes ces évolutions ne sont pas encore généralisées. Certaines technologies ne sont pas encore forcément matures (ex : pompes à chaleur hautes températures) et il y a très peu de retour d'expérience. Les projets déjà réalisés intégrant l'une des innovations citées sont très majoritairement des réseaux récents (moins de 10 ans) et de petites tailles (3.2.2 Exemples de réalisations).

⁶ Extension de réseau de chaleur : Si la puissance de la chaufferie le permet (ou si une augmentation de la puissance est possible), le réseau de chaleur existant peut être étendu afin de desservir de nouveaux quartiers.

⁷ Densification de réseau de chaleur : Il s'agit d'augmenter le nombre de bâtiments raccordés au réseau. Mais dans le cas de la densification, les nouveaux raccordements sont recherchés sur le tracé existant du réseau.

1.4.5. Températures des réseaux de chaleur : évolution et enjeux

Le régime de température des réseaux de chaleur est un paramètre clé de l'évolution de ces systèmes, notamment dans une perspective d'efficacité énergétique, d'économie de la ressource et de rentabilité et d'intégration d'énergies alternatives.

Le terme « régime de température » distingue la température « aller » de la température « retour » du réseau. Un réseau de chaleur étant une boucle fermée, l'eau chaude est distribuée dans les canalisations à température élevée puis, une fois les calories prélevées dans les sous-stations, repart via les canalisations retour vers une chaufferie à une température plus faible. Un réseau de chaleur 110/80°C aura donc une température « aller » de 110°C et une température retour de 80°C. Il arrive de parler d'une seule température de réseau, il s'agit alors de la température aller.

Comme expliqué dans l'historique (1.2), les premiers réseaux de chaleur transportaient de l'eau sous forme de vapeur, à des températures proches de 200°C. Aujourd'hui, certains nouveaux réseaux ont des régimes de température de 60/50°C, comme à l'écoquartier Sainte-Genève (Menanteau & Blanchard, 2013) et on assiste aussi à l'essor de boucles d'eau chaude très basse énergie, entre 15 et 25°C (Kim, 2017).

Dans le rapport "Economic and Design Optimization in Integrating Renewable Energy and Waste Heat with District Energy Systems", l'Agence International de l'Energie (AIE) et ses experts (Spurr et al., 2014) proposent une classification des réseaux des réseaux de chaleur en fonction de l'état du fluide caloporteur, l'eau, et de la température aller du réseau (Tableau 1-3) :

Tableau 1-3 Classification en température des réseaux de chaleur

		Pic de température aller	Pression de la vapeur
Vapeur	Haute pression	194 °C	13,8 bar
	Basse pression	126 °C	1,4 bar
Eau chaude	Haute température	120 °C	
	Température moyenne	100 °C	
	Basse température	70 °C	

Les réseaux utilisant de la vapeur sont ceux dont la température est supérieure à 120°C. Parmi les catégories proposées pour les réseaux d'eau liquide, trois classes ordonnent les réseaux : ceux à hautes-températures au-dessus de 100°C, les réseaux à températures moyennes entre 70°C et 100°C et de réseaux basses-températures en dessous de 70°C.

Lund (2014) a entrepris une démarche similaire en exposant des générations de réseaux de chaleur en fonction de l'évolution des technologies. Il y ajoute une donnée chronologique sur l'évolution des températures moyennes (Figure 1-6).

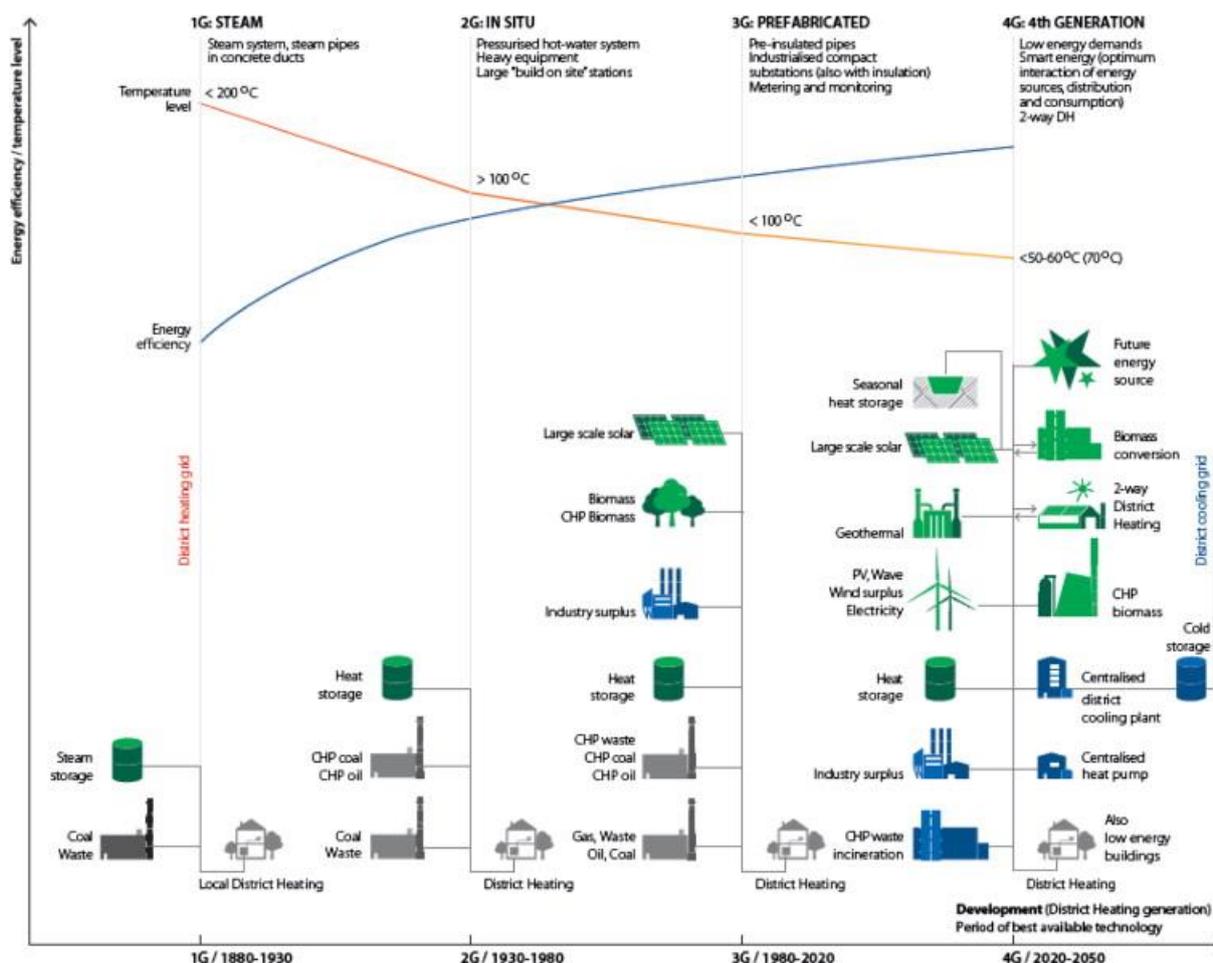


Figure 1-6 Illustration du concept de 4ème génération de réseaux de chaleur, en comparaison avec les trois générations précédentes (Lund et al. 2014)

Les réseaux de première génération correspondent aux premiers réseaux créés, entre la fin du XIXème et le début du XXème siècle et essentiellement alimentés par du charbon. La chaleur de la vapeur distribuée pouvait atteindre 200°C. Suivent les réseaux de deuxième génération, à partir des années 1930. En plus des énergies fossiles, la cogénération a commencé à se développer, surtout dans les pays scandinaves, plus consommateurs de chauffage et donc naturellement plus disposés à développer des moyens de produire de la chaleur. Les réseaux de chaleur passent à cette époque à l'eau liquide, pressurisée, à plus de 100°C. Les réseaux de troisième génération sont les premiers réseaux à passer sous une température de 100°C, même si certains réseaux construits après les années 1980 sont au-dessus de cette valeur. Le mix énergétique de ces réseaux a largement évolué et des énergies renouvelables et de récupération sont apparues : la biomasse, la chaleur fatale issue d'industries (incinérateurs d'ordures ménagères en France) et le solaire thermique. Les réseaux de quatrième génération sont le futur des chauffages urbains même si certaines technologies sont déjà développées dans certains réseaux européens. Ces réseaux sont alimentés par de multiples énergies thermiques décarbonées et des sources électriques (photovoltaïques, éoliennes) qui permettent de faire fonctionner des PAC afin de chauffer l'eau des réseaux. La température pour les réseaux de quatrième génération est basse puisqu'ils sont sous les 70°C (2.1.2).

La Figure 1-6 montre clairement une baisse des températures au cours du temps (courbe rouge). Elle est corrélée avec la courbe de l'efficacité énergétique (courbe bleue), appelée Energy Efficiency. Ici, l'efficacité énergétique est représentée de façon qualitative mais la raison principale de son augmentation est la baisse des pertes de distribution liée à ce changement de température. Il y a donc

un réel enjeu à proposer des températures basses, à la fois sur la température aller et la température retour.

L'abaissement de la température aller est limitée par la demande des bâtiments raccordés et leurs émetteurs de chauffage. En effet, certains émetteurs de chauffage sont dimensionnés à 90-70°C pour des bâtiments anciens mal isolés (radiateurs hautes températures), à 80-60°C pour des bâtiments moyennement isolés (IBGE, 2011). Pour des bâtiments plus performants, des radiateurs basses températures sont utilisés, à 70-50°C, et les températures sont encore plus basses pour des planchers chauffants (40-30°C, voire moins). Le Tableau 1-4 résume les régimes de températures des différents émetteurs de chauffage (qui sont fonction de la température extérieure). La température départ d'un réseau de chaleur ne peut donc pas être inférieure à la température des émetteurs les plus élevés des bâtiments qu'il alimente. De plus, dans le cas où le réseau de chaleur distribue de l'ECS, la température départ du réseau doit être de minimum 65°C afin d'éviter le risque de légionellose⁸ (distribution à 60°C minimum).

Tableau 1-4 Régimes de température des émetteurs de chauffage (données ENGIE)

Température extérieure	-5 °C		0 °C		5 °C		10 °C	
	T aller	T retour						
Convecteur	90 °C	80 °C	75 °C	69 °C	64 °C	58 °C	51 °C	47 °C
Radiateur HT	70 °C	55 °C	60 °C	47 °C	48 °C	40 °C	37 °C	32 °C
Radiateur BT	60 °C	50 °C	50 °C	43 °C	43 °C	37 °C	34 °C	30 °C
Plancher chauffant	45 °C	38 °C	40 °C	34 °C	34 °C	30 °C	29 °C	26 °C

L'intérêt de baisser au maximum la température départ d'un réseau de chaleur est lié aux pertes de distributions qui se verront réduites. Dans une étude de 2011 sur des solutions d'optimisation de réseaux de chaleur commanditée par l'AMORCE et réalisée par la société Inddigo (Inddigo, 2011), le passage d'un réseau de chaleur de 80/33°C à 65/33°C, possible grâce à une rénovation de certains bâtiments anciens, a permis une diminution de 16 % des pertes thermiques.

Comme l'explique L.Quiquerez (2017) dans sa thèse sur le développement du chauffage urbain en Suisse, les transferts de chaleur d'un réseau correspondent en tout temps à la combinaison d'un débit et d'une différence de température entre les canalisations aller et retour. Cette différence doit être suffisante pour assurer la capacité de transport de la chaleur sur l'ensemble du réseau. La puissance à fournir (P en W) se calcule donc ainsi :

$$(1) P = Qm_{eau} * Cp_{eau} * \Delta T$$

Avec Qm_{eau} (en kg/s) le débit massique de l'eau, Cp_{eau} la chaleur massique de l'eau (J/kg.°C qui est fixe à l'état liquide) et ΔT la différence de température dans les canalisations aller et retour.

Plus ΔT est élevée, plus le débit nécessaire pour fournir une puissance P est faible. Cette réduction du débit permet d'effectuer d'importantes économies sur les diamètres des canalisations du réseau de distribution. La consommation électrique des pompes de circulation est également baissée dans ce

⁸ La légionellose est une maladie pulmonaire due à une bactérie appelée Legionella. Celle-ci se développe dans les eaux stagnantes entre 25 et 42°C environ. Elle se transmet à l'être humain par inhalation et peut être mortelle. La distribution est donc imposée à au moins 60°C. (Legifrance, 2010)

cas. Il y a donc un fort intérêt à abaisser au maximum la température retour des réseaux de chaleur, où la contrainte liée à la température des émetteurs de chauffage est absente.

Plusieurs études et recherches sont menées pour optimiser cette température retour vers un minimum fonctionnel, en s'intéressant notamment au contrôle des sous-stations (Inddigo, 2011; Lauenburg & Wollerstrand, 2014; Rosén, 2016; Sallent Cuadrado, 2009).

En plus des gains économiques, l'intégration de plus de sources d'approvisionnement devient possible grâce à l'abaissement du régime de température.

L'AIE, dans son rapport sur l'intégration des énergies renouvelable et de récupération dans les systèmes énergétiques, résume les températures de plusieurs sources étudiées à travers la Figure 1-7.

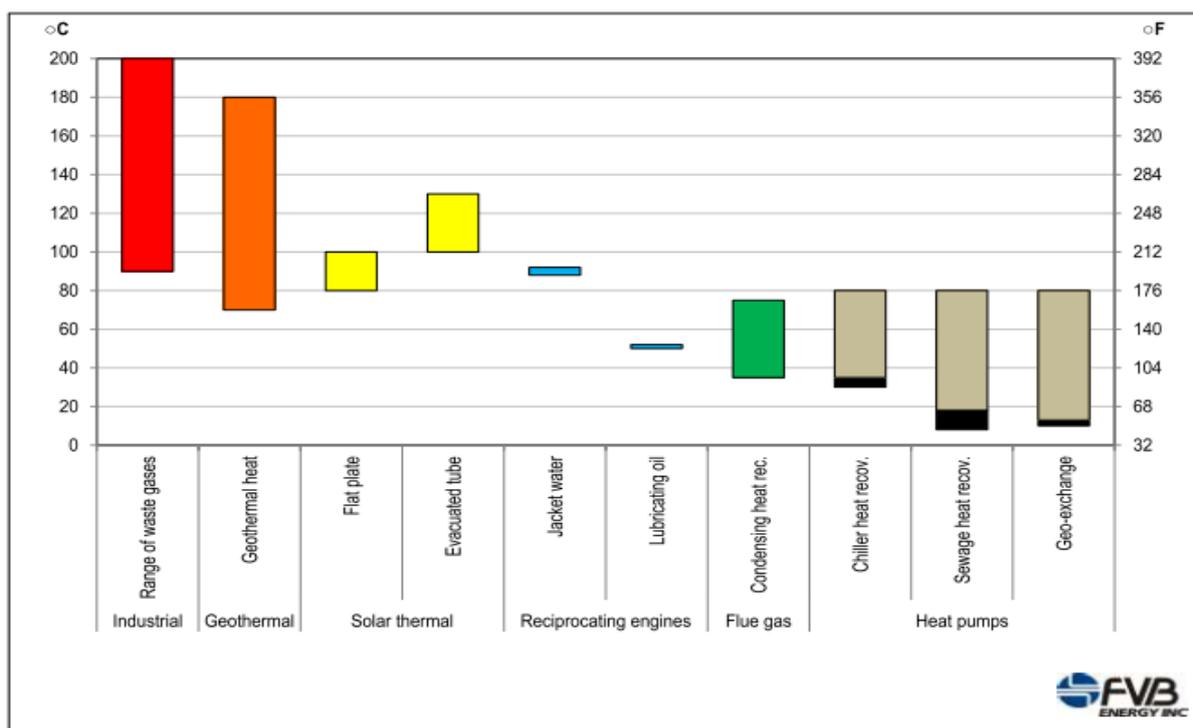


Figure 1-7 Températures de sources de chaleur renouvelables et de récupération (Spurr et al. 2014)

Les sources de chaleur étudiées sont classées en fonction des températures auxquelles elles sont disponibles. L'énergie issue de procédés industriels rejette de la chaleur entre 90 et 200°C (voir plus) et est donc compatible avec des régimes de température de réseaux de chaleur élevés. La géothermie (70-180°C) et les sources connectées à des PAC (entre 10 et 40°C) ne pourront être valorisées que dans des réseaux aux régimes de températures plus bas. Le passage à des réseaux basses températures est donc un levier pour mobiliser une plus grande diversité et quantité d'énergies renouvelables et de récupération.

1.4.6. Acteurs et modes de gestion des réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur mettent en relation différents acteurs, aux besoins et compétences diverses, de l'opérateur du réseau aux usagers finaux, en passant par la collectivité locale ou les gestionnaires des bâtiments raccordés. Les principaux acteurs et leurs interactions sont répertoriés dans la Figure 1-8. Il existe plusieurs façons d'assurer la gestion de ces systèmes en fonction des choix de ces acteurs.

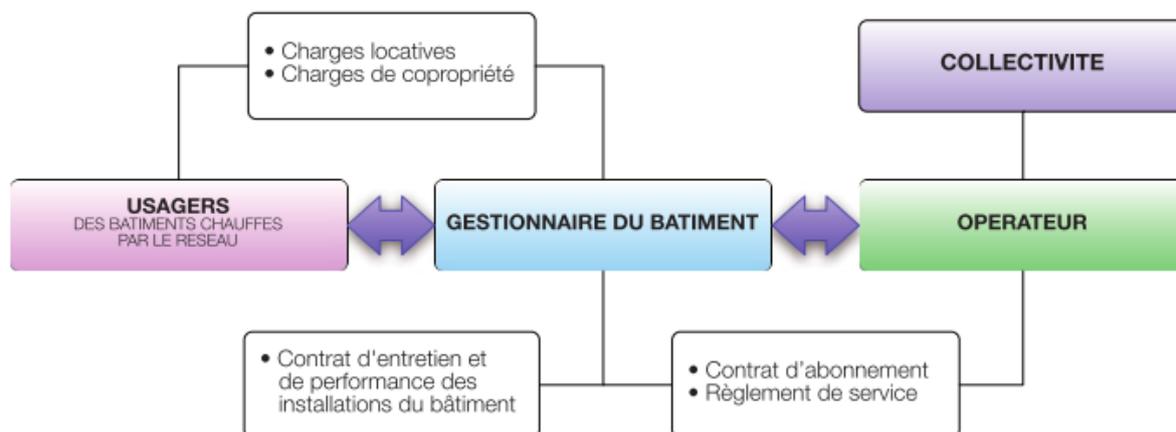


Figure 1-8 Acteurs principaux des réseaux de chaleur et interactions (Via Seva and ADEME 2009)

La collectivité territoriale est l'acteur qui peut décider de l'installation d'un réseau de chaleur sur son territoire. Ce dernier est limité à la commune dans un cas classique mais peut s'étendre à plusieurs communes dans le cas d'intercommunalité⁹ (dans ce cas précis, plusieurs collectivités s'organisent ensemble). Le rôle de la collectivité est de construire et piloter un réseau de chaleur.

Il se peut que le réseau de chaleur soit une initiative privée, notamment dans le cas où la collectivité ne souhaite pas investir dans un projet de création de réseau sur une zone d'aménagement (Lefrère, 2014a). Des usagers (associations de copropriétaires, bailleurs, universités, etc.) s'associent alors pour devenir les gestionnaires du réseau. Environ 21% de l'énergie livrée dans les réseaux français proviennent de réseaux privés (AMORCE, 2016a).

Différents montages juridiques existent pour la gestion du réseau de chaleur par la collectivité territoriale. En effet, elle a la possibilité de déléguer une partie des tâches (ou la totalité) liées à la construction et au pilotage du réseau à un autre acteur, l'**opérateur** de réseaux de chaleur. L'opérateur est très souvent une société privée spécialisée (Dalkia, Engie Réseaux, Engie Cofely, IDEX pour les plus connues en France) mais la collectivité peut également faire appel à une société publique externe. Il s'agit d'un mode de gestion en délégation de service publique (DSP). Par définition, il s'agit d'un contrat qui autorise un délégataire à gérer un service public dont elle a la charge. C'est le cas le plus courant. Deux types de contrats sont possibles lors d'une DSP :

- L'affermage : dans ce contrat, la construction et le financement du réseau revient à la collectivité. Le délégataire s'occupe de la gestion de ce service public, et ce, contre une rémunération versée par les usagers.
- La concession : ce contrat stipule que le concessionnaire (une société privée) prend en charge la gestion du réseau mais également les investissements pour sa création.

Si le gérant du réseau de chaleur ne fait pas appel à un opérateur, il s'agit d'une gestion en régie. Le gérant s'occupe alors de la conception et de l'exploitation du réseau de chaleur grâce à des ressources internes.

Le Tableau 1-5 résume de façon simplifiée les modes de gestion des réseaux de chaleur

⁹ L'intercommunalité est une forme de coopération entre plusieurs communes voisines qui peuvent se regrouper et former ainsi un établissement public de coopération intercommunale (EPCI)

Tableau 1-5 Modes de gestion des réseaux de chaleur (CEREMA, 2014)

	Construction	Exploitation
Régie	Collectivité Territoriale	Collectivité Territoriale
DSP : affermage	Collectivité Territoriale	Déléataire
DSP : exploitation	Déléataire	Déléataire

La mise en régie est le mode de gestion le moins fréquent en France et ne concerne que 20% des réseaux (SNCU, 2014). La raison est le besoin de compétences spécifiques et de moyens financiers pour le montage de tels projets. Ces réseaux sont d'ailleurs de petites tailles avec une puissance installée assez faible (inférieure à 3,5 MW). En quantité de chaleur livrée, la gestion en régie ne représente que 5% du total français. Près de 85% de l'énergie finale des réseaux de chaleur est distribuée par une DSP comme le montre la répartition des modes de gestion en Figure 1-9.

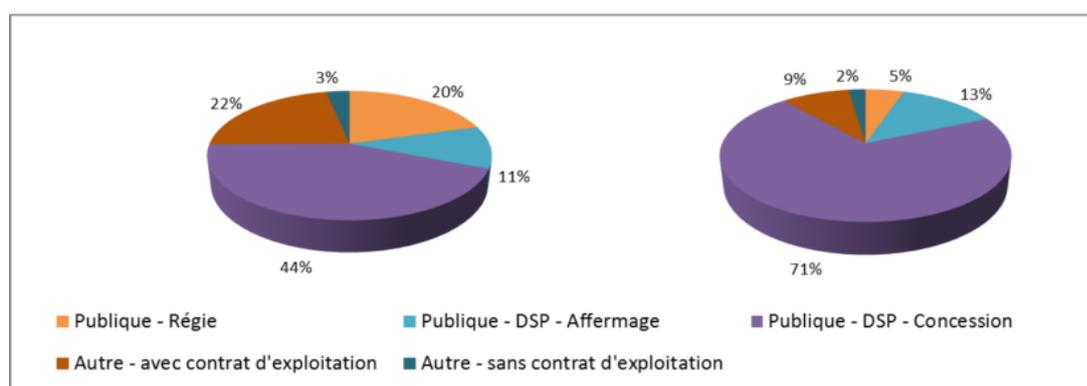


Figure 1-9 Mode de gestion des réseaux de chaleur (en nombre de réseaux à gauche et en énergie finale en GWh/an à droite) (SNCU 2014)

L'**usager** est l'acteur final, le consommateur de l'énergie distribuée par le réseau de chaleur. Dans le cas où le bâtiment raccordé est géré par l'unique occupant (bâtiments publics, hôpitaux, écoles, certains bâtiments de bureaux, etc.), cet occupant est à la fois le client du réseau de chaleur et l'utilisateur final. Dans le cas de bâtiments collectifs, le **gestionnaire du bâtiment** (copropriété ou bailleur) est alors le client du réseau et paye l'opérateur. Les usagers finaux paient ce gestionnaire via des charges locatives.

Le développement d'un réseau de chaleur peut impliquer d'autres acteurs, notamment sur les phases de décision autour des scénarios de raccordement ou non de bâtiments ou zones d'aménagements. Il s'agit de **promoteurs** à l'échelle du raccordement de bâtiments et de l'**aménageur** à l'échelle d'une zone d'aménagement.

Cette multiplicité d'acteur interroge sur le rôle de chacun d'eux, surtout sur la question du porteur d'un projet de réseau de chaleur. Plusieurs lois récentes (MAPTAM en 2014, TECV et NOTRe en 2015) encadrent ces projets et font évoluer les rôles de ces acteurs. Ce sujet est traité dans le second chapitre de cette partie (2.2.2 **Prise en compte des réseaux de chaleur dans la planification urbaine**).

1.5. Coûts et facturation des réseaux de chaleur

La question économique influe fortement sur la viabilité d'un projet de réseau de chaleur. Les **coûts d'investissement**, le **mode de facturation** et les **aides financières** sont expliquées dans cette partie.

Les **coûts d'investissement** pour la création d'un réseau de chaleur sont plus élevés que pour tous les autres systèmes de chauffages, qui sont individuels ou collectifs mais à l'échelle d'un seul bâtiment. Pour cette raison, ces coûts sont amortis sur de longues périodes (entre 20 et 30 ans environ). L'investissement se décompose en deux postes majeurs qui sont **la/les chaufferie(s)** et le **réseau de distribution** (CEREMA, 2012).

Une chaufferie est un bâtiment qui contient des chaudières, pompes et autres systèmes de circulations, ainsi que d'autres équipements annexes. Son coût dépend globalement de la puissance installée et du combustible utilisé (gaz, fioul ou bois). L'investissement peut se rapporter à un coût au kW installé. Plus l'installation a une puissance élevée, plus cet indicateur (€/kW) est faible. A titre d'exemple, selon l'étude de l'ADEME de 2015 sur les coûts d'investissement et d'exploitation des installations biomasse énergie (ADEME, 2015a), une chaufferie biomasse coûte 1106 €/kW pour les petites installations (< 1000 kW) et coûte 611 €/kW pour une puissance installée supérieure à 3000 kW.

Le **coût d'un réseau de distribution** est le produit de la longueur de canalisations et d'un coût unitaire par mètre linéaire (€/ml). Ce dernier dépend du diamètre des canalisations (lui-même fonction de la puissance à transporter tronçon par tronçon) et surtout de l'environnement de pose. En milieu urbain, ce coût va jusqu'à 1500 €/ml alors qu'il peut être cinq fois plus faible dans une zone peu dense (300 €/ml) ou en cours d'aménagement (Prévo, 2006).

Le coût lié aux études, à la maîtrise d'œuvre et aux frais annexes n'est pas négligeable. Selon une étude ADEME/Perdurance de 2009 (ADEME, 2009), ces coûts représentent 10% du montant d'investissement (somme de l'investissement pour les chaufferies et pour le réseau de distribution).

En plus de ces investissements, il faut ajouter les coûts annuels de maintenance, de remplacement du matériel et le coût des énergies (combustibles), ce qui donne des coûts globaux très élevés. En ordre de grandeur, la Figure 1-10 présente quelques coûts d'investissements de trois réseaux de chaleur biomasse et géothermiques :



Figure 1-10 Exemple de coûts d'investissement de réseaux de chaleur (Lefrère 2014)

Les réseaux de chaleur, investissements très capitalistiques, sont tout de même des systèmes de chauffage compétitifs en milieu urbain, grâce à un amortissement long terme, qui se retrouve dans la facturation.

La facturation de la chaleur fournie par un réseau se décompose en deux parts, comme pour le gaz et l'électricité : R1 pour la part variable et R2 pour la part fixe.

R1, la part variable, se calcule à partir de la consommation d'énergie. C'est le produit de cette quantité d'énergie et du prix de la chaleur, lui-même dépendant du prix du combustible ou de l'énergie utilisée. Cette part représente entre 30% et 70% en fonction des systèmes. Par exemple, un réseau de chaleur fonctionnant majoritairement avec de la géothermie aura un R1 très faible contrairement à un réseau tout combustible.

R2, la part fixe, est fonction de la puissance souscrite (ou de la surface du logement) et correspond à la somme de l'amortissement des investissements (appelé R24), les charges du remplacement de matériel et du gros entretien (R23), les charges liées à l'entretien (R22) et les charges d'électricité nécessaire au fonctionnement des pompes permettant la production et la distribution de la chaleur (R21). Cette part est la plus élevée dans la facture du chauffage par réseau de chaleur.

L'avantage d'avoir une part variable minoritaire est d'être moins dépendant du prix de l'énergie et de sa fluctuation. AMORCE, réseau français d'information, de partage d'expériences et d'accompagnement des collectivités et autres acteurs locaux, montre dans son étude comparative des systèmes de chauffage (AMORCE, 2016a) que les réseaux de chaleur ont la part fixe la plus élevée (derrière les PAC collectives géothermiques). C'est d'autant plus vrai pour les réseaux de chaleur alimentés majoritairement par des EnR&R (de 57% à 69% pour la part fixe R2 en fonction de la performance des bâtiments raccordés), comme illustré Figure 1-11.

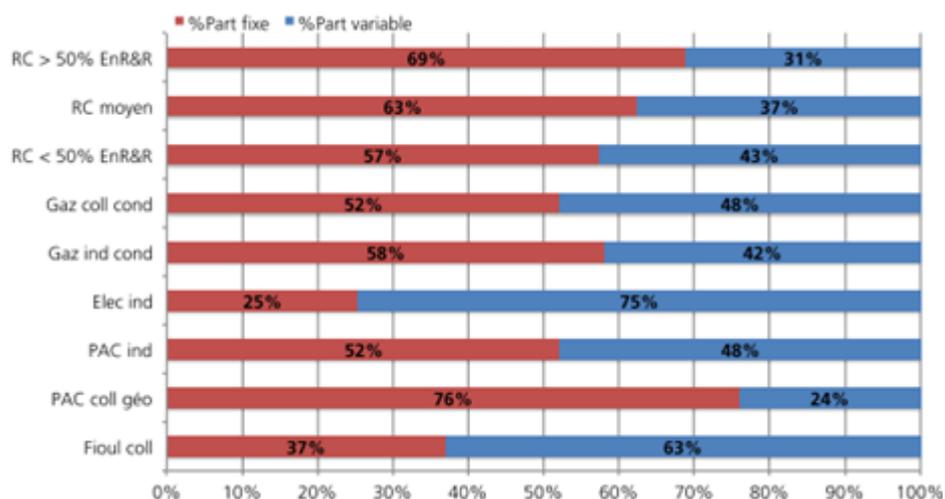


Figure 1-11 Part variables et fixes du coût global par mode de chauffage (en 2013 pour des bâtiments types RT 2005, (AMORCE 2016a)

L'association AMORCE effectue chaque année une analyse statistique des prix de vente de chaleur en comparant différents modes de chauffage. En 2015, le prix de vente moyen hors taxe (HT) de la chaleur des réseaux de chaleur s'élève à 72,2€ HT/MWh mais avec une dispersion assez forte des prix, allant de 40€HT/MWh à 140€HT/MWh (AMORCE, 2016a). Plusieurs paramètres influencent ce prix, comme la densité (cf. 1.4.2), la rigueur climatique (avec des hivers plus ou moins froids), le parc de bâtiments raccordés (plus ou moins anciens et donc énergivores), les sources d'énergie utilisées, le taux d'EnR&R du réseau de chaleur. A noter qu'en moyenne, le prix moyen est plus faible (69,8€HT/MWh) pour un réseau de chaleur avec un taux d'EnR&R supérieur à 50%. La différence sera encore plus importante après ajout des taxes grâce à la TVA réduite. Les parts fixes et variables de la facturation sont taxées, comme le gaz et l'électricité. La part fixe R2 est soumise à une TVA réduite (5,5%). Pour la part variable

R1, cette taxe est réduite à 5,5% si la part d'EnR&R dans le réseau de chaleur est supérieure à 50%. Sinon, la TVA classique est de 20%.

AMORCE a également publié dans son rapport (AMORCE, 2016a) une étude comparant les systèmes de chauffage en coût global annuel pour un logement (en € TTC/logement/an). Ce coût comprend toutes les dépenses de chaque système. L'étude s'effectue pour trois types de logements issus de trois types de bâtiments : un bâtiment type RT 2005, consommant 120 kWh/m²/an, un bâtiment moyennement isolé, consommant 170 kWh/m²/an et un bâtiment ancien, consommant 300 kWh/m²/an. Les résultats (Tableau 1-6) montrent que les réseaux de chaleur (notés RC dans le tableau) font partis des systèmes les plus compétitifs avec les chaudières gaz à condensation collectives.

Tableau 1-6 Comparatif des systèmes de chauffage en coût global pour trois logements types (AMORCE 2016a)

Système de chauffage	Logement RT 2005 (120 kWh/m ² /an)	Logement moyen (170 kWh/m ² /an)	Logement ancien (300 kWh/m ² /an)
RC : valeurs moyennes	1 020 €/logement/an	1 266 €/logement/an	1 908 €/logement/an
Gaz collectif condensation	1 023 €/logement/an	1 226 €/logement/an	1 753 €/logement/an
Gaz individuel condensation	1 334 €/logement/an	1 553 €/logement/an	2 122 €/logement/an
Electricité individuel	1312 €/logement/an	1 732 €/logement/an	2 856 €/logement/an
PAC individuelle	1 525 €/logement/an	1 744 €/logement/an	2 313 €/logement/an
PAC collective géothermique	1 231 €/logement/an	1 555 €/logement/an	2 246 €/logement/an
Fioul collectif	1 219 €/logement/an	1 539 €/logement/an	2 369 €/logement/an

Enfin, plusieurs **aides publiques** accompagnent le développement des réseaux de chaleur.

Depuis 2009, le fonds chaleur finance Ce fond est géré par l'ADEME avec des cellules régionales qui étudient l'éligibilité des projets. Entre 2009 et 2013, plus d'un milliard d'euros ont été distribués à plusieurs centaines de projets.

Les collectivités locales peuvent également apporter un soutien financier aux projets de réseaux de chaleur. Le soutien peut aussi être technique, logistique ou méthodologique en fonction des compétences présentes.

D'autres mécanismes permettent d'accompagner le développement d'un réseau de chaleur, comme les certificats d'économie d'énergie pour valoriser des travaux sur des réseaux, ou encore les tarifs d'achat d'électricité pour les installations en cogénération.

1.6. Conclusion du chapitre 1

La présentation des réseaux de chaleur et de leur fonctionnement a permis de comprendre quelles sont les caractéristiques de ces systèmes locaux, tous uniques. En effet, ils peuvent être de taille, de mode de gestion, de mix énergétique ou de régime de températures divers en fonction de la configuration du milieu urbain qu'ils alimentent. Certains de ces critères sont d'ailleurs déterminants pour évaluer si le réseau de chaleur est viable sur un territoire.

Créés au début du XX^{ème} siècle dans les très grandes villes (des Etats-Unis puis en Europe), ces systèmes de chauffage ont d'abord alimenté les grands bâtiments publics. Plusieurs vagues de développement se sont succédé avec des évolutions technologiques notables. Historiquement, les chauffages urbains étaient des systèmes vapeur à haute température (>150°C) alimentés exclusivement par des énergies fossiles (charbon, fioul, gaz). Des matériaux isolants sur les canalisations de distribution, la baisse des régimes de températures liée aux nouveaux émetteurs de chauffage, une meilleure optimisation du réseau dans son ensemble, un verdissement du mix énergétique avec l'intégration de différentes énergies renouvelables et de récupération ou encore une meilleure prévision de la demande et donc de la production rendent aujourd'hui les réseaux de chaleur plus efficaces et attractifs.

Le coût est un point clé de la viabilité d'un réseau de chaleur. Les investissements liés à l'installation des chaufferies, au réseau de distribution et aux raccordements des bâtiments en font le système de chauffage en ville le plus capitalistique. Cependant, les analyses montrent que les réseaux de chaleur sont compétitifs par rapport aux autres systèmes au niveau de la facture finale aux usagers. Cette performance est possible grâce à une contractualisation sur le long terme qui lie un opérateur de réseau avec les bâtiments raccordés. De plus, lorsque le projet de réseau de chaleur est vertueux, des subventions permettent de réduire les investissements initiaux.

Les réseaux de chaleur, comme outils techniques, peuvent donc être des atouts pour les villes dans le contexte de leur transition énergétique. De par la complexité de la mise en œuvre de ces systèmes, due au temps des travaux et à leurs contraintes (fermetures de rues, voies routières), ainsi qu'à la multiplicité d'acteurs en lien avec ces projets, les réseaux de chaleur s'inscrivent dans des contextes d'aménagement des villes, qui vont au-delà de l'aspect technique. Le développement ou non des réseaux de chauffage urbain dépend également de la stratégie énergétique des territoires et d'une planification urbaine efficace.

Le second chapitre analyse en détail comment les réseaux de chaleur sont considérés dans les stratégies politiques urbaines et énergétiques à plusieurs échelles et comment les objectifs sont déclinés dans les réglementations. Si ces systèmes sont vus comme des leviers de la transition énergétique, ils sont encore minoritaires dans la part du chauffage en France, contrairement à d'autres

pays européens. L'analyse de ce contexte de développement des réseaux de chaleur, particulièrement à travers les outils de planification urbaine, met en lumière la complexité des systèmes, notamment sur le plan de la gouvernance. Le chapitre 2 aborde cette question avec pour objectif de comprendre les points clés pouvant dénouer cette complexité.

CHAPITRE 2 : ÉTAT DES LIEUX DES RESEAUX DE CHALEUR ET PLACE DANS LES STRATEGIES ENERGETIQUES ET LA PLANIFICATION URBAINE

Décrits dans le chapitre 1, les réseaux de chaleur sont des systèmes jugés clés de la transition énergétique, notamment grâce à leur potentiel d'intégration d'EnR&R en milieu urbain. Les dernières générations de réseaux de chaleur sont des systèmes encore plus efficaces, de par leurs caractéristiques et les innovations qu'elles présentent, pour participer aux objectifs d'augmentation de la part d'EnR&R. En France, les réseaux se développent mais restent minoritaires par rapport à d'autres systèmes de chauffage (7 % des citoyens raccordés en 2015) alors que certains pays européens en ont fait des outils centraux afin d'atteindre des objectifs environnementaux ambitieux.

La première section de ce chapitre présente un état des lieux des réseaux de chaleur en Europe et en France (2.1.1 Situation dans le Monde, en Europe et en France) puis précise les caractéristiques des dernières générations de ces systèmes (2.1.2 Nouvelle génération de réseaux de chaleur). Pour terminer avec la description du chauffage urbain, la section suivante dresse un tableau récapitulatif résumant les avantages et inconvénients du chauffage urbain (2.1.3 Avantages des réseaux de chaleur et inconvénients).

Dans le contexte de la transition énergétique en milieu urbain, les réseaux de chaleur ont une place nouvelle. Leur développement est encouragé à plusieurs échelles, notamment européenne, nationale et régionale à travers des objectifs chiffrés issus de directives et lois. C'est néanmoins à l'échelle locale, via une stratégie énergétique et une planification urbaine pensées en amont, que des projets peuvent voir le jour.

La prise en compte des réseaux de chaleur dans les objectifs environnementaux (2.2.1 Déclinaison des objectifs de développement des réseaux de chaleur) et leur place dans la planification urbaine et énergétique des territoires sont détaillées en début de seconde section (2.2.2 Prise en compte des réseaux de chaleur dans la planification urbaine). Cette description fait ressortir le besoin d'interaction entre énergie et urbanisme pour mener des actions de transition énergétique et notamment de développement de réseaux de chaleur.

Cette interaction évolue avec la mise en place de réglementations sur la planification urbaine qui intègrent plus efficacement l'énergie. Ces évolutions mettent en lumière l'importance de la gouvernance des projets de réseaux de chaleur dans leur réalisation. Le portage et les choix énergétiques sont dépendants de cette gouvernance, comme expliqué à travers plusieurs exemples dans la section 2.3 (2.3 Gouvernance des réseaux de chaleur). L'analyse introduit le besoin d'accompagnement des collectivités sur les sujets de réseaux de chaleur, plus particulièrement dans le cadre de la prise en compte de l'énergie fatale locale pour verdir le mix énergétique de ces réseaux.

2.

2.1. Etat des lieux des réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur étant présentés, ce paragraphe propose un état des lieux des installations déjà existantes puis une description des nouvelles générations de réseaux de chaleur et les innovations associées à ces systèmes.

Le dernier paragraphe résume les avantages et inconvénients de ses systèmes considérés comme moteurs de la transition énergétique.

2.1.1. Situation dans le Monde, en Europe et en France

Environ 80 000 réseaux de chaleur sont répertoriés dans le monde dont 85 % en Russie, Chine et Union Européenne (Werner, 2017). La Russie possède le plus grand nombre de réseaux de chaleur avec environ 18 000 systèmes (Euroheat & Power, 2015), principalement très anciens et obsolètes de par leur manque d'entretien. Ils sont d'ailleurs alimentés à 98 % par des énergies fossiles. A l'échelle mondiale, près de 93 % de l'énergie des réseaux de chaleur provient également de sources fossiles, dont la moitié issue de la cogénération (Werner, 2017).

Chaque année, le réseau européen EuroHeat & Power propose une étude statistique des réseaux de chaleur et froid en Europe.

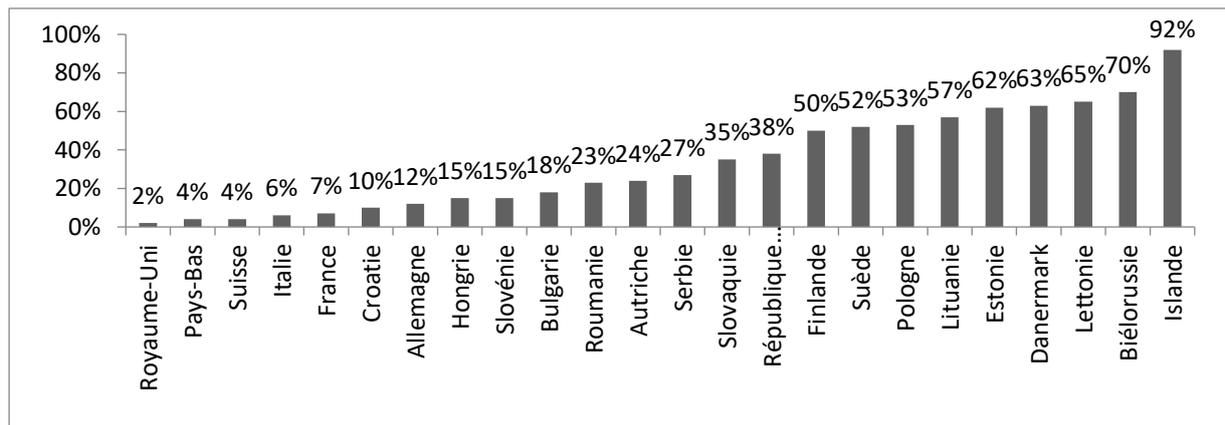


Figure 2-1 Pourcentage de citoyens raccordés à un réseau de chaleur en Europe en 2015 (Données Euroheat & Power)

La Figure 2-1 montre que la France est l'un des pays européens avec le taux de population raccordé à un réseau de chaleur les plus faibles avec 7%, même si celui-ci est en progression. En Europe, plus de 100 millions de citoyens sont chauffés par 4500 réseaux de chaleur (Euroheat & Power, 2015).

Certains pays, principalement nordiques et grands consommateurs de chaleur, ont largement développé leurs systèmes et plus de la moitié de leur population en bénéficie. Le cas de l'Islande est à part puisque ce pays bénéficie de l'abondance de chaleur issue de la géothermie pour alimenter presque l'intégralité de la population. En Europe, 13% des besoins de chauffage sont couverts par des réseaux de chaleur.

En France, en 2016, plus de 600 réseaux de chaleur sont recensés, ce qui représente plus de 4700 km de canalisation. Près de 23 TWh d'énergie thermique ont été livrés, répartis sur 2,27 millions d'équivalents logements¹⁰(SNCU, 2016).

Les réseaux de chaleur français ont un bouquet énergétique varié puisqu'ils sont alimentés à la fois par des énergies fossiles (gaz, fioul, charbon) et diverses EnR&R (biomasse, géothermie, déchets...). Pour la première fois en 2015, le taux d'EnR&R est passé au-dessus de 50%, comme le montre la Figure 2-2.

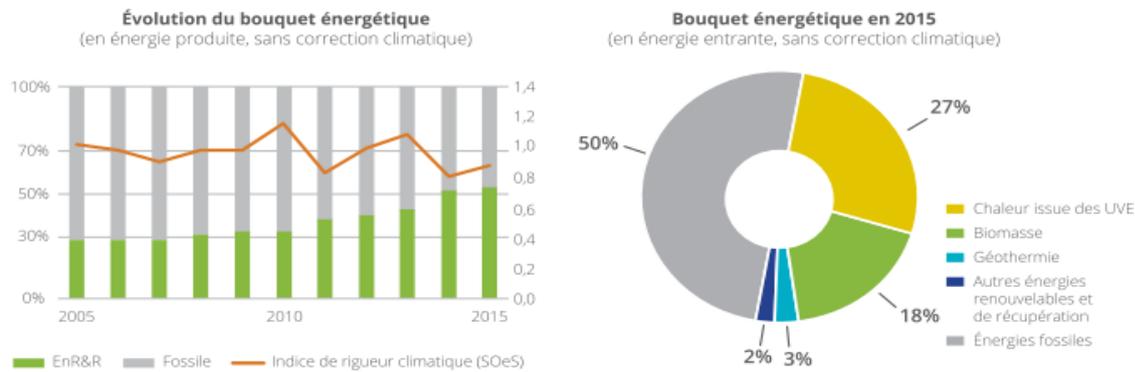


Figure 2-2 Bouquet énergétique des réseaux de chaleur français (SNCU, 2016)

Ce passage à plus de 50 % est tout de même à contraster. En effet, en corrigeant avec l'indice de rigueur climatique¹¹, le taux d'EnR&R retenu pour l'année 2015 est de 47%, soit 3% de plus qu'en 2014.

Environ la moitié de l'énergie produite provient donc des énergies fossiles (principalement du gaz). Au niveau des EnR&R, la chaleur fatale provenant des usines d'incinération d'ordures ménagères (appelées UVE pour usines de valorisation énergétique) est la principale source (27%), suivie de la biomasse bois (18%). Les autres EnR&R sont la géothermie et d'autres sources d'énergie fatale et représentent 5% du mix énergétique.

En dix ans, la quantité de chaleur provenant d'EnR&R produite et distribuée dans les réseaux de chaleur a augmenté de près de 60% (Figure 2-3), notamment avec le développement de la biomasse (+28% entre 2005 et 2015). Aujourd'hui en France, les réseaux de chaleur sont les systèmes de chauffage les moins émetteurs de CO₂ avec une moyenne de 0,139 kg/kWh par réseau derrière le chauffage électrique (0,101 kg/kWh) mais devant le gaz (0,234 kg/kWh) et le fioul domestique (0,300 kg/kWh) (SNCU, 2016).

¹⁰ Equivalent-logement : Unité de quantité d'énergie, essentiellement utilisée afin de donner une réalité « concrète » à des statistiques sur les quantités d'énergie livrées. Un équivalent-logement correspond à la consommation d'un logement de 70m² pour une rigueur climatique de 2 500 DJU (Degré Jour Unifié), soit environ 12 MWh (ou un peu plus d'une tonne-équivalent-pétrole) par an de chaleur utile en chauffage et eau chaude.

¹¹ L'indice de rigueur climatique est le rapport entre un indicateur de climat observé et un indicateur de climat de référence (période trentenaire). Cet indicateur est constitué par des degrés jours unifiés (écart journalier entre la température observée et 17°C). Par convention le degré jour unifié est égal à zéro si la température observée est supérieure ou égale à la température de référence.

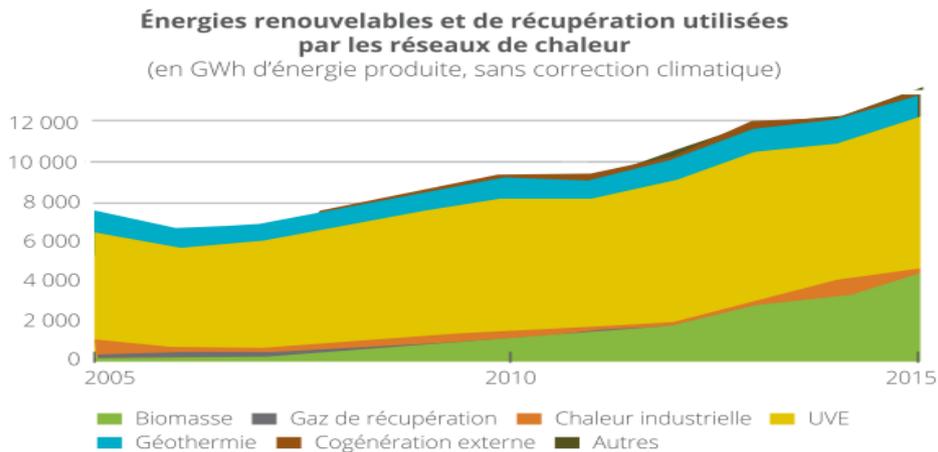


Figure 2-3 Evolution des EnR&R utilisées par les réseaux de chaleur français (SNCU, 2016)

Les objectifs européens et nationaux en matière de développement des réseaux de chaleur et de leur alimentation par des EnR&R sont ambitieux (2.2). En France, la loi 2015 de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) et d'autres évolutions réglementaires, économiques et techniques incitent le développement massif de chauffages urbains, considérés comme levier clé de la transition énergétique.

Les réseaux de chaleur innovants, vus comme ceux de 4^{ème} génération selon H. Lund (Figure 1-6 page 49) sont particulièrement mis en avant du fait des innovations qu'ils présentent et l'efficacité de ces systèmes.

2.1.2. Nouvelle génération de réseaux de chaleur

Comme évoqué dans l'historique, les réseaux de chaleur ont évolué depuis les premières installations du début du XX^{ème} siècle. Les progrès technologiques font de ces réseaux des systèmes parmi les plus efficaces pour répondre aux besoins de chauffage et d'ECS en milieu urbain tout en participant à la transition énergétique de ces territoires.

La Figure 1-6 (page 49) reprend les grandes évolutions des réseaux de chaleur au fil du temps, à savoir la baisse progressive des températures, permettant d'augmenter l'efficacité énergétique de ces systèmes (baisse des pertes de distribution principalement) et l'intégration d'une multitude de sources d'énergie décarbonée. Les nouveaux réseaux de chaleur, dits de 4^{ème} génération, sont donc des systèmes basses-températures (sous 70°C en température aller) et qui présentent des innovations technologiques précisées dans cette section et synthétisées Figure 2-4.

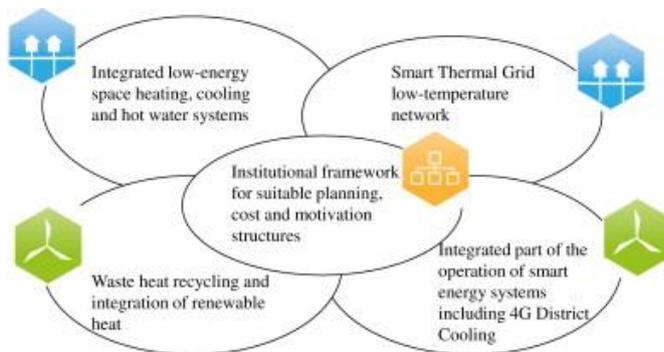


Figure 2-4 Illustration du concept de 4^{ème} Génération de réseaux de chaleur et de froid

Des régimes de température toujours plus bas

La température départ affichée pour ces réseaux est de 70 °C mais peut être abaissée dans certains cas. Si le réseau distribue de la chaleur pour du chauffage seulement (et pas d'ECS), cette température peut baisser jusqu'à 40 – 50°C si les émetteurs de chauffage sont compatibles, l'ECS devant être fournie à une température minimale de 60°C (pour des risques de légionellose, cf. note de bas de page n°8, page 50). La baisse des températures retours de réseaux de chaleur est également un enjeu économique. Le meilleur contrôle des sous-stations est une solution étudiée par Gadd et Werner (2014) pour abaisser ces températures.

Dans l'optique d'optimiser les régimes de températures, des architectures de réseaux de distribution différentes des réseaux classiques (une canalisation aller et une canalisation retour) sont envisagées.

Plusieurs architectures de réseaux possibles

En effet, des innovations sur les réseaux de distribution permettent d'utiliser des températures plus basses. L'épuisement (ou l'architecture en cascades) est un exemple déjà mis en place sur des réseaux existants. Le principe est d'utiliser le retour d'un bâtiment comme canalisation aller afin d'alimenter un autre bâtiment ou un quartier. Cette opération est possible dans le cas où le bâtiment ou le quartier qui est alimenté par cette canalisation retour est équipé d'émetteurs de chauffage à plus basse température que le premier bâtiment, fonctionnant avec des températures plus élevées. Köfing (2017) étudie l'intérêt de l'épuisement en analysant plusieurs architectures possibles sur le réseau de distribution, schématisées Figure 2-5.

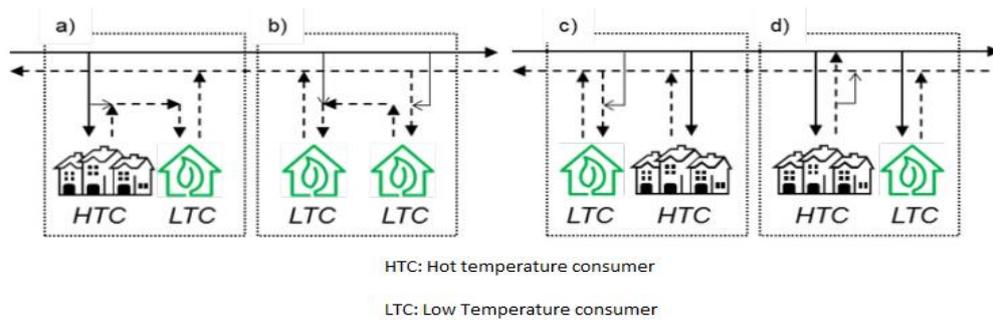


Figure 2-5 Représentation de plusieurs architectures de réseau de distribution de chaleur avec épuisement (Köfinger et al., 2017)

D'autres innovations sur l'architecture des réseaux de distribution sont intégrées à des réseaux de chaleur de 4^{ème} génération comme par exemple :

- Les réseaux 3 tubes : plusieurs architectures de réseaux de chaleur tri-tubes sont développées afin d'optimiser l'efficacité des systèmes en contrôlant au mieux les régimes de température.

Par exemple, dans le cas où les émetteurs de chauffage sont à basse température, le réseau de distribution peut présenter deux canalisations aller et une retour (Figure 2-6). Une des canalisations aller correspond à l'ECS, à une température minimale de 60°C, tandis que la seconde canalisations aller est dédiée au chauffage basse température. La canalisation retour absorbe les deux usages. L'avantage de cette architecture est la distribution du chauffage peut se faire à basse température et donc intégrer des EnR&R plus facilement, tandis que l'ECS est fournie à température réglementaire.

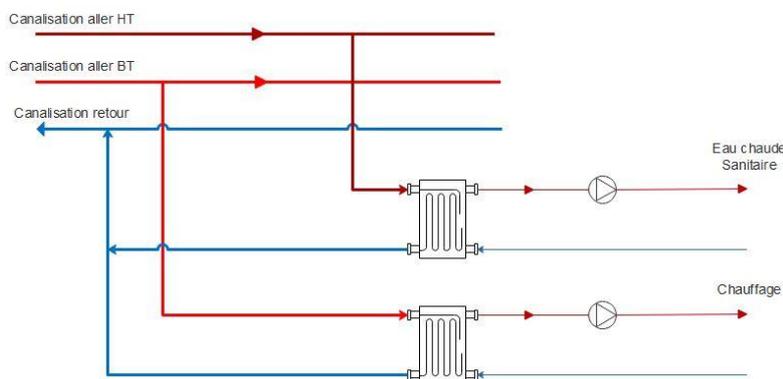


Figure 2-6 Exemple d'un réseau de distribution 3 tubes (source : auteur)

- Les boucles d'eau tempérée (BET) : il s'agit d'un système de distribution à très basse température, entre 0 et 25°C selon l'association française des professionnels de la géothermie (AFPG, 2015). Ce régime de température n'est pas suffisant pour répondre aux besoins thermiques, c'est pourquoi chaque sous-station est équipée d'une (ou plusieurs) pompe(s) à chaleur (PAC) pour rehausser ces températures et distribuer l'énergie pour le chauffage et/ou l'ECS, comme expliqué Figure 2-7. Ces pompes, dont le fonctionnement plus précis est décrit dans la partie 2 (4.4.3.2), produisent en leurs sorties de la chaleur à une température choisie à partir d'une source de chaleur plus basse température et l'apport d'électricité.

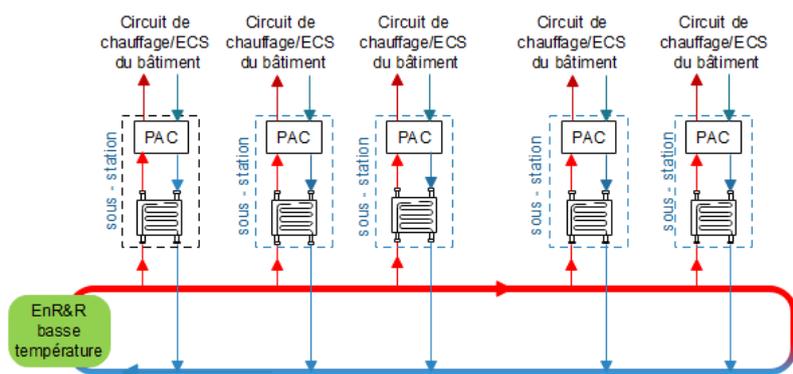


Figure 2-7 Exemple d'architecture d'une boucle d'eau tempérée (source : auteur)

Intégration du stockage thermique

Intégrer des systèmes de stockage thermique pour des réseaux de chaleur est une solution intéressante aux vues de l'intermittence de certaines sources de chaleur renouvelable (ex : solaire thermique) et de l'intermittence des besoins. Plusieurs études dressent l'état des lieux des technologies possibles et des projets déjà réalisés (ADEME & ATEE, 2016; AMORCE, 2016b).

Le stockage peut répondre à plusieurs situations :

- Pics de consommations journaliers, le matin et le soir (stockage journalier),
- Pics de consommations hebdomadaires, en début de semaine dans certains bâtiments comme les écoles ou bureaux (stockage hebdomadaire),
- Surplus de disponibilité de sources de chaleur renouvelable ou de récupération lors de la saison haute lorsque la demande en chauffage est faible voire nulle (stockage inter-saisonnier).

AMORCE synthétise les principales technologies de stockage existantes (Tableau 2-1) et montre que le stockage court-terme (noté CT dans le tableau) est plus mature et économique que le stockage long-terme (LT), correspondant au stockage saisonnier. Cette synthèse révèle également que la mise en place de certains systèmes de stockage dans les réseaux de chaleur est facilitée par l'abaissement des températures des nouveaux réseaux.

Tableau 2-1 Récapitulatif des technologies de stockage (AMORCE, 2016b)

Type		Durée	Température	Volume*	Densité (kWh/m ³)	Coût*	Maturité
Cuve de stockage sensible	Eau	CT	< 100 °C	●	35	€€	Industrielle
	Eau sous pression	CT	> 100 °C	●	Jusqu'à 40	€€	Industrielle
Sol	Sol/roche	LT	< 90 °C	●●●●	5 - 15	€	Industrielle
Aquifère	Eau/sable	LT	5 à 50 °C	●●●●	15 - 20	€€	Industrielle
Fosse	Eau	LT	< 90 °C	●●●	~35	€€€	Industrielle
	Eau/gravier	LT	< 90 °C	●●●	15 - 25	€€€	Industrielle
Grand réservoir	Eau (ou eau sous pression)	Mixte	>100 °C	●●	35 - 40	€€€€	Industrielle
MCP**	Classique	CT	-	-	80 - 100		R&D
	Surfondu	LT	-	-	100		Faible
	Solide/solide	LT	-	-	100		Très faible
Thermo chimique	-	LT	-	-	300 - 500		Très faible

* Valeurs qualitatives
 ** Matériau à changement de phase

Des Smart Grid thermiques

Le contrôle dynamique des températures, le pilotage des sous-stations ou encore l'ajout d'un système de stockage sont des innovations rendues possibles grâce à une meilleure instrumentation de tous les éléments du réseau. En effet, l'installation de capteurs communicants permet de relever des données de consommation, de production d'énergie en continu et de fonctionnement global (températures, débits, pressions). Ces données sont traitées pour optimiser le pilotage des réseaux de chaleur et pour dimensionner des éléments innovants.

Des réseaux de chaud et de froid

L'architecture en boucle d'eau tempérée est également propice à la distribution de froid pour des besoins de climatisation, en plus des besoins de chaleur. En effet, les pompes à chaleur décentralisées et installées dans chaque sous-station (schématisées Figure 2-7) peuvent être réversibles et ainsi produire de la chaleur en hiver et du froid en été. Une autre solution est d'installer une thermofrigopompe qui est un type de machine frigorifique capable de produire de la chaleur et du froid simultanément (Byrne, 2015).

Les nouveaux réseaux de chaleur intègrent donc plusieurs innovations dans leur conception et leur fonctionnement. La baisse des régimes de température de cette génération de réseaux (4^{ème} Génération) leur permet d'être plus efficace et d'utiliser une plus grande quantité et variété de sources de chaleur renouvelable ou de récupération et de verdir leur mix énergétique. La digitalisation de ces chauffages urbains en fait des Smart Grid thermiques, capables d'optimiser le pilotage et le dimensionnement du système, avec notamment de nouvelles architectures pour le réseau de distribution et des moyens de stockage. Lund (2014) ajoute que les réseaux de 4^{ème} Génération sont des systèmes durables seulement si leur conception et leur fonctionnement sont planifiés dans le temps et disposent d'une forte structure institutionnelle et organisationnelle. La planification des réseaux de chaleur en France est détaillée dans la section 2.2. Le prochain paragraphe résume les avantages et inconvénients des réseaux de chaleur, à partir des descriptions faites dans le Chapitre 1.

2.1.3. Avantages des réseaux de chaleur et inconvénients

Plusieurs études énumèrent déjà des avantages, limites et inconvénients des réseaux de chaleur. Ces études abordent principalement les sujets techniques, économiques et environnementaux, mais également les opportunités ou inconvénients sociétaux et sociaux. Les avantages les plus souvent énoncés sont la valorisation d'EnR&R locales, des émissions de GES et des coûts opérationnels plus faibles que pour d'autres systèmes tandis que les inconvénients sont principalement l'investissement très élevé et les difficultés de montage des projets. Le Tableau 2-2 reprend les principaux avantages et inconvénients répertoriés dans la littérature. Cette synthèse permet de résumer les intérêts et les freins déjà évoqués quant au développement de réseaux de chaleur.

Tableau 2-2 Avantages et inconvénients des réseaux de chaleur

		Sources
Avantages	Valorisation d'EnR&R locale en milieu urbain, difficilement possible avec d'autres systèmes de chauffage, et donc réduction des GES et des impacts du chauffage sur la qualité de l'air	(Goth, 2010; Jean Carassus, 2007; Marguerite, 2014)
	Sécurité liée à l'absence de chaudière individuelle dans les logements ou collective dans les bâtiments	(ADEME et al. 2008)
	Entretien d'équipement individuel inexistant et gain de place	(Goth, 2010; Jean Carassus, 2007; Marguerite, 2014)
	Coûts opérationnels plus faibles que d'autres systèmes de chauffage	(Goth, 2010; Jean Carassus, 2007; Marguerite, 2014)
	Prise de conscience privée et publique du changement climatique	(Jean Carassus, 2007)
	Création d'emplois locaux et d'une activité économique locale	(Jean Carassus, 2007; Marguerite, 2014)
	Stabilité du prix dans le temps	(Marguerite, 2014)
	Lissage des appels de puissance permettant une meilleure exploitation	(Marguerite, 2014)
	Système invisible en milieu urbain (canalisations souterraines)	(Marguerite, 2014)
Inconvénients	Difficultés de montage des projets liés à un grand nombre d'acteurs et des résistances politiques et institutionnelles	(Jean Carassus, 2007; Quiquerez, 2017; Rocher, 2013)
	Important investissement	(Goth, 2010; Jean Carassus, 2007; Marguerite, 2014; Quiquerez, 2017)
	Contrats longs termes et impossibilité de revenir en arrière	(Jean Carassus, 2007; Quiquerez, 2017)
	Contraintes d'installation et de maintenance du réseau : prise d'espace, accès aux galeries techniques	(Goth, 2010; Jean Carassus, 2007; Quiquerez, 2017)
	Gestion centralisée : une panne implique tous les bâtiments connectés	(Goth, 2010; Jean Carassus, 2007)
	Pertes de charges dans le réseau de distribution	(Goth, 2010; Marguerite, 2014; UNEP, 2015)
	Image négative : les réseaux de chaleur sont associés aux logements sociaux	(Marguerite, 2014)
S'oppose à la réhabilitation énergétique des bâtiments (rénovation)	(Quiquerez, 2017; Rocher, 2013)	

2.2.Place des réseaux de chaleur dans les politiques énergétiques et la planification urbaine en France

Cette section détaille dans un premier temps les objectifs d'évolution des réseaux de chaleur. Ils sont européens et nationaux et s'appliquent ensuite à l'échelle locale (2.2.1). En plus de ces objectifs chiffrés ambitieux, la stratégie des réseaux de chaleur est revue en France de façon à l'intégrer au mieux dans la planification urbaine (2.2.2).

2.2.1. Déclinaison des objectifs de développement des réseaux de chaleur

Avec des objectifs internationaux, européens, nationaux et territoriaux de lutte contre le changement climatique, le développement des réseaux de chaleur est considéré comme un levier de la transition énergétique en Europe puisqu'il s'inscrit dans la directive 2012/27/UE, qui fixe les objectifs du « 3 x 20 » pour 2020 (Parlement Européen, 2012):

- 20% d'émission de gaz à effet de serre par rapport à 1990,
- 20% d'utilisation d'énergie provenant de sources renouvelables,
- 20% d'augmentation de l'efficacité énergétique, par rapport à 1990.

La contribution des réseaux de chaleur pour atteindre ces objectifs est abordée dans l'Annexe VIII de cette directive, qui rappelle notamment les évaluations de potentiels à effectuer par les Etats de l'Union Européenne : estimation de l'évolution de la demande en chaleur et froid au cours des dix prochaines années, inventaire des infrastructures existantes et prévues de production de chaleur et de froid, les points d'approvisionnement potentiels en chaleur et froid (usines d'incinérations de déchets, installations de cogénération existantes ou prévues, installations de productions d'électricité supérieure à 20 GWh). Le potentiel d'efficacité énergétique des infrastructures des réseaux existants (réduction des pertes) est également demandé, tout comme les stratégies politiques mises en place pour les horizons 2020 et 2030.

Le Ministère de l'Energie a établi un Programmation Pluriannuelle des Investissements (PPI) de production d'énergie utilisée pour la chaleur en 2009. Il décline par filière, c'est-à-dire par source d'énergie, l'objectif du passage à 23% d'EnR&R dans le mix énergétique français en 2020. Cette augmentation de la part d'EnR&R se traduit pour les réseaux de chaleur par un passage de 0,5 Mtep à 3Mtep, soit six fois plus qu'en 2009. La partie sur le développement des réseaux de chaleur de ce PPI chaleur est largement inspirée d'un autre document majeur, le rapport Prévot, paru en 2006 (Prévot, 2006) et mandaté par le ministère de l'industrie. Les deux Grenelle I et II (2009 et 2010) et le PPI chaleur ont débouché sur plusieurs engagements :

- Diminution de 75% des émissions gaz à effet de serre d'ici 2050, par rapport à 1990,
- Baisse de 38% de la consommation d'énergie dans les logements anciens d'ici 2020, par rapport à 1990,
- Création du Fonds chaleur, soutien financier appuyé aux réseaux de chaleur alimentés par des EnR&R,
- Triplement du nombre de bâtiments raccordés aux réseaux de chaleur en 2020 (comparé à 2005),
- Etudes d'EnR&R pour les opérations d'aménagement. Les réseaux de chaleur font parties des opérations en question et le recours aux EnR&R doit être facilité par la planification,

- Révision de la procédure de classement¹² des réseaux de chaleur et de froid.

En 2015, la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) a apporté de nouveaux objectifs à l'horizon 2030. Concernant le chauffage urbain, une multiplication par cinq de la quantité d'EnR&R livrée par des réseaux de chaleur et de froid est évoquée (CEREMA, 2016b). D'autres évolutions sont apportées par cette loi :

- La commune ou l'intercommunalité voit sa compétence énergie élargie. Cette dernière intègre la compétence « création, aménagement, entretien et gestion de réseaux de chaleur ou de froid urbains » (AMORCE, 2014). C'est donc sous le contrôle de la commune ou l'intercommunalité qu'un réseau de chaleur peut se créer et évoluer ;
- Mise à disposition des données énergétiques (consommations à l'échelle des bâtiments notamment) par les gestionnaires de réseaux aux acteurs publics détenant la compétence énergie ;
- Obligation pour la collectivité territoriale de réaliser un schéma directeur de réseau de chaleur ou de froid (évaluation de la qualité du réseau actuel et développement) ;
- Renforcement des obligations d'intégration de stratégie de développement des réseaux d'énergies dans les documents d'urbanisme, entraînant de nouvelles opportunités de développement des réseaux de chaleur ou de froid dans l'aménagement local.

Le dernier point s'inscrit dans une série de documents stratégiques et d'urbanisme à des échelles régionales et locales.

2.2.2. Prise en compte des réseaux de chaleur dans la planification urbaine

La réalisation d'un projet de réseau de chaleur est liée à une stratégie énergétique territoriale. EnergyCities (association européenne des autorités locales en transition énergétique) définit la stratégie énergétique territoriale comme « *un processus qui permet aux collectivités de mener un aménagement du territoire autonome et durable* » (Girard-Madoux, 2012). Elle organise dans le temps et dans l'espace des actions concertées liées à l'énergie, et qui respectent les objectifs nationaux précédemment évoqués.

Cette stratégie énergétique se décline dans la planification urbaine des territoires, à travers divers instruments aux échelles régionales, municipales (commune ou intercommunalité) et jusqu'aux projets d'aménagement. Le niveau de détail de la prise en compte des stratégies énergétiques est variable en fonction de l'échelle territoriale et des documents, dont les interactions sont résumées Figure 2-8.

¹²Classement : Outil de valorisation permettant de garantir le développement du réseau. Pour être classé, il doit remplir 3 critères : sa part d'EnR&R doit s'élever à plus de 50%, les quantités d'énergie livrées doivent répondre à un comptage par point de livraison, l'équilibre financier de l'opération doit être assuré pendant la période d'amortissement des installations. Une fois classé, plusieurs garanties assurent une pérennité pour le réseau, et notamment l'obligation de raccordement de bâtiments situés dans un périmètre géographique fixé.

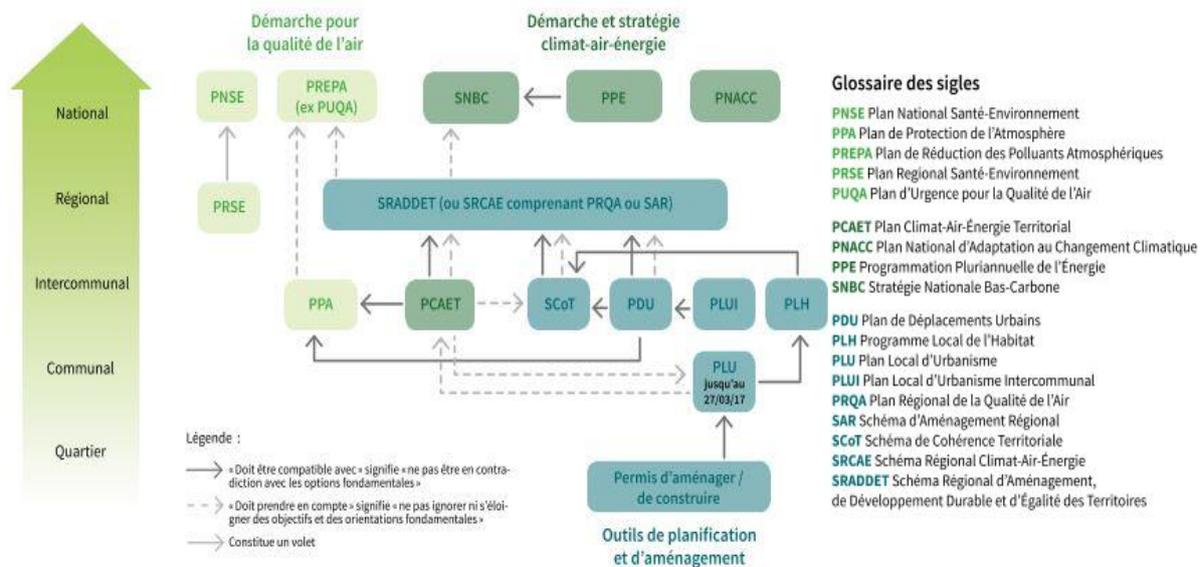


Figure 2-8 Articulation des documents de stratégie et de planification des territoires (ADEME 2016b)

Echelle régionale

Au niveau régional, le Schéma Régional du Climat, Air, Énergie (SRCAE) est un document, où sont fixés les objectifs régionaux en matière d'économie d'énergie, de réduction des émissions de GES et de développement de la production d'énergies renouvelables. Il est élaboré par les services régionaux en lien avec les services de l'État puisque ces objectifs sont une déclinaison des ambitions nationales et internationales. Créé par les lois Grenelle I et II en 2009, les horizons temporels visés par ce document sont 2020 et 2050. Les SRCAE doivent être révisés tous les cinq ans (article L.222-1 du code de l'environnement).

Comme l'indique Rayczakowski (2014), les SRCAE doivent définir des objectifs qualitatifs et quantitatifs en matière de valorisation du potentiel énergétique terrestre, renouvelable et de récupération quant à la mise en œuvre de techniques performantes d'efficacité énergétique. Ils s'articulent en trois parties : l'état des lieux, la formulation des orientations et leur mise en œuvre. Les réseaux de chaleur sont inégalement abordés dans les premières versions des SRCAE mais ces derniers doivent à minima recenser les chauffages urbains de la région¹³. En Ile-de-France le SRCAE, voté en 2012, dispose d'une étude détaillée des réseaux de chaleur déjà existant sur le territoire avec un détail technique fin et une localisation précise de tout le réseau de distribution, des sous-stations et chaufferies. Une évaluation du potentiel de développement (interconnexion, densification, extension et création) des réseaux de chaleur a été réalisée et rendue publique à travers des cartographies en ligne¹⁴. A partir de 2016 et par le biais de la loi portant nouvelle organisation territoriale de la République (NOTRe) du 7 Août 2015, les SRCAE arrivant à terme seront remplacés par un nouvel outil de planification, appelé les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET). Son contenu est un regroupement de plusieurs documents (ajout du schéma régional cohérence

¹³ L'article L. 222-1 du code de l'environnement " A ces fins, le projet de schéma [schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie] s'appuie sur un inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, un bilan énergétique, une évaluation du potentiel énergétique, renouvelable et de récupération, ainsi qu'un recensement de l'ensemble des réseaux de chaleur, une évaluation des améliorations possibles en matière d'efficacité énergétique ainsi que sur une évaluation de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé publique et l'environnement menés à l'échelon de la région et prenant en compte les aspects économiques ainsi que sociaux."

¹⁴ Partie EnR&R du SRCAE consultable : http://www.srcae-idf.fr/IMG/pdf/4-SRCAE-IDF_ENR_R_cle0ccf83.pdf

écologique, de l'intermodalité de prévention de gestion des déchets), dont le SRCAE, et doit permettre de planifier de façon plus cohérente les politiques régionales sectorielles et éviter les redondances.

Comme l'expliquent Colombert et Diab (2017), différentes lois récentes ont structuré les politiques et stratégies énergétiques locales. Les lois LOADDT (loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire, 1999), POPE (loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique, 2005) et plus récemment les lois MAPTAM (modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles, 2014), NOTRe (2015) et la loi TECV (2015) tendent à décentraliser de plus en plus la gestion des enjeux énergétiques. Les collectivités territoriales voient leurs compétences en matière d'énergie augmenter et le développement d'une stratégie énergétique locale leur incombe.

Echelle locale : communes, intercommunalités

A l'échelle intercommunale, le document majeur lié à la mise en œuvre des projets énergétiques est le plan climat-air-énergie territorial (PCAET). Depuis la loi TECV à travers son décret d'application du 28 Juin 2016, son adoption s'impose aux intercommunalités (ADEME, 2016c) de plus de 20 000 habitants. Il doit définir les mesures à prendre pour répondre aux enjeux et objectifs du SRCAE, tout en prenant en compte les spécificités locales. Il est à mettre à jour tous les six ans.

Le PCAET doit être compatible avec les objectifs fixés par le SRCAE ou SRADDET et fixer les objectifs locaux. Comme le montre la Figure 2-8, qui résume les interactions entre les différents documents de stratégie et de planification des territoires, le PCAET doit aussi être coordonnées avec des documents de planification urbaine : il prend notamment en compte le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)¹⁵ et est lui-même pris en compte par le Plan Local d'Urbanisme (PLU)¹⁶. Ces deux documents s'occupent de la planification spatiale du territoire, contrairement au PCAET qui s'occupe les stratégies énergie-climat, et ont pour vocation de décliner la politique et les règles d'urbanisme au niveau local. Ils intègrent la question énergétique à travers un document parallèle, le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD), et ont un rôle à jouer dans la faisabilité de développement des réseaux de chaleur. En effet, ils fixent des niveaux de densification sur les projets d'aménagements. Cette densité urbaine peut se traduire ensuite en densité linéique pour un éventuel réseau. Pour rappel, la densité linéique est un indicateur crucial pour déterminer la viabilité d'un réseau de chaleur

Avec la mise en application de la loi TECV, le PCAET doit expliciter des objectifs stratégiques et opérationnels pour lutter contre le changement climatique et un programme d'actions à réaliser (AMORCE, 2016c). Parmi ces actions, « développer de manière coordonnée des réseaux de distribution de gaz et de chaleur », « augmenter la production d'énergie renouvelable », « valoriser le potentiel en énergie de récupération » concernent directement les réseaux de chaleur. Pour y parvenir, les études à réaliser n'indiquent pas un certain niveau de détail requis mais doivent à minima proposer des options de densification, d'extension ou de création des réseaux d'énergie (ADEME, 2016c), avec des zones favorables à équiper et une coordination entre ces différents réseaux (AMORCE, 2017b). Dans le guide de création d'un réseau de chaleur, l'association AMORCE indique que des études de potentiel de développement d'EnR&R doivent être réalisées dans le cadre du PCAET.

¹⁵ SCoT : Le Schéma de Cohérence Territoriale est un outil de conception et de mise en œuvre d'une planification intercommunale. Son rôle est de déterminer un projet de territoire en mettant en cohérence les politiques d'urbanisme, d'habitat, de déplacements, d'équipements, de commerces, d'environnement.

¹⁶ PLU : Le Plan Local d'Urbanisme définit des règles et des normes que les constructions et aménagements des sols doivent respecter sur le territoire (commune ou groupement de communes).

Echelle du réseau de chaleur

A partir de 2018 et pour les collectivités ayant la compétence réseau de chaleur¹⁷, un schéma directeur du réseau de chaleur et/ou de froid doit être réalisé¹⁸. Ce document de planification doit permettre aux collectivités de débiter leurs réflexions sur leurs réseaux en phase amont des projets urbains. Un guide de réalisation de ce schéma directeur est proposé par l'association AMORCE en lien avec le CEREMA et l'ADEME (AMORCE, ADEME 2015). Son élaboration se décompose en sept étapes, résumées Figure 2-9.

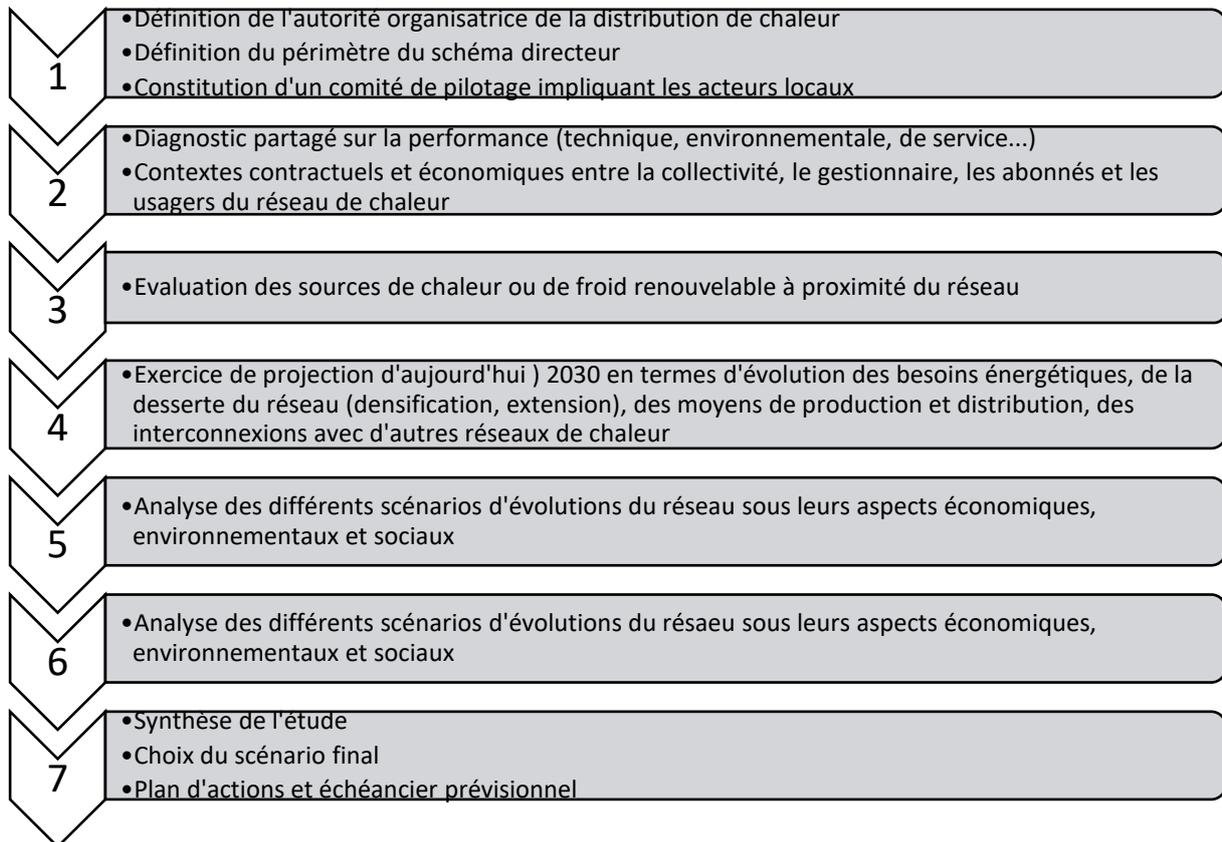


Figure 2-9 Etapes d'élaboration d'un schéma directeur de réseau de chaleur ou de froid

Le schéma directeur d'un réseau de chaleur ou de froid est le document de planification ultime d'un chauffage urbain. Il est unique pour chaque réseau et évalue sa qualité sur les plans à la fois techniques, économiques et environnementaux. Ce document présente un niveau de détail élevé, avec la publication annuelle de données techniques, environnementales et économiques clés sur la qualité du réseau. Ces éléments sont présentés dans le Tableau A-1 (page 264). Il donne également les futures orientations du système afin de planifier en amont et d'anticiper les travaux liés au développement du réseau, qu'il s'agisse d'une densification, d'extensions, d'interconnexions ou d'un changement du mix énergétique. Comme présenté dans la Figure 2-9, plusieurs scénarios sont envisagés. Le résultat de cette étude est la détermination, par un comité de pilotage qui intègre tous les acteurs concernés par ce système, d'un scénario final et de son plan d'action.

¹⁷ Cette compétence, non obligatoire, permet à la collectivité de pouvoir être responsable d'un projet de développement de réseau de chaleur sur son territoire (création, gestion).

¹⁸ Article 194 de la Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte : https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2015/8/17/DEVX1413992L/jo/article_194

Les évolutions règlementaires récentes (lois NOTRe, MAPTAM et LETCV, et la mise à jour d'instruments d'urbanisme présentés dans cette partie) révisent donc la prise en compte des stratégies énergétiques dans la planification urbaine. Les réseaux de chaleur prennent une part importante dans ces stratégies puisque le développement de ces réseaux ainsi que leur approvisionnement en EnR&R sont étudiés dans tous les documents de planification présentés. Le Tableau 2-3 reprend le niveau d'intégration minimal des réseaux de chaleur par les différents documents d'urbanisme depuis la LTECV.

Tableau 2-3 Niveau de prise en compte des réseaux de chaleur dans les documents de planification urbaine après la LTECV (CEREMA, 2017b)

Echelle	Document	Niveau de prise en compte des réseaux de chaleur
Région	SRADDET	Recensement obligatoire des réseaux de chaleur
Commune et/ou Intercommunalité	PCAET	Les réseaux d'énergie sont obligatoirement traités dans le plan d'actions
	SCoT	Est pris en compte par le PCAET
	PLU(i)	- Doit arrêter les orientations générales concernant les réseaux d'énergie - Peut fixer une production minimale d'EnR&R sur certaines zones
Réseau	Schéma directeur	Détails Figure 2-9. Il devient obligatoire pour tous les réseaux en service au 1 ^{er} Janvier 2009, à réaliser d'ici le 31 Décembre 2018

L'interaction entre stratégies énergétiques et planification urbaine est donc en pleine évolution. Les nouvelles versions des documents majeurs comme le SRADDET (à élaborer par les régions d'ici Juillet 2019) et le PCAET (à élaborer par les villes de plus de 20 000 habitants d'ici Janvier 2019) intègrent des réflexions amonts sur les réseaux de chaleur mais l'effet réel de ces incitations n'est pas encore visible.

De plus, la mise en application de ces stratégies énergétiques est questionnée. Par exemple, Blanchard (2017) interroge la traduction des stratégies énergétiques locales dans les choix opérationnels de projets d'aménagement sur une ZAC de Bordeaux Métropole. Ses recherches montrent que la stratégie énergétique oriente ces choix mais que les études réalisées par l'aménageur à l'échelle du projet de ZAC (développement d'un réseau de chaleur sur la zone) prennent le pas sur l'approche stratégique qui englobe un territoire plus large. L'évaluation des PCET (les anciens PCAET) par l'Assemblée des Communes de France (AdCF, 2016), qui a réalisé une enquête à partir d'un questionnaire (170 communautés et Métropoles ont répondu), montre d'ailleurs que ces plans ont autant vocation à provoquer une prise de conscience chez les collectivités que déterminer des orientations stratégiques et des actions concrètes.

Cette réflexion met en avant l'importance de la gouvernance des projets d'aménagement urbain. La gouvernance est définie par Pinson comme « l'ensemble des institutions, dispositifs et processus d'action qui permettent d'articuler des ressources et de coordonner l'action d'une pluralité d'acteurs et de groupes dans le cadre de la mise en œuvre de politiques publiques » (2006). Les acteurs en charge de faire des choix, notamment vis-à-vis des questions énergétiques, et de piloter ces projets, ont un rôle central dans la mise en œuvre de réseaux de chaleur. La prépondérance de la gouvernance dans les projets de transition énergétique est également mise en avant dans l'un des rapports du projet européen de recherche Urban Learning¹⁹, sur intégration de l'énergie dans la planification urbaine, où il est affirmé que les outils d'urbanisme (PLU et PCAET notamment) « n'intègrent pas de véritable planification énergétique » mais exposent seulement les stratégies énergétiques (APC, 2018). Une gouvernance efficace doit alors être mise au point pour relier les niveaux stratégiques et opérationnels.

Cette notion de gouvernance dans des réseaux de chaleur est traitée dans la section suivante.

¹⁹ <http://www.apc-paris.com/groupe-projet/projet-europeen-urban-learning>

2.3. Gouvernance des réseaux de chaleur et accompagnement pour l'aide à la décision

La section précédente décrit l'évolution de la planification énergétique des territoires, dans laquelle les réseaux de chaleur ont pris une place importante. Cependant, la mise en œuvre de projets de chauffage urbain n'est pas uniforme, et l'analyse de cas concrets dans cette section démontre l'influence de la gouvernance des réseaux dans leur développement.

Dans une analyse sur la réappropriation locale de l'énergie en Europe, EnergyCities (2017) a constaté que des collectivités vont « au-delà de leur rôle d'autorité planificatrice pour devenir un acteur opérationnel et moteur » de la transition énergétique locale.

Par exemple, la Métropole de Lyon²⁰ a mis en place un Schéma Directeur des Energies (SDE). Son objectif est « d'aller plus loin vers la territorialisation et la déclinaison opérationnelle » des actions proposées dans un PCAET (Grand Lyon, 2015). Il doit être mis en œuvre en 2019, après quatre années dédiées à son élaboration en étapes : diagnostics et construction d'un modèle énergétique du territoire, élaboration des scénarios énergétiques, stratégie énergétique et pilotage, mise en œuvre. Il mobilise des institutions publiques, des entreprises privées, des opérateurs de réseaux, des associations citoyennes, des usagers et consommateurs ainsi que le monde académique (enseignants et chercheurs). Les réseaux de chaleur et de froid sont au centre des réflexions de ce SDE où des modélisations détaillées permettent d'analyser les réseaux déjà existants (gisement d'EnR&R sur le territoire, possibilité de densification et d'extension des réseaux) et de création de nouveaux réseaux (Grand Lyon, 2017b). Cet exemple lyonnais souligne la re-politisation « des analyses relatives aux processus de transition énergétique », jugée nécessaire par Rocher (Rocher, 2013). Dans ce cas, le contexte d'appropriation locale de l'énergie est une opportunité pour le développement d'un réseau de chaleur. Rocher (2013) affirme que « cet encouragement à l'offre collective de chaleur s'inscrit dans une conception du réseau comme facteur structurant de l'espace urbain ».

Cependant, cette affirmation ne peut pas s'appliquer à tous les contextes et doit donc être nuancée. Pour rappel, les réseaux de chaleur ne représentent que 7 % des systèmes de chauffage sur toute la France (2.1.1). Au-delà de l'équation technico-économique, plusieurs recherches se sont intéressées aux raisons de la difficulté de la mise en œuvre de projets de réseaux de chaleur dans les territoires urbains. Dans plusieurs analyses de cas, à Lyon (Rocher, 2013), Metz (Gabillet, 2015), Fribourg-en-Brisgau en Allemagne (Späth et Rohrachter 2015) ou Paris (Colombert et Diab 2017), l'aspect politique et la relation entre acteurs municipaux (de divers services de la ville) et l'aménageur et/ou l'opérateur de réseaux sont des sources de tensions qui peuvent contraindre un projet ou repenser une stratégie énergétique en défaveur des réseaux de chaleur.

Dans les cas de Fribourg-en-Brisgau et Metz, la question de l'extension des réseaux de chaleur s'est posée en vue de la création d'écoquartiers. Dans les deux cas, ce choix était en concurrence avec d'autres scénarios de sobriété énergétique des nouveaux bâtiments de l'écoquartier. Avec la construction de bâtiments peu consommateurs en énergie (respectivement 65 kWh/m²/an à Fribourg en plus de la construction de bâtiments passifs et 50 kWh/m²/an à Metz), la viabilité du réseau de chaleur est menacée puisqu'elle voit notamment sa densité linéique baisser dans ces quartiers. A Metz, le choix, opéré par la municipalité, s'est porté sur le réseau de chaleur alors que plusieurs services de la ville (service de planification urbaine et service du développement durable) y étaient opposés. A Fribourg, tous les bâtiments devaient être raccordés au réseau de chaleur sauf ceux qui prouvaient qu'ils respectaient les standards de bâtiments passifs, via une certification couteuse. Ce choix, en

²⁰ La métropole de Lyon regroupe la Communauté urbaine de Lyon et le Conseil général du Rhône sur 59 communes autour de la ville de Lyon.

accord avec la politique long terme de développement énergétique de la ville, a généré des oppositions, si bien que la planification énergétique a ensuite été revue par la ville. Dans les deux cas, les collectivités sont donc porteuses de projets ayant une portée environnementale positive, mais leur prise de décision, notamment vis-à-vis du développement de leurs réseaux de chaleur, peut avoir des conséquences négatives.

Coutard (2010) classe les réseaux de chaleur parmi les *Large Technical Systems* (LTS), soit macro-systèmes techniques. Ils sont définis par Hughes (1983) comme des systèmes de taille et de complexité importantes. Ce dernier considère que ces réseaux ne sont que des infrastructures ancrées dans un système plus large (une ville) qui comporte, en plus des paramètres techniques et économiques, une dimension politique prépondérante. De par la longue durée des contrats qui lient les collectivités avec les opérateurs de réseaux et la portée politique de ces systèmes (liée à l'engagement long-terme et l'impossibilité de revenir en arrière), les réseaux de chaleur, tels que ceux de première génération (comme celui de Paris), sont jugés trop figés et résistants aux changements rapides (Monstadt, 2009). Le développement de micro-réseaux de chaleur et de boucles d'eau tempérée, parmi les réseaux de chaleur de quatrième génération montre que ces systèmes de chauffage urbain ont assimilé cette notion et se dirigent vers des systèmes de plus petites tailles, à l'échelle d'écoquartier par exemple. En Suède, Magnusson (2012) considère que cette échelle est plus appropriée pour le développement des réseaux de chaleur afin d'éviter une phase de « stagnation » pour ces systèmes, principalement due à la baisse des consommations de chauffage, et à l'encouragement du déploiement d'EnR&R locales. Lopez et Bouton (2015) classent ainsi ces nouveaux systèmes dans la catégorie des « *Small technical systems* », soit parmi les micros-systèmes techniques de la transition énergétique.

La portée politique ainsi que les relations parfois conflictuelles entre les acteurs (publics, privés et usagers) se rapportent à la gouvernance des réseaux et aux prises de décision liées à ce système. Cette gouvernance évolue par les préoccupations environnementales plus élevées et les évolutions réglementaires (abordées plus haut). Pour La Branche (2014), l'innovation liée à la gouvernance est au moins aussi importante que l'innovation technique, notamment lors du développement d'écoquartiers. Il prend comme exemple l'écoquartier Sainte Geneviève à Nanterre, où la collectivité a impulsé et porté la réalisation d'un chauffage urbain, avec l'intégration d'EnR&R, grâce à une harmonisation de la planification énergétique et urbaine, ainsi que la mise en relation de plusieurs acteurs (aménageur, propriétaire de chaleur fatale, opérateur, bailleurs).

La gouvernance passe donc aussi par une concertation multi-acteurs, avec des rôles pour ces acteurs (collectivité, opérateur, aménageur) et des importances variables en fonction des projets, comme le montrent Colombert et Diab (2017) à travers trois exemples d'aménagement de quartiers à Paris qui ont fait l'objet d'une réflexion quant au raccordement au réseau de chaleur déjà présent dans la ville. La concertation est un point clé de la viabilité d'un réseau de chaleur et est une phase obligatoire dans la première étape de la constitution du schéma directeur, à savoir la composition d'un comité de pilotage (Figure 2-9, page 74).

La gouvernance des réseaux de chaleur est d'ailleurs pointée du doigt dans la synthèse de 2017 d'une enquête menée par l'association nationale de défense des consommateurs et usagers (CLCV) sur le chauffage (CLCV, 2017). Il est reproché aux collectivités et opérateurs de ne pas être suffisamment transparents, notamment sur les méthodes de tarification.

Il y a donc un degré de complexité élevé lorsque l'intérêt pour le développement ou l'évolution d'un réseau de chaleur est abordé. Si la faisabilité technique et l'équilibre économique sont des critères prépondérants, la composante politique et plus précisément la question de la gouvernance n'est pas négligeable dans un contexte où la réappropriation locale du sujet énergétique recompose cette

gouvernance des systèmes énergétiques et donc des réseaux de chaleur. Pour Debizet et Dupuy (2016), « l'avenir de l'énergie en ville – et au-delà – est loin d'être tracé tant il dépendra de choix politiques ».

Accompagnement des collectivités territoriales dans le développement des réseaux de chaleur

La prise de décision finale relative au développement ou l'évolution d'un réseau de chaleur sur un territoire revient à la commune ou l'intercommunalité, et est donc soumise à des contraintes. Elles sont techniques, économiques, environnementales, liées à la stratégie énergétique du territoire sur le long terme, en accord avec la planification urbaine et doit, pour être une réussite, prendre en compte les considérations de tous les acteurs concernés. Dans l'idée d'y intégrer de la chaleur fatale, la dernière contrainte est d'autant plus vraie qu'il faut ajouter un acteur, le propriétaire de cette chaleur fatale, qui peut être un acteur public, privée et avec des objectifs et contraintes internes variées (ces contraintes sont détaillées dans le chapitre 3 qui décrit les sources de chaleur fatale étudiées).

L'accompagnement de ces acteurs, dans une optique d'aide à la décision, est une piste déjà développée. Ainsi, plusieurs guides ont été mis au point afin de faciliter certaines actions et compréhensions liées à la transition énergétique. Ces guides, destinés aux collectivités territoriales, aux aménageurs, aux bureaux d'études, aux gestionnaires de réseaux ou aux usagers, peuvent prendre diverses formes : ils clarifient des nouvelles réglementations, partagent des bonnes pratiques et des retours d'expériences, comparent des méthodes ou en proposent pour la réalisation d'actions diverses. Le Tableau 2-4 est une liste non-exhaustive de guides, principalement produits par l'ADEME, le CEREMA et AMORCE, et qui abordent directement ou indirectement le développement de réseaux de chaleur.

Certains de ces guides accompagnent directement le développement de réseaux de chaleur, sur le plan technique et/ou économique (guides 7, 11, 12 dans le Tableau 2-4), tandis que d'autres appuient le développement de ces réseaux dans le cadre la prise en compte de l'énergie dans l'aménagement urbain (guides 1, 3, 4, 5, 6, 15, 16). Enfin, les autres documents cités dans ce tableau ont pour but de guider les acteurs de la planification urbaine (guides 2, 8, 9, 10, 13, 14) notamment sur les différents documents d'urbanisme déjà présentés.

A noter que le dernier guide cité dans ce tableau (« Etude territoriale de connaissance des potentiels de récupération de chaleur sur son territoire », produit par la FNCRR en 2018) est le premier document de ce type dédié à la chaleur fatale. Il est destiné aux collectivités territoriales et prend la forme d'un cahier des charges qui a pour but d'étudier le potentiel d'énergie fatale sur un territoire, sous les aspects techniques et économiques. Il est considéré comme un guide opérationnel, permettant de faciliter l'approche des porteurs de projets dans la priorisation locale des énergies et d'alimenter les documents de planification et d'aménagement des territoires (SRADDET, PCAET).

Tableau 2-4 Liste de guides d'accompagnement liés à des actions de transition énergétique sur les territoires urbains et qui abordent les réseaux de chaleur

	Auteurs	Titre du document	Année	Contenus	Publics visés	Référence
1	CETE CERTU DREAL	Études sur les énergies renouvelables dans les nouveaux aménagements	2011	Méthodes Bonnes pratiques	CT AM	(CETE de L'Ouest, CETE Méditerranée, CERTU, & DREAL Rhône-Alpes, 2011)
2	CEREMA	Réseaux de chaleur et PLU	2011	Evol. Règlementaire Doc. Urbanisme	CT	(CETE and CERTU 2011)
3	ADEME & CREM	Guide de la planification énergétique territoriale	2012	REX Méthodes	CT	(Girard-Madoux, 2012)
4	ADEME	EnR'Choix – Le bon choix thermique pour votre territoire	2014	Méthodes Bonnes pratiques REX	CT AM BE	(ADEME, 2014b)
5	HESPUL	Intégrer l'énergie dans les projets d'aménagement	2015	REX Bonnes pratiques Evol. Règlementaire Doc. Urbanisme	CT AM BE	(HESPUL, 2015)
6	ANRU	Enjeux énergétiques : leur prise en compte dans les projets de renouvellement urbain	2015	REX Bonnes pratiques Méthodes	CT AM BE	(ANRU, 2015)
7	ADEME	Etude des coûts d'investissement et d'exploitation associés aux installations biomasse énergie	2015	Bonnes pratiques	BE	(ADEME, 2015a)
8	RAC – F	Nouvelles compétences Climat-énergie des collectivités territoriales	2016	Evol. Règlementaire Doc. Urbanisme Bonnes pratiques	CT Région	(RAC France, 2016)
9	AMORCE	Réforme territoriale : l'exercice des compétences énergie dans les territoires	2016	Evol. Règlementaire Doc. Urbanisme	CT	(AMORCE, 2016c)
10	ADEME	Elus, l'essentiel à connaître sur les PCAET	2016	Evol. Règlementaire Doc. Urbanisme	CT	(ADEME, 2016c)
11	ADEME	Fonds chaleur – secteur réseau de chaleur	2016	Méthodes	BE	(ADEME, 2016d)
12	CEREMA AMORCE	Réaliser un état des lieux et étudier le potentiel de développement des réseaux de chaleur/froid à l'échelle régionale	2017	Doc. Urbanisme Evol. Réglementation REX / Méthodes	Région	(CEREMA, 2017a)
13	AMORCE	Elaborer le volet énergie-climat du SRADDET	2017	Evol. Règlementaire Doc. Urbanisme Méthodes	Région	(AMORCE, 2017a)
14	ADEME	Les données énergétiques territoriales pour la planification et l'action énergie-climat	2017	Evol. Règlementaire Bonnes pratiques	CT	(ADEME & CEREMA, 2017)
15	ADEME GrDF	Optimiser le mix énergétique local dans la planification et l'aménagement	2018	Bonnes pratiques REX	CT Opérateur BE Urbanistes	(ADEME & GrDF, 2018)
16	FNCCR	Etude territoriale de connaissance des potentiels de récupération de chaleur sur son territoire	2018	Méthodes Bonnes pratiques	CT	(FNCCR, 2018)
Légende Contenus Evol. Règlementaire : évolution règlementaire Doc. Urbanisme : documents d'urbanisme REX : Retour d'expérience			Légende Publics visés CT : collectivité territoriale AM : aménageur BE : bureau d'études			

Prise en compte de l'énergie fatale dans les outils d'accompagnement

Cet état des lieux montre l'existence de plusieurs instruments pour accompagner le développement de réseaux de chaleur. Dans la plupart des documents, la chaleur fatale est abordée comme une des pistes pouvant verdir un réseau de chaleur au même titre que d'autres énergies renouvelables (géothermie, biomasse, solaire) avec un niveau de détail faible puisque les sources d'énergie fatale sont simplement citées et/ou succinctement présentées.

Parmi les guides listés dans le Tableau 2-4, les guides 1, 4 et 5 rentrent plus en détail sur l'énergie fatale, en s'intéressant aux potentiels, aux moyens de valorisation et aux conditions de mise en œuvre. Par exemple, le premier guide (CETE de L'Ouest et al., 2011) liste les systèmes de récupération possible pour différentes sources de chaleur fatale (UVE, eaux usées, data centers) et l'échelle urbaine (bâtiment, quartier, ville) à laquelle ces récupérations peuvent être pertinentes. Dans Le guide HESPUL (2015), quelques bonnes pratiques quant à la mise en œuvre de projets de récupération de chaleur fatale sont proposées, comme la nécessité de prendre en compte ces sources d'énergie très en amont des projets d'aménagement pour les rendre possibles.

Enfin, le dernier guide (numéro 16 dans le Tableau 2-4) est donc dédié à la chaleur fatale. Plusieurs pistes de valorisation de cette énergie sont étudiées : la valorisation de l'énergie sur site, la valorisation de l'énergie pour un bâtiment à proximité de la source et la valorisation via un réseau de chaleur. L'interaction entre réseaux de chaleur et chaleur fatale est faite en deux parties qui correspondent à deux configurations de territoire : une analyse à réaliser lorsqu'un réseau de chaleur est présent à proximité des sources fatales du territoire et une autre analyse à réaliser en l'absence de réseau et qui consiste à examiner la faisabilité de développement d'un nouveau réseau.

Ces deux réflexions sur le sujet de la valorisation de sources fatales de chaleur dans un réseau de chaleur révèlent l'importance de prendre en compte la configuration du territoire pour juger de la pertinence de ces projets. Plus généralement, c'est en fonction des scénarios de transition énergétique déjà imaginés et possibles sur les territoires que la valorisation de sources de chaleur fatale via des réseaux de chaleur sera possible. Ce travail de scénarisation est l'objet de la partie 3 de ce manuscrit de thèse. Le prochain chapitre (Chapitre 3 Description et analyse des sources de chaleur fatale) et la partie 2 décrivent l'énergie fatale et détaillent une méthode de calcul du potentiel énergétique de certaines sources.

2.4. Conclusion du chapitre 2

Les réseaux de chaleur restent minoritaires dans le mix des solutions de chauffage en France, avec seulement 7 % de la population raccordée. Cependant, leur développement est en augmentation et est largement encouragé dans le cadre de la transition énergétique avec des objectifs de déploiement ambitieux d'ici 2020 et 2050. Ils sont perçus comme des outils efficaces pour obtenir de meilleures performances environnementales. En effet, la moitié de l'énergie qui alimente ces réseaux de chaleur sont de sources renouvelables ou de récupération et ce chiffre est en constante augmentation. Une grande part de cette EnR&R provient de l'énergie fatale issue des incinérateurs de déchets mais d'autres sources renouvelables alimentent les réseaux : géothermies (profonde et superficielle), biomasse, solaire, autres sources de chaleur fatale. Les réseaux de nouvelles générations, à basse-température, optimisent cette part d'EnR&R grâce à d'éventuels systèmes de stockage ou des relevées de données qui évitent de la surproduction.

La loi TCVE contient des objectifs spécifiques pour le développement des réseaux de chaleur à l'échelle nationale, comme la multiplication par trois de bâtiments raccordés en 2020, par rapport à 2005. Ces systèmes étant locaux, c'est à l'échelle de la commune que les actions permettant d'atteindre ces objectifs peuvent être initiées. La planification énergétique, à travers des outils d'échelles régionales et communales (et/ou intercommunales), est alors utilisée. Ces outils abordent les réseaux de chaleur avec un niveau de détail assez inégal mais des obligations de réaliser un recensement et des études prospectives de réseaux de chauffage urbain apparaissent dans les nouvelles versions de certains documents, comme les SRCAE et les PCAET. D'autres incitations poussent les collectivités territoriales à s'intéresser de plus près aux réseaux de chaleur ou du moins au contexte énergétique : il s'agit des récentes lois (MAPTAM, NOTRe, etc.) qui réforment les territoires et leurs confient la compétence énergie.

L'aspect politique a donc une place importante dans la réalisation ou la modernisation des réseaux de chaleur, notamment en ce qui concerne la gouvernance et les prises de décision. La multiplicité des acteurs concernés directement ou indirectement par de tels projets rend la négociation et la prise de décision complexe. Elle est parfois un frein trop important qui remet en cause le développement d'un réseau ou sa viabilité. L'analyse de plusieurs exemples, notamment dans les cas de création de nouveaux quartiers aux bâtiments performants et peu consommateurs en énergie, illustrent que les réseaux de chaleur ne sont pas forcément des solutions adaptées à toutes les situations.

Pour répondre à cette complexité, l'accompagnement des acteurs de l'énergie est une nécessité déjà perçue par plusieurs établissements publics et associations (ADEME, CEREMA, AMORCE), auteurs de plusieurs guides. Ces derniers visent à aider les régions, collectivités territoriales, opérateurs de

systèmes énergétiques et bureaux d'étude dans le développement de la transition énergétique des territoires, où les réseaux de chaleur ont une place prépondérante. L'énergie fatale, comme éventuelle source d'énergie pouvant alimenter un réseau de chaleur, est succinctement abordée dans ces guides même si la FNCCR a publié en 2018 un outil, destiné aux collectivités territoriales, et dédié à ces sources d'énergie.

La partie 3 de ce manuscrit aborde les complexités de mise en œuvre de projets de développement de réseaux de chaleur alimentés par des sources d'énergie fatale. Une observation sur l'importance du portage des acteurs dans la faisabilité de ces projets est réalisée avant d'analyser la prise en compte de l'énergie fatale dans la planification et les stratégies énergétiques des territoires.

Avant de s'y intéresser, le prochain chapitre présente l'énergie fatale. Pistes parmi les autres énergies renouvelables (géothermie, biomasse, solaire) exploitées pour verdir les réseaux de chaleur. Ces sources de chaleur sont de plus en plus prises en compte dans les projets énergétiques ainsi que dans les réglementations et objectifs nationaux et locaux.

Ces sources sont nombreuses, décentralisées, situés en zones plus ou moins urbaines et surtout très hétérogènes en termes de qualité et de quantité énergétique. L'objectif du prochain chapitre est de décrire certaines sources d'énergies fatales urbaines jugées pertinentes pour participer à la transition énergétique des territoires urbains.

CHAPITRE 3 : DESCRIPTION ET ANALYSE DES SOURCES DE CHALEUR FATALE

L'énergie fatale, sous forme de chaleur, est l'une des pistes évoquées pour verdir les mix énergétiques des réseaux de chaleur. Considérées comme des EnR&R, les sources de chaleur fatale sont multiples et décentralisées. Cette énergie de récupération est rejetée par des activités industrielles aux besoins thermiques et/ou électriques élevés, éventuellement à hautes températures, ou encore par des infrastructures urbaines. Depuis des années, la chaleur provenant des usines d'incinérations d'ordures ménagères (UIOM et appelées aujourd'hui UVE pour usine de valorisation énergétique) est déjà récupérée dans de nombreux cas et intégrée à des réseaux de chaleur. D'autres sources, notamment disponibles à basse température, ont plus récemment été intégrées à certains chauffages urbains, comme la chaleur des eaux usées. Toutes les sources ont des caractéristiques différentes et la valorisation n'est pas la même en fonction de ces caractéristiques. Afin de juger de l'intégration d'une source de chaleur fatale dans un réseau de chaleur, un des objectifs de cette thèse est de proposer une description fine de la qualité de cette source et de la quantité de chaleur disponible.

Dans un premier temps, ce chapitre définit la chaleur fatale, en utilisant notamment les définitions juridiques et contractuelles. Ensuite, une présentation de la littérature scientifique sur ce sujet est proposée. A travers de nombreux travaux de recherches et études prospectives, le potentiel énergétique de plusieurs sources fatales est déjà décrit et analysé (3.1 L'énergie **fatale : définition et potentiel**).

L'intérêt pour l'énergie fatale, notamment dans le cadre de la transition énergétique des villes, est croissant. La deuxième section de ce chapitre reprend les enjeux liés à l'énergie fatale et sa prise en compte dans les objectifs environnementaux et la planification. Des exemples de cas de valorisation de sources de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur sont également présentés (3.2 L'énergie fatale et la transition énergétique).

Dans cette thèse, les sources étudiées sont celles qui se situent le plus possible en zone urbaine. Pour cette raison, et en s'appuyant sur les retours d'expérience disponibles dans la littérature, ainsi que sur les réflexions au sein de l'institut de recherche de la transition énergétique des villes Efficacity, les sources étudiées sont les eaux usées, les UVE, les data centers, les blanchisseries industrielles, les verreries et les entrepôts frigorifiques.

Avant de détailler les contextes et les spécificités de chaque source de chaleur étudiée, des critères de définition sont proposés, comme l'état, la localisation ou la variabilité. Ces derniers servent à définir au mieux leur qualité énergétique des sources (3.3 Description des sources urbaines de chaleur fatale étudiées).

Cette analyse détaillée source par source via les critères sélectionnés permet de les comparer entre eux et les catégoriser. Deux familles de sources de chaleur fatale se distinguent de par leur température, localisation, état et potentiel énergétique. Les réseaux de chaleur qui les accueillent sont également de différents types, tout comme les technologies de récupération de chaleur (3.4 Comparaison et catégorisation des sources).

3.1. L'énergie fatale : définition et potentiel

Cette section est dédiée à définir la chaleur fatale (3.1.1 **Définition**). Le potentiel énergétique est ensuite introduit, notamment par le biais d'études, à l'échelle européenne ou nationale, qui tentent d'estimer la quantité d'énergie récupérable depuis ces sources fatales (3.1.2 **Potentiel énergétique des sources de chaleur fatale**).

3.1.1. Définition

Juridiquement, l'énergie fatale n'a pas de définition propre. Toutefois, pour des raisons de régularisation des paiements de chaleurs issues de réseaux, la loi française intègre l'énergie fatale dans une définition « déchets et énergie de récupération ». Cette définition provient du Bulletin Officiel des Finances Publiques-Impôts qui détaille les sources d'approvisionnement des réseaux de chaleur qui permettent de bénéficier d'une TVA réduite si le taux d'EnR&R est supérieur à 50% (Direction Générale des Finances Publiques, 2012) :

« Fraction non biodégradable des déchets ménagers ou assimilés, des déchets des collectivités et des déchets industriels, résidus de papeterie et de raffinerie, gaz ou biogaz issus du traitement des déchets ménagers, industriels, agricoles et sylvicoles, des décharges ou des eaux usées, gaz de récupération (mines, cokerie, haut-fourneau, aciérie et gaz fatals) et récupération de chaleur sur eau de mer, de rivière ou d'égout ou de chaleur fatale à l'exclusion de la chaleur issue de la cogénération. »

De façon plus générale, l'énergie fatale correspond donc à l'énergie produite par un processus dont l'objet principal n'est pas la production d'énergie. Si elle n'est pas récupérée, elle se perd dans l'atmosphère. Elle se retrouve principalement sous la forme de chaleur. Le terme « fatale » est utilisé car cette source d'énergie est fatalement produite, comme le définit l'ADEME (ADEME, 2015b) : *« 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 ou chaleur perdue. Cependant, cette appellation est en partie erronée car la chaleur fatale peut être récupérée »*.

Les sources d'énergie fatale font parties des EnR&R. Récupérer l'énergie d'une source fatale peut donc permettre de chauffer, refroidir et/ou produire de l'électricité pour répondre à des besoins énergétiques, à différentes échelles. La valorisation peut être en interne (récupération sur un équipement ou un bâtiment pour ce même équipement) ou externe (pour un équipement ou bâtiment voisin ou bien via un réseau d'énergie qui la fournit aux postes raccordés).

Dans le cadre de la valorisation d'énergie fatale dans les réseaux de chaleur, l'intérêt de ces recherches est porté exclusivement sur les sources de chaleur fatale. Ces sources sont omniprésentes. Des sources de chaleur fatale se retrouvent sur de nombreux sites industriels : métallurgies, raffineries, agro-alimentaire, incinérations de déchets, sidérurgies, verreries, fonderies, etc. Elle est aussi présente dans d'autres activités sur des sites tertiaires, comme les centres de données (data center), ou des infrastructures urbaines (réseaux d'eaux usées, gares et métro, etc.).

Ces sources de chaleur décentralisées sont donc nombreuses, parfois urbaines et posent la question du potentiel énergétique qu'elles dégagent. L'objectif est de définir les sources ayant un intérêt de valorisation et de savoir si la quantité et la qualité d'énergie récupérable peut alimenter un réseau de chaleur et donc verdir son mix énergétique.

3.1.2. Potentiel énergétique des sources de chaleur fatale

Plusieurs études se sont penchées sur le potentiel de l'énergie fatale, à plusieurs échelles. En Europe, le projet Heat Roadmap Europe a publié plusieurs études sur le potentiel de développement des réseaux de chaleur, alimentés par des EnR&R et par les énergies fatales notamment (Connolly 2016; David et al. 2017; Hansen et al., 2016). Ces études superposent des données locales de besoins thermiques au km² (chauffage exclusivement), de densité de consommation et des informations sur la présence ou non d'un réseau de chaleur. Des sources d'énergie fatales sont également localisées et proviennent de trois activités : l'industrie, la cogénération et l'incinération de déchets. Les potentiels énergétiques affichés sont indiqués en pétajoule (1 PJ = 10¹⁵ J) et sont fonction de la consommation énergétique des industries, qui proviennent de données historiques soit des statistiques. En fonction du secteur industriel, l'efficacité de la récupération est différente (Tableau 3-1). Ainsi, la quantité d'énergie récupérable est une part de l'énergie consommé par l'industrie.

Tableau 3-1 Efficacité de la récupération de chaleur en fonction de l'activité industrielle (Persson, 2015)

Catégorie d'activité industrielle	Part de récupération possible sur l'énergie consommée
Incinération de déchets	60%
Raffinage	50%
Chimie et pétrochimie	25%
Acier et fer	25%
Métallurgies non ferreuses	25%
Minéraux non métalliques	25%
Papeteries	25%
Agroalimentaire	10%

Pour trouver des chiffres plus précis, d'autres études nationales sont parues ces dernières années où chaque pays a tenté d'évaluer le potentiel énergétique de sources de chaleur fatale. Dans tous les cas, les sources fatales industrielles sont les seules estimées. Ainsi, le surplus de chaleur industriel est évalué entre 37-73 PJ/an au Royaume-Uni, soit plus de 10 TWh (Hammond & Norman, 2014). Il est de 102,6 PJ/an en Hollande, 28,5 TWh selon l'étude prospective de (Lemmens, 2015). Dans un autre article prospectif, Forman (2016) s'inspire des études faites en Norvège et Suède, premiers pays à s'être intéresser au potentiel d'énergie fatale, pour proposer une estimation du potentiel en Allemagne. L'analyse est plus poussée, et le potentiel est séparé en trois catégories de températures : au-dessus de 300°C (50,7 PJ, soit 14 TWh), entre 100°C et 300°C (39,4 PJ, soit 10,9 TWh) et sous 100°C (155, 6 PJ soit 43 TWh), ce qui donne un total d'environ 68 TWh en Allemagne.

En France, l'ADEME s'est lancée dans la même démarche, en analysant le potentiel national issu des milieux industriels (chimie, agroalimentaire, sidérurgie et fonderie principalement) et en proposant également, les potentiels régionaux (ADEME, 2015b). Les résultats de l'étude évoquent 51 TWh d'énergie fatale rejetée par le secteur industriel français à plus de 100°C, sachant que la consommation totale de ces secteurs est d'environ 271 TWh, dont 70% pour faire fonctionner des fours et séchoirs. Près de 20% de ce qui est consommé est donc récupérable. L'ADEME va un peu plus loin, en proposant une estimation du gisement de chaleur fatale industrielle pour les réseaux de chaleur existant. De 51 TWh, le potentiel passe à 10 TWh après que la proximité entre les sources industrielles avec un réseau de chaleur déjà installé ait été vérifiée.

En 2017, l'ADEME Ile-de-France a effectué une étude spécifique à la région (ADEME, 2017a) , en s'intéressant exclusivement au potentiel de récupération sur des sources urbaines (data centers, eaux usées, incinérateurs de déchets et industries proches de zones urbaines). Les conclusions évoquent un

gisement de 26,5 TWh mais une quantité d'énergie récupérable de 0,9 TWh après prise en compte de contraintes géographiques, techniques, économiques et juridiques.

Toutes ces études énoncent donc des quantités importantes d'énergie thermique disponible et récupérable. Mais entre le potentiel théorique et la réalisation de projets de récupération de chaleur fatale, notamment pour alimenter des réseaux de chaleur, plusieurs limites existent, que les études prospectives évoquées ne prennent pas en compte, ou très peu. Brueckner (2014) explique qu'il est indispensable de différencier les potentiels théoriques, techniques et économiques lorsqu'on s'intéresse à la récupération de chaleur fatale. Plusieurs obstacles à la valorisation de cette énergie sont listés : le potentiel doit répondre à des besoins thermiques et la qualité de la source fatale doit être adaptée aux besoins (températures de réseaux de chaleur ou d'émetteurs de chauffage, intermittence de la source, etc.). La réalisation de projets dépend ensuite de sa cohérence économique. Cette approche de S. Brueckner est résumée Figure 3-1.

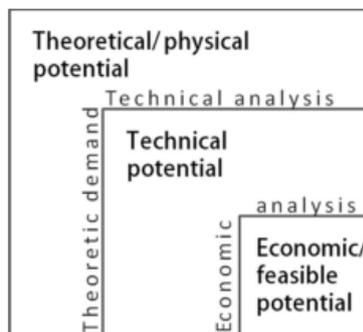


Figure 3-1 Types de potentiels (Brückner et al., 2015)

La catégorisation en température, entreprise dans les études prospectives en Allemagne et en France, est une première considération car certaines sources d'énergie fatale, basses températures, ne sont pas compatibles en l'état avec des réseaux de chaleur existants. L'ADEME prend également en compte un autre paramètre clé, la proximité entre sources et réseaux. En effet, le transport thermique implique des pertes et des coûts conséquents. Les réseaux de chaleur, présents dans les zones les plus denses auront logiquement plus d'intérêt à être alimentés par des sources d'énergie les plus proches possibles.

Cette réflexion sur le décalage entre un potentiel théorique et une valorisation de chaleur fatale dans un réseau de chaleur introduit l'intérêt de catégoriser les sources de chaleur fatale en fonction de leurs caractéristiques telles que leurs régimes de température ou encore leur localisation vis-à-vis des zones urbaines. L'objectif est ensuite de détailler, en fonction des catégories, les potentiels énergétiques, les modes et technologies de valorisation, ainsi que les types de réseaux de chaleur et d'aménagements susceptibles d'être compatibles.

Avant d'aborder cette catégorisation, les paragraphes suivants évoquent le statut de l'énergie fatale dans les politiques énergétiques, les nouvelles réglementations depuis les lois Grenelle (2009 et 2010) et la LTECV (2015) et le statut actuel de l'énergie fatale, en lien avec les réseaux de chaleur.

3.2. L'énergie fatale et la transition énergétique

Plusieurs sources d'énergie fatale est déjà valorisée dans des réseaux de chaleur, principalement celle provenant des UVE (2.1.1). Dans le contexte de la transition énergétique, l'énergie fatale est toutefois un sujet nouvellement abordé par les acteurs de l'énergie et la recherche, et introduit partiellement dans la réglementation et la planification (3.2.1). Des installations déjà existantes montrent que plusieurs sources sont déjà valorisées avec succès (3.2.2).

3.2.1. Objectifs liés à l'énergie fatale

La prise en compte de l'énergie fatale comme une EnR&R pertinente pour accompagner la transition énergétique est récente. Souvent oubliée dans les processus de décision, elle est aujourd'hui prise en compte et parfois priorisée parmi les EnR&R : l'ADEME, dans un site internet destiné à accompagner les collectivités territoriales dans leurs stratégies énergétiques et surtout leurs systèmes de chauffage (ADEME, 2014b), hiérarchise les EnR&R à valoriser et place la chaleur fatale devant les autres EnR&R (la géothermie est 2^{ème}, suivie par la biomasse).

Dans la LTECV, l'énergie fatale est intégrée aux EnR&R pour participer au verdissement du mix énergétique des réseaux de chaleur où une multiplication par cinq de la quantité d'EnR&R est attendue en 2030 (par rapport à 2005). Pour y parvenir, les régions, dans le cadre de leur SRCAE (cf. section 2.2.2, page 71) doivent obligatoirement intégrer un état des lieux du gisement de sources de chaleur fatale sur leur territoire.

En plus de la LTECV, d'autres incitations encouragent les acteurs concernés à étudier leur potentiel d'énergie fatale et le raccordement à un réseau de chaleur :

- L'analyse coût-avantage (appelée également analyse coût-bénéfice) : le décret 2014-1363, issu de la directive européenne 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique, stipule que toutes les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) de plus de 20 MW doivent obligatoirement effectuer une analyse coûts-avantage concernant la valorisation de chaleur fatale vers un réseau de chaleur existant. Dans cette analyse, figurent une description de l'installation et de la solution de la valorisation de la chaleur fatale, les échanges entre l'industriel et le gestionnaire du réseau de chaleur, ainsi qu'une analyse économique sur 20 ans résumant les investissements, les coûts d'exploitation et les gains associés à un tel projet. L'objectif de ce décret est d'amorcer un dialogue systématique entre gestionnaires de réseaux de chaleur et propriétaires de chaleur fatale.
- Depuis 2015, la chaleur fatale est éligible au Fonds chaleur de l'ADEME (cf. section 1.5, page 54)

Dans le contexte énergétique actuel, la recherche s'intéresse logiquement à l'énergie fatale, à travers plusieurs disciplines. La question technique (quantité d'énergie, exergie, technologies de valorisation, dimensionnement et optimisation des systèmes) est traitée dans de nombreuses études et recherches en sciences physiques et en sciences de l'ingénieur, où la question économique est également présente. Ces études sont utilisées dans la partie 2 de ce manuscrit qui traite notamment de l'estimation technico-économique de la valorisation de sources de chaleur fatale. L'Europe a également lancé un programme de recherche H2020 sur le sujet des sources de chaleur fatale urbaine²¹.

²¹ H2020 (Horizon 2020) : programme de recherche et d'innovation porté et financé par l'Union Européenne. <http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/ee-01-2017.html>

L'urbanisme et le génie urbain regardent également les sources de chaleur fatale et leurs intégrations à des systèmes de chauffage urbain en se posant la question de l'adaptation des acteurs à une situation nouvelle. Z. Hampikian problématise ainsi sa recherche : « comment construit-on et gère-t-on un réseau dont on ne contrôle pas la production du flux qu'il doit distribuer ? » (Hampikian, 2017a).

3.2.2. Exemples de réalisations

En France comme en Europe, des projets d'intégration de sources de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur ont déjà vu le jour. En France, la chaleur fatale provenant de l'incinération (UIOM ou UVE) et intégrée dans des réseaux de chaleur est conséquente : comme relaté dans le premier chapitre (2.1.1), plus de 6 000 GWh sont issues de ces usines en 2014 (ADEME, 2016b). Cette ressource est déjà largement exploitée mais sa part peut encore augmenter en optimisant l'extraction de la chaleur.

D'autres exemples de projets de réinjection de chaleur excédentaire dans des réseaux de chaleur et issue d'industries ou d'autres activités sont présentés ici. Ces exemples montrent la diversité des sources valorisables.

- Réseau de chaleur de Dunkerque : le chauffage urbain de la ville de Dunkerque, installé en 1985, mesure 40 km et délivre de la chaleur à 170 sous-stations, reliées à des logements, bureaux, écoles, hôpitaux et autres bâtiments publics et qui distribuent environ 126 GWh/an d'énergie thermique pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Plus de 60% de cette énergie provient de la récupération de chaleur sur l'usine sidérurgique d'ArcelorMittal, situé à moins de 2 km du centre-ville de Dunkerque (Hampikian, 2017a; Hexa Ingénierie, 2014). Cette chaleur est récupérée depuis deux hottes placées derrière des souffleries installées pour refroidir l'aggloméré (transformation du minerai de fer à 1200 °C). Deux échangeurs de 20 MW et 8 MW font l'interface entre l'usine et le réseau de chaleur de la ville de Dunkerque qui distribue de l'eau chaude à 110°C. Des dizaines de projets similaires existent déjà en Europe, où des industries revendent une partie de la chaleur de leurs procédés à un réseau de chaleur proche. Lygnerud et Werner (2017) ont par exemple répertorié toutes les industries suédoises connectées à des chauffages urbains : au total 97 installations ont été référencées dont 78 à hautes températures (les autres ont nécessité des pompes à chaleur). A noter que sur ces 97 projets, 69 sont toujours en fonctionnement. Toujours en exemple, le réseau de chaleur de Hengelo (Pays-Bas) est connecté à l'usine AkzoNobel qui produit du sel et qui revend donc de la chaleur (entre 100 GWh/an et 180 GWh/an) sous forme de vapeur à l'opérateur du chauffage urbain (Cewep, 2010).
- Réseaux de chaleur de Hoenheim et Reichesett (Nicolas Mary, 2011; SNCU, 2012): jusqu'à 2011, une raffinerie gérée par le groupe Shell restituait de la chaleur issue de ces procédés dans deux réseaux de chaleur au nord de Strasbourg. 40 GWh/an de chaleur fatale à haute température étaient ainsi valorisés, alimentant plus de 1700 logements en chauffage et ECS.
- Réseaux de chaleur de l'écoquartier Sainte Geneviève, Nanterre (O. Blanchard & Debizet, 2016; Menanteau & Blanchard, 2013): ce chauffage urbain, mis en service depuis 2011, distribue chauffage et ECS à un écoquartier de 650 logements, une école et quelques commerces avec un mix énergétique à majorité EnR&R grâce notamment à de la récupération de chaleur sur le réseau d'assainissement des eaux usées de la ville. Ces eaux, à une température variant de 12°C à 20°C et plus, préchauffent l'eau du réseau de distribution avant qu'une pompe à chaleur rehausse sa température jusqu'à 63°C, température aller du réseau. La récupération de la chaleur se fait grâce

à un échangeur thermique posé sur les canalisations d'assainissement. Deux pompes de 400 kW permettent la production d'environ 1 800 MWh/an, soit 39 % de la consommation totale de l'écoquartier. D'autres projets, utilisant d'autres technologies (notamment au niveau de l'échangeur qui peut prendre différentes formes et s'installer à divers endroits du réseau d'assainissement ou de la station d'épuration), ont vu le jour en France, comme à Roquebrune Cap Martin (06), à Chalon-sur-Saône, Bordeaux ou Auxerre. Tous ces projets datent des dernières années (entre 2011 et 2016). A l'étranger, le procédé est développé depuis plus longtemps comme en Suisse par exemple, où plusieurs dizaines de quartiers ont opté pour ce système de récupération de chaleur sur eaux usées (Rognon, 2010).

- Réseau de chaleur Val d'Europe, Marne-la-Vallée (F2A, 2012; Hampikian, 2017a) : ce réseau alimente un nouveau quartier d'entreprises d'une surface de 600 000m². La chaleur du réseau provient du data center situé dans ce même quartier. Les groupes froids, qui permettent aux salles informatiques du data center de ne pas dépasser une certaine température, relâchent une importante quantité de chaleur, à basse température (entre 30 et 50°C) qui est captée et distribuée via le chauffage urbain. En 2015, le data center peut fournir 26 GWh/an. Il existe quelques installations similaires en France (à La Courneuve en cours de construction et à Dijon où le réseau de chaleur de l'université de Dijon est connecté à un réseau de chaleur). D'autres projets en Europe montrent la faisabilité de tels projets, comme à Helsinki (CNET Home, 2009), Stockholm (DatacenterDynamics, 2017) ou en à Mantsälä en Finlande (Boye Petersen, 2018) tandis que de nombreux projets sont prévus dans les années à venir (Davies et al 2016; Wahlroos et al. 2017).

D'autres sources fatales, plus originales, sont parfois valorisées dans des réseaux de chaleur comme par exemple des crématoriums, qui relâchent de la chaleur à haute température (>150°C). C'est déjà le cas en Suède et au Danemark (Telegraph, 2008), alors que la Norvège cherche à les imiter mais se heurte à l'acceptation sociétale d'un tel projet (Decentralized Energy, 2015). Ces exemples montrent une place de plus en plus importante de l'énergie fatale comme une solution pour accompagner la transition énergétique des territoires même si le retour d'expérience sur ce type de projet est encore assez faible.

Dans l'optique de déterminer finement le potentiel énergétique, le prochain paragraphe décrit les critères permettant de caractériser une source de chaleur fatale. Augmenter la part d'énergie renouvelable dans le bouquet énergétique des chauffages urbains suppose la multiplication des sources de récupération. Contrairement aux sources industrielles (UVE compris), la chaleur fatale perdue par les infrastructures urbaines (les stations d'épuration, les data center, les centres commerciaux, les réseaux d'eaux usées) sont encore peu regardées dans les stratégies de développement des réseaux de chaleur. Les études concernant le potentiel d'énergie fatale (3.1.2 **Potentiel énergétique des sources de chaleur fatale**) négligent les sources urbaines et la littérature scientifique est également moins fournie. C'est pour cette raison que les recherches de cette thèse se concentrent exclusivement sur les sources urbaines et péri-urbaines qui présentent l'intérêt d'une plus grande proximité géographique avec les besoins (plus qu'une production industrielle plus régulière mais généralement éloignée des villes). Le choix des sources particulièrement étudiées a été régi par les orientations et réflexions de l'institut Efficacy et son consortium.

3.3. Description des sources urbaines de chaleur fatale étudiées

Cette section détaille les sources de chaleur étudiées dans le cadre d'une éventuelle valorisation dans des réseaux de chaleur. Des ordres de grandeurs théoriques sur le potentiel énergétique sont proposés dans cette section, mais la partie 2 est dédiée au calcul fin de ce potentiel réellement valorisable. Au-delà de cette donnée sur la quantité d'énergie, les sources de chaleur sont définies (3.3.2 **Focus sur les sources étudiées**) par des critères (3.3.1 **Critères de description**) présentés au prochain paragraphe.

3.3.1. Critères de description

Plusieurs paramètres conditionnent la valorisation d'une énergie fatale dans un réseau de chaleur. Au-delà de la dimension économique qui peut rendre une opération viable ou non, la question technique est la première à traiter. Or toutes les sources fatales diffèrent en plusieurs points qui les définissent. La notion de température est clé lorsqu'on regarde la compatibilité avec des besoins de chauffage ou d'ECS dans les bâtiments, mais d'autres paramètres sont déterminants. Voici les critères de description principaux d'une énergie fatale, qui permettront d'analyser les sources étudiées dans les paragraphes suivant :

- **L'état** : une source de chaleur fatale peut être sous forme d'air ou d'eau (liquide ou vapeur). L'état influe directement sur la performance de la valorisation d'énergie ainsi que les technologies nécessaires à la récupération.
- **La température** : la température de la source conditionne sa valorisation. En effet, la chaleur fatale est présente à toute température. En milieu urbain, elle se retrouve plutôt à basse température, c'est-à-dire sous les 30°C. Mais certaines sources, industrielles notamment, ont des pertes de chaleur à plusieurs centaines de degrés. C'est le cas par exemple des fours d'affinage de nickel (entre 1370-1650°C) ou encore du processus de séchage dans les fours de ciment (620-730°C) selon le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) qui classe les énergies fatales en trois catégories de température dans le cadre d'une étude sur l'efficacité énergétique des industries (Energy Efficiency Guide for Industry in Asia, 2006). La température de récupération d'une source est donc capitale pour ensuite dimensionner un système de valorisation adaptée avec les technologies adéquates.
- **La localisation** : la localisation sous-entend plusieurs informations. L'intérêt est de connaître précisément l'endroit où l'énergie est disponible et de regarder la distance avec un éventuel réseau de chaleur déjà existant et/ou la densité linéique thermique autour de source. En fonction du type de source et de son potentiel énergétique, la distance d'analyse peut s'étendre de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Les données de localisation exacte n'étant pas toujours disponibles, la première approximation a été de localiser les sources selon des échelles qualitatives : « urbain dense, urbain, périurbain ou loin des villes » (Chiche et al., 2015).
- **Le potentiel énergétique** : la quantité d'énergie extractible sur une source n'est pas du même ordre de grandeur en fonction des sources. Par exemple, l'énergie extractible d'une usine d'incinération de déchet, même de petite taille, est bien supérieure à celle d'une blanchisserie industrielle ou d'un datacenter. En fonction du potentiel énergétique, le type de réseau de chaleur connecté (taille, mix énergétique) sera différent. Pour calculer ce potentiel, il est nécessaire d'avoir des informations sur l'activité qui produit cette chaleur fatale. Il peut s'agir d'un débit d'eau, d'une quantité de matière traitée dans un process ou de la quantité d'énergie consommée par ce

process. La deuxième partie de ce mémoire détaille les algorithmes de calculs développés pour calculer le potentiel énergétique des sources urbaines étudiées.

- **La variabilité** : la variabilité, ou l'intermittence d'une source est déterminante pour évaluer l'intérêt de sa récupération. Les fluctuations peuvent être saisonnières et/ou intra journalières. Il est nécessaire d'analyser la disponibilité de l'énergie au cours du temps afin de savoir si elle peut répondre à des besoins thermiques que ce soit le jour, la nuit, en hiver, etc.

D'autres critères sont clés dans la réalisation d'une opération de valorisation d'énergie fatale dans un réseau de chaleur mais sortent de la faisabilité technique directe. Par exemple, la pérennité d'une source doit être prise en compte pour envisager un échange de chaleur sur le long terme entre le propriétaire de la chaleur fatale et l'opérateur du réseau de chaleur. Enfin, le mode de gestion de l'activité qui génère la source fatale est également une donnée importante. Il peut s'agir d'un acteur privé ou public, spécialiste d'un domaine qui peut être éloigné de l'énergie et qui ne doit pas être contraint par un système de récupération de chaleur sur son activité.

Tous ces critères vont donc servir à caractériser au mieux les sources d'étude.

3.3.2. Focus sur les sources étudiées

Les sources de chaleur fatale étudiées sont les eaux usées, les UVE, les data center, les blanchisseries industrielles, les verreries et les entrepôts frigorifiques.

Chacune de ces sources connaît un contexte particulier vis-à-vis de son historique et ces enjeux notamment relatifs à son marché et sa consommation énergétique. En plus de décrire ces sources en utilisant les critères de la section précédente, leur présentation complète est présentée en Annexe (**Annexes de la partie 1, de 1.2 à 1.7**, page 265) et résumée dans cette section.

A- Les eaux usées

Les eaux usées sont diverses : domestiques, pluviales ou non domestiques (issues de plusieurs activités comme les eaux de refroidissement pour les industries ou les piscines). Sous certaines conditions techniques, comme une température maximale de 30°C et un pH compris entre 5,5 et 8,5 (CCCE, 2014), les eaux usées sont déversées dans un réseau d'assainissement et dirigées vers des stations d'épuration (STEP) où elles sont traitées. Tous les immeubles doivent être raccordés à un réseau d'assainissement, il y a donc plus de 300 000 km de canalisation et près de 20 000 STEP en France (Commissariat Général au Développement Durable, 2011).

Sur réseau d'assainissement comme sur STEP, la valorisation de chaleur est possible. Le principe est de profiter des calories présentes dans les eaux usées afin de préchauffer de l'eau qui servira de source froide pour une pompe à chaleur (PAC). Cette dernière permet de produire de l'énergie thermique à une température qui peut répondre aux besoins de chauffage et d'ECS. Le Tableau 3-2 décrit cette source selon les critères de définition.

Tableau 3-2 Description de la source fatale "Eaux usées"

Critères	Description
Etat	Liquide
Température	Basse température (10°C - 30°C)
Localisation	Urbain dense
Variabilité	Variabilité journalière et saisonnière
Potentiel énergétique	< 3 GWh/an
Pérennité	Long terme
Gestion	Publique et/ou privée

Le potentiel énergétique de cette source est de l'ordre de quelques giga wattheures par an, comme le montrent les projets déjà effectifs évoqués dans la section exemples (3.2.2 **Exemples de réalisations**). Ce potentiel dépend principalement de la température des eaux usées ainsi que de leur débit. Le débit incarne également la variabilité de cette ressource énergétique.

Les eaux usées présentent un niveau de température entre 10°C et 30°C. Sa température varie de façon saisonnière, comme le montrent les quatre profils annuels de quatre réseaux d'assainissement (Figure A-1, page 267). Ces profils démontrent également que la température varie en fonction de la situation géographique du réseau : en moyenne, un réseau d'assainissement de la ville de Montpellier est 5°C plus chaud que celui de Nanterre, en région parisienne. Enfin, la température est plus basse sur un réseau d'assainissement unitaire (qui accueille toutes les eaux usées) que sur un réseau séparatif (qui transporte les eaux usées domestiques seulement).

Le débit présente quant à lui une variation journalière. Il suit les périodes de consommation d'eau par les habitants avec un pic le matin et le soir. Comme pour la température, des profils journaliers permettent d'analyser cette variation.

L'avantage de cette source est sa présence en milieu urbain dense, puisque les réseaux d'assainissement sont directement connectés aux bâtiments. En revanche, les STEP sont situées en périphérie des centres urbains. Malgré ce désavantage de localisation, les STEP présentent des débits plus importants puisqu'elles accueillent les eaux usées de toutes les branches du réseau d'assainissement.

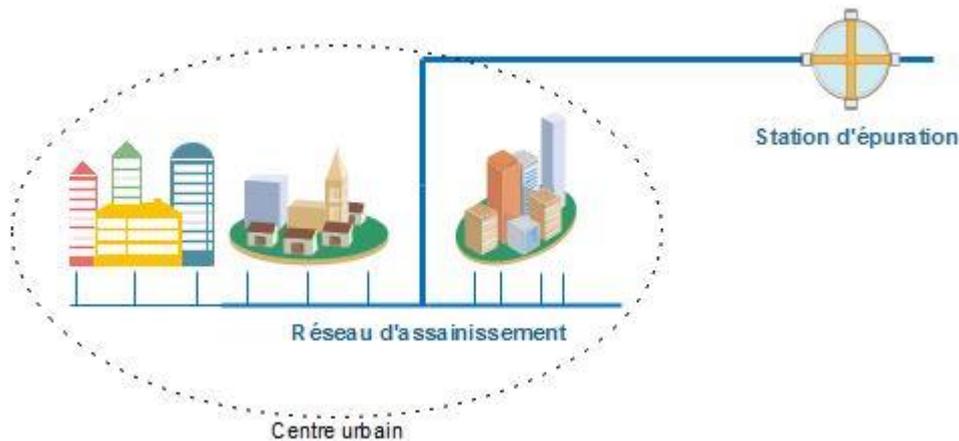


Figure 3-2 Points de récupération de chaleur sur eaux usées (source : auteur)

La pérennité de cette source est assurée sur un très long terme. Les réseaux d'assainissement et STEP, datant du XIX^{ème} siècle, s'étendent et se modernisent (Barraqué, 2014) et seront présents dans le futur avec des enjeux de préservation de la ressource et d'une épuration plus efficace.

Enfin, le propriétaire de cette ressource peut être un acteur public ou privé. Le service d'assainissement et d'épuration des eaux usées est une compétence de la collectivité territoriale, qui peut s'en occuper en interne (en régie), ce qui est le cas dans 75 % des cas (Commissariat Général au Développement Durable, 2010) ou passer par un opérateur privé via une DSP.

B- Les incinérateurs de déchets (UVE)

Aujourd'hui en France, près de 15 millions de tonnes de déchets sont incinérés par an (ADEME, 2016b), soit environ 30 % du total de déchets traités, qui peuvent également être recyclés (20 %), déchargés (36 %), ou valorisés par gestion biologique (14 %). Il existe 126 unités d'incinérations (UIOM) en France dont 115 qui pratiquent la valorisation énergétique. En effet, le four d'un incinérateur fonctionne à très haute température, jusqu'à 1 000°C. Cette chaleur, sous forme de vapeur, est alors utilisée soit pour chauffer de l'eau pour une valorisation thermique, soit pour alimenter un couple turbo-alternateur et produire de l'énergie électrique. Ainsi, environ 10 TWh d'énergie thermique ont été valorisés dans les UVE en 2014, dont 6,2 TWh distribués dans des réseaux de chaleur. Le Tableau 3-3 reprend les critères de la section 3.3.1 pour décrire l'énergie fatale issue des UVE.

Tableau 3-3 Description de la source fatale "UVE"

Critères	Description
Etat	Eau sous forme vapeur et air
Température	- Haute température (> 200°C) sur la chaudière - Basse et haute température (30-200°C) sur les autres postes
Localisation	Périurbain
Variabilité	En continu la journée, possibles variations saisonnières
Potentiel énergétique	Jusqu'à 800 GWh/an
Pérennité	Long terme
Gestion	Publique et privée

Si le four est le lieu principal pour récupérer de la chaleur fatale, d'autres procédés sont également émetteurs de chaleur, comme des eaux de refroidissement, les cheminées de traitement des fumées et les mâchefers (résidus solides issus de l'incinération de déchets). En ces points, la chaleur fatale est à des niveaux de température plus basse.

Les UVE sont majoritairement proches des villes, où la production de déchets est la plus importante. Cependant, en raison de la taille des usines (parfois supérieure à 100 000 m²) et d'éventuels risques sanitaires (Fabre, Daniau, Goria, Crouy-chanel, & Empereur-bissonnet, 2008; Hajek, 2013), ils ne sont pas situés en plein cœur des centres urbains mais dans des zones industrielles à la périphérie.

L'incinération des déchets est un processus continu. Avant d'être brûlés, les déchets sont stockés de façon à ce qu'un grappin les récupère par paquet et les envoie au four à intervalles réguliers. L'intérêt d'alimenter le four de cette façon est d'utiliser seulement le pouvoir calorifique des déchets et ainsi ne pas consommer d'autre énergie pour la combustion.

Le potentiel énergétique dépend principalement de la quantité de déchet incinéré. L'ADEME évoque un niveau de récupération d'énergie entre 946 kWh/tonne et 1276 kWh/tonne. Pour les plus grandes UVE (750 000 tonnes de déchets traités par an), l'énergie récupérable est de presque 800 GWh/an.

La quantité des déchets incinérés est stagnante après une augmentation constante depuis 1980 grâce à l'évolution du recyclage et des politiques de baisse de production de déchets. Néanmoins, l'activité est jugée pérenne et la quantité d'énergie valorisée continue à augmenter du fait de la systématisation de la valorisation énergétique sur les UVE et d'une efficacité de récupération accrue.

Enfin, comme pour les eaux usées, le traitement des déchets est une tâche qui incombe aux collectivités. Elles ont la possibilité d'assurer cette mission en interne (régie) ou de passer par des délégataires (DSP).

C- Les data centers

Un datacenter (appelé aussi centre de données en français) est un bâtiment ou une partie de bâtiment qui intègre des équipements informatiques, à savoir des serveurs, des unités de stockage de données (on parle de baies de stockage) et des systèmes de réseaux et télécommunications. Ces éléments stockent et traitent des données de toutes sortes, quelques soient leur propriétaire (particuliers ou entreprises) ou leur provenance. L'efficacité des data center est un sujet de plus en plus évoqué dans le cadre de la transition énergétique en raison de leur très forte consommation énergétique, d'environ 3 TWh en France (Observatoire de l'Industrie Electrique, 2017). Cette consommation est répartie entre les équipements informatiques et le refroidissement des salles informatiques, les salles IT (Ebrahimi et al, 2014). Ce refroidissement est à l'origine de rejets de chaleur.

Les groupes frigorifiques sont les systèmes les plus classiques de refroidissement des salles IT des data centers, avec consommation d'électricité au niveau du compresseur (W) pour produire du froid. Comme montré sur la Figure 3-3, une quantité de chaleur est relâchée au niveau du condenseur. Ce rejet peut se faire sous différentes formes en fonction du type de condenseur (à air ou liquide), sachant que la récupération de chaleur fatale n'est possible que pour un condenseur liquide. Pour améliorer leur efficacité énergétique, les nouveaux data centers favorisent, quand c'est faisable, un autre système de refroidissement passif, c'est-à-dire, non consommateur d'énergie, le free-cooling. La technique consiste à utiliser l'air extérieur pour réguler la température intérieure des salles IT, surtout en hiver. Dans ce cas, il n'y a pas de possibilité de valorisation de chaleur.

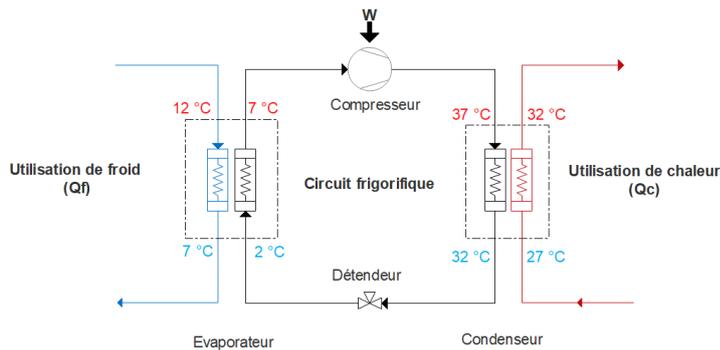


Figure 3-3 Schéma de principe d'un système frigorifique (source : auteur)

Le Tableau 3-4 expose les caractéristiques de l'énergie fatale issue des data centers selon les critères de description. La récupération se réalise donc sur les condenseurs des groupes froids où la température est d'environ 30°C.

Tableau 3-4 Description de la source fatale "data center"

Critères	Description
Etat	Eau liquide
Température	Basse température (30°C environ)
Localisation	Urbain, périurbain
Variabilité	En continu la journée, possibles variations saisonnières
Potentiel énergétique	< 30 GWh
Pérennité	Court terme
Gestion	Privée

Les data centers sont localisés à la fois sur des zones urbaines et périurbaines. Thépin détaille les critères idéaux pour l'installation d'un data center (2015) : préexistence d'un réseau d'alimentation électrique, bonne desserte, accès direct aux grandes artères du réseau internet, foncier à bas coût et proximité avec de grandes concentrations de clients potentiels. C'est pour ces raisons que la majorité des data centers en Ile-de-France se sont installés en Seine-Saint-Denis.

Le refroidissement des salles IT est constant tout au long de l'année et sans interruption. La chaleur récupérable est donc disponible en continu même si la quantité peut varier en fonction de l'activité du data center.

Le potentiel énergétique d'un data center dépend directement de la puissance du groupe frigorifique. Cette puissance est liée à la taille des salles IT et aux consommations électriques du data center. Les projets de valorisation de chaleur sur data centers ont montré un potentiel énergétique allant d'1 GWh/an à 26 GWh/an.

Les opérateurs des data centers sont des entreprises privées. Le secteur du stockage et du traitement des données est concurrentiel et qui évolue très rapidement au gré des contrats. Pour cette raison, la pérennité des data centers, symbolisée par leurs durées de vie, est assez faible et les centres peuvent fermer pour s'installer ailleurs au bout de quelques années. La durée de vie moyenne d'un data center est estimée entre sept et dix ans (Louwerens, 2014).

D- Les blanchisseries industrielles

L'activité d'une blanchisserie industrielle correspond à l'entretien professionnel des textiles. Contrairement à une laverie automatique, une blanchisserie peut traiter plusieurs tonnes de linges par jour avec des moyens plus avancés.

La consommation énergétique de cette industrie est conséquente, qui traite environ 1 600 tonnes de linge par jour, à raison d'une moyenne de 2 kWh/kg de linge (ADEME, 2017b). Ce chiffre correspond aux blanchisseries industrielles du secteur public (souvent intégrées aux hôpitaux, maisons de retraites ou EHPAD). Le reste des blanchisseries sont privées et leurs clients sont principalement des restaurants, hôtels ou des industries qui utilisent des vêtements de travail pour ses employés.

La récupération de chaleur sur une blanchisserie industrielle est possible en deux points d'un processus de traitement du linge en plusieurs étapes, illustrées Figure 3-4. Le premier point est en aval du lavage où l'eau utilisée (appelée effluent) est dirigé vers un réseau d'assainissement. Le second est au niveau du séchage où un important débit d'air est rejeté.

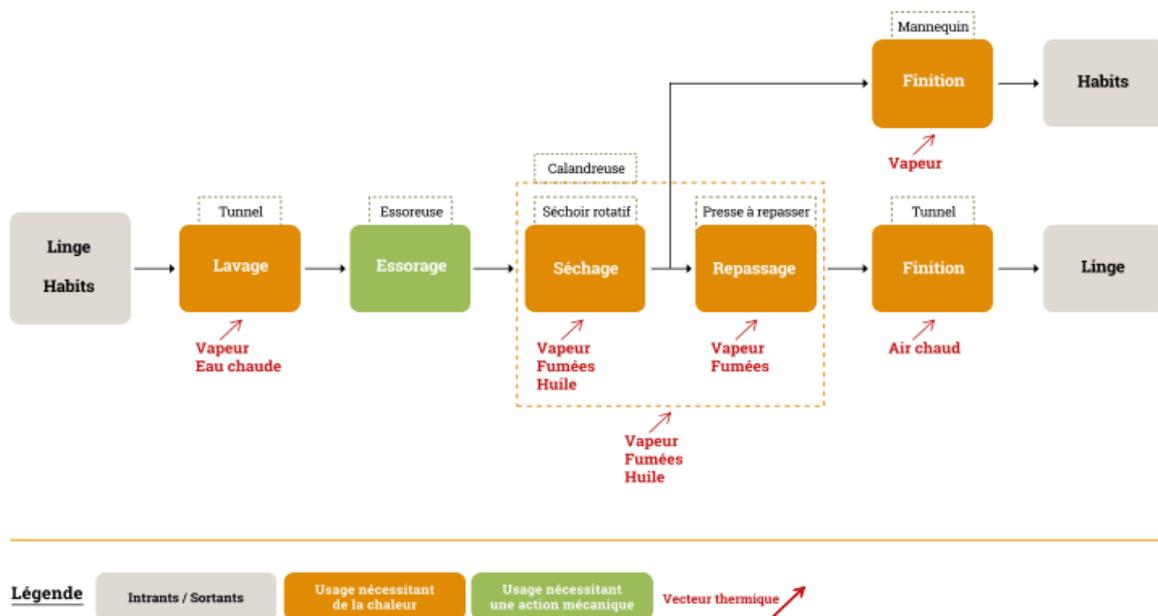


Figure 3-4 Schéma simplifié du processus du traitement du linge (ADEME, 2017b)

Dans le Tableau 3-5, le détail des critères liés à l'énergie fatale d'une blanchisserie industrielle est présenté.

Tableau 3-5 Description de la source fatale "blanchisserie industrielle"

Critères	Description
Etat	Eau liquide et air
Température	- Basse température sur les effluents (30°C) - Moyenne température sur l'air rejeté (60 °C- 110 °C)
Localisation	Urbain, périurbain
Variabilité	Forte intermittence
Potentiel énergétique	< 2 GWh
Pérennité	Court terme ou long terme
Gestion	Publique ou privée

En fonction du point de récupération, la chaleur récupérable est sous forme liquide et à une température de 30°C (ou plus si les cycles de lavage sont plus chauds) ou sous forme d'air, rejeté entre 60 °C et 110°C.

Les blanchisseries industrielles sont localisées dans diverses zones allant de l'urbain dense au périurbain. Les blanchisseries privées sont majoritairement situées dans des zones d'activités économiques (ZAE) donc plutôt en périurbain, alors que les blanchisseries publiques rattachés à des hôpitaux ou autres bâtiments sont plus proches de centres urbains (Figure A-21, page 291).

L'énergie fatale récupérable n'est disponible que durant les heures d'ouverture d'une blanchisserie, soit entre cinq et six jours par semaine, hors jours fériés et la journée, très souvent entre 6h et 21h. Même en période d'activité, la disponibilité de la chaleur est très variable. En effet, des mesures de débits d'effluents ont été réalisées dans le cadre des projets de recherche d'Efficity. Elles ont montré le caractère très saccadé du rejet d'effluents à la sortie des tambours de lavage, comme expliqué dans l'annexe (Figure A-22, page 292). Il en va de même pour l'air extrait du processus de séchage.

L'énergie fatale récupérable sur une blanchisserie industrielle est de l'ordre de quelques giga wattheures par an. Le niveau de récupération dépend de la taille de la blanchisserie et de la quantité de linge qui y est traitée. Sur les effluents, une valorisation interne est déjà parfois en place et limite donc la récupération. En effet, l'eau rejetée, qui peut être au-dessus de 30 °C, est refroidie par un échangeur de chaleur avant d'être évacuée dans un réseau d'assainissement. L'eau préchauffée par l'échangeur sert alors redistribuée en amont du processus de lavage (Figure A-19, page 289).

Enfin, les blanchisseries privées peuvent voir leur activité fluctuer en fonction du nombre de clients. La pérennité de ces industries est donc très variable, ce qui est moins le cas pour les blanchisseries publiques reliées à des hôpitaux et des EHPAD.

E- Les verreries

Les verreries fabriquent différentes gammes de verres, pour des utilisations diverses : du verre en cristal au plomb pour de l'artisanat ou du verre plat destiné à des industries comme l'automobile ou le bâtiment. Les procédés varient en fonction du type de verre produit, tout comme la quantité produite par verrerie, allant de quelques tonnes à 700 tonnes par jour (MEDDE, 2007).

Environ 4,5 millions de tonnes de verre ont été produits en 2013 en France (Fédération des industries du verre, 2013). Ces industries sont classées pour la protection de l'environnement et particulièrement énergivores. En 2009, environ 3,5 % de la consommation énergétique dans l'industrie est dédiée aux verreries en France (MTES, 2009). 42 verreries sont répertoriées en France, réparties sur tout le territoire et généralement installées depuis plusieurs dizaines d'années. Initialement implantées à l'écart des villes, certaines ont été rattrapées par le tissu urbain et sont à présent situées en zone urbaine (comme au Havre ou à Paris).

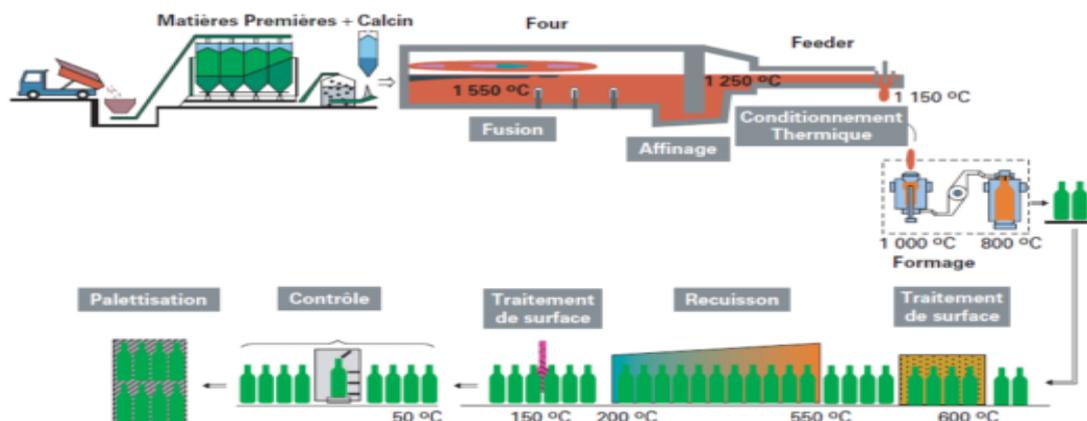


Figure 3-5 Process de fabrication du verre creux (Conseil National de l'Emballage, 2013)

La fabrication du verre est un procédé en cinq étapes majeures : le traitement des premières, la fusion, le formage, le traitement en aval et le contrôle qualité. La Figure 3-5 résume l'ensemble des étapes de fabrication et indique la température à laquelle chaque étape est réalisée. La fusion, étape la plus consommatrice en énergie, monte le niveau de température autour de 1 500 °C, qui est ensuite réduite durant les autres étapes. La récupération de chaleur est possible sur des eaux de refroidissement et sur les fumées du four (Fleiter et al., 2016).

Dans le Tableau 3-6, l'énergie récupérable sur une verrerie est décrite. Il s'agit donc de chaleur sous forme d'air ou d'eau, respectivement à haute température (300 °C – 600 °C) et basse température (40 °C – 80°C).

Tableau 3-6 Description de la source fatale "verrerie"

Critères	Description
Etat	Eau et air
Température	- Haute température (300 – 600 °C) - Basse température (40 – 80°C)
Localisation	Périurbain
Variabilité	Continu
Potentiel énergétique	De quelques GWh à 400 GWh
Pérennité	Long terme
Gestion	Privée

La localisation des verreries montre qu'elles sont majoritairement à l'extérieur des zones urbaines (Figure A-26, page 297), mais quelques usines sont implantées à proximité de centre urbain comme la verrerie SAVERGLASS dans la ville du Havre (Figure A-27, page 297).

La production de verre dans les usines est continue toute l'année puisque le four ne s'arrête que pour maintenance ou réparation. La chaleur fatale est donc disponible de façon constante.

Le potentiel énergétique d'une verrerie dépend de la quantité de verre produit. L'énergie consommée pour la production de verre est estimée entre 1,2 MWh/tonne et 1,7 MWh/tonne en fonction du type de verre produit (Fourment & Fromentin, 2012). Selon Van Limpt (2013), 100 % de l'énergie consommée est ensuite dissipée par effet joule mais tout n'est pas récupérable. Des systèmes de récupération interne au niveau du four peuvent permettre de valoriser jusqu'à 60 % de cette énergie. Pour les plus grandes verreries, jusqu'à 400 GWh/an est récupérable.

Enfin, la production de verre, gérée par des compagnies privées, est considérée comme une activité pérenne malgré une légère baisse de l'activité ces dernières années avec près d'un million de tonnes de verre produits en moins en 2003 par rapport à 2012 (Fédération des industries du verre, 2012).

F- Les entrepôts frigorifiques

Un entrepôt frigorifique reçoit, stocke et expédie des marchandises (denrées périssables : produits alimentaires et pharmaceutiques), sur une durée déterminée et dans des chambres froides. Ces dernières sont à une température comprise entre + 15 °C et – 60 °C en fonction de la marchandise entreposée. Les chambres froides alimentées par des groupes froids installés dans certains commerces (grossistes alimentaires, boucheries, poissonneries, hypermarchés de produits surgelés) peuvent être considérées comme des petits entrepôts frigorifiques. Cependant, ils ne sont pas référencés par le MEDDE qui répertorie tous les entrepôts frigorifiques de plus de 5 000m² (Commissariat Général au Développement Durable, 2012) et en compte 720.

L'élément principal d'un entrepôt frigorifique est sa ou ses chambre(s) froide(s). Le froid est produit par des installations frigorifiques à compression, qui consomment de l'électricité, selon le même principe que pour le refroidissement des data centers. Ainsi, environ 70 % de la consommation énergétique d'un entrepôt frigorifique est dédiée aux groupes frigorifiques. Les chambres froides consomment entre 30 et 300 kWh/m³/an (Evans et al., 2014).

La récupération de chaleur peut alors s'effectuer au niveau du condenseur du groupe frigorifique. Comme affiché dans le Tableau 3-7, la température à ce niveau est d'environ 30°C (Brange, Englund, & Lauenburg, 2016; Water Wind Sun S.A., 2017).

Tableau 3-7 Description de la source fatale "entrepôts frigorifiques"

Critères	Description
Etat	Eau
Température	Basse température (environ 30 °C)
Localisation	Périurbain
Variabilité	Continu mais des variations journalières
Potentiel énergétique	Entre 1 GWh/an et jusqu'à 50 GWh/an
Pérennité	Long terme
Gestion	Privée

L'analyse de la localisation des grands entrepôts frigorifiques (> 5 000 m²) montre qu'ils sont surtout situés dans des zones logistiques²² installées à l'écart des villes (Figure A-28, page 301). Les installations plus petites, issues d'activités commerciales notamment, peuvent en revanche être présentes en milieux plus urbains.

Le potentiel énergétique d'un entrepôt frigorifique dépend de la quantité d'électricité consommée par le groupe froid, elle-même dépendante de la taille de la chambre froide. Les grands entrepôts frigorifiques sont donc les plus sources avec le plus grand potentiel.

Les chambres froides sont refroidies sans interruption, même lorsque les entrepôts sont fermés (nuits, dimanches, jours fériés). La chaleur récupérable est donc supposément continue, même si en réalité, les groupes froids sont parfois désactivés ou réduits en puissance afin de faire des économies d'énergies. L'explication de cette démarche est en **ANNEXE 1.7** (Figure A-29, page 302).

Enfin, l'entreposage frigorifique, géré par des compagnies privées, est un secteur industriel indispensable au respect de la chaîne du froid et reste donc une activité pérenne.

²² Zone logistique : zone géographique aménagée de façon à permettre l'installation d'entrepôts. Il peut s'agir d'une zone industrielle, aéroportuaire, aménagée à vocation logistique, liée à une gare ferroviaire, portuaire, maritime ou fluviale (Commissariat Général au Développement Durable, 2012)

3.4. Comparaison et catégorisation des sources fatales

Pour rappel, les critères de description (3.3.1) sont l'état de la source, sa température, sa localisation, la variabilité et le potentiel énergétique. La pérennité de l'activité qui produit cette énergie, et son mode de gestion sont des critères complémentaires. La description fine de plusieurs sources de chaleur fatale via ces critères montre des différences et des similitudes.

L'intérêt de comparer les sources étudiées est de mettre en avant que, 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. La catégorisation permet ensuite de comprendre quels réseaux de chaleur et quelles sources de chaleur fatale sont compatibles.

3.4.1. Comparaison des sources fatales

Le Tableau 3-8 reprend et résume les descriptions des six sources de chaleur fatale étudiées. Lorsqu'il y a plusieurs points de récupération possible sur une source (comme pour la blanchisserie et la verrerie), le premier état et la première température correspondent aux états et températures du point de récupération principal.

Tableau 3-8 Comparaison des sources fatales étudiées

	Eaux usées	Blanchisserie industrielle	Data center	Entrepôt frigorifique	Verrerie	UVE
Etat	Eau liquide	Eau liquide Air	Eau liquide	Eau liquide	Air Eau liquide	Air Eau vapeur
Température	10°C - 30°C	30°C 60-110 °C	30°C	30 °C	300 – 600 °C 40 – 80°C	> 200°C 30-200°C
Localisation	Urbain dense	Urbain Périurbain	Urbain Périurbain	Périurbain	Périurbain	Périurbain
Variabilité	Journalière Saisonnière	Forte intermittence	Saisonnière	Journalière	Continu	Saisonnière
Potentiel énergétique	< 3 GWh/an	< 2 GWh	< 30 GWh	1 - 50 GWh/an	1 - 400 GWh/an	1 - 800 GWh/an
Pérennité	Long terme	Court ou long terme	Court terme	Long terme	Long terme	Long terme
Gestion	Publique Privée	Publique Privée	Privée	Privée	Privée	Privée

Il y a une forte corrélation entre la température et le potentiel énergétique. Les sources à basse température, c'est-à-dire sous 70 °C pour les réseaux de chaleur selon l'AIE (Tableau 1-3, page 48), ont un potentiel énergétique faible (sous les 50 GWh/an), alors que les sources à haute température présentent des potentiels bien plus importants. Le critère de localisation peut s'ajouter à cette comparaison. Les sources basses températures sont présentes dans des zones urbaines plus denses que les sources hautes températures, plus industrielles. La Figure 3-6 reprend les valeurs de description et synthétise cette comparaison.

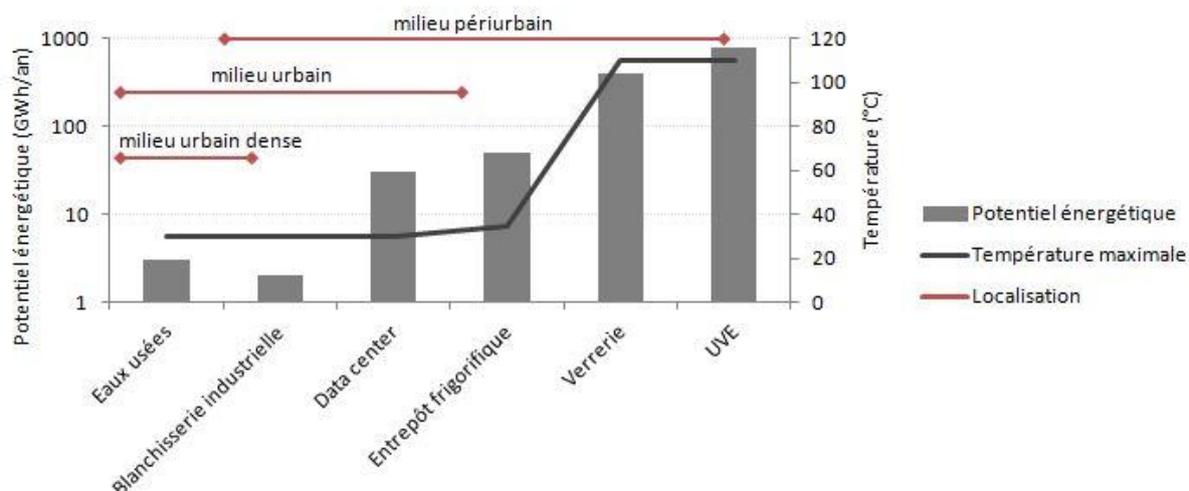


Figure 3-6 Potentiel énergétique, température et localisation des sources de chaleur fatale

Le critère de localisation est à relativiser dans le sens où chaque cas de source fatale est unique. Certaines verreries sont en milieu urbain, certains data centers sont en milieu urbain dense. A l'inverse, des data centers sont situés à l'écart des villes, en milieu rural, tout comme certaines blanchisseries. Néanmoins, la tendance exprimée par la Figure 3-6 s'inspire de la majorité des sources fatales localisées.

L'état des sources confirme également cette séparation. La récupération sur les sources à basse température se réalise sur des eaux sous forme liquide (eaux usées, effluents, condenseur à eau) alors que la chaleur fatale des sources à haute température est disponible dans l'air (combustion des déchets et de matières premières).

Cependant, la notion d'urbain/périurbain est à prendre avec précaution. Par exemple, les deux principaux UVE de la région parisienne (respectivement à Saint Ouen et Ivry) sont dans des zones urbaines. Il est également possible de trouver des data center dans des zones rurales. Les caractères urbains ou/et périurbains des sources fatales du Tableau 3-8 sont simplement des tendances.

3.4.2. Catégorisation des sources fatales

Aux vues de ces comparaisons, deux catégories d'énergies fatales se distinguent : les sources basses températures et les sources hautes températures. Au-delà du critère de température, ces deux catégories de chaleur fatales présentent des états, des localisations et des potentiels énergétiques distincts, résumés dans le Tableau 3-9.

Tableau 3-9 Catégories de sources de chaleur fatale

Catégorie de la source	Haute température	Basse température
Etat	Air	Eau liquide
Température	> 200 °C	10°C – 35°C
Localisation	Périurbain	Urbain dense - Périurbain
Potentiel énergétique	Jusqu'à 800 GWh/an	1 GWh/an – 50 GWh/an
Sources	<ul style="list-style-type: none"> • Verrerie • UVE 	<ul style="list-style-type: none"> • Eaux usées • Blanchisserie industrielle • Data center • Entrepôt frigorifique

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

Les sources de chaleur fatale « haute température » étudiées sont les UVE et les verreries. Il s'agit d'activités industrielles, très consommatrices en énergie et qui dégagent le plus de chaleur fatale. Pour rappel, les UVE en France valorisent déjà une grande partie de leur énergie fatale et profitent parfois des hautes températures pour produire et revendre de l'électricité. 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 : en vapeur (ex : CPCU, réseau de chaleur de la Ville de Paris) ou liquide (Rennes, Brest, etc.). Ces usines sont souvent localisées à la périphérie des villes, à quelques centaines de mètres de zones denses.

Dans la littérature, un seul réseau de chaleur profite des calories d'une verrerie, en Italie (Heliex Power, 2016). L'usine Vetrobalsamo, dans la banlieue de Milan (Italie), produit environ 500 000 bouteilles par jour et a installé en 2016 un système de récupération de chaleur qu'elle distribue au réseau de chaleur de la ville. Environ 20 GWh/an sont produits par l'usine de verre, soit 3 % de la quantité de chaleur haute température qui passe par le réseau de chaleur, long de 136 km (UNEP, 2013).

D'autres industries valorisent (3.2.2 **Exemples de réalisations**) de la chaleur fatale présentant les mêmes caractéristiques que celles des verreries, comme l'exemple de l'usine de sidérurgie de Dunkerque déjà présenté.

Les réseaux de chaleur qui valorisent ces énergies présentent des caractéristiques similaires : ils distribuent de grandes quantités de chaleur, à haute température, desservent des grandes villes et sont de grandes tailles (Tableau 3-10). De plus, ces réseaux sont des réseaux datant de la troisième vague de développement de chauffages urbains, à partir des années 1980 (cf. 1.2 **Historique**) et appartiennent à la première génération de réseaux de chaleur (Figure 1-6, page 49).

Tableau 3-10 Caractéristiques de réseaux de chaleur valorisant des sources urbaines de chaleur fatales (exemples)

Catégorie de la source	Haute température			Basse température		
	Brest	Dunkerque	Milan	Ecoquartier Sainte Geneviève	Val d'Europe	Sandvika, Norvège
Température aller	110 °C	110 °C	110 °C	65 °C	55 °C	80 °C
Taille du réseau	25 km	38 km	136 km	800 m	4 km	10 km
Source de chaleur fatale (CF)	UVE	Usine sidérurgique	Verrerie	Eaux usées	Data center	Eaux usées
GWh livrés	114 (87 % par la CF)	135 (60 % par la CF)	642 (3 % par la CF)	4,5 (39 % par la CF)	20 (100 % par la CF)	47 (52 % par la CF)
Equivalents logements desservis	13 729	13 469	85 000	800	Zone tertiaire (600 000 m ²)	56 bâtiments
Année de création	1988	1986	1997	2011	2013	1989

Les sources de chaleur fatale « basse température » étudiées sont les eaux usées, les blanchisseries industrielles, les data center et les entrepôts frigorifiques. Le retour d'expérience sur ces sources est plus limité, la valorisation de ces ressources étant plus récente. Parmi les cas déjà évoqués (3.2.2

Exemples de réalisations), le réseau de chaleur de l'écoquartier Sainte Geneviève à Nanterre valorise les calories du réseau d'assainissement des eaux usées, tandis que celui de Val d'Europe, à Marne-la-Vallée, récupère la chaleur d'un data center. En autre exemple, la ville de Sandvika, en Norvège, est l'une des premières villes à posséder un réseau de chaleur alimenté par deux pompes à chaleur de 6,5 MW (Boye Petersen, 2018). Les eaux usées de la station d'épuration, au-dessus de 12 °C, sont utilisées comme source chaude pour les pompes. 52 % des besoins énergétiques fournis par le réseau de chaleur de 10 km proviennent de ce système, soit 24 GWh/an. Ces trois cas existants sont repris dans le Tableau 3-10 pour illustrer les caractéristiques des réseaux de chaleur qui valorisent de l'énergie fatale basse température.

Les ordres de grandeur affichés dans le Tableau 3-10 permettent de mettre en évidence la différence entre les réseaux qui peuvent accueillir les deux catégories de chaleur fatale précédemment décrites.

Les réseaux de chaleur pouvant valoriser les sources "haute température" sont ceux qui composent déjà le parc de chauffage urbain en France (de 1^{ère} ou 2nd génération). La quantité d'énergie valorisable issue de ces sources est conséquente et permet de répondre aux besoins thermiques de nombreux bâtiments, neufs comme anciens, sans changer les systèmes de distribution. Cette distribution se réalise à haute température, 110 °C dans les exemples donnés. Dans ce cas, 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 « basse température » de chaleur fatale n'est possible qu'avec les nouvelles générations de réseaux de chaleur en France. L'exemple de Sandvika en Norvège, datant de 1989, est une exception et démontre l'avance des pays nordiques sur l'optimisation des réseaux de chaleur. En France, ces réseaux à basses températures sont de nouvelles générations. Les bâtiments raccordés à ce type de réseaux sont récents ou rénovés, ils possèdent donc des performances énergétiques supérieures et consomment moins de chauffage. Les émetteurs de chauffage sont également à basses températures. Ces systèmes sont également de plus petites tailles, et valorisent plus d'énergies locales, renouvelables ou de récupération. Ils alimentent des petites villes ou des quartiers. L'apport de pompes à chaleur est souvent nécessaire, ce qui induit une consommation électrique plus importante. En plus de coûts technologiques importants, l'intégration de sources urbaines de chaleur fatale dans de tels systèmes est donc dépendante de conditions techniques parfois difficiles à réunir. Ce constat est explicité dans le dernier chapitre de la deuxième partie : Chapitre 6 Conditions d'intégration de sources fatales dans des réseaux de chaleur.

Deux catégories de sources fatales de chaleur seraient donc potentiellement intégrables dans deux types de réseaux de chaleur, qui alimentent des aménagements différenciables. D'un côté, il s'agit de réseaux étalés sur des villes entières, aux bâtiments variés en termes d'âges, de consommation énergétique et de fonction. De l'autre, les aménagements sont de tailles plus réduites et plus récents. La question énergétique est prise en compte plus en amont que pour les aménagements plus anciens, avec des scénarios de mise en place de réseaux de chaleur qui intègrent au moins une grande partie des bâtiments. Cette planification en amont permet d'inclure des innovations telles que la valorisation d'énergies de récupération, plus complexes à mettre en œuvre dans le cas d'un réseau déjà existant et ancien. Le modèle économique de ces réseaux plus petits est également différent : l'investissement est plus faible sur le réseau de distribution mais peut être plus important au niveau des technologies utilisées (ex : pompes à chaleur) et des coûts variables (consommation électrique). La petite quantité

de chaleur totale distribuée par rapport à un grand réseau et la plus faible consommation par logement liée à une meilleure performance des bâtiments raccordés peuvent rendre vulnérable ce modèle économique.

Au-delà des différences techniques entre les réseaux de chaleur plus anciens et ceux nouveaux, les réseaux de chaleur récents sont donc les plus propices à intégrer des sources d'énergies fatales, notamment basses températures, grâce à une planification plus anticipée, des acteurs plus concernés et des aménagements plus adaptés.

3.5. Conclusion du chapitre 3

Les énergies fatales, sous forme de chaleur, sont des sources thermiques créées par des activités dont l'objet est autre que la production d'énergie. L'efficacité énergétique des processus peut limiter ses pertes mais de nombreuses sources de chaleur fatale sont inévitablement présentes. La récupération de cette chaleur fatale n'est pas une idée nouvelle dans le sens où elle s'effectue partiellement en interne dans de nombreux procédés, notamment industriels. L'intérêt de valoriser cette énergie thermique fatale est qu'elle est décarbonée (même si l'activité qui la relâche consomme des énergies fossiles) et perdue si non utilisée (relâchée dans l'atmosphère). Les sources d'énergies fatales font donc parties des EnR&R.

Devant l'intérêt que représente une énergie décarbonée et théoriquement gratuite (puisque déjà produite), de nombreuses études prospectives estiment le potentiel des sources d'énergie fatale. Plusieurs pays ont réalisé cette étude aux échelles nationales en se focalisant sur l'énergie fatale produite par les industries. Les résultats montrent des potentiels très élevés, comme en France, où l'ADEME a évalué à 51 TWh/an le potentiel de chaleur fatale à plus de 100°C récupérable dans les principales industries consommatrices d'énergie, soit une quantité supérieure l'énergie que les réseaux de chaleur délivrent aujourd'hui en France (environ 23 TWh/an). Cependant, le potentiel réellement valorisable est plus faible que le potentiel théorique. Des limites techniques, comme les pertes de distribution, la performance des technologies de récupération, la variation des besoins au cours du temps ou encore la qualité de l'énergie fatale face aux besoins, abaissent les potentiels élevés des études prospectives.

Ce potentiel de chaleur fatale peut être valorisé pour des procédés énergétiques (soit directement thermique, soit après transformation sous forme d'électricité) ou pour chauffer des bâtiments et de l'ECS, en fonction de la quantité et de la qualité de l'énergie disponible. Il peut être monopolisé en interne, c'est-à-dire directement pour l'activité qui l'a créé ou pour le bâtiment qui la contient, ou en externe en étant distribué, via un réseau de distribution.

Utiliser l'énergie fatale pour alimenter en chauffage et eau chaude sanitaire les bâtiments des villes grâce à un réseau de chaleur est donc une opportunité intéressante pour les collectivités qui souhaitent améliorer les performances environnementales de leurs territoires. C'est dans ce cadre que l'énergie fatale est aujourd'hui intégrée aux objectifs de développement des EnR&R, notamment dans la loi TCVE et leur recensement est de plus en plus présent, dans certains cas obligatoires, dans les stratégies énergétiques locales. Plusieurs réseaux de chaleur français sont déjà alimentés par des sources d'énergie fatale. La majorité des UVE sont déjà raccordés à des chauffages urbains en France, mais d'autres sources fatales ont récemment été intégrées à des réseaux, provenant d'industries (sidérurgie par exemple) ou d'infrastructures urbaines (réseau d'assainissement d'eaux usées).

Les études prospectives insistent surtout sur le potentiel provenant des industries. Ces activités, très consommatrices en énergie, sont les plus émettrices en chaleur fatale. Cependant, en s'intéressant plus particulièrement au couplage réseaux de chaleur – sources de chaleur fatale, une hypothèse est faite : les sources fatales à intégrer en priorité sont celles les plus proches des zones urbaines denses, où la viabilité d'un réseau de chaleur est la plus assurée. Pour cette raison, dans cette thèse, l'intérêt a été porté sur certaines sources de chaleur fatale localisées en zones urbaines et périurbaines. Le choix des sources est le résultat d'une analyse des projets déjà existants, de la littérature et de réflexions menées au sein du groupe de travail de l'institut Efficacity.

Les sources fatales ainsi étudiées dans cette thèse sont les eaux usées, les blanchisseries industrielles, les data center, les entrepôts frigorifiques, les verreries et les UVE. Afin de juger de la pertinence de leur intégration dans des réseaux de chaleur, l'objectif est de déterminer finement leur potentiel énergétique et de proposer une analyse technique et économique de leur valorisation. Les résultats de cette recherche sont présentés dans la partie 2.

Dans ce chapitre, la description détaillée des procédés qui produisent cette énergie fatale et du contexte des activités qui effectuent ces procédés a permis de déterminer finement la qualité et les caractéristiques des sources. Le Tableau 3-8 résume les caractéristiques des sources fatales, définies par leur état physique, leur température, leur localisation, leur variabilité et un ordre de grandeur de leur potentiel énergétique.

Ces descriptions ont mis en lumière deux catégories de sources fatales qui se différencient. En analysant les projets qui valorisaient ces sources, cette catégorisation s'applique également sur les aménagements qui s'alimentent en partie par ces sources et les réseaux de chaleur installés au sein de ces aménagements. Les catégories de sources fatales sont :

- Les sources hautes températures : elles proviennent de procédés industriels, à l'état de vapeur d'eau ou d'air rejeté à des températures supérieures à 100°C. Elles se situent à l'écart des villes, parfois en zones périurbaines et disposent d'un potentiel énergétique élevé par rapport à l'autre catégorie. Les réseaux de chaleur qui valorisent ces sources sont de grandes tailles, plutôt anciens et fonctionnent à hautes températures. Ils alimentent tout type de bâtiments et s'étalent sur des villes entières, comme à Paris, Rennes ou Milan.
- Les sources basses températures : elles proviennent d'activités industrielles ou d'infrastructures, principalement sous forme d'eau liquide à basse température (< 50 °C). Elles se situent en zones périurbaines et urbaines et se retrouvent parfois dans des zones très denses. Leur potentiel énergétique est souvent plus faible que pour les sources hautes températures. Les réseaux de chaleur qui les valorisent sont principalement des petits réseaux, de 3^{ème} ou 4^{ème} génération. Les bâtiments raccordés sont neufs ou rénovés, consomment moins d'énergie et disposent d'émetteurs de chauffage basse température. La température de fonctionnement du réseau est donc basse température. Les aménagements qui profitent de ces réseaux sont principalement des écoquartiers, soit une échelle plus petite que pour les sources à haute température.

En plus des différences entre les sources hautes et basses températures déjà évoquées, les technologies de valorisation diffèrent également : les sources basses températures n'ont pas une température assez élevée pour répondre à des besoins de chauffage ou d'ECS et l'utilisation d'une pompe à chaleur, pour rehausser cette température, est alors impérative. Dans le cas des sources à haute température, un échangeur de chaleur peut suffire pour récupérer l'énergie fatale. Ces technologies sont explicitées dans la partie 2.

Enfin, la pérennité et le mode de gestion ont été décrits pour chaque source étudiée. Ces critères ne sont pas utiles pour la détermination de la faisabilité technique d'une récupération de chaleur mais ont de l'influence dans le cadre d'une estimation économique de cette récupération et d'une contractualisation avec un réseau de chaleur.

CONCLUSION DE LA PARTIE 1

Les réseaux de chaleur sont des systèmes souterrains de distribution de chauffage et d'ECS en milieu urbain. Ils existent depuis plus d'un siècle et ont évolué pour être aujourd'hui des outils clés de la transition énergétique des villes de par les avantages qu'ils peuvent proposer. Grâce à des températures de fonctionnement réduites, une isolation du réseau de distribution, des systèmes de stockage et un pilotage optimisé, ils peuvent mobiliser des EnR&R locales. Près de la moitié de l'énergie distribuée dans les réseaux de chaleur français provient de sources renouvelables ou de récupération (Fedene & SNCU, 2018b). Or aujourd'hui seulement 7 % de la population française est raccordée à un réseau de chaleur. Le développement généralisé de ce système de chauffage urbain est l'un des moyens majeurs pour parvenir à répondre aux objectifs environnementaux en termes de réduction de GES et d'augmentation de la part d'EnR&R dans le mix énergétique. Son coût représentant un frein trop important pour les collectivités, des dispositifs incitatifs financiers ont dès lors été mis en place. En effet, les investissements liés au réseau de distribution et aux chaufferies s'amortissent sur le long terme (de l'ordre de 20 à 30 ans) et obligent les collectivités à s'engager sur des périodes plus longues que pour un autre système de chauffage.

Leur développement est également soumis à la complexité de leur mise en œuvre. Plusieurs raisons, au-delà de l'investissement, en sont la cause : la durée des travaux, les contraintes urbaines qu'elles impliquent (fermetures de routes et de voies, nuisances sonores), et la réticence de certains acteurs, concernés par le projet. Cette dernière raison est une problématique forte, aussi importante que les contraintes techniques et économiques, et souvent négligée lors des études prospectives. L'aspect politique, notamment en termes de gouvernance et de prises de décisions, est donc intégré aux réflexions de cette thèse. Plusieurs guides et méthodes ont été développés pour tenter d'accompagner au mieux les acteurs sur des projets de développement de réseaux de chaleur. Ces guides abordent de façon marginale l'énergie fatale.

Les sources de chaleur fatale, considérées comme des EnR&R, sont une des pistes de développement pouvant permettre aux réseaux de chaleur d'être plus vertueux. Ces sources sont multiples, décentralisées, et des études prospectives ont révélé des potentiels énergétiques conséquents. Ces études insistent surtout sur le potentiel provenant des industries, relativement éloignées des centres urbains où les réseaux de chaleur sont les plus pertinents. Partant de ce constat, les recherches de cette thèse se sont concentrées sur des sources de chaleur fatale urbaines, situées à proximité des zones denses. Les sources choisies ont été décrites selon plusieurs critères techniques afin de déterminer la qualité énergétique qu'elles présentent et obtenir un ordre de grandeur du potentiel énergétique récupérable.

Une fois décrite, elles ont été comparées, ce qui a permis de ressortir deux catégories de sources de chaleur fatale : les sources hautes températures et basses températures. Au-delà de leur différence de température, ces deux catégories présentent des potentiels énergétiques différents, ne sont pas localisées dans les mêmes zones, et présentent des états différents. En analysant des projets valorisant ces énergies fatales, la différence entre les deux catégories se retrouve dans le type d'aménagement qu'elles alimentent et les réseaux de chaleur qui les accueillent.

Les objets étant décrits, le sujet de l'intégration de sources fatales urbaines de chaleur dans les réseaux de chaleur pose plusieurs questions.

Tout d'abord en termes de viabilité technique et économique :

- Quelle est le réel potentiel des sources de chaleur étudiées ? La quantité de chaleur récupérable est une donnée indispensable pour juger de la pertinence de récupération mais d'autres informations sont indispensables :
- Quelle concomitance entre la variabilité des sources et celle des besoins thermiques ? Certaines sources ont une disponibilité variable durant la journée ou en fonction des saisons. Les besoins de chauffage et d'ECS sont également intermittents et ne sont pas les mêmes en fonction de l'usage des bâtiments (tertiaires, logements, etc.).
- Quelles technologies de récupération en fonction de la source disponible ? Les outils seront différents en fonction des deux catégories de sources fatales, basse ou haute température. En plus d'échangeurs thermiques, des pompes à chaleur sont parfois nécessaires. Comment dimensionner ces outils ?
- Quels seraient les gains réels de la valorisation d'une source fatale de chaleur dans un réseau de chaleur ? Quelle part d'EnR&R la valorisation d'une source fatale peut-elle permettre ? Quelle économie en CO₂ ?
- A quels coûts cette valorisation d'énergie est-elle possible ? L'investissement et la durée de vie des technologies sont prépondérantes, tout comme les coûts de maintenance. A même quantité d'énergie produite, une source fatale peut-elle être compétitive par rapport une autre énergie (renouvelable ou non) ?
- Comment s'intègre concrètement l'énergie récupérée dans un réseau de chaleur et dans quels cas l'intégration sera possible ?

Dans le cadre d'un des projets de recherche de l'Institut Efficacity dans lequel une partie du travail de thèse s'inscrit, un outil de simulation qui estime des sources fatales urbaines a été développé et répond en partie à ces questions. La partie 2 de ce manuscrit détaille le développement des modèles de Recov'Heat.

Les résultats proposés par cet outil sont ceux d'une étude technico-économique, qui permettent donc de juger de la faisabilité d'un projet de récupération d'énergie fatale. Cependant, comme expliqué dans le chapitre 2, d'autres paramètres interfèrent sur la réalisation d'un projet de développement de réseau de chaleur. Ce constat est d'autant plus avéré avec l'ajout d'un acteur supplémentaire, le propriétaire de la chaleur fatale. Se posent alors des questions sur la mise en œuvre de projets de valorisation de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur :

- Quels sont les bonnes pratiques permettant d'impulser des projets de valorisation d'énergies fatales dans des réseaux de chaleur ?
- Quels acteurs sont directement et indirectement affectés par la mise en œuvre de tels projets ? Quelles sont leurs motivations vis-à-vis de ces projets ?
- La prise en compte des sources d'énergies fatale est-elle systématique dans la réalisation de stratégies énergétiques territoriales et dans le développement d'aménagements ?
- Les porteurs de projets disposent-ils d'outils ou méthodes pour prendre en compte ces contraintes de mise en œuvre ?

Ces questions sont traitées dans la troisième partie du manuscrit où un détail des intérêts et les doutes des acteurs concernés par le développement d'un projet de valorisation de chaleur fatale dans un réseau de chaleur est effectué. L'analyse de plusieurs études de cas montre les points clés et les conditions qui permettent de rendre ce type de projets viables.

PARTIE 2 : ESTIMATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE DES SOURCES DE CHALEUR FATALE ET COMPATIBILITE AVEC LES RESEAUX DE CHALEUR

Lors de la description de plusieurs sources urbaines de chaleur fatale dans la première partie de ce manuscrit, des ordres de grandeur sur la quantité d'énergie ont été présentés. Ainsi, les sources périurbaines (et à hautes températures) comme les UVE et les verreries offrent des potentiels énergétiques élevés, pouvant dépasser 100 GWh/an. Au contraire, pour les sources localisées dans les zones les plus denses (eaux usées, data center notamment), le potentiel énergétique est estimé à quelques gigawattheures par an et jusqu'à 50 GWh/an environ.

En réalité, chaque source présente un potentiel énergétique différent qui dépend de plusieurs paramètres comme la quantité de l'activité qui rejette cette chaleur (la quantité de déchets incinérés par an d'une usine d'incinération par exemple), les technologies utilisées ou la taille des bâtiments qui accueillent cette activité. L'énergie disponible peut également être fluctuante en fonction de l'activité. Il peut s'agir d'une intermittence saisonnière (fermeture ou réduction d'une activité en été) ou journalière (variation du débit des eaux usées dans les réseaux d'assainissement en fonction des heures de la journée). L'intérêt de valoriser une source urbaine d'énergie fatale doit également être analysé en fonction des besoins thermiques auxquels elle pourrait répondre. Ces besoins (chauffage et ECS) varient en fonction de caractéristiques propres à chaque bâtiment (zone géographique, âge de construction, usage du bâtiment, types d'émetteurs de chauffage). La distance entre la source d'énergie fatale et les besoins est un autre élément qui peut influencer la faisabilité d'un projet de valorisation de cette énergie, sur les plans techniques et économiques.

Un outil de simulation, appelé Recov'Heat, a été développé dans le but de prendre en compte tous ces paramètres. Il évalue, à partir d'un minimum d'information sur une source de chaleur fatale, son potentiel énergétique au regard des besoins thermiques d'un quartier dimensionné au préalable. La méthode est de calculer un potentiel énergétique puis de dimensionner les éléments pouvant valoriser l'énergie fatale. En résultat, des indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux permettent de confirmer ou d'infirmer la pertinence d'un projet de récupération d'une source urbaine de chaleur fatale sur un territoire.

Dans le chapitre 4, la démarche Recov'Heat est entièrement décrite (Chapitre 4 L'approche et le modèle Recov'Heat). La première partie du chapitre expose son fonctionnement global qui repose sur trois modules principaux et son environnement de développement. Ensuite, les trois modules sont détaillés : le premier détermine les besoins thermiques d'un quartier, le deuxième évalue le potentiel énergétique d'une source fatale choisie et dimensionne les éléments de valorisation de cette énergie, et le troisième synthétise les résultats de la simulation pour afficher des indicateurs techniques, économiques et environnementaux.

Le chapitre 5 valide les méthodes développées dans l'outil Recov'Heat en le confrontant avec des cas réels de récupération de chaleur fatale (Chapitre 5 Validation du modèle Recov'Heat et cas d'étude). Dans un premier temps, les résultats de simulations sur le potentiel énergétique de sources telles que les UVE, les eaux usées et les data centers sont comparés avec des projets déjà mis en place. Dans un second temps, une étude de cas est réalisée à partir d'un entrepôt frigorifique situé en Ile-de-France.

L'étude porte sur la faisabilité de valorisation la chaleur de cet entrepôt pour alimenter le quartier résidentiel situé à côté. Ces comparatifs permettent de mettre en avant les avantages et les limites de l'outil. Si Recov'Heat donne des ordres de grandeur acceptables quant aux potentiels énergétiques de sources urbaines de chaleur fatale, certaines hypothèses simplificatrices rendent l'outil inadaptée pour une étude de faisabilité d'intégration à un réseau de chaleur. En effet, ce dernier est décrit à minima dans l'outil et doit être modélisé plus finement pour déterminer les performances réelles d'un tel système de récupération et de valorisation d'énergie.

Le chapitre 6 revient sur les limites de l'outil Recov'Heat et détaille plusieurs points techniques clés pour analyser la compatibilité entre une source de chaleur fatale et un réseau de chaleur (Chapitre 6 Conditions d'intégration de sources fatales dans des réseaux de chaleur). La température est un aspect qui peut être critique aux vues de la différence entre certaines sources fatales basses températures et les réseaux de chaleur. Néanmoins, des architectures innovantes de réseaux de chaleur sont adaptées et peuvent fonctionner à des régimes de température plus bas que les réseaux plus anciens. La performance globale de ces systèmes est alors questionnée.

CHAPITRE 4 : L'APPROCHE ET LE MODELE RECOV'HEAT

Recov'Heat est un outil de simulation créé à la fois dans le cadre des travaux de cette thèse, ainsi que ceux de l'institut Efficacity sur la récupération de chaleur fatale. Son objectif principal est d'estimer le potentiel énergétique des sources de chaleur fatale qui ont fait l'objet d'une description avancée dans la première partie. Dans cet outil, le potentiel d'une source fatale est calculé à partir d'une série d'hypothèses et de données fournies par l'utilisateur, puis mis en regard avec les besoins thermiques d'un quartier que l'utilisateur paramètre. En sortie, une série de résultats propose des indications sur la pertinence technique, économique et environnementale d'une opération de valorisation d'une source de chaleur fatale pour répondre aux besoins thermiques du quartier paramétré.

Ce chapitre détaille le fonctionnement de l'outil. Dans un premier temps, le fonctionnement général de l'outil (4.1 Description du modèle et présentation des modules) puis son environnement de développement (4.2 Environnement de développement de l'outil Recov'Heat) sont décrits. Ces sections introduisent l'organisation de Recov'Heat en trois modules :

- Le module de détermination des besoins thermiques d'un quartier (4.3). Ce module repose sur une interface utilisateur où les paramètres à renseigner concernent la zone climatique et les bâtiments qui composent un quartier (usage des bâtiments, date de construction ou de rénovation, surface).
- Le module de détermination du potentiel énergétique et de dimensionnement des éléments de valorisation (4.4). Il s'agit du cœur de calcul de l'outil, où un algorithme adapté à chaque source permet de calculer, au pas horaire et sur une année complète, l'énergie extractible puis l'énergie finalement valorisable après dimensionnement des éléments de valorisation.
- Le module de calcul et d'affichage des résultats (4.5). Ce dernier module utilise les deux précédents pour révéler une série de résultats énergétiques (quantité d'EnR&R valorisé, taux d'EnR, etc.), techniques (puissances et performances des éléments de valorisation), économiques (coûts d'investissement, de maintenance, coût de production, etc.) et environnementaux (CO₂ émis et évité).

4.1. Description du modèle et présentation des modules

L'objectif premier de Recov'Heat est d'estimer le potentiel énergétique des sources étudiées dans le chapitre 3, à partir de données couramment récupérables (débits, taille d'un bâtiment, quantité d'une activité émettrice d'énergie fatale). Cependant, cette simple donnée énergétique ne suffit pas à déterminer l'intérêt de récupération sur une source fatale. C'est pourquoi, la méthode est de simuler ce potentiel énergétique dans le temps (au pas horaire sur un an) avec des besoins thermiques de plusieurs bâtiments d'un quartier dimensionné par l'utilisateur de l'outil. La comparaison de ces profils permet alors d'analyser la pertinence de la valorisation d'une énergie fatale sur le quartier en question. Cette comparaison est valable seulement si les technologies de récupération sont dimensionnées. Ce travail est effectué dans l'outil tout comme la prise en compte d'autres paramètres qui influencent la faisabilité d'une récupération, notamment la compatibilité en température entre les sources et les bâtiments ou la distance entre la source de récupération et les usages.

La Figure 4-1 résume le fonctionnement de la démarche, fractionné en trois modules majeurs. Le premier est celui de la caractérisation des besoins thermiques d'un quartier, le second détermine la quantité d'énergie fatale récupérable et dimensionne les éléments de récupération, et le troisième utilise les deux premiers modules pour calculer et afficher une série de résultats techniques, énergétiques, économiques et environnementaux. Ces résultats de simulation permettent de juger de la pertinence et des conditions de la récupération de sources fatales de chaleur sur un territoire.

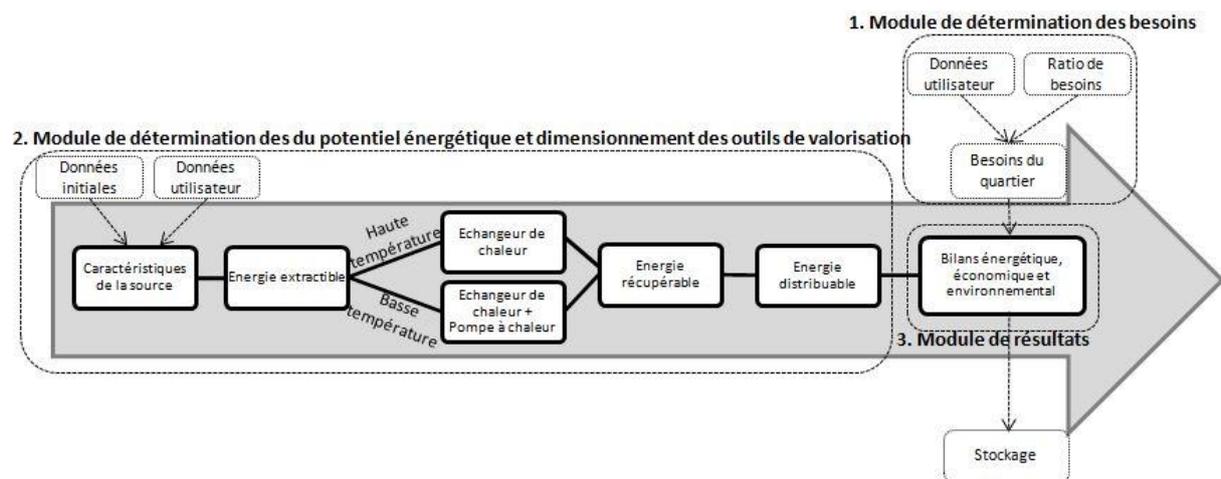


Figure 4-1 Fonctionnement modulaire de l'outil Recov'Heat

Les besoins thermiques correspondent aux usages de chauffage et d'ECS des bâtiments. Une interface utilisateur permet d'obtenir la localisation de ce quartier (pour attribuer une zone climatique), et des données sur les bâtiments : usages (logements collectifs, tertiaires, maisons individuelles, etc.), surfaces et âges de création ou de rénovation. Ces quatre données, associées à une base de données de besoins thermiques à l'échelle d'un quartier développée par Efficacity et ses partenaires, créent un profil de besoins du chauffage et de l'ECS (4.3).

Le module de détermination du potentiel énergétique d'une source et de dimensionnement des éléments de valorisation est le module principal et est détaillé dans la section suivante (4.3). Il se décompose en plusieurs étapes. La première étape consiste à renseigner la source à étudier. Une fois caractérisée, des algorithmes, différents pour chaque source et qui utilisent des profils prédéfinis, calculent le potentiel d'énergie théorique extractible. Les éléments de récupération de l'énergie sont ensuite dimensionnés. Ces éléments sont différents en fonction de la source étudiée. Pour les sources de la catégorie « haute température », un échangeur de chaleur suffit tandis que les sources à « basse

température » doivent être rehaussées en température pour répondre à des besoins thermiques. Enfin des pertes de distributions, liées à la distance entre sources et besoins, sont prises en compte pour finalement calculer l'énergie distribuable.

Le dernier module utilise les profils horaires créés dans les deux modules précédents pour calculer une série d'indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux, dont les principaux sont listés dans le Tableau 4-1 Indicateurs du module de résultats de l'outil Recov'Heat. Certaines données utilisées pour ces calculs proviennent de bibliothèques de coûts ou de ratio techniques issues de diverses sources qui seront précisés dans la description précise du module.

Tableau 4-1 Indicateurs du module de résultats de l'outil Recov'Heat

Indicateurs énergétiques	Indicateurs économiques	Indicateurs Environnementaux
Energie fatale valorisable (MWh/an)	Coût d'investissement (€)	CO2 émis (tonnes/an)
Energie fatale consommable (MWh/an)	Coût global sur 20 ans (€)	
Taux de couverture de l'énergie fatale (%)	Coût au MWh (€/MWh)	
Puissance d'une éventuelle PAC et COP		

L'objectif de Recov'Heat est de pouvoir rapidement connaître le potentiel et l'intérêt de la récupération de sources fatales sur un territoire. Les simplifications faites lors des simulations en font un instrument de prospective ou de préféabilité. L'avantage est qu'un minimum d'information est nécessaire sur les objets de la simulation (une source d'énergie fatale et des bâtiments d'un quartier) pour faire fonctionner le modèle et obtenir une série d'indicateurs.

Les prochaines sections décrivent en détail les trois modules exposés, après que l'environnement de développement de l'outil soit présenté.

4.2. Environnement de développement de l'outil Recov'Heat

La méthode Recov'Heat est développée dans le cadre des travaux de cette thèse, à partir de données récupérées d'états de l'art sur les sources de chaleur fatale étudiées. Ces états de l'art, repris dans la description des sources de la partie 1 (3.3 **Description des sources urbaines de chaleur fatale étudiées**), ont été coréalisés avec les chercheurs d'Efficacity qui ont utilisé, lorsque cela a été possible, des données de projets déjà effectifs. Ces états de l'art ont été complétés par la littérature scientifique.

Une première version du modèle a été développée (Goumba, Chiche, Guo, Colombert, & Bonneau, 2017). Il comprenait une approche simplifiée (calculs au pas mensuel, algorithmes simplifiés) et n'intégrait pas les parties économique et environnementale (Chiche et al., 2016). Cette version, implémentée sur Excel, a également donné lieu à une application web²³ développée par Efficacity dans le cadre de la communication des activités de l'institut.

La seconde version, uniquement issue des travaux de recherche de cette thèse, est également implémentée sur Excel même si la création des profils utilisés dans les simulations et le traitement de données brutes ont d'abord été réalisés sur Scilab (outil open source de calcul numérique). Le choix de garder Excel comme interface vient de la possibilité de partager facilement l'outil avec les chercheurs d'Efficacity.

Enfin, Recov'Heat est un outil de R&D, amené à évoluer et à être enrichi par les travaux de recherche de l'institut Efficacity. En exemple, un module évaluant des solutions de stockage thermique est en cours de développement, qui utilise les sorties des trois modules pour dimensionner des systèmes de stockage pouvant augmenter la part utilisable d'une source de chaleur fatale.

Recov'Heat a également une vocation opérationnelle pour Efficacity, qui souhaite l'utiliser sur des territoires et le partager aux membres de l'institut. C'est pourquoi, il est prévu de développer une application Recov'Heat, le plan de développement étant en cours de rédaction au moment de l'écriture de ce manuscrit.

²³ <http://tools.efficacity.com/recovheat-presentation-generale/>

4.3. Module de détermination des besoins thermiques d'un quartier

Les besoins estimés dans Recov'Heat sont ceux liés au chauffage et à l'ECS des différents types de bâtiments qui composent un quartier : logements, bureaux, commerces, écoles, etc. Une interface graphique permet à l'utilisateur de dimensionner le quartier qu'il souhaite étudier. Les paramètres à renseigner sont :

- Le département (en France Métropolitaine) où est localisé le quartier. Ce département permet de catégoriser le quartier selon une zone climatique définie d'après la méthode de calcul Th-B-C-E 2012²⁴ et d'utiliser ensuite les températures extérieures associées. Afin de simplifier ce traitement, quatre zones climatiques (H1, H2, H3 et IDF) sont conservées. Le détail des zones climatiques est illustré en **ANNEXE 2.1** (page 305). Un profil de température extérieure, au pas horaire sur une année, est ajouté à chaque zone géographique. Ces données sont utiles pour la caractérisation de certaines sources de chaleur fatale dans le module suivant.
- Les bâtiments dont les besoins thermiques sont à déterminer. Il s'agit de renseigner l'usage de ces bâtiments : logements collectifs, maisons individuelles, bâtiments tertiaires, écoles, crèches, grands commerces, petits commerces, établissements sportifs, hôtels, bâtiments mixtes (commerce/logements ou bureaux/logements).
- La surface de chaque bâtiment, en mètre carré. Pour déterminer finement les besoins énergétiques d'un bâtiment, cette donnée n'est pas la plus précise puisqu'elle comprend des parties communes non concernés par le chauffage ou la consommation d'ECS. Les surfaces hors œuvre nette (SHON) et plus récemment les surfaces thermiques²⁵ sont plus précises mais demandent des informations supplémentaires sur les bâtiments, pas toujours obtenables.
- L'âge de construction ou de rénovation de chaque bâtiment. L'âge précis est également une donnée difficilement récupérable, c'est pourquoi, l'interface propose de classer les bâtiments par tranches d'âge. Le Tableau 4-2 résume ces tranches : il y en a quatre pour les bâtiments les plus courants (bureaux, logements collectifs et maisons individuelles) et deux pour les autres bâtiments.

Tableau 4-2 Tranches d'âge des bâtiments

	Bâtiments principaux (bureaux, logements collectifs, maisons individuelles)	Bâtiments autres (commerces, hôtels, établissements sportifs, etc.)
Tranche 1	< 1949	Ancien (avant 2000)
Tranche 2	1950 - 1975	Neuf (post 2000)
Tranche 3	1976 – 2005	
Tranche 4	> 2005	

Ces quatre informations sur les bâtiments permettent ensuite d'appeler le profil adéquat dans une base de données développée par l'institut Efficacity avec les compétences de ses membres. Chaque profil de la base de données est composé de 8760 données en W/m², correspondant aux besoins à chaque heure, et qui dépendent donc de la zone climatique, de l'usage et de la tranche d'âge du

²⁴ Cette méthode définit des données climatiques pour plusieurs zones en France : <http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/reglementation-thermique-2012/donnees-meteorologiques.html>

²⁵ Surface thermique : définie par l'article 2/10 de l'arrêté du 11 décembre 2014, il s'agit d'une surface calculée après soustractions de plusieurs zones jugées non aménageables (pour l'habitation dans le cas du logement).

bâtiment. Ce profil peut correspondre à un besoin de chauffage ou d'ECS, il faut donc les sommer pour déterminer le besoin thermique d'un bâtiment.

Ces profils sont issus de modèles divers et outils de simulation :

- Les modèles du groupe de travail Appicateurs de la RT 2012²⁶, utilisés principalement sur les bâtiments neufs.
- Des outils de simulation comme Cometh SED²⁷ et PAPTER²⁸, dont les résultats sont fonction de la température extérieure et des températures de consigne.

Les besoins thermiques d'un bâtiment (H_{bat} , en kW) se calculent donc en tout temps (i correspond à chaque heure de l'année) à partir des vecteurs chauffage et ECS (V_{ch} et V_{ecs} , en kW/m²) appelés et de la surface du bâtiment (S_{bat} , en m²) :

$$(1) \quad H_{bat}(i) = (V_{ch}(i) + V_{ecs}(i)) * S_{bat}$$

Selon cette méthode, le profil de consommation énergétique du quartier (H_q , en MWh/an) dimensionné par l'utilisateur se réalise par la somme des besoins de chaque bâtiment en tout temps :

$$(2) \quad H_q(i) = \sum H_{bat}(i)$$

La limite de ce calcul est qu'il ne prend pas en compte les éventuelles pertes des réseaux de distribution (réseau de chaleur et réseau interne) aux bâtiments. Il permet tout de même d'obtenir un profil annuel des puissances horaire de chauffage et d'ECS du quartier dimensionné, comme montré dans l'exemple Figure 4-2.

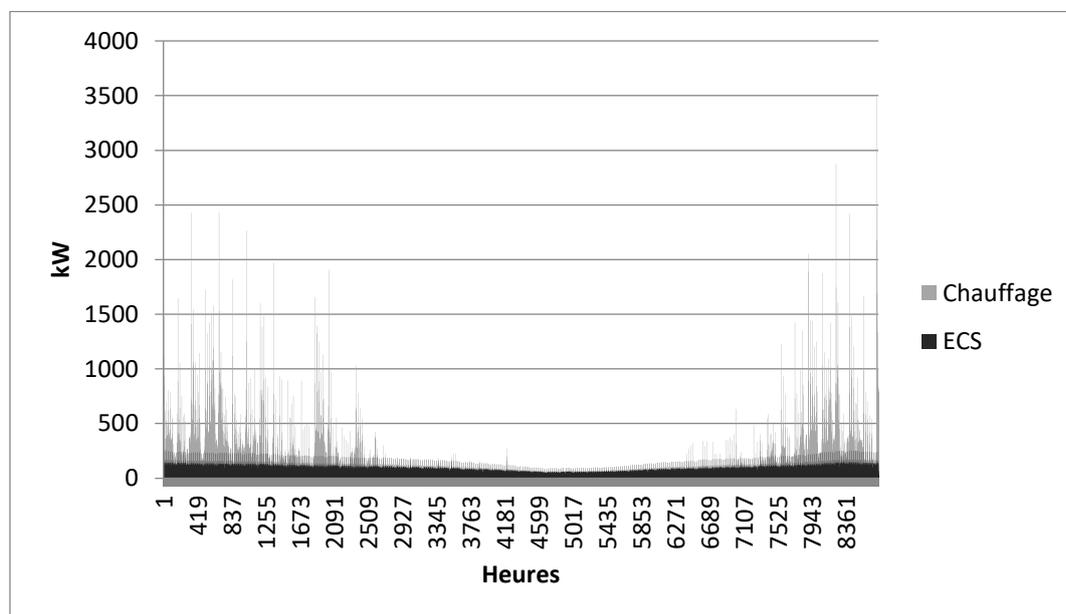


Figure 4-2 Exemple de profil de puissance horaire (chauffage et ECS) d'un quartier

²⁶ Groupe de travail composé de 40 bureaux d'études thermiques et centres techniques et chargé de tester les règles de la RT 2012 avec des dizaines de milliers de test réalisés (MEEDDM, 2010)

²⁷ Cometh SED: outil de simulation énergétique dynamique du CSTB

²⁸ PAPTER: outil de simulation interne à EDF

Etant donné la portée de l'outil, qui vise surtout à estimer le potentiel énergétique des sources d'énergie fatale, des hypothèses simplificatrices sont appliquées en ce qui concerne la température nécessaire pour répondre aux besoins (soit la température de départ d'un réseau de chaleur).

Cette température dépend de plusieurs paramètres (température extérieure, paroi des bâtiments) dont les émetteurs de chauffage présents dans les bâtiments (Tableau 1-4, page 50). Or cette donnée est difficilement récupérable à l'échelle d'un quartier et au stade amont de la réalisation d'un projet dans lequel l'outil Recov'Heat est utilisable.

L'hypothèse par défaut est d'attribuer une température de départ chauffage en fonction de l'âge des bâtiments, comme résumé dans le Tableau 4-3. Cette température est une température maximale, dimensionnée pour une température minimale (- 10°C). La température de départ dépend ensuite de la température extérieure (données récupérables librement). Pour les bâtiments créés ou rénovés après 2005, la température passe sous 60 °C, soit une température inférieure au minimum requis pour distribuer de l'ECS. Dans ce cas, l'ECS n'est plus intégré aux calculs. L'utilisateur a la possibilité de paramétrer lui-même la valeur de cette température de départ.

Tableau 4-3 Hypothèses retenues sur la température de distribution de la chaleur

Age du parc	Depuis 2005	1990 – 2005	1975 - 1990	1950 - 1975	Avant 1950
Température retenue (°C)	45	55	72	85	100

4.4. Module de détermination des potentiels énergétiques d'une source fatale et dimensionnement des technologies de valorisation

Ce module regroupe les principales étapes de calcul de l'outil Recov'Heat. Les étapes sont la caractérisation d'une source (fonction de données d'entrée, 4.4.1), le calcul du potentiel énergétique de cette source appelé l'énergie extractible (4.4.2), le dimensionnement des technologies qui permettront de valoriser l'énergie fatale (4.4.3), et le calcul de l'énergie finalement valorisable dans le quartier déjà calibré (4.4.4).

4.4.1. Données clés pour caractériser une source

La caractérisation de la source est une étape permettant d'obtenir un profil (journalier, hebdomadaire ou saisonnier) de la source d'énergie fatale. Ce profil sert ensuite à calculer dans le temps l'énergie extractible.

L'état de l'art des sources d'énergie fatale dans la première partie a permis de faire ressortir les paramètres qui influent sur la quantité de chaleur récupérable pour chacune des sources. Ces derniers sont rappelés dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4 Données dimensionnantes des sources d'énergie fatale

Source fatale	Données dimensionnantes
Eaux usées	<ul style="list-style-type: none">- Température des eaux usées- Débit des eaux usées
UVE	<ul style="list-style-type: none">- Quantité de déchets incinérés par an- PCI des déchets
Data center	<ul style="list-style-type: none">- TIER du Data center- Surface de la Salle IT- Type de système de climatisation
Blanchisserie industrielle	<ul style="list-style-type: none">- Quantité de linge traitée par jour- Heures travaillées
Verrerie	<ul style="list-style-type: none">- Quantité de verre produit par an
Entrepôt frigorifique	<ul style="list-style-type: none">- Température d'entreposage- Taille de la chambre froide

Pour les eaux usées, la température et le débit du réseau sont les éléments clés, sachant que les deux varient dans le temps. Des profils de température et de débits ont été constitués et sont utilisés pour prendre en compte ces variations dans les calculs du potentiel énergétique. Ces profils sont construits à partir de données récupérées sur divers réseaux d'assainissement et stations d'épurations (STEP), comme affiché dans l'état de l'art (**ANNEXE 1.2**, Figure A-1, page 267 pour les températures et Figure A-3, page 269 pour les débits). Pour la température, qui varie de façon saisonnière, le profil sélectionné dépend de la zone climatique choisie par l'utilisateur. Pour le débit, la variation au pas horaire a été intégrée sur des profils journaliers, au pas horaire, générés à partir du débit moyen.

Pour les UVE, la quantité de déchet incinéré par an est la donnée majeure pour déterminer leur potentiel énergétique. L'algorithme de calcul du potentiel utilise le PCI des déchets. Ce dernier peut varier en fonction des usines d'incinération et la connaissance de cette valeur affinerait le calcul du potentiel. Elle est donc demandée à l'utilisateur mais la valeur moyenne du PCI d'un déchet est retenue si l'information n'est pas disponible.

Pour caractériser l'énergie fatale d'un data center, il est nécessaire de connaître la puissance du groupe froid et son type (principalement condenseur à eau ou à air). Cette donnée est difficilement récupérable mais peut être calculée à partir de plusieurs hypothèses. La connaissance du TIER du data center (sa densité énergétique en W/m^2) et la surface des salles IT sont les informations utiles pour ce calcul.

La récupération de chaleur sur une blanchisserie industrielle est étroitement liée à la quantité de linge traité. Cette quantité peut varier jour par jour en fonction du type de blanchisserie. De plus, il est impératif de prendre en compte l'intermittence de disponibilité de cette source (récupérable qu'aux heures travaillées) et la variation durant ces heures travaillées. Des hypothèses sont donc faites pour créer un profil horaire de la disponibilité de la chaleur fatale sur une semaine.

Les verreries, comme les data center, ont une activité régulière sur l'année avec un fonctionnement continu. La quantité d'énergie récupérable dépend de la quantité de verre produite par an, un premier calcul ayant été proposé dans la partie 1 à partir de cette valeur. Le type de verre produit (principalement verre creux ou verre plat), qui influe sur la quantité d'énergie consommée par les process, est la seconde information nécessaire pour préciser le calcul.

Pour les entrepôts frigorifiques, l'objectif est d'obtenir la puissance du groupe froid (comme pour le data center). Il dépend du volume de la chambre froide. Si l'utilisateur ne connaît que la surface, une hauteur par défaut est prise. Il dépend également de la température d'entreposage, qui conditionne l'efficacité frigorifique. Des profils horaires sur plusieurs journées types sont également constitués pour reproduire les variations de consommations électriques liés aux heures creuses et aux jours non travaillés.

Les données d'entrées demandées sur l'interface utilisateur de l'outil Recov'Heat sont résumés dans le Tableau 4-5. Ces données servent donc d'entrées pour caractériser chaque source. Leurs profils horaires permettent de prendre en compte les éventuelles variations de disponibilité, heure par heure sur des journées ou semaines types.

L'étape suivante est donc de définir la quantité d'énergie extractible sur une source avant de déterminer sa technologie de valorisation.

Tableau 4-5 Données demandées sur l'interface utilisateur de l'outil Recov'Heat

Source fatale	Données dimensionnantes
Eaux usées	- Débit moyen des eaux usées
UVE	- Quantité de déchets incinérés par an - PCI des déchets
Data center	- TIER du Data center - Surface de la Salle IT
Blanchisserie industrielle	- Quantité de linge traitée par jour
Verrerie	- Quantité de verre produit par an - Type de verre produit
Entrepôt frigorifique	- Température d'entreposage - Taille de la chambre froide (volume ou surface)

4.4.2. Calcul du potentiel énergétique : l'énergie extractible

Le calcul du potentiel énergétique peut se faire à l'aide de plusieurs méthodes. Pour ces six sources fatales, trois méthodes sont utilisées :

- Pour les eaux usées et les blanchisseries industrielles, l'énergie fatale correspond aux calories des effluents (de l'eau sous forme liquide) qui circulent dans des canalisations. La quantité d'énergie peut se calculer à partir de la variation de température entre ces effluents et le corps qui reçoit ses calories.
- Pour les data center et les entrepôts frigorifiques, l'énergie fatale provient d'un système de refroidissement et donc d'un groupe froid. Le potentiel énergétique dépendra de l'efficacité de ce groupe (EER) et de sa consommation électrique. C'est cette valeur qui est recherchée dans ce calcul et qui découle d'hypothèses concernant ce besoin électrique et le besoin total de l'activité.
- Pour les UVE et les verreries, le calcul est différent mais repose sur la même méthode : l'énergie thermique produite par les activités est dissipée sur divers process. Les calculs consistent alors à déterminer quelle part de cette énergie est dégagée par les différents process.

L'objectif de ces calculs est de déterminer un potentiel énergétique, en MWh/an. Cette énergie théorique peut se calculer comme la somme de la puissance disponible à chaque heure sur un an. Cependant, l'étape de dimensionnement (des échangeurs et des canalisations à minima) impose de fixer une puissance. Le calcul du potentiel énergétique correspond alors au produit d'une puissance thermique (en kW ou en MW), déterminée sous certaines conditions (uniques pour chaque source et détaillées dans les paragraphes suivants) et de la durée de fonctionnement (h/an).

4.4.2.1. Energie extractible sur les eaux usées

La méthode est la même pour obtenir ce potentiel énergétique sur l'eau usée des réseaux d'assainissement et en STEP mais le calcul présente quelques différences au niveau des conditions limites. La méthode est détaillée dans cette section et résumée Figure 4-3.

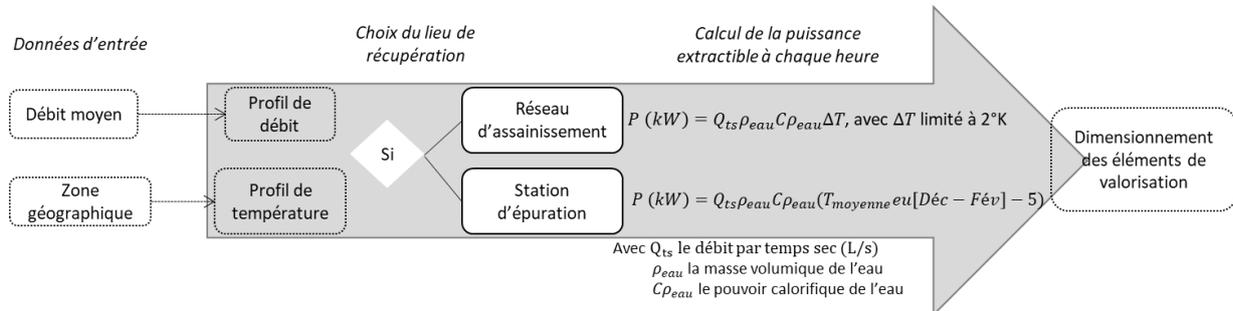


Figure 4-3 Méthode du calcul de la puissance extractible sur eaux usées

La puissance thermique contenue par les eaux usées (P_{eu} , en kW) s'évalue en tout temps grâce à la formule suivante :

$$(3) \quad P_{eu} = Q_{eu} * \rho_{eau} * C_{p_{eau}} * \Delta T$$

Q_{eu} est le débit des eaux usées dans la canalisation étudiée (en litre par seconde), ρ_{eau} la masse volumique de l'eau (proche de 1 kg/L pour une eau sous 30°C), $C_{p_{eau}}$ le pouvoir calorifique de l'eau (environ à 4,2 kJ/kg * K pour une eau sous 30°C) et ΔT (en °K) correspond à la variation de température entre l'eau usée et sa température après extraction de chaleur, c'est-à-dire, à la sortie de l'échangeur de chaleur ($T_{1e} - T_{1s}$, Figure 4-4). L'échangeur permet de puiser les calories des eaux usées, qui servent de source froide de pompe à chaleur (PAC), la température du fluide chauffée par l'eau usée n'étant pas assez élevée pour répondre à des usages de chauffage ou d'ECS.

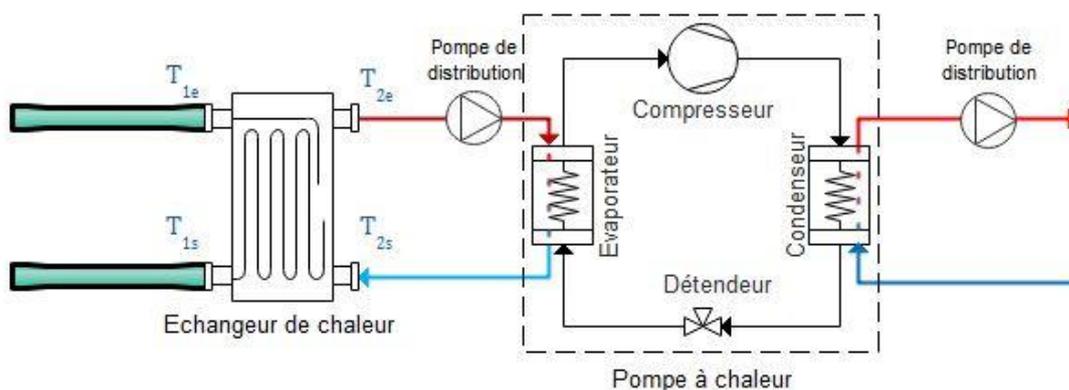


Figure 4-4 Schéma de fonctionnement de la récupération de chaleur sur eaux usées (source : auteur)

Comme expliqué dans la section précédente, la température (et par conséquent la valeur ΔT) et le débit des eaux usées proviennent de profils, au pas horaire.

La température est peu variable en fonction des heures de la journée (Cipolla & Maglionico, 2014b), avec des variations de moins d'un degré, mais varie en fonction de la température extérieure. La plupart des données récupérées sur des températures d'eaux usées en réseaux d'assainissement sont d'ailleurs au pas de temps mensuel et montrent des différences saisonnières et selon les zones géographiques. Pour le calcul du potentiel, les hypothèses sont donc de prendre une température

constante sur un mois et d'utiliser des profils de températures d'eaux usées différents en fonction des quatre zones géographiques, comme affiché sur la Figure 4-5.

Pour le débit, les profils sont créés à partir du débit moyen (Q_m), donnée d'entrée de Recov'Heat, multiplié, à chaque heure, par un premier profil de fractions horaires. Ce profil de fraction horaire (fh) est constitué à partir des données de débits horaires, récupérées sur plusieurs réseaux d'assainissement (**ANNEXE 1.2**, Figure A-1, page 267). Il correspond, au rapport entre le débit de chaque heure et le débit moyen journalier, et retranscrit les variations journalières du débit des eaux usées dans un réseau d'assainissement, illustré Figure 4-5.

Le débit heure par heure et sur une journée (Q_{eu} en m^3/h ou en L/s) est finalement obtenu ainsi :

$$(4) \quad Q_{eu}(i) = fh(i) * Q_m$$

Deux profils de fractions horaires sont utilisés pour ce calcul : pour une journée de semaine ou une journée de weekend, où les heures de pointes diffèrent, comme illustré sur la Figure 4-5.

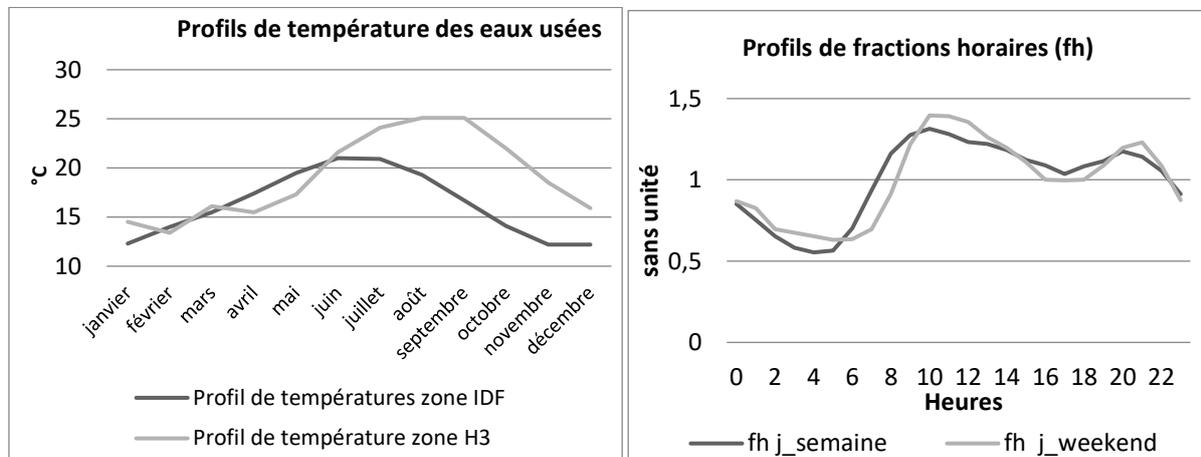


Figure 4-5 Exemples de profils de température et de fractions horaires de débit de réseaux d'assainissement d'eaux usées

La valeur de ΔT doit être fixée pour dimensionner l'échangeur de chaleur qui récupère les calories. Comme expliqué dans l'état de l'art sur les eaux usées, la température de rejet ne doit pas descendre sous un seuil, entre 10 °C et 12 °C (Cipolla & Maglionico, 2014a; Hélène & Molinaro, 2017), qui risque d'altérer les processus de traitement des eaux usées à la STEP. Etant donné les températures de ces eaux usées en hiver (entre 10 et 14°C), période la plus consommatrice en chauffage, la valeur de ΔT peut valoir jusqu'à 4 °K pour étude de potentiel énergétique (Caenen et al., 2016). D'autres études prennent 1 °K voir moins (Epp & Darmayan, 2013). Dans Recov'Heat, l'hypothèse prise est $\Delta T = 2 \text{ °K}$. La valeur seuil de la température après extraction choisie est $T_{2_min} = 11 \text{ °C}$. Il y a donc une valeur limite pour la température des eaux usées T_{eu_min} en dessous de laquelle la récupération de chaleur n'est pas possible :

$$(5) \quad T_{eu_min} = T_{2_min} + \Delta T = 13 \text{ °C}$$

A partir de ces hypothèses, la puissance thermique P_{eu} est donc calculable à chaque heure, sur un an (8760 valeurs). Cette simulation permet d'obtenir la puissance maximale théorique, P_{max} (kW) et un potentiel énergétique théorique (MWh/an).

$$(6) \quad P_{max}(kW)_{th} = \max(P_{eu}); \quad Pot_{th}(MWh/an) = \sum P_{eu}$$

A titre d'exemple, en supposant un débit moyen de 50 L/sec sur une portion d'un réseau d'assainissement, dans une zone climatique « IDF », Figure 4-6 représente la puissance extractible à chaque heure sur une année. La température des eaux usées étant sous le seuil minimum en Janvier, Novembre et Décembre, il n'y a pas de puissance extractible. La variation de la puissance visible sur le graphique traduit la variation du débit des eaux usées. Un zoom de cette figure sur une semaine (prise aléatoirement) rend compte de la variation journalière du débit (Figure 4-7). Les résultats de cette simulation sont les suivants :

$$P_{max} = 292 \text{ kW} ; Pot_{th} = 1373 \text{ MWh/an}$$

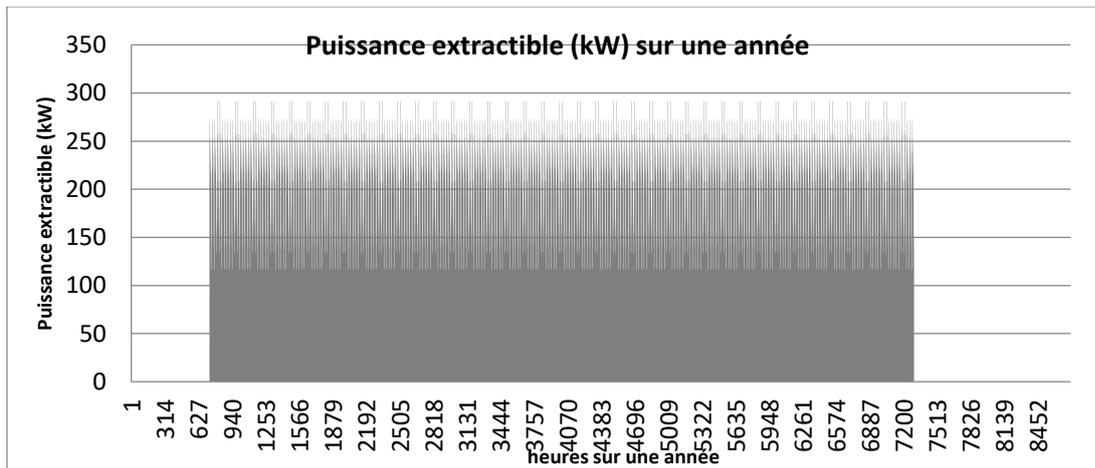


Figure 4-6 Exemple d'un résultat de simulation de Recov'Heat : Puissance extractible (kW) sur une année

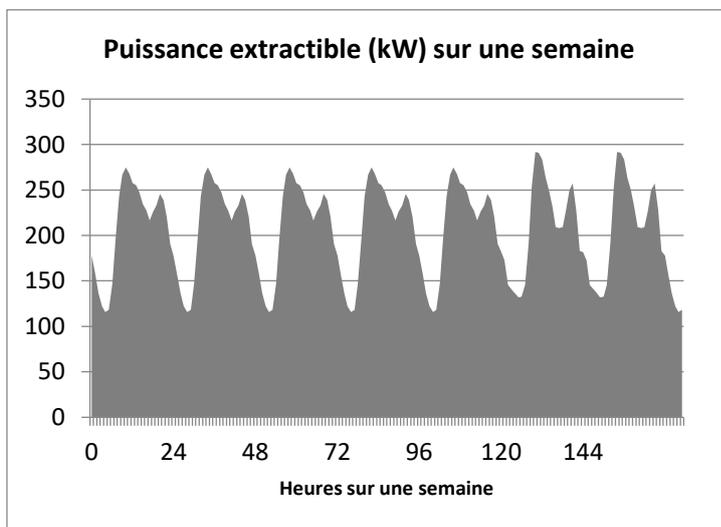


Figure 4-7 Zoom de la Figure 4-6 sur une semaine (du mois de Février)

Ces résultats sont seulement théoriques et ne sont pas applicables pour réaliser un dimensionnement de récupération de chaleur fatale. En effet, la puissance maximale n'est disponible que quelques heures dans l'année (78 heures) et l'utilisation de ces valeurs rendraient l'installation surdimensionnée.

C'est pourquoi plusieurs études préconisent, pour calculer un potentiel énergétique dimensionnable (Pot_{dim}) des eaux usées sur réseau d'assainissement, d'utiliser le débit minimal journalier par temps sec comme valeur référence (Caenen et al., 2016; Diab & Colombert, 2014; Khoury, Services Industriels de Genève, & Ville de Genève, 2009), lorsque cette donnée est récupérable. Le temps sec garantit un

débit sans eau pluvial, et le débit minimum assure une quantité d'énergie minimale dans le temps. Cette méthode est utilisée dans une étude de cas en Suisse (Khoury et al., 2009), où le dimensionnement est réalisé à partir des données les plus défavorables. D'autres études (Epp & Darmayan, 2013; Neugebauer et al., 2015) confirment cette méthode. A noter que la valeur minimale pour le débit est recommandée par la plupart des études (entre 12 L/sec et 15 L/sec en fonction des technologies utilisées).

Pour l'outil Recov'Heat, une hypothèse est prise sur la valeur de ce débit Q_{ts} : il correspond au débit minimal, calculé depuis les profils horaires sur une journée. Il peut donc se déterminer à partir de la fraction horaire minimale des profils, à savoir à 3h du matin.

$$(7) \quad Q_{ts} = \min(Q_{eu}) = \min(fh) * Q_m * 24, \text{ avec } \min(Q_{eu}) > 15 \text{ L/sec}$$

L'application de cette formule permet alors de déterminer un potentiel énergétique dimensionnable (Pot_{dim}) et une puissance thermique (P_{dim}). En reprenant l'exemple, on obtient les résultats suivants :

$P_{dim} = 232 \text{ kW}$; $Pot_{dim} = 1\,476 \text{ MWh/an}$, cette puissance étant disponible 6375 heures dans l'année (soit 73 % du temps).

Cas de la récupération de chaleur sur STEP

Le calcul du potentiel énergétique sur les eaux usées au niveau d'une STEP (à l'entrée ou à la sortie) repose sur le même principe que pour la récupération sur réseau d'assainissement, à savoir la relation entre le débit de circulation des eaux usées et leur température. Cependant, les conditions limites sont différentes. Si la récupération se fait en sortie de STEP, la limite en température n'est plus un frein, et la valeur de ΔT peut ainsi être maximisée. Epp et Darmayan (2013) proposent de calculer la puissance extractible ainsi :

$$(8) \quad P_{dim} = Q_{ts} * \rho_{eau} * Cp_{eau} * (T_{moyenne\ eu}[D\acute{e}c - F\acute{e}v] - 5)$$

Ici, le ΔT correspond à la température moyenne entre les mois de Décembre et Février, soit les mois les plus froids, soustraits de 5°C, valeur estimée pour la température de rejet limite. Avec un ΔT plus important, le potentiel énergétique est plus important dans une STEP que sur les réseaux d'assainissement. Le débit est par ailleurs supérieur à celui des réseaux d'assainissement puisqu'ils reçoivent les eaux usées de tous les tronçons. A débit égal que dans l'exemple précédent les résultats sont :

$$P_{dim} = 931 \text{ kW} ; Pot_{dim} = 5\,933 \text{ MWh/an}$$

L'inconvénient des STEP est leur localisation. Contrairement aux réseaux d'assainissement qui parcourent les villes et les zones urbaines, les STEP sont situées dans des zones périurbaines et industrielles.

Le potentiel énergétique théorique de récupération de chaleur sur eaux usées étant défini, l'étape suivante est de déterminer les moyens de valorisation de cette source. Il s'agit donc d'une source basse température, puisque la température des eaux usées varie entre 10 °C et 30 °C et est donc trop basse pour alimenter des émetteurs de chauffage. En plus d'un échangeur de chaleur, qui permet de prélever les calories des eaux usées, une PAC est nécessaire afin de remonter cette température et de répondre à des besoins thermiques. Le dimensionnement de ces deux éléments est expliqué dans la section suivante (4.4.3).

4.4.2.2. Energie extractible sur les blanchisseries industrielles

L'état de l'art sur cette source de chaleur fatale suggère deux points de récupération (ANNEXE 1.5, page 286) : sur les effluents de lavage et sur l'air rejeté au niveau du séchage. Dans Recov'Heat, seul l'énergie provenant des effluents est analysée et les conclusions évoquées dans cette section montrent que la forte intermittence de la ressource menace la viabilité de la récupération. Cette variabilité est encore plus importante à la sortie des éléments de séchage, si bien que ce point de récupération a été exclu des sources prises en compte dans l'outil. La méthode pour calculer l'énergie extractible d'une blanchisserie est résumée Figure 4-8.

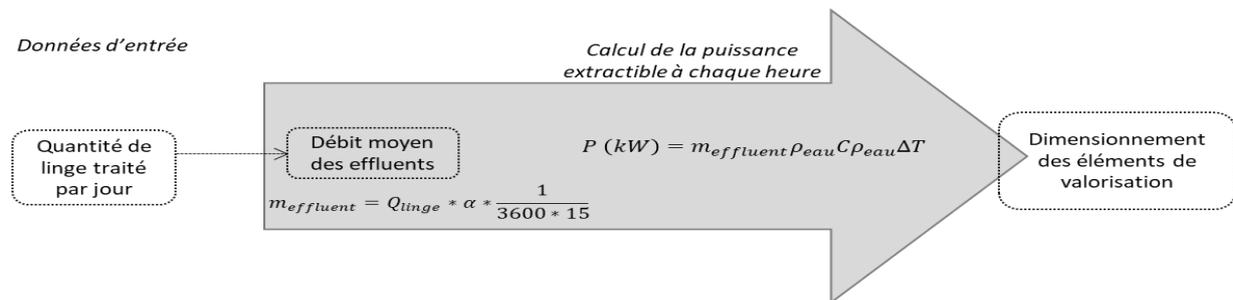


Figure 4-8 Méthode de calcul de la puissance extractible sur blanchisserie industrielle

Comme pour les eaux usées, la relation intégrant le débit et la température permet de calculer un potentiel énergétique des effluents d'eaux usées d'une blanchisserie. La puissance extractible P_{bl} s'obtient ainsi :

$$(9) \quad P_{bl} = m_{effluent} * C p_{eau} * \Delta T$$

La capacité thermique de l'effluent (de l'eau), $C p_{eau}$, est fixe et vaut $4,2 \text{ KJ/Kg} * \text{K}$.

La valeur de ΔT , variation de température de l'effluent avant et après échange de chaleur, est moins contrainte que pour les eaux usées dans les réseaux d'assainissement. En effet, l'hypothèse prise pour la température des effluents est de 25°C ²⁹, soit un niveau bien supérieur à la température minimale de rejet à l'assainissement (fixée à 11°C). La valeur de ΔT peut donc être maximisée lors du dimensionnement de l'échangeur de chaleur même si d'autres contraintes (volume d'échange notamment) limite cette valeur entre 5°K et 10°K .

Le débit moyen de rejet des effluents, $m_{effluent}$ (en L/s) est la donnée inconnue. L'hypothèse pour le déterminer est de le mettre en relation avec la quantité de linge traité (Q_{linge}), la donnée d'entrée de l'outil Recov'Heat. Cette quantité journalière est répartie sur une journée de 15 heures travaillées (comme observé dans les mesures de blanchisserie évoquées dans l'état de l'art : Figure A-22, page 292) et multipliée par la quantité moyenne d'effluent rejetée pour un kilogramme de linge traité (α), évaluée à 4 L/kg_{linge} (ANNEXE 1.5, page 286).

$$(10) \quad m_{effluent} = Q_{linge} * \alpha * \frac{1}{3600 * 15}$$

L'énergie ainsi extractible, Pot_{bl} , revient à multiplier cette puissance extractible par le nombre d'heure sur une année. Comme expliqué dans la description du secteur des blanchisseries industrielles, l'énergie fatale est disponible lorsqu'il y a activité, à savoir les jours de semaines hors jours fériés. La

²⁹ La température de 25°C correspond à une température moyenne durant les heures travaillées (hors dimanche et durant la nuit), calculée à partir des données mesurées sur deux blanchisseries instrumentées (ANNEXE 1.5, Figure A-23, page 293).

moyenne d'activité par jour est supposée à 15 heures et la moyenne de jours travaillés sur une année est de 218 jours :

$$(11) \quad Pot_{bl} = P_{bl} * 218 \text{ jours} * 15 \text{ heures}$$

Cette estimation permet d'obtenir un potentiel énergétique qui ne prend pas en compte la variation infra-horaire observée dans l'état de l'art. Pour rappel, l'instrumentation de deux blanchisseries a permis d'observer la variation réelle du débit, minute par minute. La Figure 4-9 illustre les variations de ces deux blanchisseries à travers deux relevés de débit sur une journée de 15 heures, soit 900 minutes, où un fonctionnement en cycles est observable. Les effluents sont éjectés par périodes, respectivement de 25 minutes en moyenne (premier graphique) et de 5 minutes (second graphique) en moyenne. Cette intermittence est susceptible de contraindre fortement la récupération de chaleur sur blanchisseries industrielles à des fins de distributions de cette énergie pour des besoins de chauffage ou d'ECS.

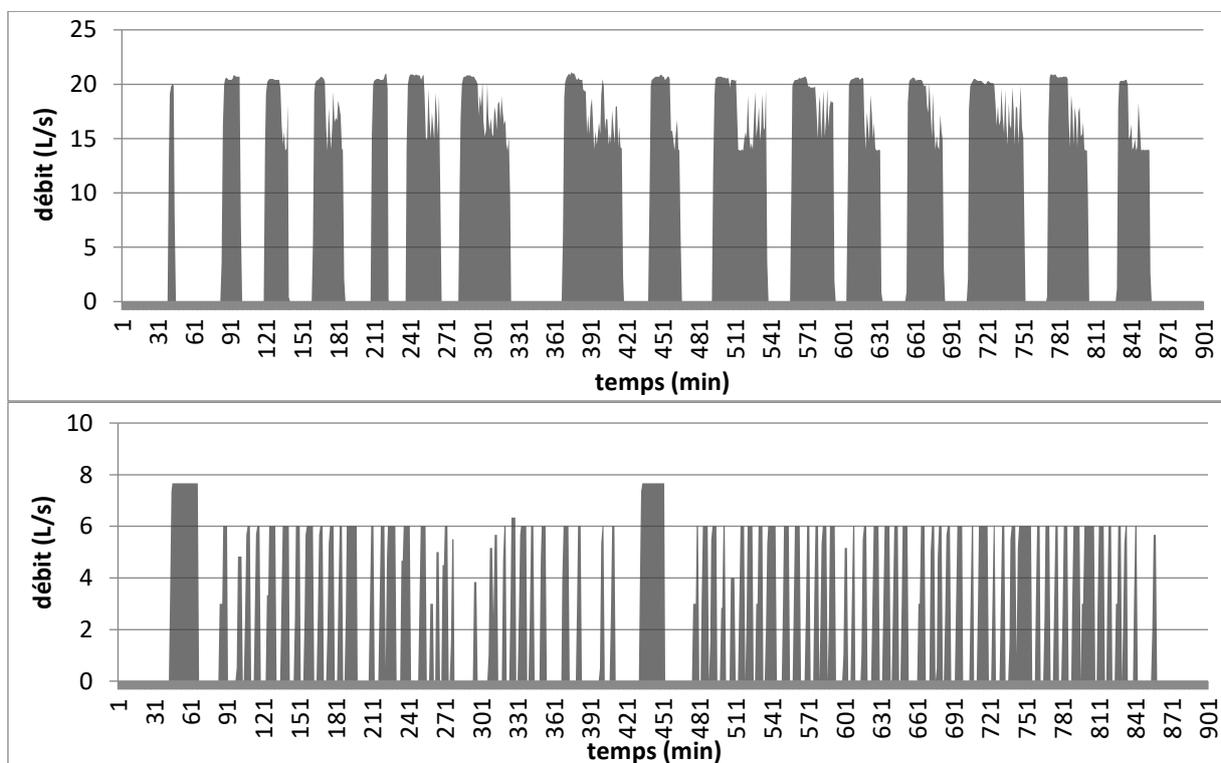


Figure 4-9 Relevé de débits sur blanchisseries industrielles sur une journée de 15 heures

L'énergie fatale issue des blanchisseries est basse température. La valorisation de cette source de chaleur passe donc par un couplage échangeur de chaleur et PAC, comme pour les eaux usées. Ce système est expliqué dans la section suivante (4.4.3).

4.4.2.3. Energie extractible sur les data center

La méthode utilisée pour calculer l'énergie extractible sur un data center est expliquée dans cette section et résumé Figure 4-10.

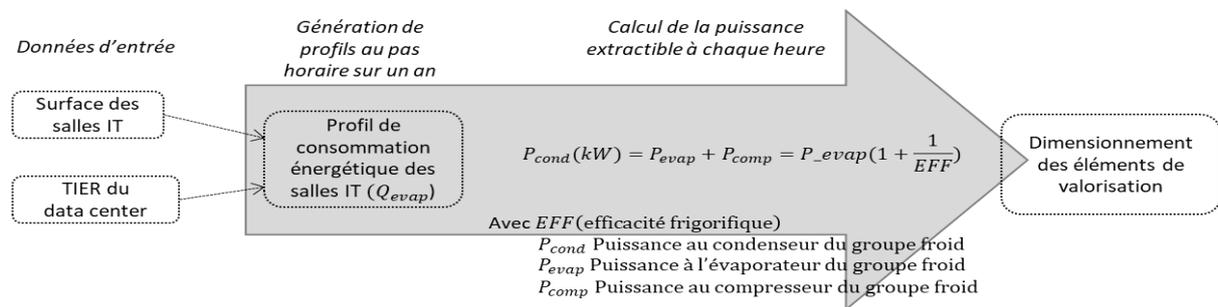


Figure 4-10 Méthode de calcul de la puissance extractible sur data center

Comme expliqué dans la description de l'énergie fatale provenant des data center, la chaleur provient du groupe froid, et plus précisément au niveau du condenseur de système frigorifique. Selon le premier principe de la thermodynamique, l'énergie thermique au condenseur, $Q_{condenseur}$, correspond, en tout temps, à :

$$(12) \quad Q_{condenseur} = Q_{compresseur} + Q_{évaporateur} = Q_{évaporateur} * \left(1 + \frac{Q_{compresseur}}{Q_{évaporateur}}\right)$$

L'énergie à l'évaporateur, $Q_{évaporateur}$, équivaut à l'énergie absorbée par la salle IT du data center. Cette donnée est calculable à partir des entrées de l'outil Recov'Heat, qui sont la surface de la salle IT (S_{IT} en m^2) du data center (ou du data center si la surface de la salle IT n'est pas connue), et le TIER du data center. Cette dernière information donne la densité énergétique de la salle IT, d_{IT} en W/m^2 (TIER II pris par défaut, soit $500 W/m^2$) et de déterminer la consommation énergétique de la salle IT :

$$(13) \quad Q_{évaporateur} = S_{IT} * d_{IT} * 8760$$

Dans ce calcul, l'hypothèse est que les besoins énergétiques des salles IT d'un data center sont constants tout au long de l'année (8760 heures). Cette hypothèse s'appuie sur les observations faites sur les courbes de charge de data center récupérées dans l'état de l'art (**ANNEXE 1.4**, Figure A-14, page 284). Un data center est en service toute l'année et en continu même s'il ne fonctionne pas tout le temps à pleine capacité, en fonction des contrats en cours. Si seule la surface du data center (S_{DC}) est connue, une hypothèse est faite pour déterminer la surface de la salle IT, issue des enquêtes menées par l'institut Efficacity à travers plusieurs installations (EFFICACITY, 2017) : la salle IT correspond à 30 % de la surface totale d'un data center.

Le rapport de la puissance à l'évaporateur sur la puissance au compresseur ($\frac{P_{évaporateur}}{P_{compresseur}}$) correspond au coefficient d'efficacité frigorifique (EFF). Il s'agit du coefficient de performance du système frigorifique et représente la performance énergétique de la PAC fonctionnant en mode rafraîchissement (Jean Carassus, 2007). Sa valeur pour un data center est comprise entre 2,5 et 5 (Douchet, 2015), en fonction de la performance des équipements et surtout des systèmes de climatisation. La tendance à rendre plus efficace les data center (**ANNEXE 1.4**, Figure A-15, page 285) implique une augmentation de cette valeur, fixée à 4 dans l'outil Recov'Heat.

Finalement, l'énergie extractible ($Q_{condenseur}$ en Wh/an) se calcule comme suit :

$$(14) \quad Q_{condenseur} \text{ (en MWh/an)} = Q_{\text{évaporateur}} * \left(1 + \frac{Q_{\text{compresseur}}}{Q_{\text{évaporateur}}} \right) = S_{IT} * d_{IT} * \frac{8760}{10^6} * \left(1 + \frac{1}{EFF} \right)$$

Cette méthode de calcul permet d'obtenir un potentiel maximal de chaleur fatale dissipée mais ne prend pas en compte la possibilité qu'a un data center de ne pas fonctionner à pleine puissance et qui peut réduire ce potentiel.

Cette source, basse température (30 °C environ), se valorise pour des besoins de chauffage et/ou d'ECS par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur et d'une PAC. Cette dernière permet de rehausser la température.

4.4.2.4. Energie extractible sur les entrepôts frigorifiques

La méthode pour calculer le potentiel énergétique des entrepôts frigorifiques est sensiblement la même que pour les data centers puisque l'énergie extractible récupérable se situe au niveau du condenseur du groupe froid des chambres froides. La méthode est résumée Figure 4-11.

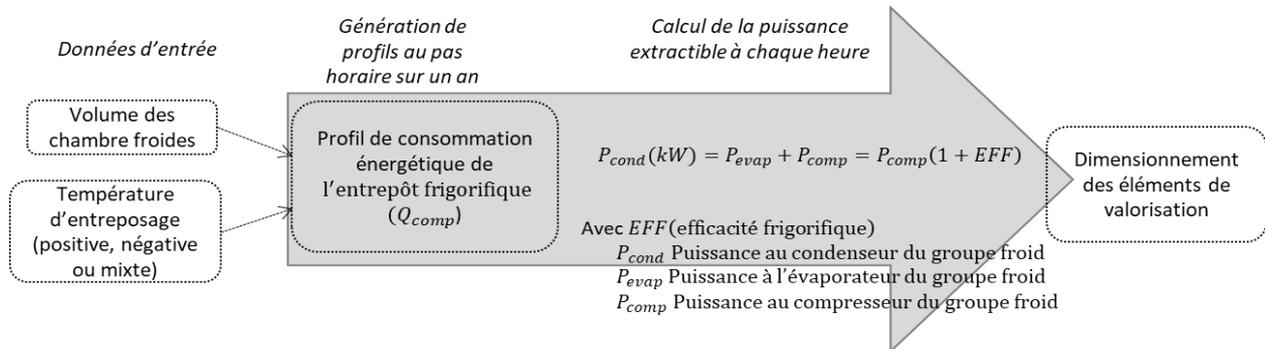


Figure 4-11 Méthode de calcul de la puissance extractible sur entrepôt frigorifique

Ainsi, l'énergie récupérable ($Q_{condenseur}$) correspond à la somme de l'énergie absorbée par le compresseur et celle distribuée à l'évaporateur.

L'état de l'art sur cette activité a montré que les groupes froids fonctionnaient en continu même lors des heures non-travaillées, afin de stocker les marchandises à la température voulue. Cependant, profitant de l'inertie des chambres froides, les groupes froids sont parfois désactivés sur des courtes périodes (quelques heures) aux heures pleines, notamment en hiver, et permet de réduire la consommation électrique. La méthode de calcul du potentiel énergétique prend en compte ces variations. La puissance extractible, $P_{condenseur}$, en tout temps, est donc :

$$(15) P_{condenseur} = P_{compresseur} + P_{évaporateur} = P_{compresseur} \left(1 + \frac{P_{évaporateur}}{P_{compresseur}} \right)$$

$$(16) P_{condenseur} = P_{compresseur}(1 + EFF)$$

La puissance au compresseur ($P_{compresseur}$) correspond à l'électricité absorbée par le groupe froid. La consommation électrique est la donnée calculable à partir des données d'entrée de l'outil Recov'Heat qui sont la température d'entreposage et le volume de la chambre froide. La température d'entreposage est répartie en 3 catégories : température positive, température négative et température mixte. Evans (2014) propose des ratios de consommations électriques en fonction de la température d'entreposage (respectivement 56,1 kWh/m³/an, 73,5 kWh/m³/an et 61,2 kWh/m³/an pour l'entreposage à température positive, négative et mixte) tandis que De Carlan (De Carlan, 2016) ajoute une notion d'échelle : plus le volume de la chambre froide est important, plus la consommation par unité de volume baisse.

Les ratios retenus dans l'outil Recov'Heat, issus des deux études citées dans le paragraphe précédent, sont énumérés dans le Tableau 4-6.

Tableau 4-6 Ratios de consommation électrique d'une chambre froide par unité de volume

	Température positive	Température négative	Température mixte
Volume < 10 000 m ³	56 kWh/m ³ /an	73 kWh/m ³ /an	61 kWh/m ³ /an
Volume > 10 000 m ³	44 kWh/m ³ /an	57 kWh/m ³ /an	48 kWh/m ³ /an

Ce ratio, r_{elec} , multiplié au volume de la chambre froide, V_{cf} , permet d'obtenir la consommation électrique annuelle de la chambre froide, $Q_{cf}(kWh/an)$:

$$(17) Q_{cf} = V_{cf} * r_{elec}$$

La puissance au compresseur est alors extractible grâce à des profils journaliers, au pas horaire, réalisés pour prendre en compte la variation de la consommation électrique. En effet, comme expliqué dans la première partie (Figure A-29, page 302), l'arrêt ou la mise en fonctionnement partiel des groupes froids à certaines heures de la journée est une pratique courante pour réduire la consommation énergétique. Une hypothèse sur ces variations de consommations a été réalisée à partir des données d'un entrepôt frigorifique, partagée avec l'institut Efficacity. Trois profils journaliers ont ainsi été créés (Figure 4-12), illustrant les variations horaires des consommations électriques sur une journée d'hiver (mois de Décembre, Janvier et Février et du lundi au samedi), une journée hors hiver (de Mars à Novembre et du lundi au samedi) et une journée non travaillée (soit tous les dimanches et jours fériés). Lors d'une journée hors hiver, la puissance maximale, P_{max} est appelée la nuit seulement (jusqu'à 5h du matin et à partir de 22h le soir) alors que la moitié de P_{max} , $\frac{P_{max}}{2}$, est appelée le reste du temps. Le profil est le même lors des jours d'hiver, sauf que la puissance appelée est nulle, P_{nulle} , lors des heures pleines (entre 8h et 9h le matin et entre 18h et 19h le soir). Enfin les jours non-travaillés, P_{max} est appelée en continu car aucun employé n'est présent pour effectuer cette régulation et contrôler la température des chambres froides.

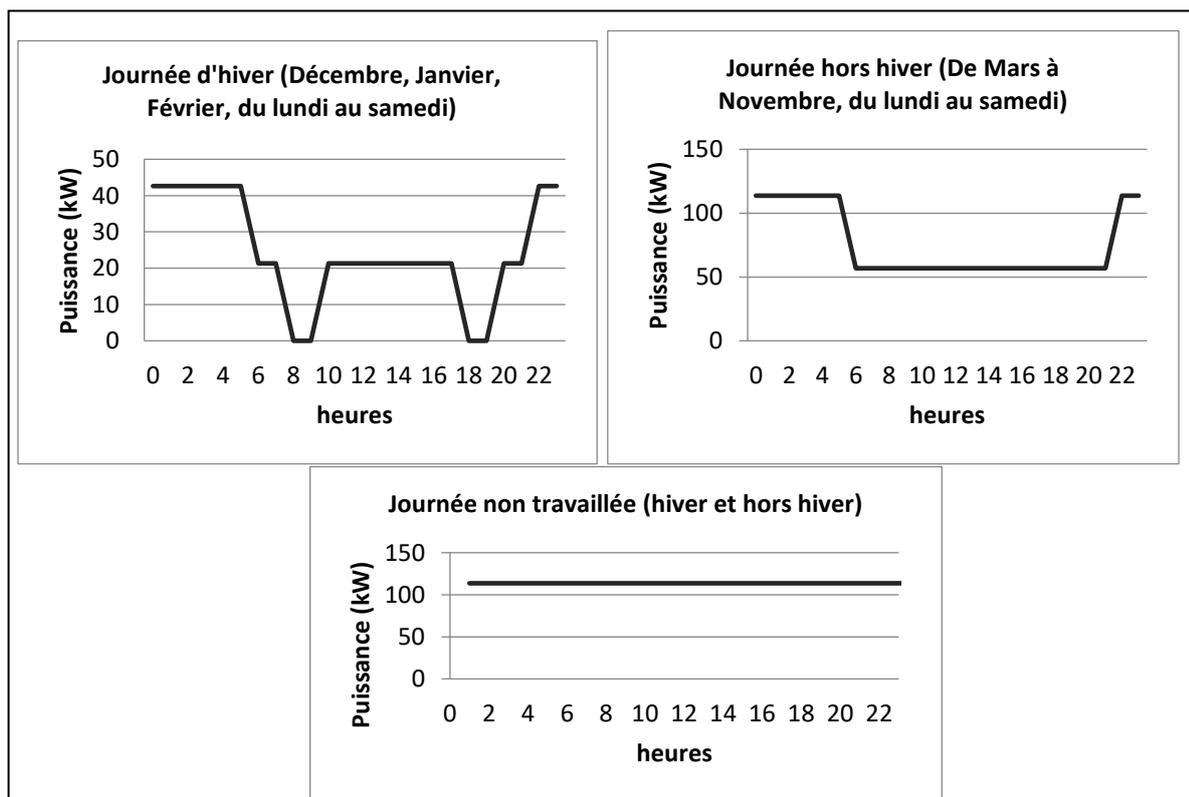


Figure 4-12 Profils journaliers de consommation électrique d'un entrepôt frigorifique

En utilisant ces profils journaliers sur une année, il est possible de déterminer les valeurs des puissances appelés P_{max} et $\frac{P_{max}}{2}$, qui représentent la puissance au compresseur $P_{compresseur}$. Sur une année, le nombre d'heures où ces puissances sont appelées est connu. De plus, la somme du produit

de ces puissances avec leur nombre d'heures appelés équivaut à la consommation électrique, Q_{cf} , déjà déterminée :

$$(18) \quad NB_{h_{P_{max}}} * P_{max} + NB_{h_{\frac{P_{max}}{2}}} * \frac{P_{max}}{2} + NB_{h_{P_{nulle}}} * P_{nulle} = Q_{cf}$$

Avec $P_{nulle} = 0$; $P_{max} = 2 * \frac{P_{max}}{2}$; $NB_{h_{P_{max}}} = 3752$; $NB_{h_{\frac{P_{max}}{2}}} = 4697$; $NB_{h_{P_{nulle}}} = 314$

En fonction de l'heure de la journée et du mois, $P_{compresseur}$ vaut P_{max} , $\frac{P_{max}}{2}$ ou P_{nulle} avec :

$$(19) \quad P_{max} = \frac{Q_{cf}}{NB_{h_{P_{max}}} + \frac{1}{2} * NB_{h_{\frac{P_{max}}{2}}}} = \frac{Q_{cf}}{6100,5}; \quad \frac{P_{max}}{2} = \frac{Q_{cf}}{12201}; \quad P_{nulle} = 0$$

En revenant à l'équation (16), la puissance extractible sur un entrepôt frigorifique, $P_{condenseur}$, se calcule donc ainsi :

$$(20) \quad P_{condenseur} = P_{compresseur} (1 + EFF) = \left(P_{max}; \frac{P_{max}}{2}; P_{nulle} \right) * (1 + EFF)$$

Comme pour le datacenter, l'efficacité frigorifique (EFF) est utilisée pour déterminer la puissance extractible. La valeur de l'efficacité frigorifique dépend notamment du type de fluide frigorigène utilisé, mais surtout de la température d'entreposage. Pour les chambres froides à température négative, *EFF* vaut entre 1,1 et 1,4 selon le fluide frigorigène (Harrisson & Letarte, 2013) et monte jusqu'à 2,5 pour des températures positives. Le Tableau 4-7 résume les valeurs prises dans l'outil Recov'Heat, où l'hypothèse a été de ne pas faire de distinction en fonction du fluide frigorigène.

Tableau 4-7 Valeur de l'efficacité frigorifique en fonction de la température d'une chambre froide

	Température positive	Température négative	Température mixte
<i>EFF</i>	2,5	1,3	1,9

Le potentiel énergétique d'un entrepôt frigorifique ($Pot_{efriogo}$) correspond donc à la somme des puissances au condenseur (20), sur une année.

$$(21) \quad Pot_{efriogo} = \sum P_{condenseur}$$

Il s'agit d'un potentiel énergétique à basse température, puisque l'énergie thermique récupérable au condenseur est à environ 35°C. Pour utiliser cette chaleur afin de répondre à des besoins de chauffage et /ou d'ECS, un couplage échangeur de chaleur et PAC est nécessaire, afin de rehausser cette température. Le dimensionnement de ces systèmes est expliqué dans la section suivante (4.4.3).

4.4.2.5. Energie extractible sur les incinérateurs de déchets d'ordures ménagères

La méthode de détermination du potentiel d'énergie extractible sur une UVE est détaillée dans cette section et résumée Figure 4-13.

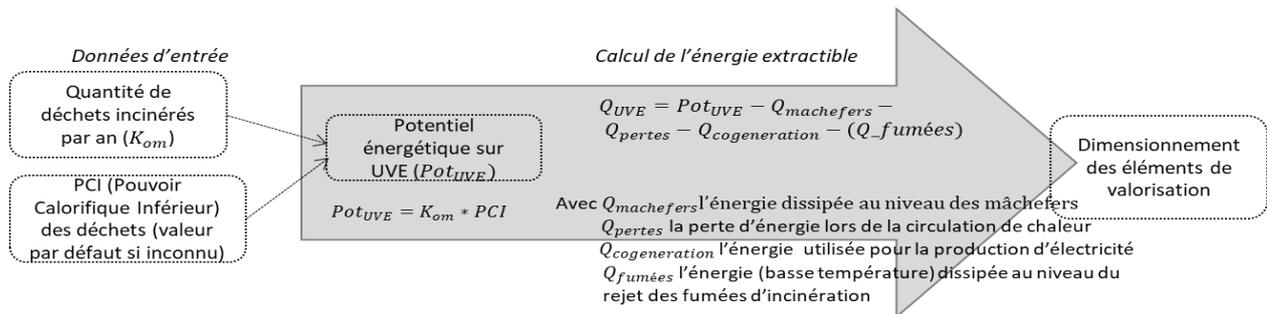


Figure 4-13 Méthode de calcul de l'énergie extractible sur UVE

La quantité de déchets incinérés (K_{om} , exprimé en tonnes/an) est la donnée d'entrée majeure pour déterminer le potentiel énergétique d'une UVE (Pot_{UVE}). Le calcul implique le PCI des déchets (PCI_{om} , exprimé en kWh/tonne).

$$(22) Pot_{UVE} = K_{om} * PCI_{om}$$

Ce calcul donne le potentiel annuel théorique des UVE. La quantité de déchets (K_{om}) est exprimée en tonnes par an. Dans le modèle de Recov'Heat, cette quantité de déchets est supposée constante sur toutes les heures d'une journée. Pour modéliser la légère augmentation de l'activité dans la plupart des UVE en hiver, l'hypothèse est d'attribuer aux cinq mois d'hiver (Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars), l'équivalent de 45 % de la quantité de déchet incinéré (soit 0,0123 % pour chaque heure d'hiver) et 55 % pour les sept autres mois (soit 0,0108 % pour chaque heure hors hiver).

Le PCI des déchets (PCI_{om}) est exprimé en kilowattheure par tonne de déchet. Sa valeur diffère en fonction des UVE. L'association Zero Waste France, anciennement Centre national d'information indépendante sur les déchets (CNIID), répertorie tous les UVE en France³⁰ et indique la valeur du PCI de tous les UVE qui communiquent cette donnée. Alors que le PCI moyen était estimé à 1 600 kWh/t en 1980, il était de 2 000 kWh/t en 2011 (AMORCE, 2011a) et plusieurs UVE présentent aujourd'hui des PCI supérieurs à 2 200 kWh/t. La raison avancée est l'amélioration des opérations en amont des incinérateurs comme le tri et le refus de matières à l'incinération telles que le verre. Dans l'outil Recov'Heat, la valeur par défaut du PCI est de 2 200 kWh/t mais si la donnée est connue, l'utilisateur peut l'intégrer en entrée.

Ce potentiel théorique ne correspond pas à toute l'énergie valorisable. En effet, il s'agit de l'énergie produite par l'incinération des déchets, évacuée ensuite à travers plusieurs process dont les principaux : la chaudière (pour une éventuelle valorisation électrique et/ou thermique), les mâchefers et au niveau du traitement des fumées, sur les tours de refroidissement. La Figure A-6 (ANNEXE 1.3, page 274) reprend l'ensemble des étapes. Tout au long du process, des pertes réduisent également le potentiel d'énergie extractible.

Les mâchefers sont les résidus solides issus de l'incinération. Ils peuvent être utilisés comme des matériaux de construction ou de terrassement. Pour une tonne de déchet incinéré, entre 250 et 300 kg de mâchefers sont rejetés, à une température d'environ 300 °C (Manificat & Megret, 2012). Une partie de l'énergie thermique dissipée est présente dans ces mâchefers, qui doivent être refroidis

³⁰ <http://france-incineration.fr>

avant réutilisation. Le potentiel énergétique est estimé entre 25 kWh/an et 60 kWh/an ($Q_{mâchefers}$) pour une tonne de mâchefer, un potentiel trop faible pour être exploité (Combe & Woillez, 2015; Manificat & Megret, 2012).

L'autre poste se situe en fin de process, au niveau du rejet de fumées dans l'atmosphère. Ici, la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées peut permettre de récupérer de la chaleur. La température de ces fumées est estimée entre 50 °C et 130 °C en fonction des installations, sachant qu'une tonne de déchet génère environ 5 000 Mm³ de gaz (Manificat & Megret, 2012). Le potentiel énergétique à ce poste ($Q_{fumées}$) se calcule alors à partir du coefficient volumique global de déperdition des fumées ($\rho_{fumée} = 0,34 \text{ W/m}^3/\text{°C}$) et le volume de gaz généré ($V_{fumées}$) :

$$(23) \quad Q_{fumées} = V_{fumées} * \rho_{fumée} * \Delta T$$

La valeur ΔT correspond à la différence entre la température des fumées et la température de l'usage après récupération (chauffage ou ECS). Ce procédé est peu répandu, notamment à cause de la corrosion engendrée par les fours et les chaudières. Pour sa modernisation, l'UVE de Saint-Ouen projette d'installer un système de récupération de chaleur des fumées par condensation (Syctom, 2015).

Il est également nécessaire d'intégrer des pertes thermiques (Q_{pertes}). En effet, la circulation de cette chaleur à travers différents process d'une usine d'incinération implique des pertes thermiques à hautes températures. Combe (2015) évalue à environ 22% le total des pertes thermiques. Le détail de ces pertes poste par poste est proposé en **ANNEXE 2.2** (page 306).

Pour calculer l'énergie extractible d'un UVE (Q_{UVE}), la méthode choisie dans l'outil Recov'Heat est donc de partir du potentiel théorique (équation 22) et de soustraire les pertes liées au process ($Q_{fumées}$), l'énergie contenue dans les mâchefers ($Q_{mâchefers}$), ainsi que l'énergie utilisée pour la production électrique. La majorité des UVE valorisent également l'énergie fatale pour produire de l'électricité. Sans connaître la part de cette production sur celle de la chaleur récupérée, une hypothèse est faite : l'énergie nécessaire à la production électrique ($Q_{cogénération}$) est le produit du potentiel énergétique et d'un coefficient pour la turbine à condensation ($\alpha_{turbine}$). Ce coefficient est de 15% en hiver et 30% en été. Etant donné que les besoins thermiques sont plus faibles en été (besoins d'ECS seulement), l'énergie récupérable est plus largement utilisée pour la production d'électricité.

$$(24) \quad Q_{cogénération} = \alpha_{turbine} * Pot_{UVE}$$

Le résultat est proposé avec et sans valorisation de l'énergie des fumées rejetées ($Q_{fumées}$) et est donc :

$$(25) \quad Q_{UVE} = Pot_{UVE} - Q_{mâchefers} - Q_{pertes} - Q_{cogénération} - (Q_{fumées})$$

Ce potentiel énergétique est à haute température, puisque la chaleur provenant de la chaudière est supérieure à 100°C. La valorisation énergétique se réalise donc par échanges de chaleur et ne nécessite pas un système d'augmentation de la température comme pour les sources précédentes.

4.4.2.6. Energie extractible sur les verreries

La méthode de détermination du potentiel d'énergie extractible sur une verrerie est détaillée dans cette section et résumée Figure 4-14.

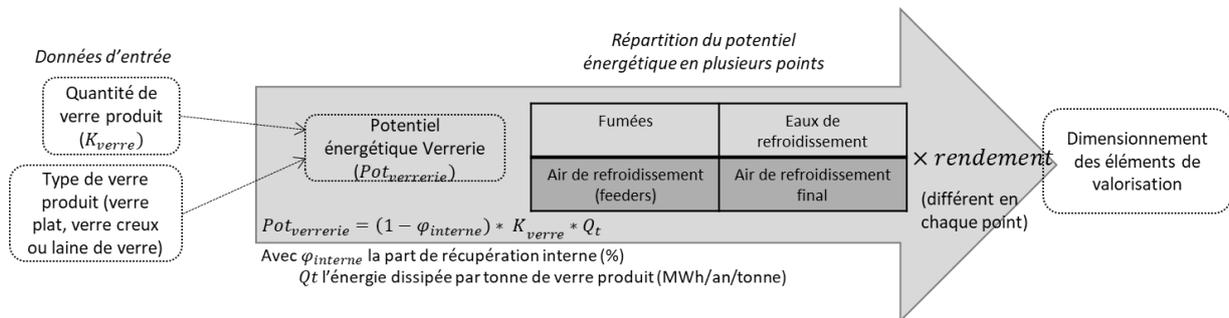


Figure 4-14 Méthode de calcul du potentiel énergétique sur une verrerie

Comme expliqué dans le chapitre précédent, le potentiel énergétique d'une verrerie ($Pot_{verrerie}$) peut se calculer à partir de la quantité de verre produit (K_{verre} , en tonnes) :

$$(26) \quad Pot_{verrerie} = (1 - \varphi_{interne}) * K_{verre} * Q_t$$

Ce produit prend en compte l'éventuelle récupération d'énergie déjà réalisée en interne ($\varphi_{interne}$, en pourcentage) par les process de la fabrication de verre, et un ratio de quantité d'énergie dissipée par tonne de verre produit (Q_t , en *MWh/an/tonne*), qui dépend notamment du type de verre produit. Ces données ont des valeurs limites :

$$1 < Q_t < 1,7; \quad 18\,000 < K_{verre} < 255\,500; \quad 0\% < \varphi_{interne} < 60\%$$

Comme pour les UVE, il s'agit d'un potentiel théorique, qui correspond à un total d'énergie dissipé à travers les différents process de fabrication du verre, et à différentes températures :

- sur les fumées ($Q_{fumée}$), estimées à 350°C environ,
- sur les eaux de refroidissement (Q_{er}), estimées entre 40 °C et 80 °C,
- sur l'air de refroidissement des feeders ($Q_{air\,feeders}$), à 200 °C,
- sur l'air refroidissement final (après la cuisson), ($Q_{air\,final}$) estimée à 150°C.

Woillez (2015) a estimé la part de dissipation d'énergie de chacun des postes (Tableau 4-8). Ces ratios sont utilisés pour calculer l'énergie fatale extractible (27). La source d'énergie fatale provenant des eaux de refroidissement est la seule à basse température et est donc mise à part dans les résultats.

$$(27) \quad Q_{verrerie} = Q_{fumée} + Q_{er} + Q_{air\,feeders} + Q_{air\,final}$$

Woillez (2015) ajoute également des rendements de récupération pour chaque poste de dissipation, qui prennent en compte des pertes thermiques liées à la distribution et aux éléments de valorisation. Sur les fumées et sur l'eau, ce rendement est estimé à 50%. Dans les deux cas, le flux est concentré, ce qui simplifie la récupération mais, comme pour les UVE, la récupération sur fumées est limitée par des risques de corrosion. La récupération au niveau de l'air de refroidissement (pour le feeder et à la fin du process) est plus complexe car la chaleur est diffuse, le rendement est donc plus bas (30 %). Ces rendements sont utilisés pour calculer l'énergie restante après dimensionnement des éléments de valorisation.

Tableau 4-8 Part d'énergie dissipée sur les postes majeurs de la fabrication de verre (Wuillez, 2015)

Poste de dissipation de chaleur	Verre plat		Verre creux	
	Part de dissipation d'énergie	Rendement récupération	Part de dissipation d'énergie	Rendement récupération
Fumées	16 %	50 %	13 %	50 %
Eaux de refroidissement	16 %	50 %	13 %	50 %
Air de refroidissement (feeders)	12 %	30 %	9 %	30 %
Air de refroidissement final	56 %	30 %	65 %	30 %

4.4.3. Dimensionnement des technologies de valorisation

Après avoir déterminé l'énergie extractible pour chaque source, la question de la façon de valoriser ce potentiel se pose.

L'ADEME (2017) résume Figure 4-15 l'ensemble des possibilités de valorisation d'une source de chaleur fatale et les technologies associées. Ces éléments de valorisation dépendent de l'usage souhaité : la chaleur fatale peut être utilisée sous forme thermique (chaleur ou froid en interne ou en externe) ou transformée en énergie mécanique pour permettre une production d'énergie électrique ou mécanique. Ici, l'intérêt est porté seulement sur la production de chaleur avec l'optique de l'intégrer à un réseau de chaleur. Dans ce cas, la collecte de chaleur se réalise grâce à des échangeurs de chaleur de différents types en fonction de l'état de la source fatale : liquide/liquide, gaz/liquide ou sous forme de chaudière de récupération (comme pour les UVE). Une fois collectée, la chaleur fatale peut être directement utilisable ou nécessite une remontée du niveau thermique. La température de la source est l'information qui détermine ce choix. Les eaux usées, les blanchisseries, les entrepôts frigorifiques et les data center sont des sources basses-température et ne peuvent donc pas répondre au niveau thermique de l'usage (ici un réseau de chaleur). Cette remontée en température se réalise principalement avec une PAC à compression, même si d'autres technologies existent et sont listées dans la Figure 4-15 (éjecto-compresseur, PAC à absorption, thermotransformateur).

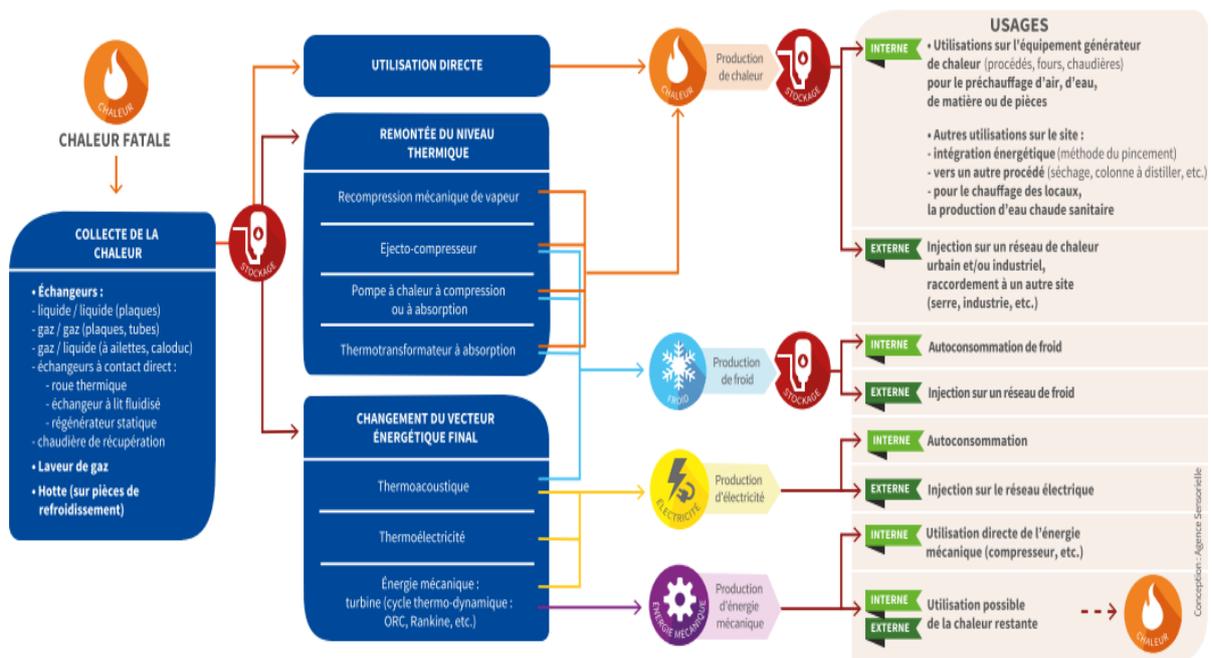


Figure 4-15 Technologies de valorisation d'énergie fatale (ADEME, 2017c)

La section suivante présente les échangeurs de chaleur dans un premier temps (4.4.3.1) avant la description du principe de fonctionnement des technologies de remontée du niveau thermique (4.4.3.2).

4.4.3.1. Les échangeurs de chaleur

Un échangeur de chaleur est un appareil permettant de transférer la chaleur d'une source à un puit (Bontemps, 2014). Ils sont omniprésents dans toutes les activités industrielles avec des procédés qui impliquent de la consommation ou du rejet d'énergie thermique. Le choix d'un échangeur se fait à partir de paramètres techniques (état physique du fluide, température, pression, agressivité du fluide) mais doit également prendre en compte d'autres aspects, comme la place disponible, la possibilité d'effectuer des actions de maintenance et remplacement et les coûts.

Dans le cadre de la récupération de chaleur sur les sources étudiées, seuls les échangeurs de chaleur qui peuvent valoriser ces sources sont analysés. Les échangeurs de chaleur à plaques sont les plus courants dans ce domaine. En effet, ils sont optimisés pour le transfert de chaleur à basse température, soit inférieure à 150 °C, et à basse pression (Manificat & Megret, 2012). Pour les sources à plus hautes températures et hautes pressions (UVE et verreries), des échangeurs tubulaires sont également usuels et présentent des coûts plus faibles.

Les échangeurs de chaleur à plaques consistent à l'enchaînement de plaques embouties très rapprochées avec écoulement dirigé, comme illustré Figure 4-16. Ce type de montage présente plusieurs avantages, dont un coefficient d'échange élevé et une grande compacité par rapport à d'autres échangeurs. L'installation se voit donc facilitée et peu encombrante. Plusieurs types d'échangeurs à plaques, applicables à la récupération de chaleur, se distinguent : à plaques et joints, à plaques brasées ou à plaques soudées et spiralées.

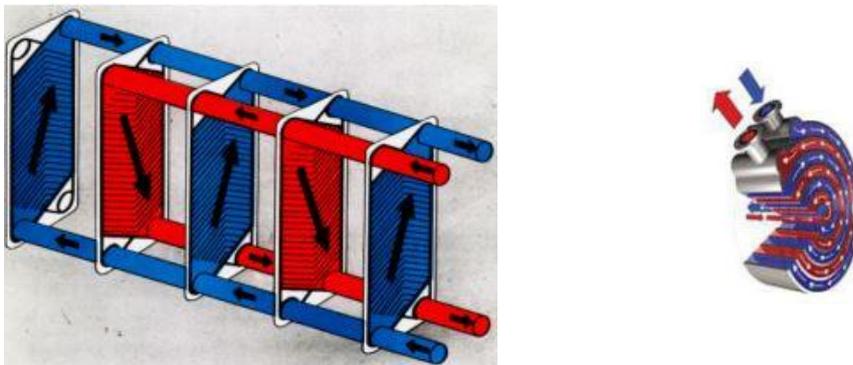


Figure 4-16 Schéma de principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques et joints (Bourret, 2012) et à plaques spiralées (Manificat & Megret, 2012)

L'un des exemples de récupération de chaleur à l'échelle d'un quartier évoqué dans le chapitre 3 partie 1, l'éco quartier Roquebrune Cap-Martin, utilise un échangeur spiralé (schéma de droite dans la figure ci-dessus) pour valoriser les calories d'une station d'épuration d'eaux usées. L'inconvénient de cet échangeur de chaleur par rapport à ceux évoqués avant est son coût, plus élevé.

L'utilisation de ce genre d'échangeur nécessite également la dérivation du système d'eaux usées. Un autre procédé existe, comme au niveau de l'écoquartier Sainte Geneviève à Nanterre, où un échangeur à plaques est directement posé sur le réseau d'assainissement (Figure 4-17). Ce procédé, appelé Degrés Bleus et développé par la Lyonnaise des Eaux, évite l'encombrement, ce qui peut être un atout majeur en milieu urbain. La mise en œuvre est complexe puisqu'il faut impérativement intervenir directement sur le réseau d'assainissement.

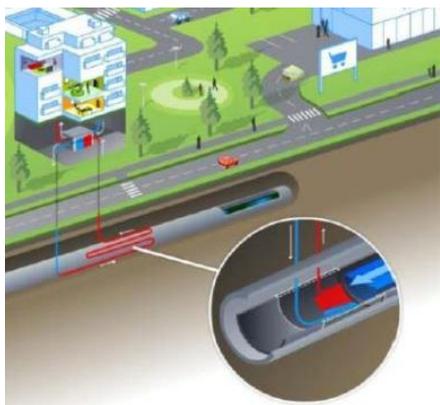


Figure 4-17 Principe général de fonctionnement DEGRÉS BLEUS

Dans l'outil Recov'Heat, des simplifications sont faites et des échangeurs de chaleur à plaques sont choisis pour toutes les sources. Pour la récupération sur eaux usées, l'hypothèse est que le coût de cet échangeur est plus élevé pour prendre en compte les contraintes d'encrassement. Ces coûts sont issus de données commerciales proposées par des sociétés qui vendent ce type d'échangeur.

Dans le cas où la recherche du potentiel maximal d'énergie fatale récupérable est recherchée, le dimensionnement des échangeurs de chaleur se fait de façon à échanger toute la puissance potentiellement extractible, calculée dans la section précédente. Un dimensionnement d'échangeur de chaleur consiste à déterminer sa surface et son coefficient d'échange à partir de la puissance et des températures avant et après échange. La surface et le type d'échangeur permet ensuite de déterminer son coût. Dans Recov'Heat, l'approche a été simplifiée et le calcul du coût utilise simplement des ratios en fonction de la puissance (disponibles en ANNEXE 2.4, page 308). Cette simplification néglige les pertes de charges de l'échangeur.

4.4.3.2. Remontée du niveau thermique

Cette étape de dimensionnement est donc nécessaire pour les sources fatales à basse température, qui ne peuvent, en l'état, être valorisées pour répondre à des besoins de chauffage ou d'ECS ou être intégrées à des réseaux de chaleur. Les pompes à chaleur (PAC) sont alors des systèmes qui permettent de rehausser les niveaux de températures. Plusieurs technologies existent mais la plus commune, et la seule dimensionnée dans Recov'Heat, est la PAC à compression.

Le fonctionnement repose sur le même principe que celui d'un groupe frigorifique (Figure 3-3, page 97) mais est utilisée pour de la production de chaleur : la chaleur fatale issue des sources étudiées, à basse température (T_{e_f}), est récupérée au niveau de l'évaporateur et revalorisée à haute température à la sortie condenseur (T_c). La Figure 4-18 présente un schéma de fonctionnement type d'une PAC.

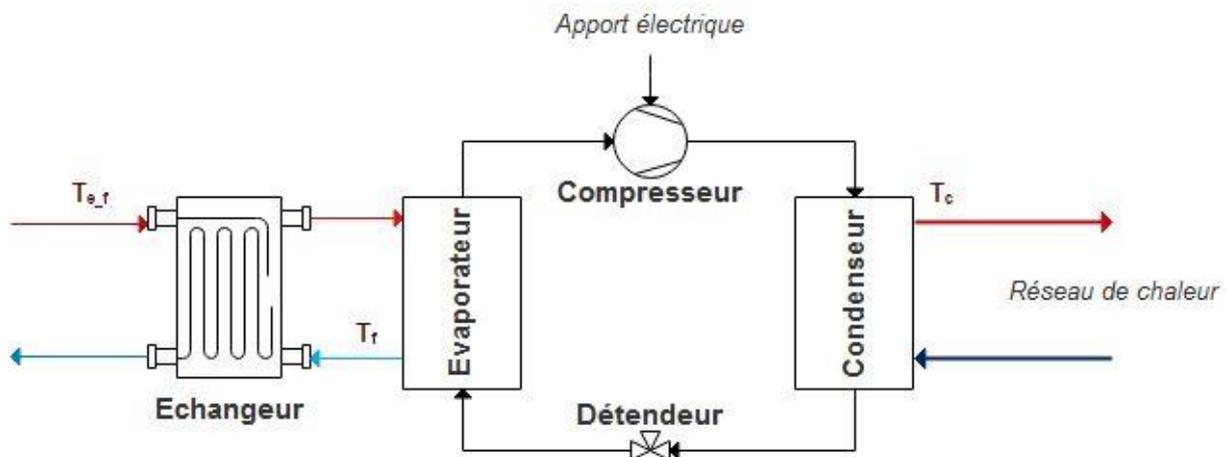


Figure 4-18 Schéma de fonctionnement d'une PAC (source : auteur)

Au niveau du compresseur, l'énergie mécanique est utilisée pour élever la pression et la température du fluide frigorigène. Ce fluide, à l'état gazeux, est dirigé au condenseur où un échangeur permet au gaz de se condenser (à température et pression constante) et de distribuer de la chaleur à un circuit d'eau en sortie. Le fluide frigorigène est alors à l'état liquide et est détendu par une baisse de pression au niveau du détendeur. A l'évaporateur, ce fluide passe à l'état de vapeur au contact d'un échangeur qui fait le lien entre la chaleur fatale et le cycle thermodynamique.

Le coefficient de performance (COP) donne le niveau de performance d'une PAC. Il correspond à l'énergie utile produite, dans ce cas de la chaleur, au condenseur ($Q_{condenseur}$) sur l'énergie consommée. Cette dernière est principalement l'électricité absorbée au compresseur ($Q_{compresseur}$), mais provient aussi des consommations auxiliaires des éléments de la PAC ($Q_{auxiliaire}$).

$$(28) \quad COP = \frac{Q_{condenseur}}{Q_{compresseur} + Q_{auxiliaire}}$$

Dans l'outil Recov'Heat, la détermination du COP est effectuée à partir d'une approche en température, puisque ces données sont connues. Cette méthode est utilisée dans plusieurs travaux d'estimation de potentiel (Hammond & Norman, 2014; Hélène & Molinaro, 2017). Selon le second principe de la thermodynamique, le COP maximum théorique, COP_{carnot} , dépend des températures

de sortie de l'évaporateur (T_f) et du condenseur (T_c), ainsi que du pincement des échangeurs³¹ ($Pinch$) :

$$(29) \quad COP_{carnot} = \frac{T_c + Pinch}{(T_c + Pinch) - (T_f - Pinch)}$$

La température de sortie de l'évaporateur (T_f) est déterminée en fonction de la température de la source fatale (T_{e_f}). La température de sortie du condenseur (T_c) dépend des émetteurs de chaleur qui utilisent cette énergie. Dans Recov'Heat, où l'énergie fatale est supposément valorisée dans un réseau de chaleur, l'hypothèse est que cette température correspond à celle de la température aller d'un réseau de chaleur. Elle est déterminée par défaut en fonction de l'âge des bâtiments sélectionnés dans le premier module mais peut être déterminée manuellement par l'utilisateur.

Le pincement des échangeurs ($Pinch$) peut varier entre 2 °C pour des échanges entre liquides et jusqu'à 10 °C pour des échanges d'air (Hita & Seck, 2011). Dans Recov'Heat, sa valeur est fixée à 3 °C. Ce COP théorique est idéal et jamais atteint car le cycle de Carnot fait l'hypothèse que les transformations dans les organes de la PAC sont réversibles. Or les transformations de chaleur sont irréversibles. C'est pourquoi un rendement de Carnot (R_c) est appliqué afin d'obtenir un COP effectif (COP_{eff}), d'une valeur allant de 0,55 à 0,65 (Caenen et al., 2016; Guo & Hendel, 2018; Hammond & Norman, 2014; Spurr et al., 2014), notamment en fonction du fluide frigorigène. Dans Recov'Heat, il est fixé à 0,55.

$$(30) \quad COP_{eff} = R_c * COP_{carnot}$$

L'énergie produite et ensuite distribuée en sortie de PAC (Q_c) se calcule ainsi, en prenant l'hypothèse de négliger l'électricité consommée par les auxiliaires, avec Q_f l'énergie extractible calculée précédemment.

$$(31) \quad Q_c = Q_f * \frac{COP_{eff}}{COP_{eff}-1}$$

Dimensionner une PAC revient à déterminer ses températures de fonctionnement et sa puissance. Sa puissance correspond à la puissance au condenseur ($P_{condenseur}$). Dans Recov'Heat, il se calcule donc à partir de la puissance à l'évaporateur (soit la puissance de dimensionnement de sources fatales calculée pour chaque source dans la section précédente) et du COP effectif, lui-même déterminé par les températures (T_c et T_f) :

$$(32) \quad P_{condenseur} = P_f \frac{COP_{eff}}{COP_{eff}-1}$$

Dans le cas de l'énergie fatale issue des entrepôts frigorifiques, où deux puissances sont disponibles un grand nombre d'heures dans l'année (équation 18), deux pompes à chaleur doivent être dimensionnées pour valoriser un maximum d'énergie fatale.

A ce stade, le potentiel énergétique de chaque source est défini : le potentiel extractible est calculé dans la section précédente, et les moyens de la récupérer sont décrit ici. Il s'agit dans un premier temps d'échangeurs de chaleur. Si la température de l'énergie fatale étudiée est trop basse pour répondre à des besoins de chauffage ou d'ECS, une PAC à compression est ensuite dimensionnée.

³¹ Pincement des échangeurs : Le pincement d'un échangeur de chaleur est l'écart minimal de température entre ses extrémités

L'énergie extraite de ces éléments de valorisation correspond à l'énergie valorisable de la Figure 4-1 (page 122). A noter que si la source de chaleur est basse température et nécessite une PAC, le bilan énergétique doit prendre en compte l'électricité consommée et la déduire de la part d'EnR&R de la solution.

4.4.4. De l'énergie valorisable à l'énergie distribuable

Pour connaître la quantité d'énergie distribuable, il faut prendre en compte les pertes de distributions. En effet, les sources étudiées sont des sources urbaines mais qui ne sont pas forcément directement connectées avec les quartiers à approvisionner. Or la distance entre la (les) source(s) de chaleur et les utilisateurs est un paramètre incontournable pour mesurer la faisabilité d'un projet de valorisation. Plus cette distance est importante, plus les canalisations pour raccorder l'énergie fatale à la chaufferie centralisée d'un réseau de chaleur (ou à un autre point du réseau) sont coûteuses et menacent la viabilité économique de cette récupération (4.5.2). Les pertes thermiques de distribution sont également un possible frein lorsque cette distance est élevée. Pour chaque source, l'énergie distribuable (Q_{fatale}) correspond donc à la soustraction des pertes à l'énergie valorisable ($Q_{valorisable}$) précédemment calculée :

$$(33) \quad Q_{fatale} = Q_{valorisable} - Pertes$$

Il existe plusieurs types de pertes dans le cas de la distribution de chaleur et d'écoulement d'un liquide à travers des canalisations (perte de charge linéaire, perte de charge singulière, déperdition thermique par transmission de chaleur ou par renouvellement d'air, etc.). Ici, seule la déperdition thermique par transmission de chaleur est calculée (DP_{ef}) et est fonction de la distance entre la source fatale et la chaufferie (d en mètres) et du coefficient d'échange (γ , en W/m) :

$$(34) \quad DP_{ef} = d * \gamma, \text{ où } \gamma = k * \Delta T$$

Le coefficient d'échange est le produit du coefficient de déperdition thermique (k) et de la différence de température entre la source fatale et la température extérieure (ΔT), qui est celle du sous-sol, les canalisations étant enterrées. La température du sous-sol est considérée comme constante. L'hypothèse est de fixer la température extérieure à 10°C puisqu'il s'agit ici de la température dans le sol qui ne subit pas la même variation que la température hors sol.

La valeur du coefficient de déperdition thermique dépend du diamètre de la canalisation. L'abaque de Dariès est couramment utilisé pour déterminer ce diamètre, qui dépend du débit, retrouvable ici depuis la puissance. Quelques valeurs sont extraites de l'abaque de Dariès afin d'automatiser la récupération de cette donnée, comme expliqué en **ANNEXE 2.3**, page 307.

La distance entre la source et les utilisateurs est donc une donnée qui influe sur les pertes de distribution. Elle est également un paramètre important du calcul économique. Pour cette raison, plusieurs études sur la récupération de chaleur des eaux usées préconisent une distance maximum entre les canalisations et les consommateurs (la chaufferie centralisée d'un réseau de chaleur ou les bâtiments directement) : cette distance est estimée à 200 mètres (Caenen et al., 2016; Khoury et al., 2009) et peut aller jusqu'à 300 mètres si la puissance récupérable est élevée (Epp & Darmayan, 2013; Neugebauer et al., 2015).

Dans Recov'Heat, la distance est une donnée d'entrée demandée à l'utilisateur.

4.5. Module de résultats

Le potentiel énergétique des six sources fatales étant calculé, le dernier module de l'outil Recov'Heat consiste à évaluer ce potentiel (module 2) en regard avec les besoins thermiques d'un quartier déjà dimensionné (module 1). Une série des résultats technico-énergétiques (4.5.1), économiques (4.5.2) et environnementaux (4.5.3) sont alors déductibles pour juger de l'intérêt de la récupération de chaleur pour les besoins thermiques à l'échelle d'un quartier donné.

4.5.1. Résultats énergétiques

Avant d'évaluer l'intérêt de la récupération d'une source de chaleur fatale dans le but de répondre à des besoins de chauffage et/ou d'ECS, la faisabilité technique est questionnée. Ici, cette faisabilité fait référence à la compatibilité entre la température des sources de chaleur fatale et celle des besoins. S'il s'agit d'une source basse température et que la température de départ pour répondre aux besoins, déterminée par une hypothèse simplificatrice (Tableau 4-3, page 127), est élevée (>90 °C), la simulation n'opère pas.

L'obtention de résultats se fait par la superposition de trois courbes, au pas horaire et sur un an : l'énergie fatale distribuable et les besoins thermiques (chauffage et ECS), comme montré en exemple sur la Figure 4-19.

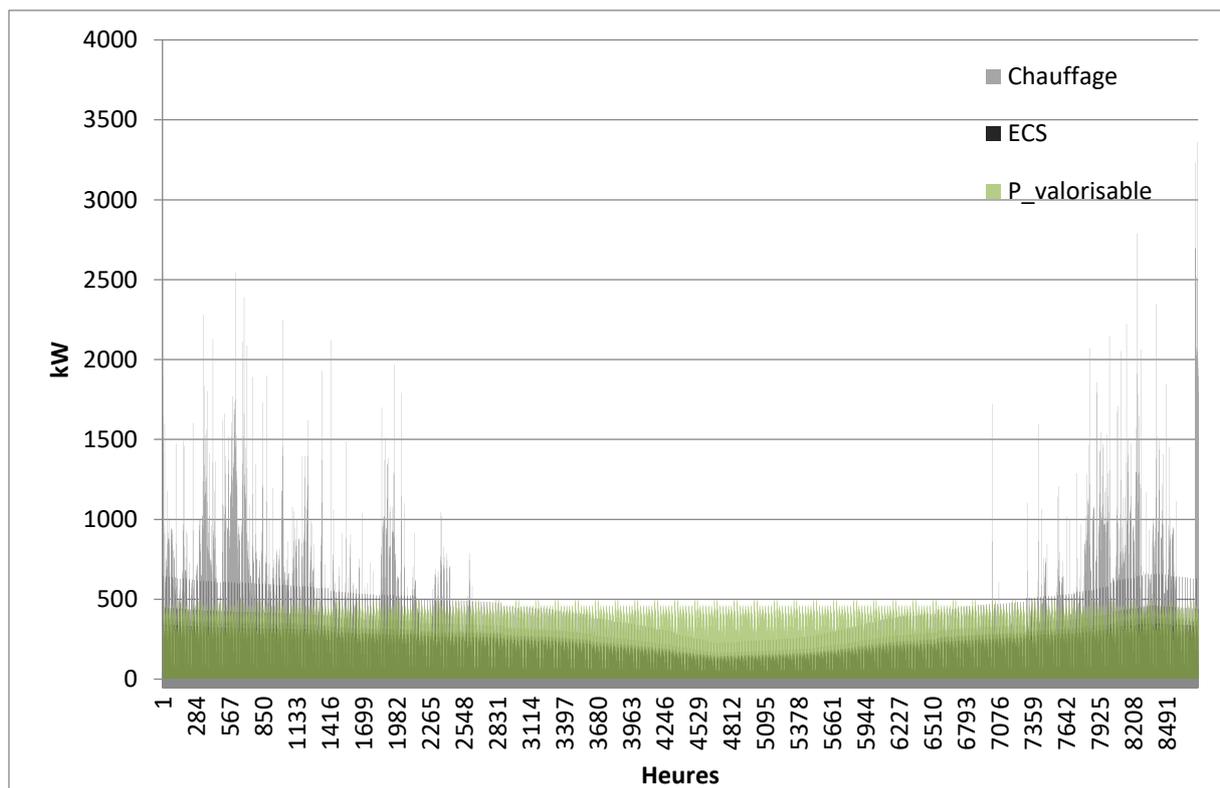


Figure 4-19 Exemple d'un profil de besoins thermiques et de potentiel d'énergie fatale (ici d'une station d'épuration)

Cette superposition permet d'obtenir l'énergie fatale réellement consommable (Q_{conso}) : à chaque heure, l'énergie fatale distribuable ($Q_{fatale}(i)$) est inférieure ou supérieure à l'énergie consommée ($H_q(i)$).

$$(35) \quad Q_{conso}(i) = Q_{fatale}(i) \text{ si } Q_{fatale}(i) \leq H_q(i); \quad Q_{conso}(i) = H_q(i) \text{ si } Q_{fatale}(i) > H_q(i)$$

$$(36) \quad Q_{conso} = \sum Q_{conso}(i)$$

De cette énergie fatale consommée, on détermine ensuite le taux d'utilisation de l'énergie fatale étudiée ($T_{utilisation}$), qui correspond au rapport de l'énergie fatale consommée sur celle valorisable. Ce taux d'utilisation permet de savoir si le potentiel énergétique d'une source fatale est en phase avec les besoins thermiques d'un quartier.

$$(37) \quad T_{utilisation} (\%) = \frac{Q_{conso}}{Q_{fatale}} * 100$$

Le taux de couverture ($T_{couverture}$) correspond à la part des besoins annuels couverts par l'énergie fatale.

$$(38) \quad T_{couverture} (\%) = \frac{Q_{conso}}{H_q} * 100$$

Ce taux de couverture est annuel. Afin de juger de cette part d'énergie fatale consommable pendant la saison de chauffe, un taux de couverture mensuel est également calculé à partir de la même méthode, mais sur chaque mois.

Si la source étudiée est basse température, la valeur du COP de la PAC est rappelée dans ce module de résultats (équation 30). Un COP saisonnier est également proposé afin d'analyser les performances de la PAC en période hivernale où les besoins sont plus élevés et les températures de la source froide peuvent être plus bas (comme pour les eaux usées par exemple).

A partir de ce COP, le calcul de l'électricité consommée (Q_{elec}) pour la PAC est calculé :

$$(39) \quad Q_{elec} = \frac{Q_{fatale}}{COP}$$

Enfin, le dernier résultat déductible est le taux d'EnR&R ($T_{enr\&r}$) que l'énergie fatale étudiée permet d'obtenir si elle est valorisée dans le quartier dimensionné. Ce taux se détermine à partir de l'énergie fatale consommable, soustrait de l'électricité nécessaire pour faire fonctionner une éventuelle PAC :

$$(40) \quad T_{enr\&r} (\%) = \frac{Q_{conso} - Q_{elec}}{H_q}$$

Tous ces résultats sont rappelés à la fin de la section dans le Tableau 4-9, page 155.

4.5.2. Résultats économiques

Trois résultats économiques sont proposés : le coût d'investissement (€), le coût global actualisé sur 20 ans (€), et le coût ramené à l'unité énergétique (€/MWh).

Le coût d'investissement rassemble les coûts d'achat des éléments de valorisation des sources de chaleur fatale. Il s'agit des échangeurs de chaleur, des éventuelles pompes à chaleur et du réseau de récupération (canalisations avant chaufferie d'un réseau de chaleur). Un coût lié à la réalisation du projet (études préalables, AMO, MOE, aléas, assurance) est ajouté et est fixé à 15 % du total des investissements pour les éléments de valorisation. La détermination des coûts est réalisée à partir de plusieurs hypothèses simplificatrices :

- pour les échangeurs de chaleur, le coût dépend de leur puissance,
- pour les pompes à chaleur, le coût dépend de leur puissance et des températures de fonctionnement,

- pour le réseau de récupération, le coût dépend de la longueur qui sépare la source de chaleur fatale avec une chaufferie.

Dans les trois cas, une bibliothèque de coûts unitaires (en €/kW ou €/ml) est appelée pour déterminer le prix de ces éléments. Cette bibliothèque est synthétisée dans un tableau présenté en **ANNEXE 2.4**. Le coût global actualisé est un calcul annuel qui prend en compte les investissements, la maintenance, le remplacement du matériel en fonction de sa durée de vie, l'éventuelle consommation d'énergie pour le fonctionnement du système (exclusivement l'électricité pour une PAC ici) et l'actualisation³² dont le taux est fixé à 4 %. Le coût global actualisé est ensuite sommé sur 20 ans. La durée de vie de 20 ans et la valeur du taux d'actualisation s'inspirent des études réalisées par l'association AMORCE sur la compétitivité des réseaux de chaleur par rapport aux autres systèmes de chauffage (AMORCE, 2016a).

Enfin, le coût ramené en €/MWh est calculé avec la méthode du LCOE (Levelized Cost of Energy, appelé coût actualisé de l'énergie en français). Cette méthode est notamment appliquée par l'ADEME dans son étude sur les coûts des énergies renouvelables en France (ADEME, 2016a) et prend en compte tous les paramètres nécessaires au calcul du coût global actualisé : les coûts d'investissement à l'année t (I_t), les coûts de maintenance à l'année t (M_t), les coûts de l'énergie consommée pour faire fonctionner le système à l'année t (F_t), la quantité d'énergie produite à l'année t (E_t), le taux d'actualisation (r) et la durée de vie du système (n).

$$(41) \quad LCOE \text{ (€/MWh)} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Cette valeur permet de comparer directement la compétitivité économique d'une source fatale avec une autre énergie (renouvelable ou fossile).

4.5.3. Résultats environnementaux

Les résultats environnementaux sont limités à l'analyse du CO₂ émis par la solution proposée. Dans le cas de l'utilisation d'une PAC, seule l'électricité consommée est émettrice de CO₂, l'énergie fatale étant décarbonée. Le CO₂ émis (E_{CO_2}) est simplement le produit de la quantité d'électricité consommée et du ratio de CO₂ émis pour un kilowattheure (n_{CO_2} en kg/kWh). A titre indicatif, cette valeur est comparée avec le CO₂ émis par une solution 100 % gaz pour la même quantité d'énergie produite. Un coût indicatif sur le CO₂ émis est également proposé.

$$(42) \quad E_{CO_2} = Q_{elec} * n_{CO_2}$$

Le Tableau 4-9 reprend tous les indicateurs calculés et affichés dans le module des résultats de l'outil Recov'Heat.

³² Actualisation : L'actualisation prend en compte l'évolution de la valeur de l'argent dans le temps. Un taux d'actualisation permet d'apprécier cette valeur dans les années futures.

Tableau 4-9 Récapitulatif des résultats de l'outil Recov'Heat

Indicateurs énergétiques	Indicateurs économiques	Indicateurs Environnementaux
Energie valorisable (MWh/an)	Coûts d'investissements (€)	CO ₂ émis (tonnes/an)
Energie consommable (MWh/an)	Coût global actualisé sur 20 ans (€)	CO ₂ évité (tonnes/an)
Taux de couverture (%)	Coût d'exploitation annuel (€/an)	Coûts du CO ₂ émis
Taux d'utilisation (%)	LCOE (€/MWh)	
Puissance (kW) et COP (s.u) si PAC		
Electricité consommée (MWh/an)		
Taux EnR&R (%)		

Les indicateurs énergétiques permettent d'analyser la performance de la récupération d'une source fatale sur un territoire donné. Par exemple, un taux d'EnR&R trop faible rend l'opération inintéressante. Si les taux de couverture et d'utilisation sont bas, c'est que le quartier dimensionné n'est pas en adéquation avec la disponibilité de la source de chaleur fatale. La réflexion peut se tourner alors vers l'alimentation d'autres bâtiments plus compatibles ou le dimensionnement d'une solution de stockage.

Les indicateurs économiques et environnementaux informent également sur l'intérêt d'étudier plus en détail la faisabilité de la récupération et valorisation de chaleur fatale. Le LCOE permet ainsi de comparer cette solution avec d'autres sources d'énergies plus classiques (fossiles comme renouvelables). Le résultat quant au CO₂ émis par la solution peut également être comparé avec d'autres scénarios, possiblement plus ou moins émetteur.

4.6. Conclusion du chapitre 4

Recov'Heat est donc un outil de simulation dont l'objectif est d'apporter une estimation du potentiel énergétique de sources urbaines de chaleur fatale, à partir d'un minimum de connaissance sur cette source. Plusieurs hypothèses permettent de caractériser les sources, leur potentiel d'énergie extractible, puis de dimensionner les éléments de valorisation de cette chaleur fatale en fonction des caractéristiques de la source.

Ce potentiel est finalement mis en regard de besoins thermiques d'un quartier (chauffage et/ou ECS) pour juger de l'intérêt de sa valorisation. La simulation est réalisée sur un an au pas horaire afin de prendre en compte la variabilité de la source, et la concomitance entre cette variabilité et celle des besoins thermiques. Les indicateurs techniques, économiques et environnementaux présentés dans le Tableau 4-9 sont les résultats principaux de la simulation. Ils orientent les utilisateurs sur l'intérêt de la récupération d'une source fatale de chaleur.

L'utilisation de cet outil peut se faire au stade d'une étude d'opportunité ou de pré faisabilité, par un bureau d'étude, un maître d'ouvrage ou une collectivité souhaitant développer une stratégie énergétique sur son territoire (entre autres pour la constitution de son PCEAT). Aux vues de certaines hypothèses simplificatrices, notamment sur la détermination des besoins thermiques d'un quartier dimensionné et de la température aller d'un réseau de distribution de chaleur pouvant alimenter ce quartier, l'outil ne peut pas être utilisé pour une étude de faisabilité et les résultats doivent être interprétés comme des ordres de grandeur.

Le fonctionnement générique de Recov'Heat et l'instantanéité des simulations permettent d'utiliser cet outil pour réaliser des études de sensibilité sur plusieurs paramètres : en faisant varier les températures (des sources fatales et/ou de distribution de la chaleur), les coûts unitaires ou la distance entre source et besoins, la performance de la solution (COP des PAC), l'intérêt énergétique (taux d'EnR&R), économique (LCOE) et environnementale (CO₂ émis par la solution) sont impactés et les résultats sont obtenables immédiatement. (ANNEXE 2.5)

L'outil a été développé sur diverses interfaces (principalement Excel et Scilab) puis tous les modules ont été regroupés sur une même interface Excel afin de le rendre utilisable facilement par les membres de l'institut Efficacity. Une version simplifiée a été développée en application web³³, dans le cadre de la communication des activités de l'institut. L'outil est également couplé avec des travaux menés par Efficacity, sur la géolocalisation de sources fatales en France et l'intégration à un SIG, susceptible d'intégrer d'autres données sur les territoires (présence de réseaux de chaleur, besoins à la maille IRIS, etc.).

Dans le chapitre suivant, Recov'Heat est testé et comparé avec des cas déjà existants de récupération de chaleur en France, afin de valider son fonctionnement. Une étude de cas est également présentée afin d'expliquer l'utilité de l'outil ainsi que ses limites.

³³ <http://tools.efficacity.com/recovheat-presentation-generale/>

CHAPITRE 5 : VALIDATION DU MODELE RECOV'HEAT ET CAS D'ETUDE

Recov'Heat permet donc de réaliser une évaluation du potentiel énergétique d'une source d'énergie fatale urbaine et de l'intérêt de sa valorisation pour répondre aux besoins thermiques d'un quartier. Pour qualifier l'exactitude de ce modèle, ce chapitre présente une série de comparaison avec des projets réels existants ainsi qu'un cas d'étude.

Les comparaisons utilisent les retours d'expérience collectés au sein des travaux d'Efficacity ainsi que ceux partagés par la communauté scientifique. Cette analyse vise à confronter les résultats des potentiels énergétiques calculés par Recov'Heat et l'énergie produite dans les cas réels. Les écarts absolus et relatifs permettent alors de mesurer la précision du modèle. Dans ce travail, la partie de l'outil dédiée à la réponse à des besoins thermiques n'est pas utile (5.1). La source d'énergie fatale la plus valorisée provient des UVE où les données sont partagées et exploitables pour cette comparaison. Les retours d'expériences sont plus rares pour les autres sources étudiées qui sont regroupées dans un paragraphe dédié.

Le cas d'étude (5.2) présenté est l'analyse de la faisabilité de récupération de chaleur fatale sur les groupes froids d'un entrepôt frigorifique dans le but de répondre aux besoins thermiques des bâtiments d'un quartier voisin. Certaines données d'entrée sont issues d'une étude parallèle réalisée par Efficacity. Dans cette section, la simulation réalisée sur Recov'Heat permet d'obtenir les indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux évoqués dans le chapitre 4. Leur analyse offre des éléments de réponse quant à l'intérêt de valoriser l'énergie fatale de l'entrepôt frigorifique sur le territoire et met en lumière les limites du modèle Recov'Heat.

5.1. Validation du modèle Recov'Heat

Les premières comparaisons ont été réalisées sur une source déjà valorisée dans des réseaux de chaleur : les UVE (5.1.1). D'autres analyses sont réalisées pour la récupération de chaleur sur eaux usées et data center, en utilisant un retour d'expérience plus restreint (5.1.2).

5.1.1. Validation du modèle sur les UVE

Pour rappel, les données nécessaires à l'évaluation du potentiel énergétique d'une UVE sont la quantité de déchet incinérée sur une année, et le PCI (valeur par défaut si non disponible). La première donnée est récupérable manuellement sur tous les UVE qui partagent cette information dans des rapports annuels publics. La comparaison des sorties du modèle Recov'Heat se fait à partir d'un croisement de données sur la valorisation d'énergie thermique :

- Les données partagées par l'association Zero Waste France sur une carte de France des incinérateurs³⁴ et pour chaque UVE : capacité annuelle (en tonnes/an), PCI des déchets (kWh/tonne), production d'énergie thermique, d'énergie électrique (MWh/an), vente d'énergie thermique et électrique (MWh/an), autoconsommation d'énergie thermique et électrique (MWh/an). Les sources sont issues d'organismes officiels (Ministère de l'Ecologie, ADEME, collectivités, etc.) et de veilles d'associations locales. La dernière mise à jour des données a été réalisée en 2012 et de nombreuses UVE ne sont pas totalement renseignées, d'où la nécessité de croiser ces informations avec une autre base.
- Les données partagées par le groupe SETEC, membre du consortium Efficacy : capacité annuelle et quantité de déchets incinérés (tonnes/an), production d'énergie thermique et électrique (MWh/an).

Le potentiel énergétique de 66 UVE a été calculé. Il s'agit des UVE où des données suffisantes ont été récupérées pour effectuer une comparaison. Cette dernière consiste, pour chaque UVE, à calculer l'écart absolu (E_{abs}) et l'écart relatif ($E_{relatif}$) entre les résultats de simulation (Q_{rh}) et la réalité ($Q_{réel}$) :

$$(43) \quad E_{abs} \text{ (en MWh/an)} = Q_{rh} - Q_{réel}$$

$$(44) \quad E_{relatif} \text{ (en \%)} = \frac{Q_{rh} - Q_{réel}}{Q_{réel}} * 100$$

Le Tableau 5-1 affiche des cas d'UVE où les potentiels obtenus par Recov'Heat sont proches de la réalité. Dans ces dix exemples, classés par ordre croissant de quantité de déchets incinérés, l'écart relatif moyen est compris entre 1 % (UVE de Bayet) et 40 % (UVE de Lyon). L'observation première est la tendance du modèle Recov'Heat à surestimer le potentiel énergétique par rapport à la réalité.

³⁴ <http://france-incineration.fr/>

Tableau 5-1 Comparaison du modèle Recov'Heat sur dix UVE

UVE	PCI	Déchets incinérés	Energie thermique valorisée	Energie thermique estimée (Recov'Heat)	Ecart absolu	Ecart relatif
	MJ/kg	tonnes/an	GWh/an	GWh/an	GWh/an	%
Sens	8,5	19155	19,3	26,7	7,4	39 %
Pontarlier	8,1	35782	45,1	47,5	2,4	5 %
Poitiers	8,5	47167	49,8	65,8	15,9	32 %
Bayet	8,5	59504	82,0	82,9	0,9	1 %
Nancy	7,7	107188	102,6	135,8	33,2	32 %
Rungis	8,5	131921	149,6	183,9	34,3	23 %
Sarcelles	7,0	150224	133,7	172,1	38,4	29 %
Lyon	8,5	237489	237,2	331,1	93,8	40 %
Nice	7,6	316143	277,7	390,9	113,1	41 %
Issy-les-Moulineaux	7,7	491747	567,1	619,9	52,8	9 %

L'analyse sur les 66 UVE confirme cette tendance, avec des résultats parfois bien supérieurs à la réalité. Comme le montre la Figure 5-1, où les UVE sont classés par ordre croissant de quantité déchets incinérés, 59 des 66 estimations sont supérieures à la réalité.

Sept cas montrent une sous-estimation du potentiel (lorsque l'écart absolu est négatif). Six des sept UVE concernées ne font pas de cogénération et produisent donc seulement de l'énergie sous forme thermique. Or ce fonctionnement est effectif par défaut dans le modèle Recov'Heat et réduit le potentiel de valorisation thermique. Le seul cas où Recov'Heat sous-dimensionne le potentiel énergétique alors que l'UVE fait de la cogénération est l'UVE de Besançon, avec 2 GWh/an de valorisation supplémentaire par rapport au modèle (soit un écart relatif de 4 %). Dans ce cas, le PCI (7,2 MJ/kg) est plus faible que le PCI moyen (8 MJ/kg) selon les données récupérées sur la plateforme de Zero Waste France.

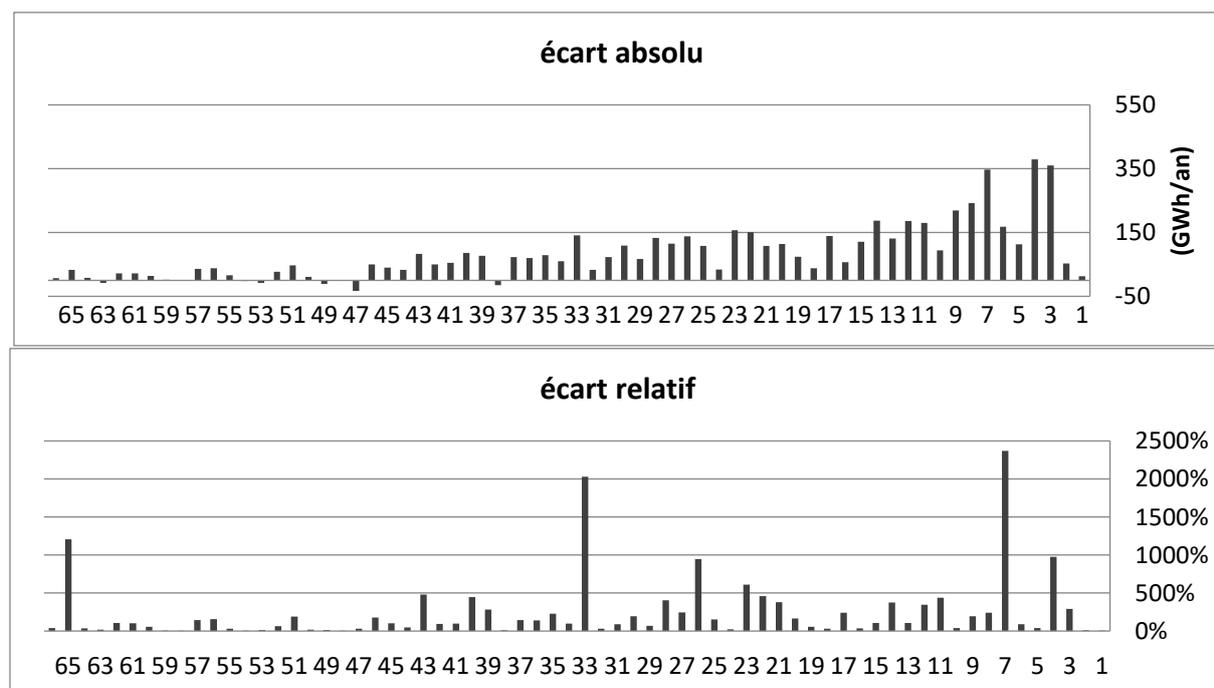


Figure 5-1 Ecarts absolus et relatifs entre les simulations de Recov'Heat et la réalité (UVE)

Plusieurs raisons expliquent cette surestimation globale de Recov'Heat par rapport à la réalité. En effet, le modèle réalise un dimensionnement maximal, qui ne prend pas en compte certains paramètres :

- Tous les UVE subissent des fermetures annuelles pour des raisons de maintenance ou de remplacement de matériel. Sur une année, l'arrêt cumulé de fonctionnement peut être de plusieurs centaines d'heures, soit autant d'heures sans valorisation énergétique. Ces interruptions relèvent du cas par cas et ne sont pas incluses dans le modèle Recov'Heat qui se veut générique.
- Les UVE privilégient parfois la valorisation électrique. En analysant plus en détail les 10 UVE où les écarts relatifs sont les plus élevés (entre 447 % et 2371 %) via des rapports annuels et des communiqués de presse, l'observation est que ces UVE produisent de l'énergie thermique dans une optique d'autoconsommation et valorisent le reste de l'énergie pour produire de l'électricité.
- L'énergie récupérable est parfois supérieure aux besoins aux alentours, surtout lorsque l'UVE est isolée et éloignée de centres urbains. L'énergie n'est donc pas valorisée à 100 %. L'un des résultats proposés par Recov'Heat, le taux d'utilisation (équation 37), est un indicateur qui prend en compte cette réponse au besoin.

L'analyse sur les UVE montre la tendance à surestimer le potentiel énergétique des sources d'énergie fatale par le modèle Recov'Heat. Cette surestimation est principalement due au fait que le modèle calcule un potentiel maximum qui ne prend pas en compte plusieurs paramètres qui peuvent limiter la récupération. La non-prise en compte des besoins autour des UVE fausse les écarts entre l'énergie réellement valorisée et celle valorisable.

5.1.2. Validation du modèle sur eaux usées et data center

La récupération de chaleur sur les autres sources est une option plus récemment prise en compte dans les projets de réseaux de chaleur, les cas d'études sont donc moins nombreux. Le modèle est tout de même testé par rapport à deux cas français de récupération de chaleur issue d'eaux usées (à Nanterre et à Roquebrune-Cap-Martin) et de data centers (à Bailly Romainvilliers et Dijon).

Pour les eaux-usées, la donnée d'entrée principale du modèle Recov'Heat est le débit moyen de ces eaux. Ce dernier permet de constituer des profils journaliers aux pas horaires qui retranscrivent la variation du débit au cours du temps. La température des eaux usées provient de profils compilés dans l'état de l'art (Figure A-1, page 267). La zone géographique détermine le profil utilisé puisqu'il y a une influence entre température extérieure et celle des eaux usées. Pour la comparaison avec le cas de Nanterre, le profil de température est celui de la zone IDF (cf. Figure A-30, page 305, **ANNEXE 2.1**) tandis que le profil H3 est utilisé pour le cas de Roquebrune-Cap-Martin (Alpes-Maritimes).

A Nanterre (département 92), la chaleur des eaux usées est récupérée sur un réseau d'assainissement et redistribuée dans un réseau de chaleur basse température (65°C/50°C) qui alimente l'écoquartier Centre Sainte-Geneviève. Lors de la visite de l'écoquartier, organisée en 2016 dans le cadre des Visites Climat par l'ADEME³⁵, le débit moyen des eaux usées énoncé par les exploitants de la solution (appelée

³⁵ <http://www.visitesclimat-ademe-idf.fr/visite-7-ecole-a-energie-positive-a-nanterre/>

Degrés Bleus) est de 30 litres par seconde. Les données de production sont celles de 2016, partagées à travers une présentation du cas d'étude (Guyard, 2017).

Pour Roquebrune-Cap-Martin (département 06), les données sont partagées sur différentes plaquettes de présentation du projet de l'écoquartier Cap Azur (AFPG, 2014; Veolia Eau, 2014). Ce dernier est alimenté par une boucle d'eau tempérée, préchauffée par les calories des eaux usées d'une station d'épuration située à 500 mètres du quartier. Des pompes à chaleur au sein des sept bâtiments raccordés permettent de distribuer du chauffage et du froid pour la climatisation. Le débit moyen des eaux usées est de 25 litres par seconde.

Le Tableau 5-2 reprend ces données et affiche les résultats de la comparaison entre la production réelle d'énergie et la production proposée par le modèle Recov'Heat.

Tableau 5-2 Comparaison du modèle sur deux cas de récupération sur eaux usées

Cas d'étude	Débit Moyen	Energie thermique valorisée	Energie thermique estimée (Recov'Heat)	Ecart absolu	Ecart relatif
	L/s	MWh/an	MWh/an	MWh/an	%
Ecoquartier Centre Sainte-Geneviève	30	1492	1865	373	25 %
Ecoquartier Cap-Azur	25	1000	2416	1416	142 %

Pour le cas de l'écoquartier Centre Sainte-Geneviève, l'estimation est assez proche de la réalité, même si la quantité d'énergie calculée par le modèle Recov'Heat est supérieure à celle produite en réalité. Le potentiel estimé pour le second cas (écoquartier Cap-Azur) est largement supérieur à l'énergie consommée. L'explication est que les besoins du quartier sont peu élevés et que l'installation a été dimensionnée pour prélever l'énergie nécessaire. En effet, 100 % des besoins proviennent de la boucle d'eau tempérée, uniquement préchauffée par les eaux usées de la station d'épuration. Le taux d'EnR&R de la solution est de 75 % car l'électricité nécessaire pour le fonctionnement des pompes à chaleur de chaque bâtiment est soustraite de l'énergie produite (Veolia Eau, 2014).

La dernière comparaison est réalisée sur deux data centers français qui redistribuent la chaleur fatale extraite de leurs systèmes de refroidissement dans des réseaux de chaleur : le data center de Bailly-Romainvilliers et le data center de l'université de Bourgogne à Dijon. Les résultats sont repris dans le Tableau 5-3.

Le data center de Bailly-Romainvilliers (département 77) est connecté au réseau de chaleur de la ZAC du Prieuré, composé d'un centre nautique et de bâtiments tertiaires. La ZAC est aujourd'hui partiellement construite et d'autres constructions sont en cours (Hampikian, 2017a). Le Data center de Tier IV, appartenant à la société NATIXIS, est un bâtiment de 12 000 m² dont 25 % dédiés aux salles IT (EFFICACITY, 2017). Le projet d'aménagement étant toujours en cours, les exploitants de cette solution communiquent sur différents chiffres au niveau de la valorisation énergétique : actuellement, Dalkia récupère environ 20 GWh/an mais avec un potentiel de puissance extractible de 7,8 MW (Boye Petersen, 2018). Etant donné la disponibilité du data center, continue toute l'année (8760 heures), l'énergie extractible est de 68,3 GWh/an.

Le data center de 675 m² de l'université de Bourgogne à Dijon (département 21) distribue la chaleur issue des groupes froids nécessaires à la climatisation des salles IT (110 m²) au réseau de chauffage interne du campus, lui-même connecté au réseau de chaleur de la ville de Dijon. Ce data center de

TIER III est utilisée pour le stockage et traitement des données de toute l'université. En 2016, 1 130 MWh d'énergie fatale ont été récupérée sur le data center pour réchauffer les bâtiments du campus, après une rehausse de la température à 90°C par une PAC (Rito, 2016).

Tableau 5-3 Comparaison du modèle sur deux cas de récupération sur data center

Cas d'étude	Surface IT	Energie thermique valorisée	Energie thermique estimée (Recov'Heat)	Ecart absolu	Ecart relatif
	m ²	GWh/an	GWh/an	GWh/an	%
Bailly-Romainvilliers	3000	68,3	58,6	9,7	14 %
Université de Dijon	110	1,1	1,3	0,2	14 %

Les résultats obtenus par Recov'Heat pour les deux cas de data centers sont assez proche de l'énergie réellement valorisée, avec 14 % d'écart relatif pour chacun d'eux. Pour le cas de Bailly-Romainvilliers, Recov'Heat sous-estime le potentiel maximal annoncé précédemment. L'hypothèse sur ce décalage est que la densité énergétique des salles IT est supérieure à la valeur prise par défaut. Il s'agit d'un data center de TIER IV, la densité énergétique choisie est donc de 1 500 W/m², soit la valeur minimale pour ce TIER de data center (Tableau A-4, page 279).

Conclusion des travaux de validation du modèle Recov'Heat

De manière générale, les analyses comparatives réalisées ont montré que Recov'Heat propose un potentiel d'énergie fatale supérieur à l'énergie réellement valorisée. Plusieurs raisons justifient ce surdimensionnement. Dans plusieurs cas, l'énergie réellement valorisée correspond à l'énergie nécessaire pour répondre à des besoins thermiques définis, en interne ou via un réseau de chaleur. Le potentiel énergétique n'est alors pas valorisé à 100 %. De plus, Recov'Heat ne prend pas en compte d'éventuels arrêts d'activité, et donc de valorisation possible, liés à des opérations de maintenance ou de remplacement de matériel. Recov'Heat est un modèle générique qui fonctionne à partir d'hypothèses et de profils figés. Il ne peut donc pas retranscrire la réalité des projets avec exactitude. Le dimensionnement des éléments de valorisation dans Recov'Heat peut également provoquer un décalage entre calculs et réalité. En effet, Recov'Heat détermine seulement des puissances extractibles, les durées de fonctionnement à pleine puissance et définit les éléments pour extraire l'énergie (échangeur, PAC) mais n'étudie pas les configurations particulières de ces éléments (utilisation de plusieurs PAC pour une distribution séparée du chauffage et de l'ECS par exemple).

Cependant, les estimations obtenues sont valables ou présentent un décalage justifiable avec les projets déjà existants. L'outil permet donc de définir un ordre de grandeur fiable du potentiel d'énergie récupérable d'une source de chaleur fatale à partir d'un minimum de donnée sur cette source.

La section suivante relate une étude de cas réalisée avec le modèle Recov'Heat et qui intègre les besoins thermiques d'un quartier proche d'une source de chaleur fatale.

5.2. Etude de cas : récupération de chaleur sur entrepôt frigorifique

L'étude de cas traite de la récupération de chaleur sur les groupes froids d'un entrepôt frigorifique en Ile-de-France. Efficacity a réalisé une étude sur cet entrepôt frigorifique situé à Trappes (78). Leur démarche a été de rencontrer les exploitants de cet entrepôt, de visiter les installations et de récupérer une série de données, notamment de consommation électrique de l'entrepôt, pour ensuite déterminer un potentiel d'énergie récupérable. L'équipe de recherche a également visité un quartier résidentiel à proximité de l'entrepôt frigorifique et réalisé une étude spécifique de création d'un réseau de chaleur, alimenté en partie par la chaleur excédentaire de l'entrepôt frigorifique, pour alimenter le quartier. Dans cette section, certaines données de cette étude sont utilisées pour effectuer la simulation sur Recov'Heat.

Le premier paragraphe de cette section détaille l'acquisition des données d'entrée du modèle (5.2.1) et le second présente les résultats de simulation (5.2.2).

5.2.1. Données d'entrée

L'entrepôt frigorifique étudié appartient au groupe Sofrilog, l'un des leaders du secteur avec 42 entrepôts en France. Datant des années 80, l'entrepôt a une taille de 24 000 m² pour 130 000 m³ dont 93 000 m³ de chambre froide en froid négatif (à - 20°C). Dans l'étude réalisée par Efficacity, d'autres données ont été collectées, comme le fluide utilisé dans les groupes froids (NH₃), le nombre de salles des machines et la récupération interne opérée dans l'entrepôt pour éviter le gel des sols sous les chambres froides. Ces éléments ne sont pas utilisés dans l'étude Recov'Heat.

Le quartier résidentiel La Verrière est situé de l'autre côté d'une route départementale (D58), comme illustré sur la visualisation 3D obtenue sur Google Earth en Figure 5-2. Le quartier La Verrière est composé des dix bâtiments visibles à gauche de la route départementale tandis que l'entrepôt frigorifique correspond au groupement d'édifices situés à droite de l'illustration.



Figure 5-2 Vue générale du cas d'étude

Dans le cadre de la détermination des besoins thermiques du quartier via le premier module de Recov'Heat, l'objectif est d'obtenir les surfaces et usages des dix bâtiments qui composent ce quartier.

Il s'agit d'un quartier résidentiel où les dix bâtiments sont exclusivement des logements collectifs construits dans les années 1980. La surface des bâtiments est obtenue grâce à l'outil en ligne Géoportail³⁶. Ce dernier permet d'estimer la surface des toitures de chaque bâtiment. Le nombre d'étages par bâtiment est déterminé à la main, grâce au mode « Street View » sous l'application en ligne Google Map. Le Tableau 5-4 résume les surfaces de chaque bâtiment, estimées en multipliant simplement le nombre d'étages et la surface de toiture des bâtiments.

Tableau 5-4 Surface des bâtiments du cas d'étude

Bâtiment	Surface toiture (m ²)	Nombre d'étages	Surface bâtiment (m ²)
1	560	9	5040
2	360	13	4680
3	630	10	6300
4	360	13	4680
5	540	9	4860
6	360	13	4680
7	360	13	4680
8	580	10	5800
9	360	12	4320
10	360	13	4680
TOTAL			49720

³⁶ <https://www.geoportail.gouv.fr/>

La Figure 5-3 représente les besoins thermiques du quartier au pas horaire sur année et la monotone des puissances, simulés sur Recov'Heat. Une monotone de puissance représente le nombre d'heures (sur une année) au cours desquelles une puissance est appelée. Au total, ces besoins sont évalués à 7,3 GWh/an, dont 77 % pour le chauffage et 23 % pour l'ECS. Pour rappel, l'approche Recov'Heat néglige les pertes de distributions (dans un éventuel réseau et en interne dans les bâtiments), et n'exclut pas les zones communes des bâtiments, non concernés par des besoins de chauffage et d'ECS.

Une hypothèse est prise sur la température de distribution de la chaleur : 80°C selon le Tableau 1-4 (page 50) avec des radiateurs HT pour émetteurs de chaleur dans les logements. Cette température correspond à une température de dimensionnement à température extérieure minimale (- 10°C). Une loi d'eau³⁷ permet alors de calculer la température de distribution de chaleur (assimilable à la température aller d'un réseau de chaleur) en fonction de la température extérieure. La température minimale de distribution est fixée à 65 °C, afin de pouvoir distribuer de l'ECS. Figure 5-4 résume la température retenue en fonction de la température extérieure.

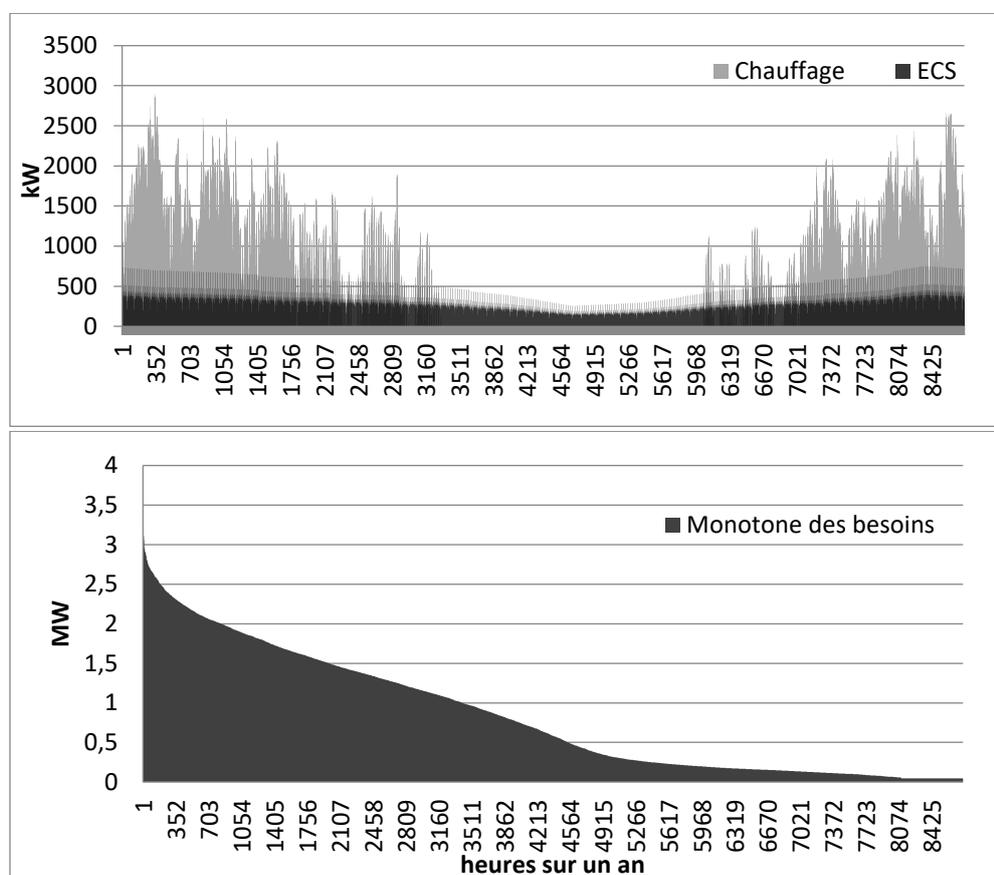


Figure 5-3 Besoins thermique du quartier sur une année et monotone des besoins

³⁷ Une loi d'eau (ou courbe de chauffe) est une courbe qui lie la température extérieure avec la température de distribution du chauffage à partir de deux points : la température de distribution lorsque la température est la plus basse sur la zone géographique considérée, et la température jusqu'à laquelle il est nécessaire de se chauffer

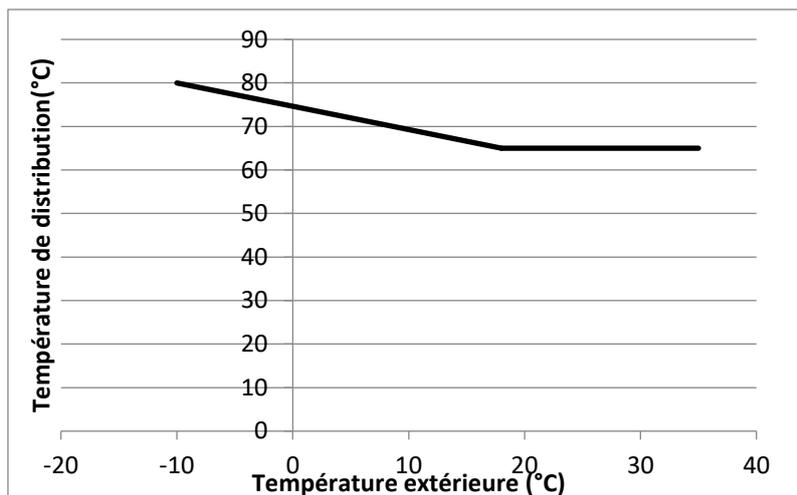


Figure 5-4 Hypothèses sur la température de distribution de la chaleur

La dernière entrée manquante à la simulation sur Recov'Heat est la distance entre la source fatale et le quartier pouvant bénéficier de la chaleur. Elle est évaluée à 500 mètres par une mesure faite sur un logiciel de système d'information géographique (QGIS). Le Tableau 5-5 rappelle toutes les données d'entrée permettant le lancement de la simulation de Recov'Heat.

Tableau 5-5 Données d'entrée du modèle Recov'Heat

Données d'entrée du modèle Recov'Heat	Valeur
Volume Chambre froide	93 000 m ³
Température chambre froide	Froid négatif (- 20 °C)
Température départ	80 °C
Distance source - quartier	500 m
Caractéristiques des bâtiments du quartier	Construction 1980, surfaces Tableau 5-4

5.2.2. Résultats de la simulation

Pour rappel, la simulation consiste au calcul heure par heure sur une année de la puissance extractible, valorisable et consommable. Le dimensionnement des éléments de valorisation est réalisé de façon à valoriser une quantité maximale d'énergie fatale. L'énergie fatale issue d'un entrepôt frigorifique correspond à l'énergie récupérable sur le condenseur d'un groupe froid. La chaleur est à basse température, environ 30°C et nécessite donc l'apport d'une PAC pour être rehaussée à une température d'usage pour le chauffage et l'ECS. Les résultats de simulation sont des indicateurs énergétiques (Tableau 5-6), économiques Tableau 5-7, et environnementaux (Tableau 5-9).

Tableau 5-6 Indicateurs énergétiques du cas d'étude

Indicateurs énergétiques	Définitions	Valeurs	
		Sortie PAC	Energie fatale
Energie distribuable	Quantité d'énergie fatale utilisable après valorisation et distribution – équation (33)	16 891 MWh/an	12 151 MWh/an
Energie consommable	Quantité d'énergie fatale qui répond aux besoins du quartier – équations (35) et (36)	6 104 MWh/an	4 322 MWh/an
Taux de couverture	Part de l'énergie en sortie de PAC sur les besoins du quartier – équation (38)	86 %	
Taux EnR&R (%)	Taux de couverture après soustraction de l'électricité consommée – équation (40)	60,6 %	
Taux d'utilisation	Part des besoins annuels couverts par l'énergie fatale – équation (37)	36 %	
Puissance PAC	Equation (32)	2 626 kW et 1 313 kW	
COP PAC	Performance de la PAC – équation (30)	3,59	

Le premier résultat du tableau (sortie PAC) indique que la quantité d'énergie fatale rejetée par l'entrepôt frigorifique est supérieure aux besoins thermiques du quartier de La Verrière (16,9 GWh/an contre 7,3 GWh/an). Cette valeur correspond à l'énergie après augmentation de sa température jusqu'à 65°C/80 °C par des PAC. L'énergie fatale réellement valorisable correspond donc à cette valeur soustraite de la consommation électrique théorique (6,1 GWh/an), ce qui donne 12,2 GWh/an valorisable.

Le second résultat correspond à l'énergie réellement consommable en adéquation avec les besoins du quartier dans le temps. 6,1 GWh/an en sortie de PAC sont donc consommables, ce qui fait 4,3 GWh/an d'énergie fatale. Le taux de couverture des besoins par la chaleur fatale est donc de 86 %, soit 61 % d'EnR&R lorsque l'électricité nécessaire au fonctionnement des PAC est soustraite. Sur la Figure 5-5, qui superpose les besoins thermiques et l'énergie fatale sur une année de Janvier à Décembre, on n'observe que c'est seulement en période hivernale que l'énergie fatale ne peut pas répondre à la totalité des besoins du quartier. La consommation saisonnière de chauffage explique aussi que le taux d'utilisation de la source soit assez bas (36 %). L'énergie rejetée en été n'est utilisable que pour l'ECS.

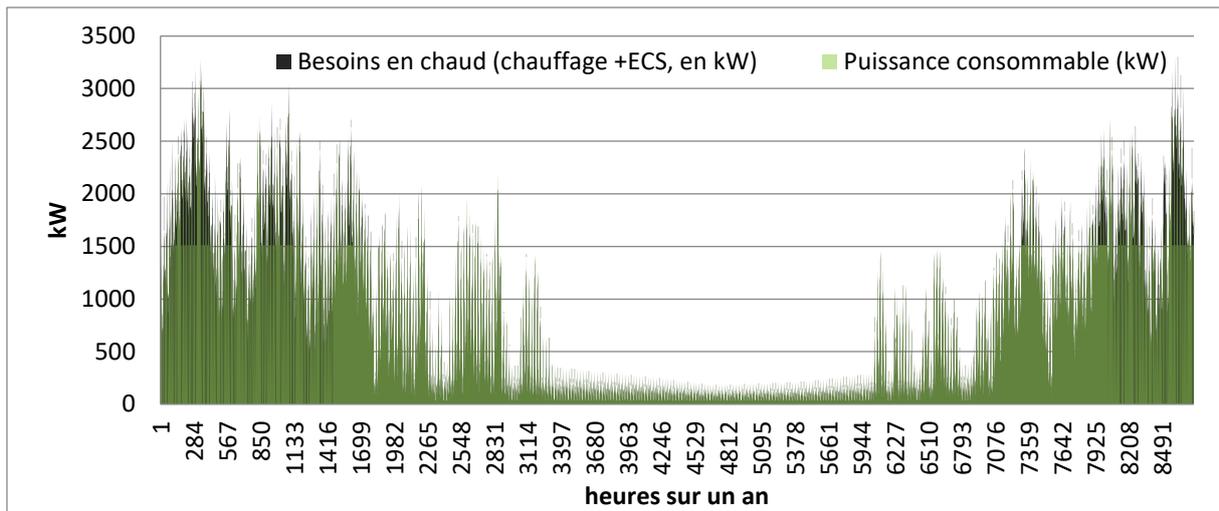


Figure 5-5 Superposition des besoins en puissance et de la puissance fatale consommable sur une année

Etant donné le profil intermittent du rejet d'énergie fatale des groupes froids de l'entrepôt frigorifique (cf. Figure 4-12, page 140), qui alterne entre une puissance maximale aux heures creuses et une puissance moyenne (fixée à la moitié de la puissance maximale) aux heures pleines, les puissances de deux PAC sont estimées. Il s'agit ici des puissances aux condenseurs des PAC, calculées pour une valorisation maximale d'énergie : 2626 kW et 1313 kW. La monotone des puissances consommables (Figure 5-6) montre que ce dimensionnement n'est pas optimal. En effet, les PAC sont surdimensionnées puisque le nombre d'heures où la puissance disponible est au-dessus de 1 500 kW est inférieur à 1 000 (970 heures), soit une durée considérée comme faible. Dans l'étude réalisée par Efficacity, un taux d'EnR&R de 51 % (- 10 % que Recov'Heat) est obtenu avec 3 PAC en parallèle pour une puissance installée de 1 674 kW, soit 2,4 fois moins que dans Recov'Heat.

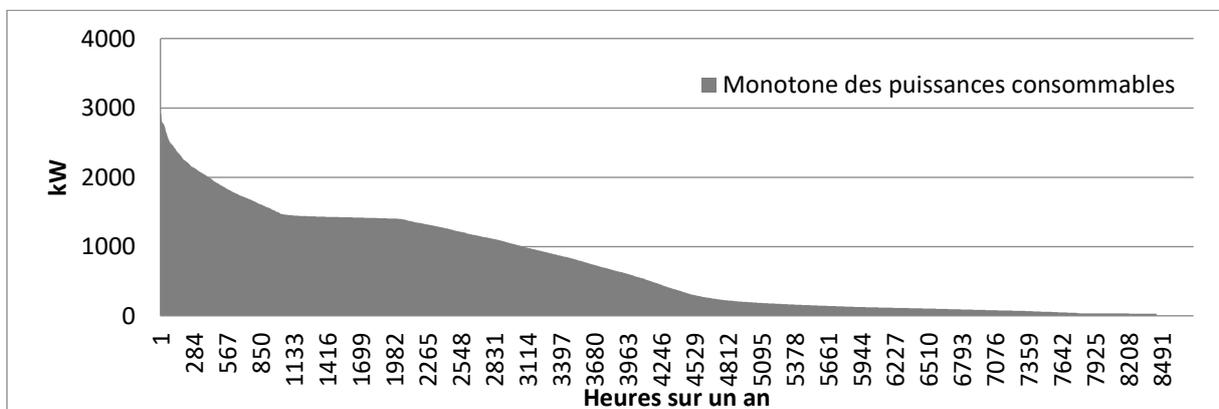


Figure 5-6 Monotone des puissances consommables

Enfin, le COP moyen sur l'année est de 3,59. En saison de chauffe, le COP est de 3,45 et passe à 3,73 lorsque les besoins thermiques ne correspondent qu'aux besoins d'ECS à 65°C, en été. La valeur minimale d'un COP pertinent techniquement est d'environ 3³⁸. Cependant, les valeurs du COP dans ce cas sont légèrement insuffisantes pour bénéficier d'aide au financement par le Fonds chaleur mis en place par l'ADEME (2012), qui conditionne son appui à partir d'un COP de 4 pour ce genre de solution.

³⁸ 1 kWh d'électricité = 2,58 kWh en énergie finale en France. Si le COP est sous cette valeur de 2,58, la PAC consomme plus d'électricité qu'un simple chauffage électrique.

La valeur relativement faible du COP s'explique dans ce cas par la température de départ (80°C) élevée par rapport à la température de distribution du chauffage de bâtiments plus récents.

Par analyse des indicateurs énergétiques tirés de la simulation, la solution est donc viable techniquement car elle permet de répondre à 86 % des besoins pour un taux d'EnR&R de 61 %. La différence de température entre la source de chaleur fatale et la température d'usage des bâtiments du cas d'étude est tout de même élevée, ce qui provoque un COP des PAC assez faible.

Tableau 5-7 Indicateurs économiques du cas d'étude

Indicateurs économiques	Valeur
Coûts d'investissements	2 275 784 €
Coût global actualisé sur 20 ans	11 981 880 €
Coût d'exploitation annuel	720 634 €/an
LCOE	52,2 €/MWh

Le coût d'investissement correspond à la somme des investissements pour un échangeur (en €/MWh), les PAC (en €/kW), le réseau de récupération qui achemine la chaleur jusqu'au quartier (€/ml) et une sous-station d'échange qui contient l'échangeur et les PAC (€/kW). Le dernier poste d'investissement est celui lié à la mise en œuvre de projet et qui contient les études préalables, assurances, AMO et MOE. Il correspond à 15 % de l'investissement sur les autres postes. Tous les coûts unitaires et les hypothèses économiques sont présentés dans l'ANNEXE 2.4.

L'indicateur économique le plus interprétable ici est le LCOE, qui permet de comparer le coût de production de l'énergie fatale à d'autres sources d'énergies, renouvelables ou fossiles. Il se calcule à partir du coût global actualisé sur une période de 20 ans et prend en compte le coût annuel d'exploitation (équation (41)). Ce coût d'exploitation est la somme de l'électricité consommée pour le fonctionnement du système (ici exclusivement à l'électricité aux compresseurs des PAC) et de la maintenance annuelle nécessaire au fonctionnement des échangeurs et PAC. Le coût de maintenance est fixé à 15 % de l'investissement total.

Le LCOE calculé ici est de 52,2 €/kWh. Il est important de rappeler que la valeur de ce coût de production est une estimation qui ne prend pas en compte un éventuel coût de revente de l'énergie par l'entrepôt frigorifique. Sa valeur indique que la récupération d'énergie fatale est compétitive par rapport à d'autres énergies renouvelables, dont les LCOE oscillent entre 54 €/MWh et 102 €/MWh pour une puissance installée équivalente et en prenant le même taux d'actualisation Tableau 5-8. Le LCOE le plus bas est celui du gaz naturel mais cette source d'énergie est carbonée.

Tableau 5-8 LCOE de différentes énergies (fossiles et EnR&R) pour le collectif (ADEME, 2016a)

Source d'énergie	LCOE (€/MWh)
Biomasse collective	83
Biomasse industrielle	54
Solaire thermique (zone Nord)	102
Solaire thermique (zone Sud)	84
PAC géothermique sur sondes	91
PAC géothermique sur aquifères	81
Géothermie profonde	82
Gaz naturel	48
Cas d'étude : entrepôt frigorifique	52

Enfin, le Tableau 5-9 rassemble les indicateurs environnementaux de la solution. Le CO₂ émis (387 tonnes/an) est dû à la consommation d'électricité seulement, l'énergie fatale étant considérée comme 100 % décarbonée. Pour une même quantité que l'énergie fatale distribuée, l'émission de CO₂ d'une solution au gaz naturel, solution la plus courante, s'élèverait à 1454 tonnes/an. Enfin, les derniers indicateurs sont les coûts du CO₂ émis et les économies réalisées sur ce CO₂ comparé à une solution au gaz naturel.

Tableau 5-9 Indicateurs environnementaux du cas d'étude

Indicateurs environnementaux	Valeur
CO ₂ émis	387 tonnes/an
CO ₂ évité (tonnes/an)	1 068 tonnes/an
Coût du CO ₂ émis sur 20 ans	113 746 €
Economie sur CO ₂ évités sur 20 ans	314 179 €

5.2.3. Conclusion sur l'étude de cas

Ces résultats montrent la pertinence de la récupération de chaleur sur les groupes froids de l'entrepôt frigorifique pour alimenter le quartier résidentiel situé à 500 mètres de l'entrepôt. En effet, l'énergie valorisable est supérieure aux besoins thermiques (chauffage et ECS) de ce quartier. En comparant au pas horaire les besoins et le rejet d'énergie fatale, environ 36 % de l'énergie fatale est réellement consommable. Si toute cette énergie basse température est récupérée via des PAC, le taux de couverture du quartier par cette solution de récupération est de 86 %, ce qui donne un taux d'EnR&R de 61 % en enlevant la part d'électricité consommée. Ce scénario est possible avec un dimensionnement des PAC pas forcément opportun au vue des heures de fonctionnement à pleine puissance et avec un COP moyen évalué à 3,6. Ce dernier est plutôt faible, comparé aux COP minimum exigés pour obtenir une aide financière du Fonds Chaleur, fixé entre 3,7 et 4 selon la source froide (ADEME, 2012a).

Du point de vue économique, le LCOE de cette solution est compétitif par rapport à d'autres énergies. Le gaz naturel reste l'énergie aux coûts les moins élevés mais cette énergie est carbonée et l'évolution de son coût est incertaine et fluctuante. L'évolution du marché du gaz et la hausse des taxes pourraient rapidement augmenter les coûts des solutions au gaz naturel. Le LCOE représente le coût de production de la chaleur, ou ici, le coût de récupération. Il ne prend pas en compte un éventuel tarif de revente de l'énergie rejetée comme c'est le cas pour les UVE (Megret et al., 2011). A noter que les coûts calculés dans cette simulation (investissements, exploitation, maintenance) ne prennent pas en compte les coûts d'une chaudière d'appoint pour répondre au reste des besoins thermiques, ou des coûts autres que ceux nécessaires à la récupération et la distribution de la chaleur fatale.

Enfin, l'analyse environnementale montre un intérêt certain à la valorisation de la chaleur fatale. Le CO₂ émis par rapport à une solution au gaz et pour la même quantité d'énergie produite, est environ presque quatre fois moins élevé. Une fois encore, l'appoint, très souvent au gaz naturel dans les projets de réseaux de chaleur, n'est pas pris en compte dans cette analyse.

5.3. Conclusion du chapitre 5

A partir d'une série de données facilement récupérables, Recov'Heat permet donc d'effectuer des études de préfaisabilité génériques où la pertinence technique, économique et environnementale sont estimées. La comparaison des résultats obtenus avec des projets réels montrent que, malgré une surestimation justifiable, l'outil est pertinent et les indicateurs en sortie présentent des ordres de grandeurs en adéquation avec la réalité. Concernant l'étude de cas, et malgré différents résultats qui tendent à valider l'intérêt de la récupération de chaleur, plusieurs limites du modèle Recov'Heat ne sont pas négligeables et feront l'objet d'améliorations dans le futur :

- Le dimensionnement des PAC n'est pas optimal. Il est réalisé de façon à extraire tout le potentiel énergétique de la source fatale étudiée. Cette méthode est limitante techniquement puisqu'en plus de proposer une puissance installée trop élevée, elle ne prend pas en compte le fonctionnement dégradé des PAC (charge partiel et nombre d'heures à puissance maximale faible, cycles marche/arrêt) qui réduit leurs performances (symbolisé par le COP).
- Le COP calculé ne prend pas en compte les consommations électriques auxiliaires (principalement les pompes de l'évaporateur et condenseur des PAC), non-négligeables et qui déprécient le COP des PAC, déjà assez bas. En plus d'une performance réduite, l'effet est aussi économique, avec une consommation électrique accrue, et par conséquent environnementale.

Ces limites mettent en lumière la fonction de Recov'Heat, comme outil d'étude de préfaisabilité qui détermine un potentiel énergétique d'une source de chaleur fatale et l'apport de cette énergie pour répondre aux besoins thermiques d'un quartier. La simplicité d'utilisation de cet outil permet également d'effectuer des analyses de sensibilité et ainsi d'obtenir les paramètres qui ont un fort impact, technique et économique, sur la viabilité du système. Ainsi, plusieurs simulations ont été réalisées à partir du cas d'étude présenté dans ce chapitre, en faisant varier la distance entre la source et les besoins, la température de départ et la zone géographique. Les résultats, présentés en ANNEXE 2.5, montrent qu'une plus longue distance entre source et besoins entrainerait essentiellement une augmentation des coûts (augmentation du LCOE). Les changements de la température de départ et de la température d'entreposage de l'entrepôt frigorifique auraient des conséquences sur les performances du système avec la modification du COP des PAC et du taux d'EnR&R.

Cependant, le fonctionnement générique, qui repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices, ne permet pas d'étudier l'intégration d'une source fatale dans un réseau de chaleur avec un niveau de détail suffisamment précis pour affirmer la faisabilité d'un projet. Cette question dépend de nombreux paramètres et est réalisable par une modélisation fine difficilement généralisable. Le chapitre suivant reprend quelques-uns de ces paramètres afin d'illustrer dans quels cas et sous quelles conditions une source de chaleur fatale peut être intégrée à un réseau de chaleur (architectures de réseaux, performances réelles des systèmes).

CHAPITRE 6 : CONDITIONS D'INTEGRATION DE SOURCES FATALES DANS DES RESEAUX DE CHALEUR

Le modèle Recov'Heat permet d'évaluer les conditions techniques, économiques et environnementales de valorisation d'une source urbaine de chaleur fatale pour répondre aux besoins thermiques (chauffage et ECS) des bâtiments d'un territoire donné. Le réseau de chaleur est un système qui peut valoriser et distribuer cette énergie. Dans le modèle Recov'Heat, plusieurs paramètres techniques sont pris en compte pour examiner la faisabilité de cette récupération mais certains aspects sont simplifiés et négligés. Ils sont pourtant indispensables pour mesurer plus précisément les performances du système global de récupération et de distribution. Ce chapitre approfondit deux aspects abordés dans Recov'Heat mais qui nécessitent un approfondissement :

- La compatibilité en températures et intégration de la chaleur fatale dans le réseau de distribution de chaleur : cette notion est abordée de manière simplifiée dans Recov'Heat où la température d'usage (dite température de départ) est déterminée en fonction des caractéristiques des bâtiments dimensionnés par l'utilisateur. En réalité, les sources de chaleur s'intègrent depuis les canalisations retour du réseau afin de réchauffer l'eau en fin de boucle. Ce montage entraîne une modification des bilans énergétiques ainsi que des performances globales du système (6.1.1 Intégration dans le retour de la boucle et influence des régimes de température). Ces modifications posent la question de l'architecture des réseaux de chaleur les plus favorables afin de maximiser l'intégration de sources de chaleur fatale (6.1.2 Architectures de réseaux de chaleur adaptées à l'intégration de sources urbaines d'énergie fatale).
- La performance des PAC : les sources de chaleur fatale étudiées dans ces recherches sont majoritairement à basse température et nécessitent donc des PAC pour répondre aux besoins thermiques des bâtiments. Dans Recov'Heat, les performances des PAC sont calculées avec une approche en température. Cette méthode ne prend pas en compte des paramètres qui peuvent affecter la performance du système, à savoir les consommations auxiliaires et le fonctionnement à charge partielle. Il est important de considérer ces éléments surtout dans le contexte de certaines architectures de réseaux de chaleur (comme la boucle d'eau tempérée), où la consommation d'électricité prend une part plus importante que sur des réseaux aux architectures plus classiques (6.2 Performances des pompes à chaleur).

6.1. Compatibilité en températures et architectures de réseaux de chaleur adaptés

Le réseau de chaleur est une boucle fermée où les sources d'énergies qui l'alimentent réchauffent les canalisations « retour » avant que les canalisations « aller » distribuent la chaleur à la température de départ fixée. Dans le cas de l'utilisation de sources basses températures, comme c'est le cas pour certaines sources de chaleur fatale étudiées ici, une question se pose sur la température à laquelle la PAC doit distribuer l'énergie pour une intégration dans un réseau de chaleur avec les meilleures performances possibles. L'analyse menée dans le prochain paragraphe (6.1.1) met en lumière l'influence que peut avoir le choix de la température au condenseur de la PAC sur les performances globales d'un système de récupération de chaleur fatale.

Les températures mises en jeu dans un système de récupération de chaleur fatale peuvent être des paramètres limitants dans le cadre d'une valorisation dans un chauffage urbain. Ainsi, les réseaux de chaleur basse température sont naturellement plus compatibles avec les sources fatales urbaines étudiées (sauf pour les UVE et les verreries, déjà à hautes températures). Comme vu dans la section « Nouvelle génération de réseaux de chaleur » (2.1.2), les nouvelles générations de réseaux de chaleur présentent des architectures innovantes, intégrant plusieurs sources de façon décentralisée ou fonctionnant à très basses températures. La section 6.1.2 revient sur les architectures de réseaux compatibles avec les sources urbaines de chaleur fatale étudiées.

6.1.1. Intégration dans le retour de la boucle et influence des régimes de température

La description des sources urbaines de chaleur fatale montre que les sources situées dans les zones les plus denses (eaux usées, data center, etc.) sont à basse température (entre 10°C et 35°C environ). Leur valorisation exige donc des PAC pour distribuer de l'énergie à une température qui convient aux usages du chauffage et de l'ECS. Dans Recov'Heat, une simplification sur la compatibilité en température entre l'usage (température de départ) et la température à laquelle l'énergie fatale doit être réhaussée par une PAC est faite : cette température de départ, déterminée en fonction de l'âge des bâtiments est égale à la température de sortie des PAC. Cette hypothèse peut provoquer un écart de température important entre l'évaporateur (l'entrée) et le condenseur (la sortie) de la PAC et baisser sa performance, le COP. En effet, un moyen de calculer ce COP est d'utiliser la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur (équation 29).

Dans le cas probable où la source urbaine d'énergie fatale ne couvre pas la totalité des besoins d'un quartier, un appoint est utilisé. Le plus courant est d'ajouter une chaudière à gaz (solution économique et technologie maîtrisée). Une possibilité est alors de réduire l'écart de température de sortie de la PAC et d'utiliser plus d'appoint pour augmenter cette température jusqu'à la température de départ requise. Plusieurs montages existent (plusieurs chaufferies décentralisées, plusieurs sources en une seule chaufferie, etc.), la Figure 6-1 illustre un exemple : une chaufferie centralisée avec une PAC distribue l'énergie en sortie de condenseur à une température, T_{cond} . Le mélange entre le retour du réseau de chaleur et la sortie de la PAC, la température ($T_{mélange}$), est de 60 °C. L'appoint gaz, qui complète la production d'énergie, réhausse à 80 °C, soit la température de départ du réseau.

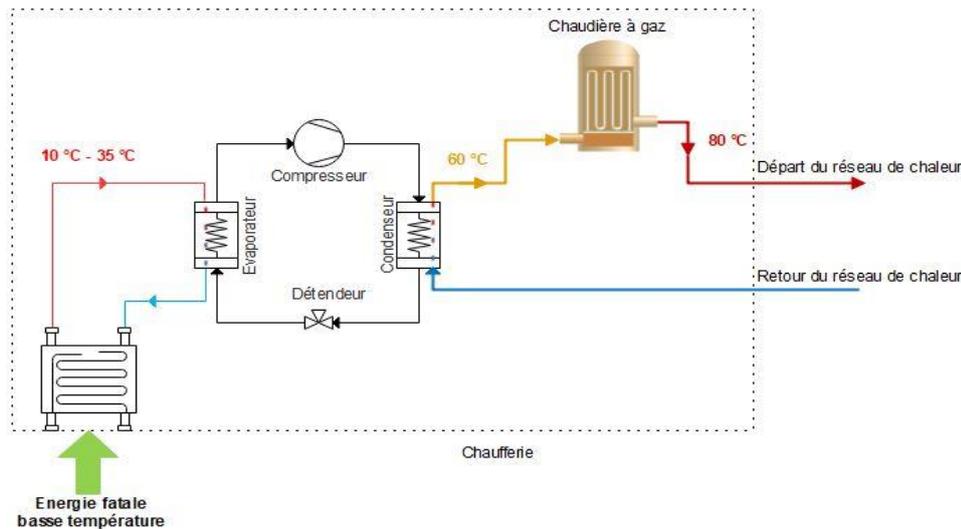


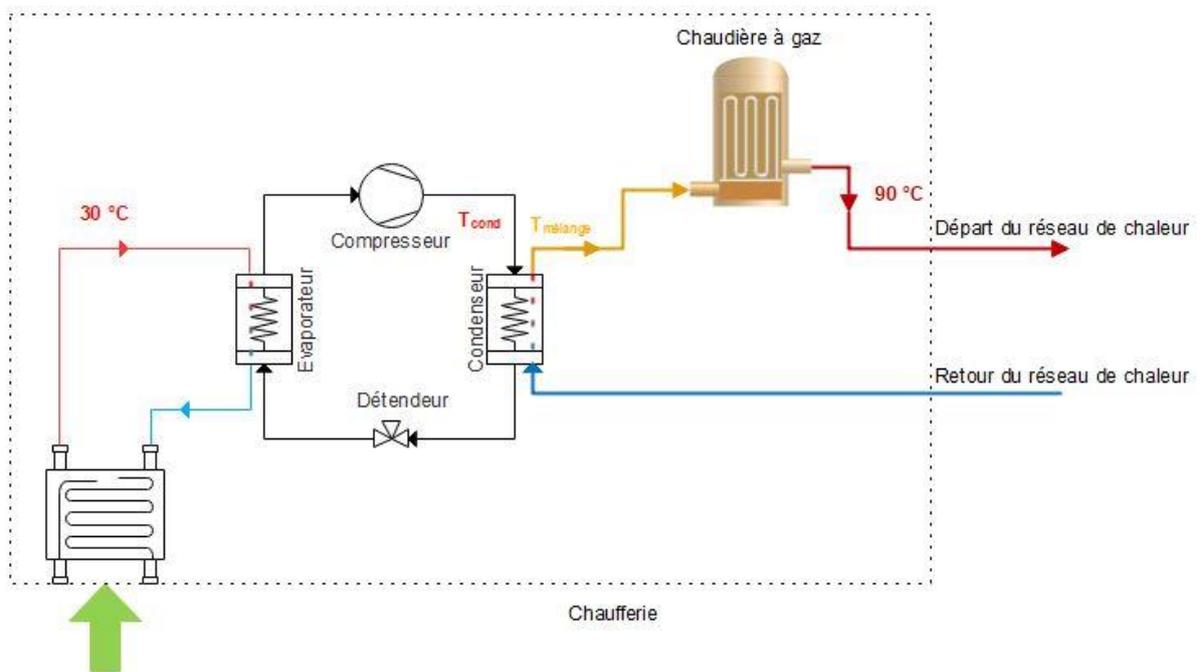
Figure 6-1 Exemple de montage d'une chaufferie de réseau de chaleur (source : auteur)

Cette alternative n'est pas donc pas intégrée aux algorithmes de Recov'Heat. Le prochain paragraphe présente les résultats d'une analyse réalisée sur l'influence de la baisse de la température au niveau du condenseur sur les performances énergétiques du système (COP des PAC, taux d'EnR&R, électricité consommée, appoint gaz).

Un cas d'étude fictif est imaginé pour cette étude, largement inspiré du cas d'étude du chapitre 5. Ainsi, les mêmes besoins thermiques (chauffage et ECS) sont repris. Il est supposé que la température de départ du réseau de chaleur soit de 90 °C lorsque la température extérieure est de -10°C. La température retour est alors de 60 °C et ces températures varient en fonction de la température extérieure d'une loi d'eau. L'hypothèse sur la chaleur fatale (issu du même entrepôt frigorifique que dans le cas d'étude) est de prendre une température fixe de 30°C et le même potentiel énergétique (quantité d'énergie récupérable et variation de la disponibilité) que dans le cas d'étude du chapitre 5.

L'objectif est d'analyser la variation du mix énergétique, du taux d'EnR&R, de la consommation électrique et de gaz en appoint, et des coûts associés en fonction de différentes températures au condenseur. Le schéma de la Figure 6-2 illustre le fonctionnement du système étudié : la température au condenseur de la PAC (T_{cond}) influe directement sur la température de mélange entre le retour du réseau de chaleur et la sortie de la PAC ($T_{mélange}$). Un bilan énergétique (quantité d'énergie en sortie de PAC, quantité d'énergie pour l'appoint, puissance des PAC), environnemental (CO_2 émis) et économique (coûts liés au gaz et à l'électricité consommée) permet de comparer les différents cas.

Les températures prises au condenseur sont 89 °C (température maximale de départ du réseau selon la loi d'eau), 60 °C (température maximale retour du réseau), et deux températures intermédiaires (75 °C et 70 °C).



Energie fatale issue d'un entrepôt frigorifique

Figure 6-2 Montage utilisé pour l'étude de l'influence de la température au niveau condenseur sur les performances du système

Le Tableau 6-1 expose les résultats de cette simulation, réalisée sur un an : la puissance des PAC et l'énergie délivrée, le COP, la quantité d'électricité consommée par les PAC, la quantité de gaz en appoint, le taux d'EnR&R de la solution. Ces résultats permettent de calculer le CO₂ émis par le système et les coûts annuels pour l'énergie primaire consommée (gaz et électricité).

L'énergie délivrée en sortie de PAC est calculée à partir de l'énergie récupérable (équation 31). Une hypothèse est prise pour maintenir une température de départ conforme malgré la baisse de la température au condenseur de la PAC : l'énergie en sortie de PAC (au condenseur) peut répondre au maximum à 90 % des besoins. Ainsi, un appoint gaz sera toujours présent pour assurer une température en sortie de chaufferie égale à la température de départ souhaitée, même lorsque la quantité d'énergie fatale est théoriquement suffisante pour répondre à 100 % des besoins.

Dans un premier temps, il n'y a pas de contrainte sur la variation des débits engendrée par le changement de température. Ce paramètre est pris en compte dans une seconde simulation (résultats Figure 6-4). L'appoint gaz correspond à la différence entre les besoins thermiques et l'énergie en sortie de PAC. Les calculs des COP et taux d'EnR&R sont les mêmes que dans Recov'Heat. Le CO₂ émis est calculé à partir des données unitaires de Recov'Heat, tout comme les coûts annuels pour le gaz et l'électricité.

Tableau 6-1 Influence de la température au condenseur d'une PAC sur la performance d'un système de récupération de chaleur basse température

	Températures Départ/retour/ condenseur	Puissance PAC	Energie sortie PAC	COP	Energie compresseur	EnR&R	Appoint gaz	Part EnR&R
Unité	°C	kW	MWh/an	S.U.	MWh/an	MWh/an	MWh/an	%
Cas 1	89/60/89	2 556	5 515	3,4	1 633	3 881	1 616	54,4
Cas 2	89/60/75	2 351	5 412	4,3	1 272	4 140	1 718	58,1
Cas 3	89/60/70	2 283	5 371	4,7	1 138	4 233	1 759	59,4
Cas 4	89/60/60	2 151	5 283	6,1	865	4 418	1 848	62,0

	Températures Départ/retour/ condenseur	CO ₂ émis	Coût annuel gaz	Coût annuel électricité	Coût annuel énergie primaire
Unité	°C	t/MWh	k€/an	k€/an	k€/an
Cas 1	89/60/89	739	72,7	130,7	203,4
Cas 2	89/60/75	685	77,3	101,6	178,9
Cas 3	89/60/70	665	79,2	91,1	170,3
Cas 4	89/60/60	627	83,1	69,2	152,3

La Figure 6-3 présente l'influence de la température au condenseur sur les indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux de la solution. La baisse de la température au condenseur augmente logiquement le COP des PAC (colonne 5 du Tableau 6-1). La consommation électrique (apport électrique dans le graphique a) de la Figure 6-3) est donc diminuée. Grâce à une meilleure performance, la PAC valorise plus d'énergie fatale mais il est nécessaire d'augmenter la quantité de gaz pour répondre aux besoins. Néanmoins, le taux d'EnR&R augmente lorsque cette température au condenseur baisse comme le montre le graphique b).

Le graphique c) montre que, malgré l'augmentation de l'appoint, la quantité de CO₂ émis est plus faible avec la baisse de la température au condenseur, grâce à la baisse de l'émission associée à la consommation électrique.

Enfin, le graphique d) exprime les coûts annuels liés à l'utilisation d'électricité et de gaz pour le fonctionnement du système. La baisse de la température au condenseur entraîne une diminution logique des coûts relatifs à la consommation d'électricité. Cette diminution est plus importante que l'augmentation des coûts liés au gaz. Plus la température au condenseur baisse, plus les coûts annuels en énergie primaire sont donc limités. Restreindre la température au condenseur est également intéressant pour limiter l'investissement de la PAC. En effet, le coût d'investissement d'une PAC dépend de sa puissance, or la colonne 3 du Tableau 6-1 montre que la puissance de la PAC est réduite lors de la baisse de la température au condenseur.

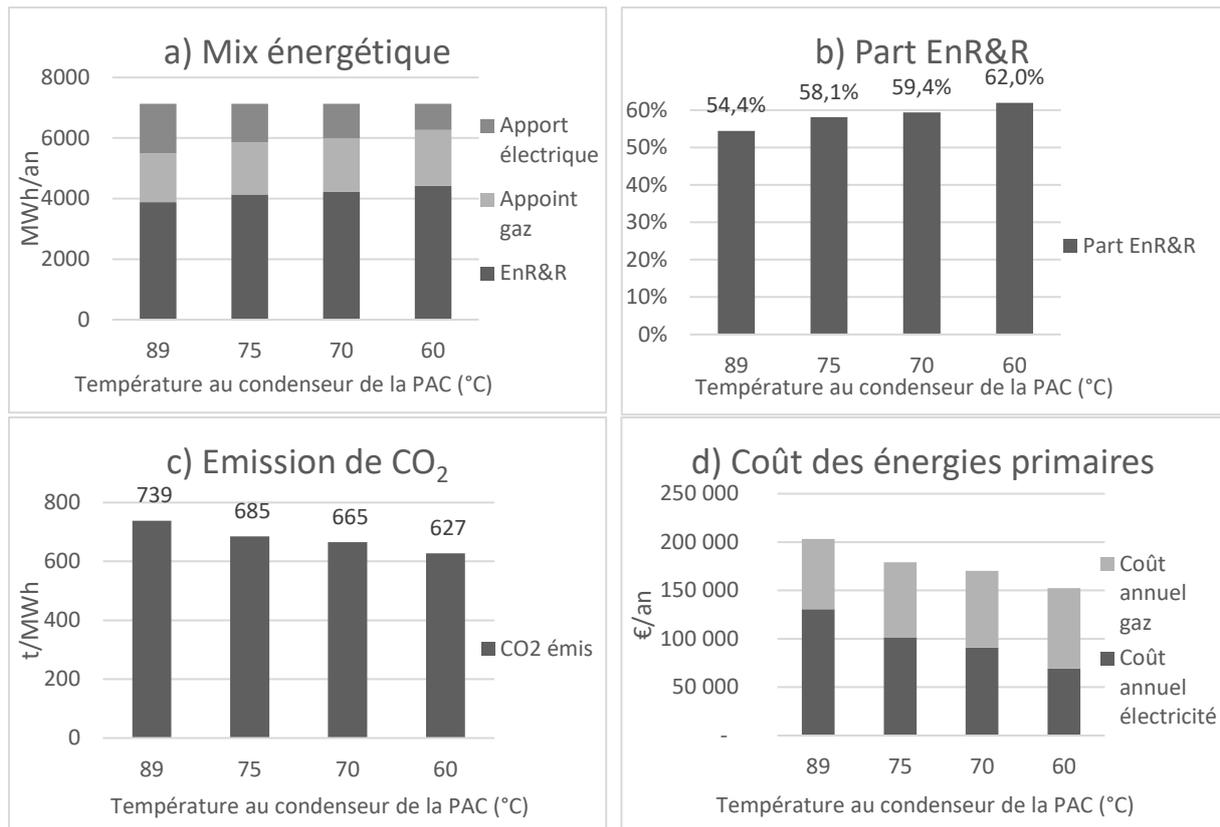


Figure 6-3 Influence de la température au condenseur d'une PAC sur le mix énergétique, la part EnR&R de la solution, les émissions de CO₂ associées et le coût annuel en énergies primaires

L'analyse montre donc que la baisse de la température au condenseur d'une PAC provoque une hausse du taux d'EnR&R pour un système de récupération d'énergie fatale basse température, en même temps qu'une augmentation de la quantité d'appoint gaz à fournir. Diminuer la température au condenseur permet d'obtenir un meilleur bilan environnemental (émission de CO₂) et économique (coût annuel en gaz et électricité). Ces résultats s'expliquent par les performances accrues de la PAC lors de la baisse de la température au condenseur qui engendrent une baisse de la consommation électrique.

Pour rappel, cette analyse a été effectuée sans déterminer de limite sur les débits de l'eau circulant dans les diverses canalisations. Or, ces débits sont liés à la puissance et aux régimes de températures, selon l'équation 1, rappelée ici, équation (45), avec P la puissance, Q_m le débit, C_p la chaleur massique de l'eau qui est une constante, et ΔT la différence de température entre le fluide aller et retour. En abaissant ΔT , il faut donc augmenter le débit Q_m pour distribuer la même puissance. L'intégration de l'énergie fatale basse température dans un réseau de chaleur grâce à une PAC peut donc être limitée par des débits à ne pas dépasser (plus le débit est élevé, plus les diamètres des canalisations augmentent ce qui peut poser des problèmes de coûts et de place). Pour une même puissance à fournir, une baisse de la température au condenseur entraîne donc une augmentation du débit en sortie de PAC.

$$(45) P = Q_m * C_p * \Delta T$$

Une seconde étude est réalisée, où les paramètres sont les mêmes que pour la première mais une nouvelle hypothèse est ajoutée : le débit maximal en sortie de PAC est limité et équivaut au débit maximal qui circule dans le réseau de chaleur. Les résultats diffèrent alors : dans le cas où la température au condenseur est à 60 °C, le débit en sortie de PAC atteint la limite fixée (à savoir le débit

maximal du réseau de chaleur) et toute l'énergie ne peut donc pas être valorisée. La Figure 6-4 reprend les résultats extraits de cette nouvelle analyse.

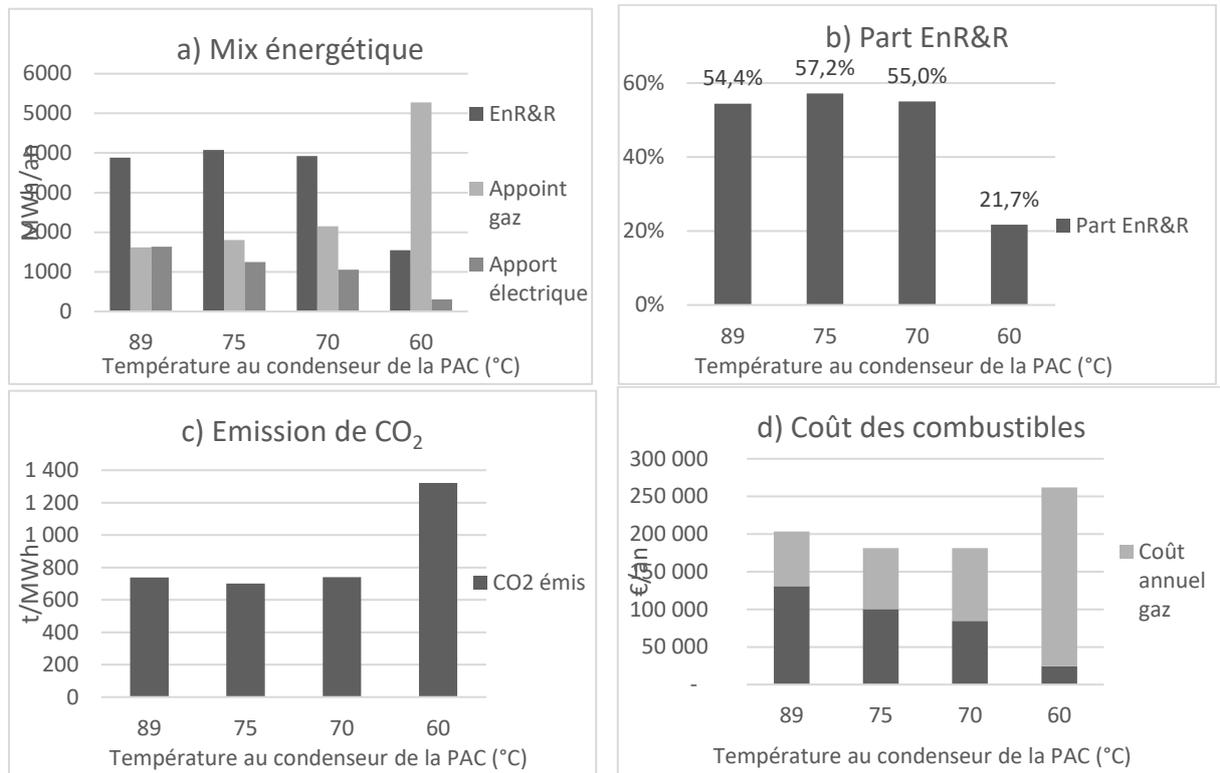


Figure 6-4 Influence de la température au condenseur d'une PAC avec limitation du débit

Le taux d'EnR&R est alors de 22 % (graphique b) lorsque la température au condenseur est de 60 °C. Le bilan environnemental (graphique c) et économique (graphique d) montre que la solution est alors moins pertinente qu'avec une température au condenseur plus élevée.

Si l'intérêt d'abaisser la température au condenseur pour améliorer les performances d'un système de récupération de chaleur fatale basse température est vérifié, cette baisse est donc soumise à des conditions. Dans cette analyse, si la température au condenseur passe sous 75°C, la récupération de chaleur est limitée par les débits et la taille des canalisations à installer avant l'intégration au réseau de chaleur.

Cette étude a permis de mesurer l'importance des régimes de température à mettre en place pour rendre un système de récupération de chaleur fatale efficace. Le choix du bon régime de température se réalise au cas par cas pour chaque réseau et nécessite une modélisation plus fine de tous les paramètres du réseau (débits, températures, configuration des sous-stations, etc.).

Par exemple, la baisse des températures retour dans les réseaux de chaleur, enjeu important déjà abordé dans la partie 1 (1.4.5, page 51), permettrait d'intégrer plus d'énergie basse température. Il y a donc un fort intérêt à proposer des systèmes de récupération couplés à des réseaux de chaleur avec des régimes de températures optimaux. Les nouvelles générations de réseaux de chaleur (2.1.2) disposent de nouvelles architectures innovantes, qui permettent d'abaisser les régimes de températures. Cet effet est une opportunité pour l'intégration de sources fatales basses températures. La prochaine section s'intéresse à ces architectures innovantes en décrivant celles adaptées à l'intégration de sources urbaines de chaleur fatale.

6.1.2. Architectures de réseaux de chaleur adaptées à l'intégration de sources urbaines d'énergie fatale

Les sources urbaines d'énergie fatale, exceptées les UVE et les verreries, présentent des températures qui varient entre 12 °C et 35 °C. Les architectures de réseaux de chaleur présentées ici sont compatibles avec ces températures.

La première architecture de réseau de chaleur est dite « classique » : une chaufferie centralisée et un réseau de distribution à deux tubes : l'aller et le retour. Etant donnée la température des sources de chaleur fatale, il faut que le réseau de chaleur soit lui-même à basse température, en dessous de 90 °C pour sa température aller. Plus la température retour du réseau de chaleur est basse, plus la valorisation de chaleur fatale basse température est rendue possible et avec de meilleures performances.

Plusieurs sources peuvent alimenter la chaufferie centralisée du réseau de chaleur, comme dans l'exemple de la section précédente (Chapitre 5) où une seule chaufferie comprend la PAC qui valorise l'énergie d'un entrepôt frigorifique et une chaudière à gaz, utilisée en appoint. Le fonctionnement est le même si plusieurs chaufferies sont installées à divers endroits, de façon décentralisée. Les réseaux de grandes tailles sont d'ailleurs majoritairement décentralisés pour éviter l'installation de canalisations et de coûts supplémentaires, comme illustré Figure 6-5.



Figure 6-5 Réseau de chaleur de la communauté urbaine Grand Poitiers avec deux chaufferies distinctes (Grand Poitiers, 2016)

Il peut également s'agir d'une branche basse température d'un réseau de chaleur fonctionnant à plus haute température. Ce type de montage se retrouve lors de l'extension d'un réseau de chaleur ancien pour alimenter des quartiers plus récents. C'est le cas du réseau de chaleur Rennes Nord, déjà utilisé comme exemple pour illustrer les différents régimes de températures possibles (Figure 1-5, page 44).

Une autre architecture déjà évoquée est la **boucle d'eau tempérée**. Contrairement à un réseau de chaleur classique, le régime de température du système ne permet pas de répondre directement aux besoins thermiques des bâtiments raccordés. Au lieu d'utiliser une PAC en chaufferie pour rehausser la température d'une source basse température, chaque sous-station de chaque bâtiment est équipée d'une ou plusieurs PAC. Ce type de montage permet d'avoir une boucle principale à basse température (en moyenne entre 15 °C et 25 °C) avec des canalisations non-isolées. La Figure 6-6 représente un schéma type de la boucle d'eau tempérée. Généralement, deux PAC sont installées pour distribuer

séparément l'ECS (à une température minimale de 60 °C) et le chauffage (à partir de 40 °C en fonction du type d'émetteur de chauffage).

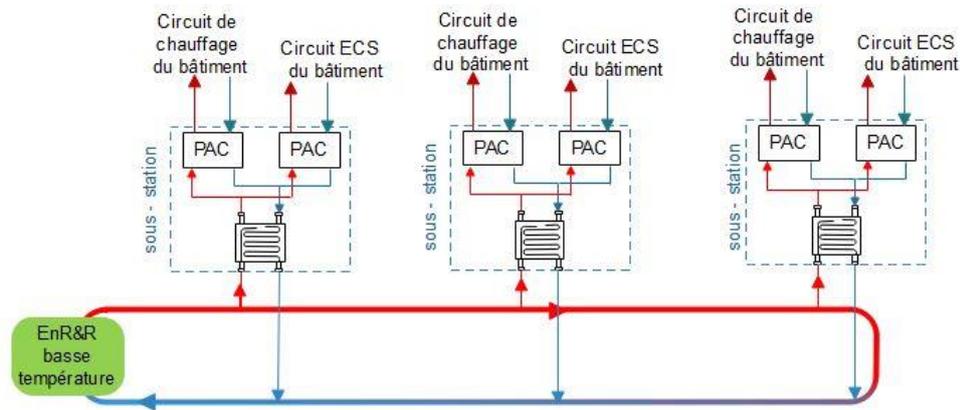


Figure 6-6 Schéma type d'une boucle d'eau tempérée (source : auteur)

Les boucles tempérées, exclusivement réservées aux bâtiments performants et équipés d'émetteurs de chauffage basse température, sont des solutions de plus en plus envisagées pour alimenter des quartiers ou des îlots. Ainsi, l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) recense plusieurs installations récemment mises en place (AFPG, 2015) où l'énergie de la boucle provient de géothermie superficielle (Campus Airbus à Blagnac), de nappes souterraines mais peu profondes (quartier Luciline à Rouen, île Folien à Valenciennes) ou encore d'eaux usées (quartier Cap Azur à Roquebrune-Cap-Martin) .

Un avantage majeur de ce type de système est la possibilité de produire et distribuer du froid pour le refroidissement des bâtiments raccordés. En effet, les PAC peuvent être réversibles : dans le cas de besoins de froid, l'évaporateur et le condenseur échangent leur rôle, grâce à une vanne à quatre voies qui inverse le cycle, comme schématisé Figure 6-7. Ainsi, avec un seul réseau (la boucle tempérée), il est possible de distribuer du froid pour de la climatisation en été et du chaud pour du chauffage en hiver. Pour mesurer la performance des PAC réversibles, le « COP chaud » et le « COP froid » sont calculés distinctement.

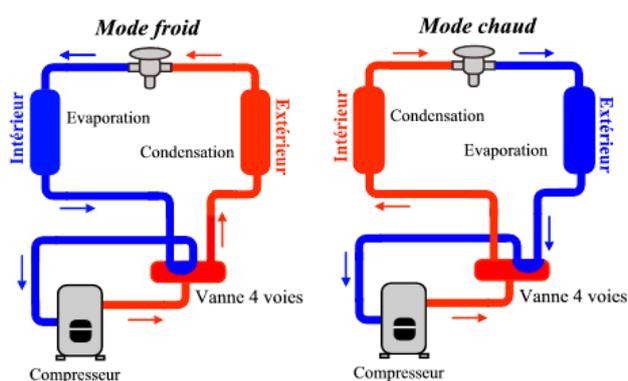


Figure 6-7 Fonctionnement en mode froid et chaud d'une PAC réversible (ABC CLIM, 2015)

Le montage en boucle d'eau tempérée peut également permettre de distribuer simultanément du chaud pour des besoins de chauffage et du froid pour des besoins de climatisation. Cette configuration est utile pour des hôtels ou certains bâtiments tertiaires. Dans ce cas, une thermofrigopompe est utilisée. Cet outil fonctionne de la même façon qu'une machine frigorifique avec des montages hydrauliques particuliers en fonction du mode de fonctionnement (distribution de chaud uniquement,

de froid uniquement, de chaud et de froid en même quantité, de chaud plus que de froid ou enfin de froid plus que de chaud). L'ANNEXE 2.6 propose une explication plus détaillée de la thermofrigopompe.

Une architecture « hybride » entre le réseau de chaleur « classique » et la boucle d'eau tempérée est également possible : une boucle d'eau tempérée récupère et valorise une énergie fatale basse température. Au lieu d'être raccordée à des sous-stations, la boucle est connectée à des chaufferies, équipées de PAC(s) (et/ou d'une thermofrigopompe) et de chaudières d'appoint. Ces chaufferies distribuent ensuite la chaleur dans des quartiers via un réseau de distribution à plus haute température que la boucle d'eau tempérée. La Figure 6-8 illustre le fonctionnement de ces réseaux hybrides.

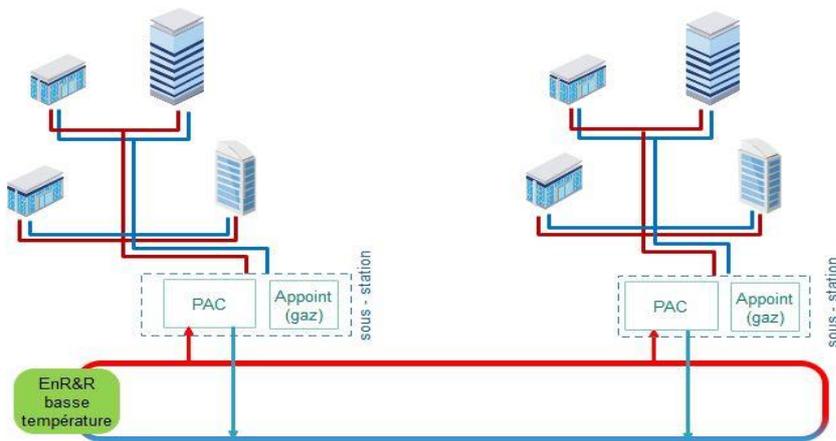


Figure 6-8 Schéma de fonctionnement d'un réseau de chaleur "hybride"

L'avantage d'un tel système est de disposer d'un réseau principal (ici la boucle d'eau tempérée) à bas coût (canalisations non isolées thermiquement car très basse température) et évolutif. En effet, de nouveaux quartiers/îlots peuvent s'intégrer au réseau en installant leur chaufferie adaptée avec des machines de divers types (PAC, thermofrigopompes), avec des puissances et régimes de températures personnalisés en fonction des types de bâtiments présents.

En 2016, le réseau de chaleur et de froid de Paris Saclay a choisi ce montage. Comme le montre la Figure 6-9, la boucle d'eau tempérée est alimentée par une géothermie superficielle et sera également connectée avec un data center, des industries et des laboratoires qui pourront rejeter de la chaleur fatale dans la boucle. Deux îlots sont raccordés à la boucle tempérée et chacun d'eux possède une « sous-station d'îlot » avant une distribution via des micros-réseaux de chaud et de froid aux températures adaptées aux besoins.

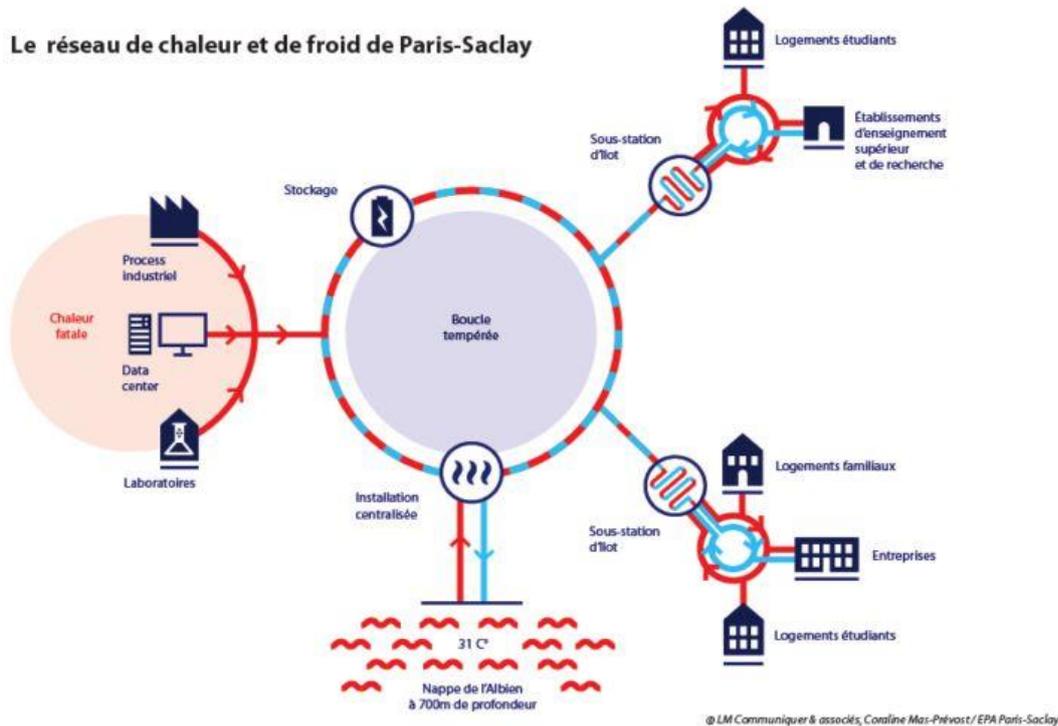


Figure 6-9 Schéma du réseau de chaleur et de froid de Paris Saclay (EPA Paris-Saclay, 2016)

Le réseau de chaleur profitera dans le futur de l'installation de grandes écoles, universités, laboratoires et entreprises dans cette zone en plein essor pour mettre en place d'autres sous-stations d'îlots et augmenter la quantité d'énergie distribuée. En effet, il est attendu pour 2021 une fourniture de 40 GWh/an de chaleur et de 10 GWh de froid via ce réseau (Paris-Saclay, 2015).

La description des architectures de réseaux de chaleur adaptées à l'intégration de sources urbaines de chaleur fatale permet de faire ressortir l'indispensable compatibilité en température entre les deux objets. En effet, la valorisation de la plupart des sources urbaines d'énergie fatale n'est possible que dans des cas où la distribution est réalisée à basse température. Cette condition limite donc la faisabilité de projets de récupération à des installations récentes ou sur des aménagements neufs. L'énergie fatale urbaine à haute température est moins présente (UVE, verrerie) et peut quant à elle s'intégrer à des réseaux de chaleur fonctionnant à haute température (>90 °C) et donc alimenter des bâtiments plus anciens et plus énergivores.

Si une architecture classique de réseau est donc potentiellement compatible avec les sources urbaines basses températures, d'autres architectures (boucle d'eau tempérée et architecture hybride) sont de plus en plus présentes dans les nouveaux aménagements. Leurs fonctionnements à très basse température leur permettent d'intégrer des énergies décarbonées comme la géothermie et les sources urbaines de chaleur fatale et d'éventuellement distribuer du froid pour le refroidissement des bâtiments. Ils fonctionnent grâce à divers machines (PAC, thermofrigopompes) qui ajustent les températures pour distribuer le chaud et le froid de façon adaptée grâce à un apport électrique. Les COP de ces machines indiquent leur viabilité technique : dans un contexte où la part d'électricité est donc plus importante sur ces réseaux que pour un réseau de chaleur classique, il est important d'étudier plus en détails les performances en fonctionnement des PAC.

6.2. Performances des pompes à chaleur

Comme expliqué dans le dimensionnement des PAC dans le modèle Recov'Heat, la performance des PAC se détermine à partir de leur COP. Plus le COP est élevé, plus la PAC est performante. Pour des applications en réponse à des besoins thermiques de bâtiments (chauffage et ECS), un COP supérieur à 3 est requis et l'ADEME impose un COP minimum de 4 pour accompagner le financement d'un projet incluant une PAC avec de l'énergie fatale (ADEME, 2012a). Il correspond à l'énergie produite à la sortie du condenseur sur l'énergie consommée au niveau du compresseur. Le COP peut également se calculer à partir des températures mises en jeu à l'évaporateur et au condenseur comme c'est le cas dans Recov'Heat (équation (29)). Dans les deux méthodes, le COP calculé est un COP réel (COP_r) qui néglige deux aspects de fonctionnement des PAC : à savoir la consommation des auxiliaires, Q_{aux} , et la dégradation des performances lors d'un fonctionnement à charge partielle (6.2.2). La prise en compte de ces éléments permet alors de calculer un COP machine, COP_m , qui intègre donc toutes les contraintes de fonctionnement d'une PAC et représente mieux les performances du système mis en place. Dans la dernière version de sa fiche d'instruction pour bénéficier de financement du Fonds chaleur³⁹, l'ADEME intègre d'ailleurs la consommation aux auxiliaires dans son calcul du COP.

6.2.1. Consommation des auxiliaires

L'électricité consommée par les auxiliaires correspond aux besoins des pompes de distribution et des ventilateurs associés. Ils concernent majoritairement le circuit entre la source froide et l'évaporateur et plus minoritairement le circuit à la sortie du condenseur, comme schématisé sur la Figure 6-10.

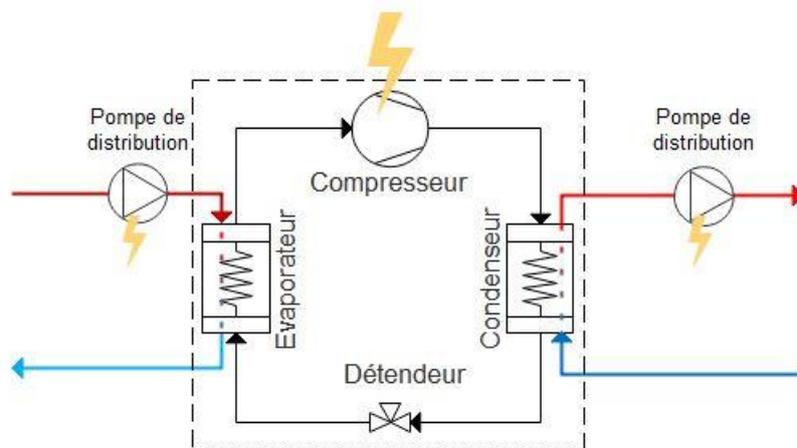


Figure 6-10 Points de consommation électrique d'une PAC (source: auteur)

La part de la consommation de ces auxiliaires sur le système global est variable en fonction des puissances mises en jeu et de la configuration des installations et il est donc impossible d'utiliser avec précision un ratio. Certains ordres de grandeur ont tout de même été récupérés : dans un retour d'expérience mené à Efficacity (source confidentielle), un ratio de 16 % de toute l'électricité consommée par les PAC est utilisée. Cette part est de 18 % dans une étude menée par Guo et Hendel (2018) dans un cas de récupération de chaleur sur eaux usées en région parisienne.

³⁹ https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/6chaleur_fatale_fds_chal_2018_27-02-18.pdf

Dans le cas d'étude du chapitre 5, le COP moyen (ici COP_r) est de 3,59. En ajoutant une consommation aux auxiliaires (Q_{aux}) de 16 %, on obtient un nouveau COP intermédiaire (COP_{inter}) de 2,96 qui ne prend pas encore en compte le fonctionnement à charge partielle :

$$(46) \quad COP_{inter} = \frac{Q_{cond}}{Q_{comp} + Q_{aux}} = 2,96$$

L'analyse du COP avant la prise en compte des consommations aux auxiliaires dans le cas d'étude du chapitre 5 montrait que ce dernier était déjà plutôt faible, notamment par rapport aux standards de l'ADEME pour l'accompagnement financier d'une telle opération. C'est donc d'autant plus vrai avec l'ajout de ces auxiliaires, qui abaisse le COP. La considération des performances de la PAC en fonctionnement à charge partielle peut encore abaisser l'efficacité du système.

6.2.2. Fonctionnement à charge partielle

Les COP fournis par les constructeurs de PAC sont généralement des valeurs obtenues en conditions idéales et à charge nominale, c'est-à-dire, en fonctionnant à 100 % de leur capacité. Avec la variation des besoins thermiques, les PAC sont souvent en fonctionnement à charge partielle. Ce fonctionnement altère la performance des PAC et se répercute donc sur leur COP. C'est ce que montrent plusieurs études (Fuentes & Waddicor, 2016; Grenelle Environnement, 2014; Zottl, Nordman, & Miara, 2012) qui présentent la même tendance, illustrée Figure 6-11. Lorsque la PAC fonctionne à plus de 30 % de sa capacité, elle a des performances au-dessus de 80 %. En revanche, entre 0 et 30 % de la capacité, la performance peut être basse, sous 50 % à partir de 15 % de la charge maximale.

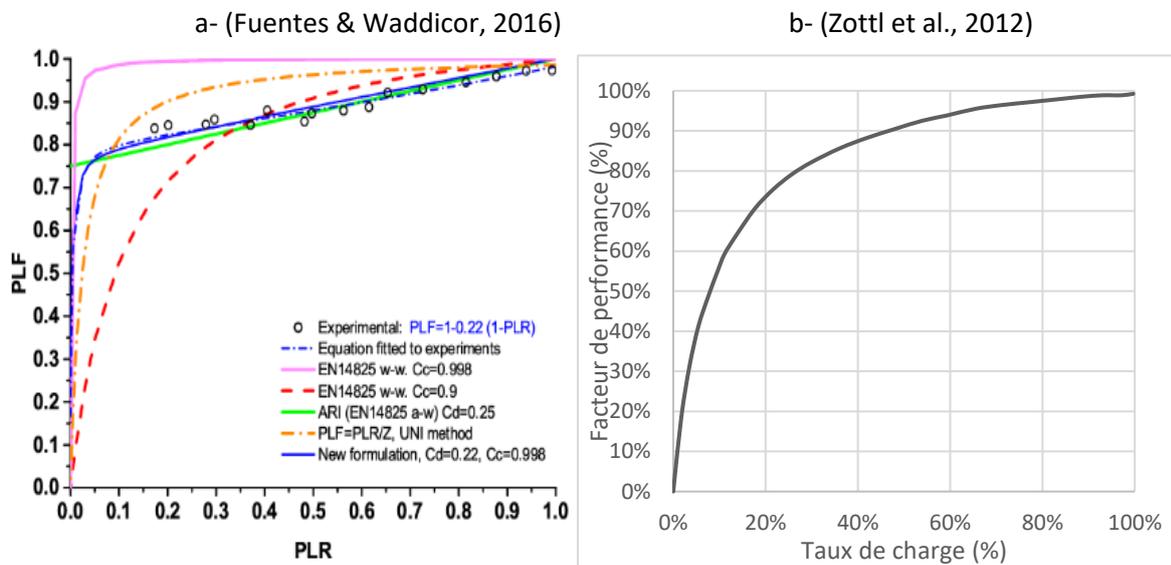


Figure 6-11 Facteur de performance d'une PAC en fonction de son taux de charge

Dans leur étude, Fuentes et Waddicor (2016) comparent différentes méthodes d'analyse de dégradation des performances de PAC en fonction du taux de charge. Sur ce graphique (Figure 31 a-), plusieurs méthodes (expérimentales et numériques) sont illustrées avec :

- En abscisse : PLR (part-load ratio), le taux de charge de la PAC
- En ordonnée : PFL (part-load factor), le facteur de performance de la PAC

L'influence du taux de charge n'est pas négligeable pour mesurer le COP d'une PAC. Le COP machine, COP_m , qui intègre donc la consommation des auxiliaires et le facteur de performance à charge partielle, PFL , s'obtient ainsi :

$$(47) \quad COP_m = COP_{inter} * PFL$$

Dans le cas d'étude du chapitre 5, deux PAC sont dimensionnées, respectivement de 1 313 kW et 2 626 kW. Leur taux de charge moyen est de 48 % et 63 %. La Figure 6-12 représente leur taux de charge au cours d'une année. La première PAC (1 313 kW) a un taux de charge faible en été, où la capacité de la PAC est supérieure à la capacité nécessaire pour répondre aux besoins d'ECS. Sa moyenne est donc abaissée par cette période estivale. Elle fonctionne néanmoins à pleine charge près de 2 300 heures sur une année. La seconde PAC fonctionne lorsque la première est à pleine capacité et est donc principalement active en hiver, avec un taux de charge variant de 50 % à 100 %. Elle atteint son taux de charge maximal environ 60 heures dans l'année.

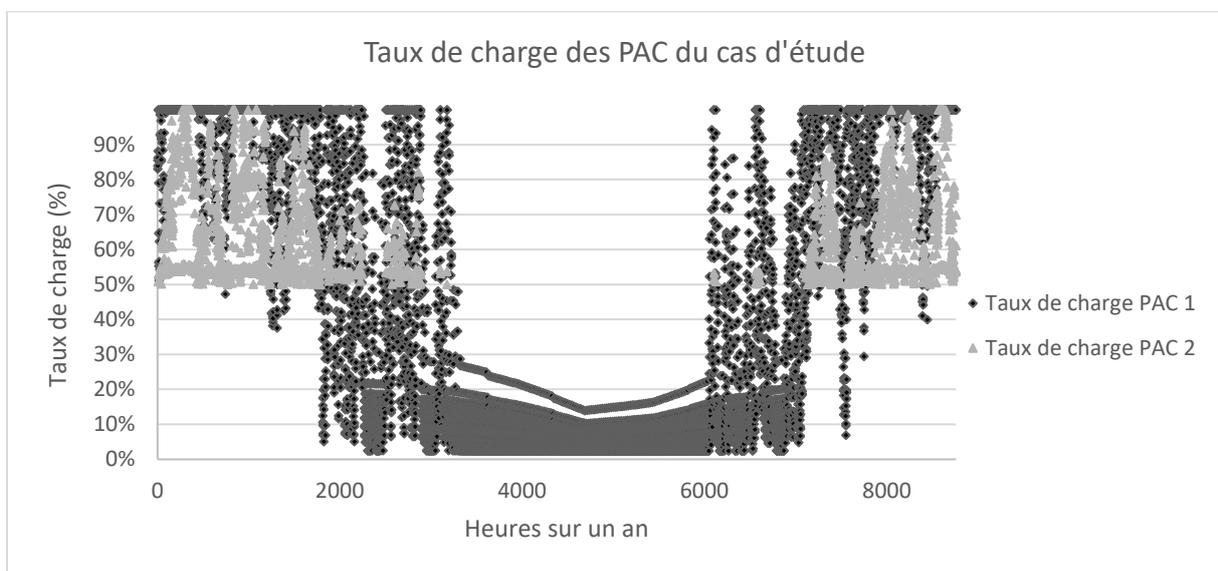


Figure 6-12 Taux de charge des PAC du cas d'étude du chapitre 5

En prenant les taux de charges moyens, les facteurs de performances des deux PAC sont respectivement de 90 % et de 95 %, pour des COP machines moyens de 2,66 et 2,81. A ces niveaux de performance, le système de récupération de chaleur fatale pour alimenter le quartier résidentiel situé à côté de l'entrepôt frigorifique n'est pas efficace.

Cet aspect met en lumière l'importance du bon dimensionnement des PAC, qui doit prendre en compte les différents niveaux de puissance requis tout au long d'une année. En effet, dans Recov'Heat, les capacités des PAC sont déterminées en fonction des puissances nécessaires pour récupérer un maximum d'énergie fatale mais ne prennent pas en compte le profil du besoin. Dans notre cas d'étude, il aurait été opportun de dimensionner une première PAC avec une puissance équivalente à la puissance requise pour l'ECS, soit environ 550 kW, soit une puissance appelée près de 4 300 heures dans l'année (cf. Figure 5-6, page 171). Les bureaux d'études préfèrent d'ailleurs dimensionner plusieurs PAC de plus faibles puissances, plutôt qu'une seule machine qui fonctionnera alors avec un faible taux de charge la majorité de l'année.

6.3. Conclusion du chapitre 6

En fonction de leur niveau de température, les sources de chaleur peuvent s'intégrer à différents types de réseaux de chaleur.

Dans Recov'Heat, l'hypothèse simplificatrice est de comparer la température d'une source fatale et la température aller du réseau de chaleur afin d'analyser leur compatibilité. Si la source fatale est à une température plus basse, une PAC (ou un ensemble de plusieurs PAC) peut alors être utilisée mais sa pertinence, liée à son COP, dépend de l'écart de température entre la source fatale et la température aller du réseau de chaleur : plus il est élevé, moins le système est efficace. En réalité, l'énergie fatale peut s'intégrer au réseau avec une température plus basse que celle de départ puisque le principe est de réchauffer l'eau du retour du réseau de chaleur. Le mélange peut donc se faire entre cette température départ et la température retour du réseau. Dans ce chapitre, où a été menée une analyse de l'influence de la température au condenseur d'une PAC lors d'une récupération de source de chaleur fatale basse température, il a été montré qu'il y a un fort intérêt à baisser, dans la mesure du possible, cette température au condenseur. Si cette diminution provoque une augmentation de la quantité d'appoint à fournir (très souvent via une chaudière à gaz), la performance de la PAC est améliorée. La réduction de la consommation électrique compense alors le supplément de CO₂ issu de l'appoint au gaz. La baisse de la consommation électrique a également des conséquences positives sur le bilan économique. L'énergie fatale basse température est donc éventuellement compatible avec un réseau de chaleur si la différence de température entre la source et le retour de réseau est assez faible et dans le cas où les débits associés à la récupération sont réalistes. Une modélisation fine des températures et des débits mis en jeu doit être réalisée pour mesurer en détail la faisabilité de la valorisation de chaleur fatale dans un réseau de chaleur.

L'architecture d'un réseau de chaleur a également de l'influence sur la possible valorisation de chaleur basse température. En effet, certains nouveaux réseaux de chaleur proposent des montages décentralisés comme la boucle d'eau tempérée, où la remontée des températures ne se réalise que dans les sous-stations des immeubles raccordés. Ce type de montage, envisageable pour des bâtiments neufs et à basse consommation énergétique, est idéal pour l'intégration de sources de chaleur basse température puisque la boucle est à une température allant de 10 °C à 30 °C environ. L'autre avantage de ces architectures est la possibilité de produire et distribuer du froid pour la climatisation des bâtiments raccordés, grâce à des PAC réversibles et des thermofrigopompes.

Des boucles d'eau tempérée ou de systèmes hybrides présentent un mix énergétique avec une part d'électricité plus importante que dans les réseaux de chaleur dits « classiques ». Cela est lié à la consommation des PAC et thermofrigopompes qui composent les sous-stations. Le bon calcul et dimensionnement de ces machines frigorifiques est donc indispensable. L'efficacité de ces machines est définie par leur COP. Dans Recov'Heat, où seules les PAC sont prises en compte (car les besoins de froid ne sont pas considérés), le COP est déterminé par une méthode qui néglige certains aspects : ainsi, la consommation des auxiliaires et le fonctionnement à charge partielle des PAC influencent la performance du système. La prise en considération de ces deux éléments a montré une baisse

significative du COP calculé dans l'étude de cas du chapitre 5 et l'importance d'un dimensionnement optimal de ces machines.

Ce chapitre évoque donc plusieurs conditions, principalement techniques, qui garantissent ou compromettent la faisabilité d'intégration d'une source urbaine de chaleur fatale dans un réseau de chaleur. En tant qu'outil permettant de juger la pertinence de la valorisation de sources urbaines de chaleur fatale à une phase de pré-faisabilité, Recov'Heat néglige ou simplifie ces conditions dans sa version actuelle.

Pour prendre en compte tous ces paramètres, il aurait fallu passer par un travail de modélisation plus détaillé. Aujourd'hui dans Recov'Heat, seules les sources d'énergie fatale sont finement représentées. La partie réseau de chaleur est simplement décrite par des besoins thermiques et une température de départ alors que l'étude réalisée dans ce chapitre sur l'influence de la température au condenseur d'une PAC montre que le réseau doit être caractérisé par d'autres paramètres : température retour, températures de mélange, débits d'eau dans le réseau, diamètre des canalisations qui font circuler cette eau, appoint (quantités, températures, débits). Ce travail, à réaliser avec les différentes architectures de réseau de chaleur décrites dans ce chapitre, fait partie des tâches engagées par l'institut Efficacity dans le cadre de son programme R&D sur la conception des quartiers à haute performance et des réseaux énergétiques associés.

L'outil Recov'Heat est donc une première brique nécessaire à la réflexion que poursuit l'institut Efficacity sur l'intérêt de valoriser l'énergie fatale issue de sources localisées en milieux urbains et via des réseaux de chaleur. Parallèlement à ces réflexions, s'est posé la question des modalités de mise en œuvre de cet objet technique. Ce sujet intègre des complexités relatives à l'urbanisme déjà évoquées dans la première partie de ce manuscrit (2.2 et 2.3), à savoir la planification urbaine et l'intégration des politiques énergétiques locales, ainsi que l'importance de la gouvernance et de l'accompagnement des projets de développement de réseaux de chaleur dans les territoires.

CONCLUSION DE LA PARTIE 2

Le modèle Recov'Heat permet d'obtenir des indicateurs techniques, économiques et environnementaux quant à la faisabilité et la pertinence d'un projet de récupération d'une source urbaine de chaleur fatale (eaux usées, datacenter, entrepôt frigorifique, blanchisserie industrielle, verrerie, UVE) pour répondre aux besoins thermiques (chauffage et ECS) d'un quartier. Grâce à une série d'hypothèses et la constitution de profils de chaleur fatale sur chacune des sources, la simulation peut s'effectuer à partir d'un minimum de données d'entrée. Le pas horaire de la simulation permet de prendre en compte la variation du potentiel énergétique des sources au cours du temps (à la fois les variations journalières et saisonnières). La méthode est de déterminer dans un premier temps le potentiel extractible, puis d'identifier la quantité d'énergie réellement valorisable en fonction des besoins thermiques du quartier décrit par l'utilisateur, et de dimensionner les éléments de valorisation de la chaleur en fonction de la qualité de sa source (représentée par sa température). Des bilans énergétiques, économiques et environnementaux permettent d'extraire les indicateurs clés pouvant orienter l'utilisateur sur l'intérêt de la récupération d'une source de chaleur fatale.

Utile pour déceler des opportunités sur les territoires, l'outil Recov'Heat peut servir à réaliser des études de préfaisabilité et participer au développement d'une stratégie énergétique locale, notamment s'il est couplé avec des applications cartographiques où besoins, sources et éventuellement réseaux sont superposés. L'utilisateur peut également effectuer des analyses de sensibilités et identifier les paramètres décisifs dans la faisabilité d'un projet de récupération (température, distance entre source et besoins, etc.).

Le module de calcul du potentiel énergétique des sources fatales a été testé pour validation en utilisant le retour d'expériences de plusieurs projets déjà existants, notamment pour les UVE, les eaux usées et les data centers. Les résultats montrent que Recov'Heat propose très souvent un potentiel supérieur à l'énergie réellement récupérée. Cette surestimation s'explique naturellement par le fait que le modèle calcule un potentiel d'énergie extractible et ne prend pas en compte d'éventuelles contraintes locales, repérables au cas par cas et qui ne sont donc pas intégrables dans un outil générique comme Recov'Heat. Malgré cette surévaluation, les ordres de grandeurs obtenus sont conformes avec les données des cas existants (environ 20 % supérieurs à l'énergie réellement récupérée).

Une étude de cas complète a également été menée avec Recov'Heat sur un entrepôt frigorifique situé en Ile-de-France et un quartier résidentiel de dix bâtiments situés de l'autre côté d'une route par rapport à cet entrepôt. Les bilans ont montré que la quantité d'énergie récupérable au niveau des groupes froids des chambres froides de l'entrepôt frigorifique était suffisante pour couvrir une grande majorité des besoins thermiques du quartier (86 % après utilisation de PAC, soit plus de 60 % d'EnR&R)

avec un LCOE⁴⁰ compétitif par rapport à d'autres énergies. Cependant, cet indicateur ne prend pas en compte toutes les dépenses liées à un tel projet, comme les coûts d'investissement nécessaires pour des chaufferies d'appoint et de secours. De plus, au vu du type de bâtiments qui composent ce quartier (années 1980), l'écart de température entre la chaleur fatale de l'entrepôt frigorifique (environ 30 °C) et la température à laquelle le chauffage est distribué (80 °C lorsque la température extérieure est la plus basse) est conséquente. Cet écart entraîne des performances de PAC peu satisfaisantes, avec un COP moyen estimé à 3,6, soit un chiffre sous le minimum requis par l'ADEME pour obtenir une aide financière.

Cette étude de cas a permis de détecter certaines limites de l'outil Recov'Heat, notamment sur le dimensionnement des éléments de valorisation (échangeurs et PAC), réalisé pour récupérer un maximum d'énergie fatale disponible alors qu'un dimensionnement réaliste doit prendre en compte les heures de fonctionnement de ces éléments. Le calcul du COP des PAC néglige également des conditions de fonctionnement qui peuvent réduire les performances. Enfin, certaines hypothèses simplificatrices, notamment pour décrire le réseau de chaleur (réduit aux besoins thermiques et à la température de départ), rendent l'outil inadaptée à des études plus précises sur la faisabilité réelle de l'intégration de sources fatales dans des systèmes de chauffage urbain.

Le dernier chapitre de cette partie revient sur ces limites du modèle Recov'Heat, et explicite plus précisément certaines conditions quant à l'intégration de sources urbaines de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur. La majorité des sources décrites dans ces travaux sont basses températures (entre 10 °C et 35 °C) et posent donc la question de la compatibilité en température avec des systèmes qui distribuent de la chaleur à des températures supérieures. Il est alors indispensable d'analyser plus en détail les éléments qui influencent les performances des PAC, les montages possibles pour valoriser une source de chaleur basse température et les architectures de réseaux de chaleur compatibles.

Ainsi, une étude sur l'influence de la température au condenseur des PAC a montré l'intérêt de choisir une température la plus basse possible afin de valoriser l'énergie fatale tout en minimisant la différence de température entre cette énergie fatale et le retour du réseau de chaleur. L'effet est l'amélioration de la performance des PAC, une consommation électrique réduite qui implique des gains économiques et environnementaux. Parallèlement, la prise en compte des consommations d'auxiliaires et du fonctionnement à charge partielle des PAC, analysés en fin de chapitre 6, révèle une baisse conséquente du COP par rapport à la méthode utilisée dans Recov'Heat. Ces analyses indiquent la nécessité de passer par des modélisations plus fines pour obtenir des dimensionnements optimaux de PAC (nombres de machines, puissances à installer, régimes de températures).

Cet impératif est d'autant plus vrai que les nouvelles générations de réseaux de chaleur ont tendance à s'équiper massivement de machines frigorifiques et présentent une consommation électrique supérieure par rapport aux réseaux plus anciens. En effet, de plus en plus de réseaux basses températures et de boucles d'eau tempérée équipent des quartiers neufs. L'avantage de ce dernier type de réseau est de pouvoir distribuer via un seul réseau du chaud et du froid et ainsi répondre à des besoins de climatisation. Les sous-stations sont alors équipées de PAC réversibles ou de thermofrigopompes. Ces systèmes valorisent des EnR&R à basse température comme la géothermie superficielle ou l'énergie fatale provenant d'eaux usées ou de data center par exemple.

Si Recov'Heat est un outil destiné à évaluer l'intérêt de projets de récupération de chaleur fatale, les simplifications faites dans le modèle ne permettent pas de l'utiliser pour des études de faisabilité

⁴⁰ LCOE : (indicateur économique, en €/MWh, qui porte sur le coût de production d'une énergie)

précises pour valider définitivement ou non ces projets. Certains des paramètres manquant à ce diagnostic ont été présentés dans le chapitre 6, mais un travail de modélisation de tous les éléments d'un système aurait alors dû être entrepris. La modélisation des diverses architectures de réseaux décrites est d'ailleurs un projet en cours de développement au sein de l'institut partenaire de cette thèse.

La troisième partie de ces travaux de thèse aborde la question de la mise en œuvre de projets de valorisation de sources urbaines de chaleur fatale par des réseaux de chaleur. Ce sujet intègre des complexités relatives à la gouvernance, à l'importance des interactions multi-acteurs dans la faisabilité des projets et à leur planification en amont dans les stratégies énergétiques locales.

PARTIE 3 : DE L'OBJET TECHNIQUE AUX CONDITIONS REELLES DE MISE EN ŒUVRE DE PROJETS DE VALORISATION DE SOURCES URBAINES DE CHALEUR FATALE

Dans le chapitre 2, deux facteurs clés de la réussite d'un projet de développement de réseau de chaleur ont été identifiés :

- Leur gouvernance,
- Leur prise en compte dans les stratégies énergétiques territoriales et dans la planification urbaine.

Ces deux facteurs sont aussi importants que les facteurs techniques et la faisabilité technologique. La gouvernance intervient à différentes phases d'un projet de développement de réseau de chaleur et implique directement et indirectement plusieurs acteurs. En effet, plusieurs entités sont concernées par de tels projets et interviennent à diverses phases avec des rôles différents. L'intégration d'une source de chaleur fatale ajoute un nouvel acteur, le propriétaire de cette énergie. La collectivité territoriale joue un rôle central dès lors qu'elle impulse ces projets tandis que l'AMO, le MOE et l'aménageur mènent les études qui servent à concevoir le système à l'échelle d'un aménagement. Cette conception intègre également l'opérateur du réseau dans une seconde phase. Les promoteurs et constructeurs de bâtiments ainsi que les usagers sont également impliqués en phase amont, notamment dans le cadre du schéma directeur du réseau de chaleur. Il n'existe pas de processus décisionnel unique menant au choix de développement d'un réseau de chaleur mais cette décision est conditionnée par un jeu d'acteur efficace, c'est-à-dire une bonne concertation entre tous ces acteurs, la prise en compte des intérêts de tous et un portage politique fort par la ou les ville(s) concernée(s). Dans la première partie de ce chapitre, les rôles de tous les acteurs cités sont décrits. Dans le chapitre 7, l'analyse de plusieurs projets illustre l'importance du jeu d'acteurs et expose plusieurs scénarios et portages qui ont aboutis à la décision de développer un réseau de chaleur valorisant (ou non) une source d'énergie fatale urbaine. (Chapitre 7 Influence de la gouvernance et de la concertation entre acteurs sur la faisabilité des projets de valorisation de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur).

La planification urbaine intègre des stratégies énergétiques à diverses échelles territoriales (région, commune/intercommunalité, projet d'aménagement). Plusieurs documents centralisent ces travaux de planification à chaque échelle avec notamment le SRCAE pour la région et le PCAET pour les communes. Ils contiennent notamment des diagnostics énergétiques des territoires, des scénarios d'évolution des mix énergétiques et des moyens à mettre en œuvre pour accomplir ces scénarios. Les exigences de ces contenus ont été mis à jour en 2015 avec la LTECV. Les effets ne sont donc pas encore visibles mais les réseaux de chaleur, considérés comme des outils clés de la transition énergétique, prennent une place importante dans l'ensemble de cette organisation. Leur prise en compte reste inégale dans ces documents et les scénarios de développement des réseaux de chaleur peuvent être très détaillés sur certains territoires comme très sommaires. Il en va de même pour les gisements locaux d'énergie fatale, parfois traités ou simplement cités. Dans un dernier chapitre dédié aux sujets d'ouverture relatifs à ces travaux de thèse, l'analyse de certains de ces documents, qui traduisent des trajectoires régionales ou communales sur la question de l'approvisionnement énergétique, permet d'observer les pratiques favorables ou défavorables au développement de projets de récupération de chaleur fatale et une valorisation par des réseaux de chaleur (Chapitre 8 Perspectives de recherche). Un second sujet d'ouverture est introduit dans ce dernier chapitre : l'aide à la décision de multicritère

comme approche scientifique pour mêler les paramètres technico-économiques et liés à la mise en œuvre des projets de valorisation de chaleur fatale à l'échelle de quartiers et de villes.

CHAPITRE 7 : INFLUENCE DE LA GOUVERNANCE ET DE LA CONCERTATION ENTRE ACTEURS SUR LA FAISABILITE DES PROJETS DE VALORISATION DE CHALEUR FATALE DANS DES RESEAUX DE CHALEUR

Comme déjà évoqué dans le premier chapitre (1.4.6 Acteurs et modes de gestion des réseaux de chaleur), un réseau de chaleur met en relation plusieurs acteurs. De la collectivité territoriale, propriétaire de tout réseau sur son territoire, aux usagers finaux et en passant par un éventuel opérateur de réseau, des promoteurs de bâtiments, un aménageur, un assistant à maîtrise d'ouvrage ou encore un propriétaire de chaleur fatale, tous n'ont pas les mêmes intérêts et n'ont donc pas les mêmes raisons d'œuvrer au développement d'un réseau de chaleur.

Dans un premier temps, tous ces acteurs sont décrits et leurs rôles dans la mise en œuvre des réseaux de chaleur sont expliqués (7.1 Les acteurs, leurs rôles et leurs intérêts vis-à-vis du développement d'un réseau de chaleur). Un paragraphe spécifique est dédié à l'acteur propriétaire d'une source de chaleur fatale (7.2 Un nouvel acteur : le propriétaire d'une source de chaleur fatale). Dans un second temps, le récit de plusieurs cas montre l'influence de l'interaction entre tous ces acteurs dans les prises de décision, notamment vis-à-vis de scénarios de valorisation de chaleur fatale (7.3 Illustration de l'importance du jeu d'acteur).

7.1. Les acteurs, leurs rôles et leurs intérêts vis-à-vis du développement d'un réseau de chaleur

Dans le chapitre 1, le schéma de la Figure 7-1 représente les acteurs principaux concernés par un réseau de chaleur et les interactions entre ces acteurs.

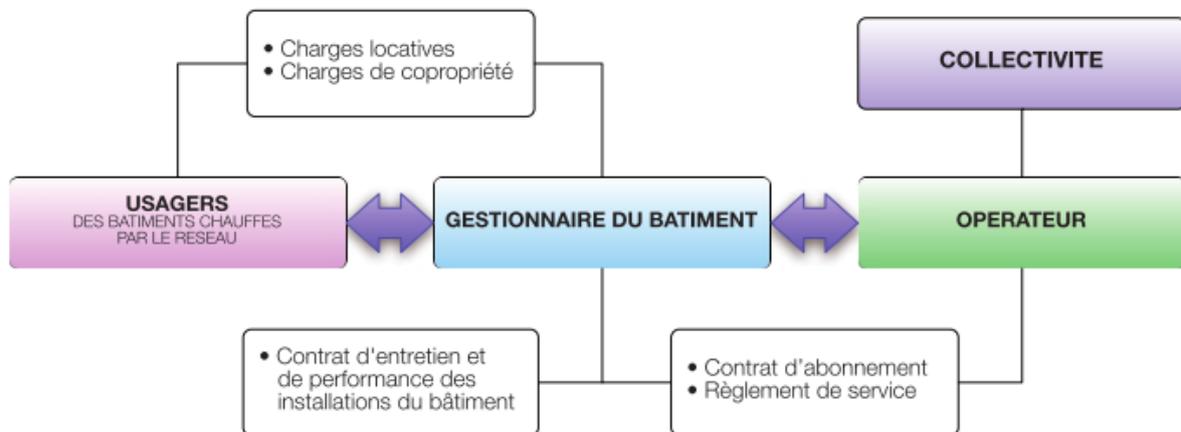


Figure 7-1 Acteurs principaux des réseaux de chaleur et interactions

Ainsi, la **collectivité territoriale** est le propriétaire du réseau et est chargée de sa gestion. En fonction du mode de gestion choisi, un **opérateur de réseau** peut s'occuper de cette gestion et construire et/ou exploiter le chauffage urbain. Les **gestionnaires de bâtiments** (copropriétés, bailleurs) sont alors unis contractuellement avec l'opérateur du réseau via un contrat d'abonnement. Enfin, les **usagers finaux** paient les gestionnaires de bâtiments à travers des charges locatives et de copropriété.

D'autres acteurs, non présents sur ce schéma, interviennent dans les phases de conception de réseaux de chaleur à l'échelle d'un projet d'aménagement.

La Figure 7-2 réalisée par l'ADEME et AMORCE (2011), schématise les liens entre tous les acteurs d'un projet d'aménagement qui intègre le développement d'un réseau de chaleur. Des pastilles de couleurs indiquent l'intérêt théorique de chaque acteur pour ce système de chauffage : le vert pour un intérêt positif, le rouge s'il s'agit d'un inconvénient et enfin les pastilles orange pour un inconvénient supposé⁴¹.

Ces tendances sont les résultats d'une enquête sur le développement des réseaux de chaleur dans les nouveaux projets d'aménagement en France, et notamment sur 28 projets primés dans le cadre d'un appel à projet national sur les écoquartiers exemplaires lancé en 2009. Cette enquête s'est penchée sur les enjeux techniques et économiques du développement de réseaux de chaleur dans les nouveaux aménagements, c'est-à-dire pour des bâtiments neufs et à basse consommation. Dans un second temps, l'enquête porte sur la mise en œuvre de ces projets en s'intéressant notamment aux jeux d'acteurs qui ont conduit à des prises de décision sur plusieurs quartiers (choix d'installer ou non un réseau de chaleur, mix énergétique, etc.), dont certains sont décrits dans la prochaine section (7.3).

⁴¹ L'ADEME et AMORCE définissent un inconvénient supposé comme un inconvénient « exprimé par un acteur mais pas toujours fondé sur une vision objective de l'impact en global pour lui de cette solution par rapport aux autres modes de chauffage » (2011).

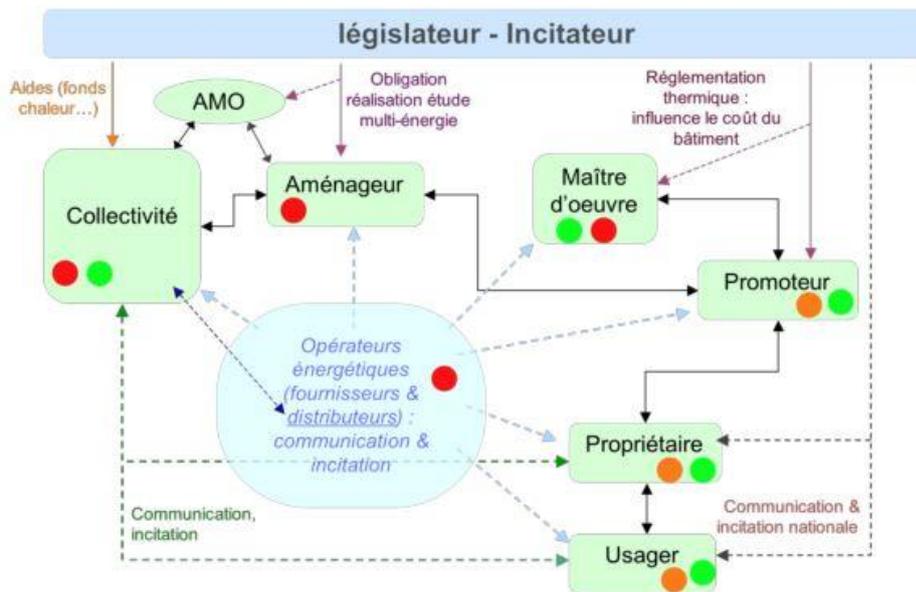


Figure 7-2 Jeu d'acteurs lors d'un projet de développement de réseau de chaleur (AMORCE & ADEME, 2011)

Le rôle de chaque acteur vis-à-vis d'un projet de développement de réseau de chaleur est explicité dans cette section.

La **collectivité** a plusieurs rôles : elle se doit d'impulser des projets de transition énergétique sur son territoire afin d'atteindre les objectifs fixés par son PCAET. Dans ce contexte, il y a un fort intérêt à développer des réseaux de chaleur et à raccorder le plus de bâtiments possibles, surtout dans la perspective de systèmes à plus de 50 % d'EnR&R. Elle a également un rôle de financeur sur une opération d'aménagement, et sur un éventuel réseau de chaleur. Cet aspect financier peut être un frein pour la collectivité, au vu de l'investissement élevé des chauffages urbains comparé à d'autres systèmes de chauffage, et ce malgré la possibilité de bénéficier d'aides (Fonds chaleur et autres subventions). L'autre frein est la complexité du projet qui nécessite une implication des élus (montage financier, mobilisation de plusieurs services, communication et pédagogie autour de la solution).

L'**assistant à maîtrise d'ouvrage** (AMO) a pour mission de réaliser des études et de proposer des scénarios de desserte énergétique du projet d'aménagement. La commande vient de la collectivité ou de l'aménageur. Selon l'enquête ADEME/AMORCE, le commandeur a déjà un avis assez arrêté sur le choix de la solution qu'il veut mettre en œuvre et oriente l'AMO vers cette solution.

L'**aménageur**, en charge de la conception de l'ensemble de l'aménagement, a tendance à préférer d'autres solutions que le chauffage urbain (solutions dites classiques comme le gaz ou l'électricité à l'échelle du bâtiment ou du logement) pour plusieurs raisons : le développement d'un réseau de chaleur provoque une augmentation du budget global de l'aménagement et donc du prix du foncier. La coordination entre acteurs demande également plus d'effort et le phasage des travaux doit être planifié plus finement. Enfin, l'installation d'un réseau de chaleur oblige l'aménageur à préciser ses exigences quant à la conception des systèmes de chauffage des bâtiments et rend donc plus contraignante la construction de ces bâtiments.

En plus de ces contraintes techniques, le raccordement à un réseau de chaleur peut engendrer des surcoûts pour le **promoteur** d'un bâtiment. Ce dernier devient également dépendant de l'avancement des travaux pour la livraison du bâtiment. Malgré ces inconvénients, le raccordement à un réseau lui permet d'économiser l'investissement d'une autre solution de production de chaleur et évite

l'entretien de chaudières (individuelles et collectives). Ces effets sont similaires pour le maître d'œuvre, mandaté par le promoteur pour effectuer les études thermiques des bâtiments.

Les **autres opérateurs énergétiques** (électricité et gaz), directement en concurrence avec un réseau de chaleur pour l'approvisionnement du chauffage et de l'ECS d'une opération, voient l'installation d'un réseau de chaleur comme un marché perdu. Cependant, ils ont toujours un rôle dans la conception de l'aménagement puisque le réseau électrique sera de toute façon installé pour les besoins électriques des bâtiments. Le réseau de gaz est moins systématiquement présent mais reste souvent installé (ne serait-ce que pour l'appoint des réseaux de chaleur ou d'autres usages spécifiques).

Les propriétaires des logements (et locataires), futurs **usagers** d'un éventuel réseau de chaleur, sont également concernés par les systèmes énergétiques de l'aménagement. Leurs intérêts sont avant tout économiques et environnementaux. En cas de réseaux de chaleur alimentés à plus de 50 % d'EnR&R, la TVA réduite à 5,5 % ainsi que la part variable limitée sur les factures de chauffage rendent le système désirable. Une pédagogie est tout de même nécessaire de la part de la collectivité, les réseaux de chaleur pouvant être méconnus du grand public ou avoir une image de système obsolète (inconvenient répertorié dans la liste du paragraphe 2.1.3). Dans le cas de l'intégration d'une énergie fatale, cette pédagogie est d'autant plus importante que certaines sources peuvent avoir des images négatives (eaux usées, data center, UVE).

7.2. Un nouvel acteur : le propriétaire d'une source de chaleur fatale

Le propriétaire d'une source de chaleur fatale, absent de la Figure 7-2, est également un acteur affecté par le développement des réseaux de chaleur.

Si une nouvelle activité rejetant de la chaleur fatale s'installe (UVE, data center, entrepôt frigorifique, etc.), la prise en compte de cette énergie doit, dans l'idéal, être réalisée en amont des études de l'AMO afin d'adapter l'emplacement de l'édifice (au plus près d'une chaufferie ou des bâtiments consommateurs) et les systèmes de rejet de chaleur. Par exemple, pour la chaleur fatale issue de groupes froids (entrepôts frigorifiques, data center), il faut idéalement des condenseurs à eau pour que la récupération soit plus efficace (Figure A-13, page 282). Ces types de prescriptions sont primordiales pour que la valorisation de l'énergie soit possible, mais ne font pas partie des normes classiques pour ces acteurs, qui ont d'autres priorités lors de la construction des bâtiments qui accueilleront leurs activités. Le propriétaire d'un entrepôt frigorifique regardera en premier lieu la facilité d'accès par des véhicules de livraison tandis que la condition d'installation d'un data center dépend notamment de la desserte électrique du lieu (cf. **ANNEXE 1.4**, page 283).

Le développement d'un scénario d'intégration d'une source d'énergie fatale dans un réseau de chaleur doit donc se faire en adéquation avec son propriétaire, affecté à plusieurs niveaux par un tel projet :

- Au niveau de l'image : certaines sources de chaleur fatale ont une image assez négative auprès des citoyens. Les UVE (Hajek, 2013) ou les datacenter (Marquet, 2018) sont dans ce cas et doivent parfois se confronter aux refus et protestations des riverains quant à leurs activités. Intégrer ces activités dans le système de chauffage local d'un quartier et verdir son mix énergétique peut permettre de modifier cette image auprès des populations.
- Au niveau économique : le propriétaire de cette énergie a la possibilité de revendre la chaleur fatale, ce qui est un supplément par rapport à son activité principale. Cependant, l'investissement pour le système de récupération est un possible frein. Le financement peut revenir au propriétaire de la chaleur fatale ou à l'opérateur du réseau de chaleur avec des freins économiques et juridiques. Si l'investissement est profitable sur un long terme, c'est-à-dire sur une durée de DSP (de 20 à 30 ans environ), les industriels ont des temporalités plus faibles et préfèrent des investissements avec des temps de retour plus courts, moins de trois ans (RECA, 2014).

La question du financement et du montage juridique entre le propriétaire de chaleur fatale et un opérateur de réseau est finalement, après la faisabilité technique, le frein le plus persistant (FNCCR, 2018). En fonction de l'acteur qui porte l'investissement, la question des risques et des responsabilités peut dissuader les propriétaires de chaleur fatale. Ils sont peu enclins à porter la responsabilité de la distribution de chaleur alors que leur cœur de métier n'est pas l'énergie. Dans le même temps, il y a un risque éventuel de dégradation de l'activité principale qui produit la chaleur. Dans le cas du datacenter par exemple, où la sécurité du service est la principale préoccupation des gestionnaires, l'ajout d'un système de récupération de chaleur sur les groupes froids est perçu comme une potentielle menace sur le fonctionnement des salles IT.

De plus, le décalage de temporalité entre ces acteurs, représenté par les temps de retour courts souhaités par les industriels alors que les réseaux de chaleur s'amortissent sur le long terme, fait ressortir la question de la pérennité de la ressource. Cette notion fait partie des freins identifiés par la FNCCR (2018) et revient dans plusieurs analyses de cas, comme celui étudié par Hampikian (2017) à Dunkerque où la pérennité de la chaleur récupérée sur une usine de sidérurgie est questionnée.

Décrites dans le chapitre 3, chaque source de chaleur fatale possède des « durées de vie » différentes. Or le raccordement à un réseau de chaleur n'a de sens que si l'échange de calories entre la source et le réseau est durable, au moins le temps d'une DSP. Le Tableau 7-1 rappelle la pérennité des sources fatales étudiées.

Ainsi les réseaux d'assainissement et stations d'épuration qui transportent et traitent les eaux usées sont des infrastructures pérennes et fixes. Il en va de même pour les UVE même si les politiques locales tentent de limiter l'incinération de déchets au profit du recyclage et du compostage/méthanisation (Figure A-9, page 276). La fabrication de verre est également une activité pérenne même si ce secteur est en baisse progressive depuis le début du XXIème siècle. Seules les grandes verreries perdurent alors que les plus petites structures disparaissent (Brejon de Lavergnée, 2002). Les entrepôts frigorifiques et blanchisseries industrielles privées sont des industries dépendantes de leur marché respectif et sont donc plus exposés à des fluctuations de leurs activités et à de possibles déménagements. Les blanchisseries publiques, situées dans les EPHAD et les hôpitaux principalement, sont moins soumises à ces instabilités. Enfin les data center sont assez fréquemment sujets à des déménagements et des variations de leurs activités. Leur durée de vie est très variable mais la moyenne est estimée entre sept et dix ans (Louwerens, 2014).

Tableau 7-1 Pérennité des sources de chaleur fatale étudiées

Source	Pérennité
Eaux usées	Long terme
Data center	Court terme
Blanchisserie industrielle	Court terme et long terme
Entrepôt frigorifique	Long terme
UVE	Long terme (malgré une réduction lente des déchets incinérés)
Verrerie	Long terme

Plusieurs contraintes viennent donc s'ajouter aux freins techniques et économiques déjà évoqués. Elles sont d'ordres organisationnelles et ne sont surmontables que dans certains cas et grâce à une concertation entre tous les acteurs et le plus en amont possible des projets d'aménagement. Le retour d'expérience, détaillé dans la section suivante (7.3) montre que la faisabilité de ce type de projet est conditionnée par la volonté des acteurs et le portage du projet.

Ce retour d'expérience montre également l'influence du mode de gestion par les propriétaires de la chaleur fatale dans la faisabilité des projets. Pour rappel, ce critère a été pris en compte dans la description des sources urbaines de chaleur fatale : il s'agit du statut du propriétaire de l'énergie fatale (public ou privé). Le Tableau 7-2 rappelle ces modes de gestion : par exemple, la gestion des déchets est une activité qui incombe à la collectivité territoriale mais celle-ci peut déléguer cette gestion à un prestataire privé (en DSP, comme pour les réseaux de chaleur). Il en va de même pour la gestion des eaux usées (en réseau d'assainissement et en station d'épuration). Les data center, entrepôts frigorifiques et verreries sont des activités industrielles, avec des propriétaires privés. Les blanchisseries le sont aussi même si certaines d'entre-elles sont rattachées à des services publics (hôpitaux, EPHAD) et sont donc gérées par le secteur public.

Tableau 7-2 Type d'acteur des sources de chaleur fatale étudiées

Source	Type d'acteur
Eaux usées	Public et/ou privé
Data center	Privé
Blanchisserie industrielle	Public ou privé
Entrepôt frigorifique	Privé
UVE	Public et/ou privé
Verrerie	Privé

Cette analyse, acteur par acteur, fait ressortir les avantages et inconvénients vis-à-vis du développement d'un réseau de chaleur, synthétisés dans le tableau récapitulatif de l'étude AMORCE/ADEME en **ANNEXE 3.1**, page 314. Elle montre que la mise en œuvre de ce système peut se heurter au bon vouloir de chacun des acteurs, motivés par des aspects économiques (limitation des investissements ou des factures énergétiques) et organisationnels (il est plus simple et rapide de penser le système de chauffage bâtiment par bâtiment qu'en réseau). L'ajout d'un propriétaire de chaleur fatale dans ces projets ajoute de la complexité et pose des questions contractuelles (pérennité, mode de gestion notamment). Finalement, la mise en œuvre de ces projets dépend de conditions techniques autant que de conditions expliquées dans ce paragraphe. Dans ce cadre, le jeu d'acteur et le portage des projets ont un rôle prépondérant pour surmonter ces difficultés. La prochaine section (7.3) raconte plusieurs cas d'étude pour illustrer et décrire cette importance.

A noter que récemment, de nouveaux projets de recherche, en France et en Europe, s'intéressent aux contraintes sociotechniques et organisationnelles liées aux projets de valorisation de chaleur fatale.

Depuis 2017, le projet de recherche européen appelé ReUseHeat⁴² s'intéresse à la question de la mise en œuvre de solutions de récupération de chaleur fatale en milieu urbain. Un des travaux de ce projet de recherche a été d'interviewer différents acteurs liés à ces projets afin de cibler les principales barrières existantes, évaluer les actions déjà mises en place pour les accélérer et analyser le rôle des acteurs dans leur réalisation. Les acteurs retenus dans ce projet sont les opérateurs de réseaux de chaleur, les décideurs politiques (équivalents de collectivités territoriales en France), les investisseurs, les utilisateurs finaux et les propriétaires de la chaleur fatale. Au total, 60 interviews ont été menées dans sept pays différents. Le livrable de ces travaux est prévu pour Février 2019 mais les résultats évoquent les mêmes problématiques soulevées dans cette section. En effet, comme le montre la synthèse des interviews en **ANNEXE 3.2**, les freins observés par les différents acteurs sont techniques, économiques et liés à la mise en œuvre des projets :

- La température de l'énergie fatale en milieu urbain est parfois trop basse pour que sa valorisation soit efficace,
- Pas de cadre juridique et contractuel généralisé pour associer systématiquement le propriétaire de chaleur fatale avec le reste des acteurs d'un projet,
- Risques à l'investissement car peu de retour d'expérience pour valider la pertinence des projets,
- Temps de retour estimés trop longs,
- Pérennité des sources abordées avec la nécessité de proposer une garantie de distribution de la chaleur.

⁴² ReUseHeat : <https://www.reuseheat.eu>

Enfin depuis Janvier 2019, le projet RECUPERTE⁴³, porté par le laboratoire EVS (Environnement, Ville, Société, UMR 5600) initie des travaux de recherche portant sur les difficultés sociotechniques de la récupération de chaleur fatale, une énergie jugée comme sous-exploitée. Le constat est que la valorisation de ces énergies implique la mise en relation d'acteurs et d'organisations issus de secteurs divers. Ces relations s'inscrivent dans des « circuits organisationnels, économiques, sociaux et politiques spécifiques » qu'il faut comprendre pour « lever les freins à la territorialisation de cette ressource ». La méthode est d'analyser des cas réels dans deux régions urbaines en France (Lyon/Saint-Etienne et Lille/Dunkerque) en s'intéressant à des opérations existantes, en cours ou abandonnées.

⁴³ RECUPERTE : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-18-CE05-0009>

7.3. Illustration de l'importance du jeu d'acteur

Dans cette section, quatre projets de développement de réseaux de chaleur avec prise en compte d'une source d'énergie fatale sont analysés. Ces cas d'étude présentent les acteurs ayant porté et participé aux projets, identifient les freins et les bonnes pratiques qui les ont rendus indésirables ou possibles.

Le premier cas est un projet historique datant des années 1980 et qui relie le réseau de chaleur de la ville de Dunkerque avec l'usine sidérurgique Arcelor-Mittal qui partage une partie de la chaleur fatale issue de ses process. Ce projet est une référence française en termes de valorisation de d'énergie fatale.

Le deuxième est la création d'un réseau de chaleur basse température pour un écoquartier de Nanterre en 2012 (Sainte-Geneviève), alimenté en partie par de la récupération de chaleur des eaux usées.

Le troisième projet étudié est la ZAC de La Saulaie, située dans la commune d'Oullins, ville de la Métropole de Lyon. Le démarrage des travaux de cette ZAC est prévu pour 2021 mais les diverses phases de réflexion sur le projet (incluant la problématique énergétique et des scénarios de distribution de l'énergie) ont déjà commencé à travers différentes consultations réunissant plusieurs acteurs du projet.

Enfin, le dernier projet est le développement d'un écoquartier à Bordeaux, appelé Ginko, dont les travaux ont commencé en 2012 et se poursuivent jusqu'à 2020. Dans les réflexions sur l'approvisionnement énergétique, la piste de la récupération de chaleur sur eaux usées a été envisagée mais la décision s'est finalement portée sur un réseau de chaleur biomasse.

7.3.1. Cas de la ville de Dunkerque

A la fin des années 1970, dans un contexte de crises pétrolières, la ville portuaire et industrielle de Dunkerque, située au Nord de la France, pense au développement d'un réseau de chaleur afin de fournir une énergie à bas coût dans un territoire très consommateur en chauffage et où la précarité énergétique est élevée (taux de chômage en hausse et crise économique).

En 1982, une étude propose plusieurs scénarios d'alimentation énergétique pour la ville : la création d'une centrale à charbon, l'utilisation de gaz issu des activités sidérurgiques de l'usine Usinor, la récupération de chaleur issue de la centrale nucléaire de Gravelines et la récupération de chaleur issue des activités sidérurgiques d'Usinor (Energy Cities, 2015). Le dernier scénario a été choisi pour des raisons économiques et en 1986, un réseau de chaleur alimentant les communes de Dunkerque et Saint-Pol-sur-Mer (ville où se trouve l'usine Usinor, aujourd'hui Arcelor-Mittal) est mis en service par un nouveau syndicat alliant les deux villes (SICURD pour Syndicat Intercommunal de la ville de Dunkerque) dans le cadre d'une DSP avec l'opérateur Compagnie générale de chauffe (aujourd'hui Dalkia, du groupe EDF). Une hotte de captation de 23 MW est alors installée sur l'usine. Le tracé du réseau de chaleur ainsi que les points de production sont affichés sur la Figure 7-3.

Au début des années 2000, une seconde hotte de 13 MW est installée pour répondre à des besoins thermiques en hausse et une première extension du réseau alors également alimenté par chaudières à gaz. Aujourd'hui, ce réseau de chaleur à haute température (> 110°C) de 38,1 km distribue près de 126 GWh/an de chaleur et dessert environ 14 000 équivalents-logements (Via Seva, 2017). 61 % de l'énergie provient de l'usine sidérurgique.



Figure 7-3 Réseau de chaleur et sources de production à Dunkerque (Hampikian, 2017a)

Cette seconde opération s'est réalisée assez simplement avec une interaction efficace entre le gestionnaire du réseau de chaleur, la compagnie Energie Grand Littorale (société dédiée 100 % filiale de Dalkia) et l'industriel Arcelor-Mittal. La première réalisation de 1986 a demandé une coopération beaucoup plus importante de différents acteurs. En effet, au début des années 1980, plusieurs associations de défense de l'environnement sur le territoire se plaignent du trop grand nombre d'industries polluantes présentes dont Arcelor-Mittal. Cette dernière a donc tenté d'améliorer au maximum ses relations avec les associations et acteurs du territoire et a vu l'opportunité d'apaiser ces

tensions lorsque Michel Delabarre, maire de Dunkerque mais aussi président du SICURD, a proposé ce projet. De plus, l'investissement était porté par l'opérateur du réseau.

Ici le portage de la collectivité a été décisif. Cette dernière fut moteur dans le développement du réseau de chaleur et a mené les négociations avec le propriétaire de la chaleur fatale. Ce propriétaire a trouvé l'opportunité dans ce projet d'améliorer son image auprès des citoyens, dans une période où les industries de la région sont jugées nocives pour l'environnement. Aujourd'hui et depuis l'adoption du plan climat en 2009, ce réseau de chaleur est considéré comme un outil clé de la transition énergétique du territoire et il est prévu de le densifier et de l'étendre d'ici 2020. L'opérateur pourrait compter sur la chaleur fatale de l'usine Arcelor-Mittal puisque moins d'1% de la chaleur fatale est valorisée aujourd'hui (Energy Cities, 2015). Mais face à des doutes sur la pérennité de l'activité de cette usine sidérurgique, le bureau d'étude qui propose des scénarios de développement est prié de trouver de nouvelles sources locales de chaleur renouvelable (Hampikian, 2017b; Hexa Ingénierie, 2014). La bonne relation entre la ville et les acteurs industriels depuis ce projet a engendré la création d'un réseau, appelé Ecopal, où plusieurs industriels (plus de 200) du bassin dunkerquois s'allient pour participer ensemble à une industrie plus écologique. Ce réseau et la ville échangent régulièrement sur des actions d'efficacité énergétique (Bouve et al., 2014) et de nouvelles industries émettant de l'énergie fatale sont en contact avec l'opérateur du réseau de chaleur pour d'éventuels futurs raccordements.

7.3.2. Cas de l'écoquartier Sainte Geneviève à Nanterre

Cet écoquartier, créé sur une ancienne friche industrielle de cinq hectares est composé de 650 logements neufs, 1 000 m² de commerces et un groupe scolaire. Les premiers bâtiments ont été livrés en 2011 et le quartier est achevé depuis 2015.

Les bâtiments de ce quartier sont des immeubles neufs qui respectent au moins la RT 2005 et sont donc peu consommateurs en énergie thermique. Un réseau de chaleur basse température (65 °C pour la température de départ), en service depuis 2011, alimente les bâtiments de ce quartier. Ce réseau de 800 mètres distribue 4 500 MWh/an d'énergie thermique, avec un mix énergétique composé de 51 % d'énergie renouvelable (14 % de géothermie sur nappe à faible profondeur et 39 % de chaleur issue des eaux usées), le reste étant du gaz. Une chaufferie centralisée contient des chaudières à gaz et des PAC qui réhaussent l'énergie issue de la géothermie et d'une portion de réseau d'assainissement d'eaux usées.

En 2006, la ville de Nanterre s'engage à travers un plan climat à augmenter la part d'EnR&R sur son territoire et est à la recherche de projets pour satisfaire ses ambitions. Avec cet écoquartier, elle souhaite porter une innovation : développer un réseau de chaleur alimenté en partie par la chaleur fatale issue des eaux usées, alors une première en France. L'idée est venue d'une visite en Suisse d'un service de la collectivité, qui a alors découvert une technologie de récupération sur eaux usées (Ademe, 2015). Pour réaliser cette opération, la collectivité a choisi de faire appel à la SEM (société d'économie mixte) d'aménagement de la ville de Nanterre, la SEMNA. Le réseau d'eaux usées étant géré en régie, tous les acteurs en amont du projet sont en étroite collaboration. Ce lien a permis de mettre en œuvre toutes les conditions pour rendre le projet faisable et viable.



Figure 7-4 réseau de chaleur Sainte Geneviève (Ademe, 2015)

Ainsi, grâce à des données précises sur le réseau d'assainissement, disponibles en interne, la collectivité a pu déterminer le point idéal de la récupération dans les canalisations d'eaux usées : à la fois proche de l'écoquartier et avec un débit conséquent pour puiser le plus de calories possibles, comme illustré Figure 7-4. En lien avec l'aménageur, la densité a été maximisée dans l'écoquartier pour compenser les faibles consommations thermiques des bâtiments, permettant d'obtenir une densité linéique du réseau de chaleur est de 5,6 MWh/ml. Cette densité est au-dessus du seuil minimal de l'ADEME, qui a accompagné le financement du réseau via le Fonds chaleur.

Une fois les études réalisées, la ville a lancé un appel d'offre pour une DSP du réseau de chaleur avec les solutions techniques intégrées au cahier des charges. Le groupement Cofely (du groupe Engie) et Lyonnaise des Eaux (du groupe Suez Environnement) est l'exploitant retenu en charge du financement, de la construction, de la maintenance et de la gestion du réseau.

Dans ce cas, le portage de la collectivité a donc été primordial puisqu'elle a imposé le développement d'un réseau de chaleur avec valorisation d'une source de chaleur fatale. Le choix de cette solution a été dicté par des objectifs de développement des EnR&R et le souhait de proposer des solutions innovantes. La concertation avec les autres acteurs de l'aménagement et la mise en place des conditions de viabilité de cette solution ont été simplifiées par le fait que tous ces acteurs étaient publics et rattachés à la ville de Nanterre. L'opérateur privé du réseau de chaleur ainsi que les promoteurs de bâtiments sont intervenus en seconde phase, pour la construction des infrastructures. La Lyonnaise des Eaux a financé les investissements sur la technologie de récupération d'eaux usées mais la collectivité, propriétaire de cette ressource, donne gratuitement la chaleur prélevée⁴⁴.

Cette opération fait d'ailleurs office de référence et la collectivité communique et organise des partages d'expériences (visite climat avec l'ADEME) à la fois techniques et organisationnelles pour promouvoir la répliquabilité de la solution.

⁴⁴ Informations recueillies lors de la visite de l'écoquartier Sainte-Geneviève dans le cadre des « visites climats » organisées par l'ADEME : <http://www.visitesclimat-ademe-idf.fr/>

7.3.3. Cas de la ZAC La Saulaie à Oullins (Grand Lyon)

Oullins est une ville d'environ 26 000 habitants, située en banlieue sud-ouest de Lyon et fait partie de la métropole de Lyon. Le projet en question est la réhabilitation d'un quartier appelé « La Saulaie », ancienne zone industrielle. Les ambitions générales du projet ont été officialisées en 2017 et le démarrage de la première phase de travaux est prévu pour 2021. L'ambition avec cette Zone d'Aménagement Concertée (ZAC) est de développer un quartier multifonctionnel (tertiaire et résidentiel), exposé Figure 7-5. La métropole de Lyon est le porteur du projet et souhaite mettre en œuvre des solutions techniques permettant de répondre à ses objectifs de transition énergétique, déclinés notamment dans un schéma directeur des énergies (2.3, page 76).

Sur la ZAC de 40 hectares, il est prévu de construire 850 logements neufs, de réhabiliter l'existant (parc HLM et parc de logements privés), de développer une zone économique avec 60 000 m² de bureaux, des commerces de proximité et une zone de 7,5 hectares dédiés à un parc d'activité. Enfin, des équipements publics seront également construits : un groupe scolaire, un gymnase et une crèche (Grand Lyon, 2017c). Un groupe d'étudiants de l'ENTPE⁴⁵ s'est intéressé à la planification et la gouvernance énergétique mise en place sur cette ZAC et le résultat de leurs travaux permet de comprendre le rôle des acteurs dans ce projet (Aubras et al., 2017).

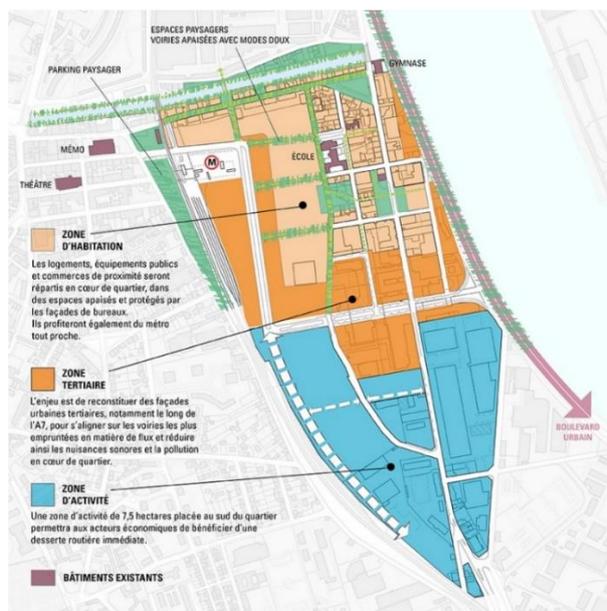


Figure 7-5 Programmation de la ZAC de la Saulaie (Grand Lyon, 2017c)

Plusieurs phases de concertation, intégrant à chaque fois un grand nombre d'acteurs (élus de la métropole de Lyon, élus de la ville d'Oullins, DREAL⁴⁶, riverains et associations de riverains dans un premier temps) ont validé les premières tendances majeures du projet (périmètre, types de construction, etc.). Des comités se sont alors constitués dont le comité de pilotage et comité technique, qui ont pour missions d'analyser des orientations politiques, techniques et financières du projet. Les questions énergétiques sont prises en compte dans ces comités, avec un niveau de détail

⁴⁵ ENTPE : Ecole nationale des travaux publics d'Etat

⁴⁶ DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, l'Aménagement et le Logement, qui est le représentant régional pour le projet et qui donne son accord pour sa création en fonction de sa conformité avec les ambitions de la région.

accru au fil des réunions et de l'avancement du projet. Le comité de pilotage, comprenant des représentants de la métropole de Lyon, de la ville des Oullins et des financeurs, propose des scénarios énergétiques qui sont analysés par le comité technique, composé d'élus, de l'aménageur lorsque celui-ci est sélectionné, et d'au moins un architecte-urbaniste, un assistant à la maîtrise d'ouvrage, d'un représentant de bureau d'études.

Le développement d'un réseau de chaleur et la récupération de chaleur sur eaux usées font parties des solutions proposées par la métropole de Lyon et les premières études ont confirmé l'intérêt de telles solutions. Plusieurs raisons justifient le choix de ces solutions : le développement des réseaux de chaleur est largement encouragé par le schéma directeur des énergies de la métropole, où déjà 8 agglomérations sont équipés d'un chauffage urbain (Grand Lyon, 2017d). La récupération de chaleur sur eaux usées fait partie des choix de la Métropole qui veut mettre en place un projet pilote sur ce sujet, comme elle l'a expliqué lors des Assises Européennes de la Transition Energétique (Grand Lyon, 2017a) dans une présentation sur l'énergie fatale sur son territoire. Le choix de la source eaux usées est également priorisée car le propriétaire de l'énergie fatale dans ce cas est la Métropole elle-même, ce qui simplifie la concertation, entièrement entre acteurs publics. En 2019, d'autres travaux d'un groupe d'étudiants de l'ENTPE ont confirmé l'intérêt des acteurs pour ce scénario (Bongrand et al., 2019) et ont évalué un potentiel énergétique de 1,7 GWh/an sur la ZAC, soit plus de 50 % des besoins en chaleur (chauffage et ECS). Dans ce scénario, la récupération d'une autre énergie fatale est par ailleurs envisagée. Il s'agit de la chaleur provenant du site industriel ARKEMA, dont le potentiel énergétique est évalué à 1,5 GWh/an.

Enfin, ce projet bénéficie également de l'appui politique du parti écologiste français Europe Ecologie les Verts (EELV) à travers des conseillers régionaux (région Auvergne-Rhône-Alpes), et municipaux (Oullins) qui ont participé à plusieurs réunions de concertation. Dans des restitutions sur ces réunions⁴⁷, le groupe EELV précise les points positifs et négatifs des réflexions sur le projet et soutient les scénarios énergétiques de valorisation de l'énergie fatale issue des eaux usées et de la création d'un réseau de chaleur.

S'il y a donc un portage politique dans ce projet, c'est avant tout la Métropole du Grand Lyon qui est moteur dans sa mise en œuvre. Il s'inscrit dans le développement de réseaux de chaleur vertueux dans tout le territoire de la Métropole, souhaité et planifié par un schéma directeur des énergies ambitieux (cf. section 2.3, page 76). Comme pour le cas de Nanterre, la gestion des eaux usées se fait en régie et le propriétaire de la chaleur fatale (dans le réseau d'assainissement) est la Métropole elle-même. Les échanges entre services de la même entité simplifient le jeu d'acteur, ce qui augmente les chances de réalisation du projet. Enfin, il est nécessaire de souligner la place importante donnée à la concertation avec tous les acteurs dans la réalisation de ce projet. Par des comités techniques et de pilotage, la Métropole a pu expliquer clairement ses choix, et notamment celui de la récupération de chaleur sur eaux usées, aux élus, citoyens, financeurs, aménageurs, urbanistes, bureaux d'études, etc.

⁴⁷ <https://rhone.eelv.fr/conseil-metropole-la-saulaie-beatrice-vessiller/>
<https://rhone.eelv.fr/zone-damenagement-concertee-de-la-saulaie-contribution-deurope-ecologie-les-verts/>

7.3.4. Cas de l'écoquartier Ginko à Bordeaux

L'écoquartier Ginko, du quartier des Berges du Lac à Bordeaux, est une zone de 32 hectares composée de 2 150 logements, 2 groupes scolaires, 28 000 m² de commerces et 25 000 m² de bureaux et services.

Les travaux sur ce quartier ont démarré en 2006 mais ne sont pas encore totalement achevés. Le projet a été présenté et primé dans le cadre de l'appel à projets Eco-quartier 2009 dans la catégorie « sobriété énergétique ». La Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) a amorcé ce projet en 2004 en lançant une consultation pour l'aménagement du quartier avec un cahier des charges ambitieux sur le plan environnemental et sociétal (performance des bâtiments, utilisation d'EnR&R locales, réseau de transport en commun et de mobilité douce, mixité sociale). L'aménageur privé Bouygues Immobilier a remporté ce marché en 2006 et forme, avec la CUB, les comités de suivi et technique du projet.

Plusieurs solutions de performances des bâtiments et d'approvisionnement énergétique sont proposées en 2007 et comparées d'un point de vue économique (coûts d'investissements et coûts globaux sur 30 ans) avec une solution de référence (chaudières à gaz à condensation pour chaque immeuble). Parmi-elles, les solutions de développement d'un réseau de chaleur sont les plus pertinentes du point de vue économique. Un des scénarios associés au réseau de chaleur est la récupération de chaleur fatale issue des eaux usées. Dans cette même étude, il est montré qu'il était plus intéressant de développer un réseau de chaleur que d'investir sur la performance des bâtiments. Ainsi, il était initialement prévu de concevoir une majorité de bâtiments à basse consommation (BBC) et qui anticipe la RT 2012 et une minorité de bâtiments à très haute performance énergétique (THPE). Finalement, les bâtiments sont conçus avec une performance RT 2005 - 10% (AMORCE & ADEME, 2011).

La CUB a validé le développement du réseau de chaleur mais a refusé de s'engager dans ce projet pour des raisons économiques (Faucheu & Pomerade, 2009). L'aménageur a donc porté la mise en place de ce système et est donc passé par un montage juridique peu répandu, une AFUL⁴⁸. Dans ce cas, l'ensemble des copropriétaires de l'écoquartier Ginko sont devenus délégués du réseau de chaleur. Ils sont les propriétaires de ce réseau privé et ont choisi un mode de gestion en DSP pour son financement, sa construction et sa maintenance. Cofely, filiale du groupe Engie, en est l'opérateur. A noter qu'il s'agissait alors d'une première pour cet aménageur, pour qui « le domaine des réseaux de chaleur lui était totalement inconnu »(AMORCE & ADEME, 2011).

Pour alimenter ce réseau de chaleur, la biomasse (80 % bois et 20 % végétale) a finalement été choisie. L'architecture sélectionnée est un réseau de chaleur interconnecté avec une boucle d'eau tempérée pour un îlot composé d'un centre commercial et de bâtiments de bureaux qui ont également des besoins de froid. Ce réseau est illustré Figure 7-6. Il s'agit, selon l'étude comparative des divers scénarios, de la solution présentant le meilleur compromis entre temps de retour sur investissement et économies de CO₂. La solution de récupération de chaleur fatale n'a pas été retenue à cause d'incertitudes sur le débit des eaux usées pour couvrir suffisamment de besoins. On peut également supposer que le manque de connaissance et de retours d'expériences sur ce sujet a également contribué l'aménageur à écarter ce scénario.

⁴⁸ AFUL (Association foncière urbaine Libre) : collectivité de propriétaires réunis pour exécuter et entretenir, à frais communs, les travaux qu'elle énumère.



Figure 7-6 Tracé du réseau de chaleur de l'écoquartier GINKO (Engie Cofely, 2011)

Le développement de l'écoquartier Ginko à Bordeaux fut donc le fruit d'une collaboration entre un acteur public, la métropole de Bordeaux (Communauté Urbaine de Bordeaux) et un acteur privé, l'aménageur Bouygues Immobilier. La CUB a imposé des objectifs environnementaux élevés pour cet écoquartier où la solution de création d'un réseau de chaleur a été retenue. En revanche, elle n'a pas souhaité être acteur de cette solution, finalement financée par une AFUL, soit de façon privée avec une mise en DSP. L'AFUL et Cofely, le délégataire du réseau de chaleur, ont opté pour un réseau de chaleur biomasse après avoir réfléchi à l'alimentation partielle du réseau par la récupération de chaleur sur eaux usées. Des incertitudes sur le débit de ces eaux usées ont écarté cette solution. On peut tout de même s'interroger sur l'intérêt qu'aurait eu la valorisation de chaleur des eaux usées vu l'architecture choisie pour réseau de chaleur : en effet, une partie de l'écoquartier est alimentée par une boucle tempérée avec des pompes à chaleur réversibles (distribution de chaud et de froid) installées dans les immeubles raccordés (des bâtiments tertiaires et un centre commercial). Le régime de température de la boucle tempérée (entre 20 et 30°C) rend pertinent l'utilisation de cette chaleur de récupération plutôt que celle de la biomasse.

En refusant de participer au montage du réseau de chaleur sur l'écoquartier, la CUB peut finalement être perçue comme moins impliquée que les autres acteurs publics de ces cas d'étude. Cette appréciation est confirmée par l'analyse des résultats d'une recherche effectuée par P. Menanteau et O. Blanchard (2013) qui comparent plusieurs écoquartiers en Europe, notamment sur le sujet des types de gouvernance mis en place. L'écoquartier Ginko fait partie des 15 écoquartiers comparés et la CUB présente le second degré d'implication le plus faible parmi toutes les autres collectivités territoriales. C'est ce qu'illustre la Figure 7-7 où les degrés d'implication sont évalués entre 0 (degré d'implication le plus faible) et 5 (degré d'implication le plus élevé). L'acronyme « Borde » correspond à l'écoquartier Ginko, évalué à 2.

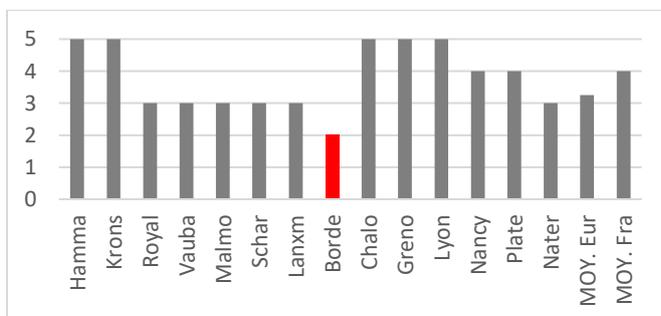


Figure 7-7 Degré d'implication de la collectivité territoriale (Menanteau & Blanchard, 2013)

7.3.5. Conclusions sur les études de cas

Deux des quatre cas d'étude présentés ici ont opté pour un réseau de chaleur alimenté par au moins une source d'énergie fatale (cas de la ville de Dunkerque et de l'écoquartier Sainte Geneviève). La ZAC de la Saulaie (Grand Lyon) envisage cette solution mais les scénarios énoncés ne sont pas encore définitifs et les travaux n'ont pas encore démarré tandis que la solution de récupération de chaleur sur eaux usées a été considérée dans le dernier cas d'étude (écoquartier Ginko) mais n'a finalement pas été retenue.

Le nombre de cas d'étude analysés ne permet pas de généraliser quant aux relations entre les acteurs rendant faisable un projet de valorisation de chaleur fatale mais quelques conclusions sont extraites dans ce paragraphe.

Collectivités territoriales (ou métropoles) : les porteurs de projets

Ces différents cas ont montré que la mise en place d'un réseau de chaleur, éventuellement alimenté en partie par une source d'énergie fatale, est conditionnée par un portage appuyé des collectivités territoriales.

A Dunkerque, le maire de la ville a été décisif, à la fin des années 1980, dans le montage du projet. Il a joué un rôle de médiateur entre les industries du territoire, jugées nocives, et les citoyens, dans un contexte de précarité énergétique élevée et des crises pétrolières des années 1970. Le lien créé à cette époque entre le réseau de chaleur et les industriels de la région permet aujourd'hui d'envisager d'autres projets de valorisation de chaleur fatale.

A Nanterre, la collectivité territoriale fut un porteur particulièrement actif. Elle a imposé la solution de réseau de chaleur sur l'écoquartier avec la récupération de chaleur sur le réseau d'assainissement. Elle a choisi de collaborer avec les acteurs publics du territoire : l'aménageur public de la ville et le service de gestion des eaux usées, qui donne gratuitement à l'exploitant du réseau de chaleur les calories récupérées.

La Métropole du Grand Lyon est le porteur principal dans la mise en œuvre du projet de récupération de chaleur sur eaux usées et de développement d'un réseau de chaleur pour la ZAC La Saulaie. La concertation entre tous les acteurs concernés a été menée en amont pour optimiser les chances de réussite du projet, porté également politiquement (élus de la Métropole du Grand Lyon et Europe Ecologie les Verts).

La CUB a mené le développement de l'écoquartier Ginko avec de fortes ambitions environnementales. Des études technico-économiques ont validé les scénarios de création d'un réseau de chaleur mais la CUB n'a pas souhaité de porter ce système, qui s'est finalement développé entre acteurs privés (aménageurs de l'écoquartier et promoteurs des bâtiments). Si une solution de récupération de chaleur sur eaux usées a été envisagée, ce scénario n'a pas été approfondi car le débit semblait trop faible pour que la quantité de chaleur récupérable soit suffisante (taux de couverture trop faible).

Question financière : un critère prépondérant

Dans tous les cas analysés, la question économique est un critère important dans la prise de décision. Cependant, il n'est pas forcément le premier critère.

A Dunkerque, le choix de récupérer la chaleur de l'usine Arcelor-Mittal s'est fait selon le critère économique en premier lieu, la précarité énergétique des citoyens de la ville étant à l'origine du projet. Aujourd'hui, la chaleur est vendue à un prix compétitif de 68€ TTC/MWh (Mabille, 2016), la moyenne nationale étant de 68,3 € HT/MWh en 2018⁴⁹.

Pour l'écoquartier Sainte-Geneviève de Nanterre, le coût de l'énergie n'a pas été la priorité. Le souhait était avant tout de porter une innovation sur le quartier avec la récupération sur eaux usées. Pour porter l'innovation, la collectivité donne gratuitement les calories puisées dans le réseau d'assainissement à Engie Cofely, l'exploitant du réseau de chaleur du quartier. Les investissements importants pour ce projet (3,8 millions d'euros) ont été en partie subventionnés par le Fonds Chaleur (à hauteur de 25 %). La vente de chaleur est bien plus élevée que la moyenne nationale (> 120 €/MWh) notamment à cause de la baisse du niveau d'aides par rapport à l'estimation initiale⁵⁰. Ce coût de vente de l'énergie est à nuancer avec la performance des bâtiments (> RT 2005) qui ont des besoins réduits en chauffage.

L'évaluation économique des scénarios n'a pas encore été réalisée sur la ZAC La Saulaie même si quelques études de préféabilité proposent des ordres de grandeur sur l'investissement de solutions techniques. Il sera intéressant de suivre l'évolution du projet de la Saulaie où les citoyens actuels de la ville connaissent un niveau de précarité énergétique élevé (Rutault and al., 2018).

Le choix des systèmes énergétiques de l'écoquartier Ginko s'est principalement fait sur des critères économiques. La CUB avait dans un premier temps opté pour la construction de bâtiments à très haute performance énergétique. Cependant, une autre étude économique intégrant d'autres scénarios a convaincu la CUB d'opter pour une solution en réseau de chaleur avec des bâtiments moins performants (RT 2005 – 10%). Cette étude soutient que le meilleur compromis entre temps de retour sur investissement et économies de CO₂ est une solution avec un réseau de chaleur alimenté par de la biomasse bois et c'est cette dernière qui a finalement été retenue devant d'autres solutions (notamment la géothermie et la récupération de chaleur sur eaux usées).

Dans les cas de l'écoquartier Sainte Geneviève à Nanterre et de la ZAC La Saulaie à Oullins, la question économique passe après les objectifs énergétiques fixés par des documents de stratégies de développement des territoires (PCAET pour Nanterre et SDE pour le Grand Lyon) ambitieux et qui imposent la mobilisation d'EnR&R locales. A Dunkerque, la situation était différente et c'est pour une raison avant tout économique qu'un projet de récupération de chaleur fatale a été réalisé. Enfin, c'est également selon le critère économique aménageur de l'écoquartier GINKO a décidé de développer un réseau de chaleur biomasse et a écarté une solution avec récupération d'énergie fatale.

⁴⁹ Prix moyen de la chaleur issue d'un réseau de chaleur : 65,6 € HT/MWh pour un réseau à plus de 50 % EnR&R et 70,9 € HT/MWh pour un réseau de chaleur à moins de 50 % EnR&R. Source : <https://www.observatoire-des-reseaux.fr/evolution-du-prix-de-la-chaleur/>

⁵⁰ <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/ecoquartier-centre-sainte-genevieve-nanterre-hauts-de-seine>

Une contractualisation plus complexe avec les propriétaires privés de chaleur fatale

Dans trois des quatre études de cas, la source d'énergie fatale valorisée ou envisagée est la chaleur provenant des eaux usées. A Dunkerque seulement, l'énergie fatale valorisée provient d'un industriel, Arcelor-Mittal.

Pour rappel, le traitement des eaux usées, au même titre que le traitement des déchets, est un service public dont la responsabilité revient aux collectivités territoriales, aux intercommunalités et aux métropoles. Ces dernières peuvent gérer ces services en interne ou bien les déléguer (via une délégation de service publique) et ainsi laisser la gestion à une entreprise privée. Dans tous les cas, la collectivité, un acteur public, reste propriétaire de la ressource.

Cette notion a son importance puisque la très grande majorité de projets de valorisation d'énergie fatale via des réseaux de chaleur en France concernent ces ressources « publiques », c'est-à-dire provenant de services publics. Il n'existe qu'un cas de récupération sur data center associé à un réseau de chaleur, et quelques autres cas de chaleur récupérée sur des activités industrielles, dont la propriété est un acteur privé. En revanche, la majorité de l'EnR&R valorisée dans les réseaux de chaleur en France provient des incinérateurs de déchets (environ 45 %, Figure 2-2, page 63).

Il semble donc qu'il est plus complexe pour les porteurs de projets de contractualiser des échanges d'énergie fatale avec des producteurs de chaleur ayant une activité privée. La pérennité des activités et le manque de modèles économiques connus sur ce type de projet refroidit les propriétaires de chaleur fatale. Ces derniers favorisent avant tout la rentabilité de leurs sociétés et sont généralement peu enclin à développer une autre action dans leurs locaux sans lien avec leur activité principale.

C'est également pour cette raison que les eaux usées sont les sources urbaines de chaleur fatale les plus regardées dans les nouveaux projets d'aménagement. Pourtant, l'eau usée ne présente pas forcément le plus d'intérêt au vu d'une valorisation thermique, comme l'a montrée la description des sources : son niveau de température (entre 12 et 25°C en fonction de la période de l'année) est plus bas que celui de la chaleur fatale issue de datacenters et d'entrepôts frigorifique. Mais le fait que la gestion et la propriété des eaux usées soient du domaine public rend cette ressource plus attractive. La chaleur fatale peut être prélevée gratuitement (comme c'est le cas pour l'écoquartier de Sainte Geneviève à Nanterre) et le dialogue avec la collectivité est plus direct.

Le Tableau 7-3 synthétise les conclusions extraites par l'analyse de ces études de cas. Trois déductions sont ainsi formulées :

- Les collectivités territoriales sont les initiatrices de projets de valorisation de chaleur fatale dans des réseaux de chaleur.
- La motivation est financière puisqu'un réseau de chaleur à majorité EnR&R est plus attractif qu'un réseau alimenté en majorité par des énergies carbonées. Cependant, les solutions avec énergies fatales ne sont pas forcément les plus économes mais peuvent être préférées par les collectivités engagées dans le développement d'EnR&R sur leurs territoires.
- La complexité juridique/contractuelle des projets rend plus simple de valoriser des sources issues de services publics que de dialoguer avec des propriétaires privés de chaleur fatale.

Tableau 7-3 Conclusions issues de l'analyse des cas d'étude

	Ville de Dunkerque	Ecoquartier Sainte Geneviève (Nanterre)	ZAC La Saulaie (Grand Lyon)	Ecoquartier Ginko (Communauté Urbaine de Bordeaux)
Portage politique	Relation forte et durable entre la collectivité et le tissu industriel	Motivation forte de la collectivité et mise en cohérence avec le PCAT de l'époque	Stratégie énergétique territoriale ambitieuse (SDE) et suivi politique rigoureux	Ambition environnementale forte mais collectivité peu impliquée dans l'aménagement de l'écoquartier.
Intérêt financier	Central	Secondaire	Secondaire	Central
Mode de gestion	Partenariat public-privé historique	Compétences en régie et mise à disposition de la ressource	Souhait de mettre à disposition une ressource gérée par un service public	Gestion du réseau de chaleur en privée, via une AFUL qui n'inclue pas la collectivité.

7.4. Conclusion du chapitre 7

Une multitude d'acteurs est concernée par le développement d'un réseau de chaleur. Tous n'ont pas les mêmes attentes et la même volonté vis-à-vis du développement de ce système de chauffage des bâtiments. Des critères de performance environnementale (production de l'énergie par des EnR&R), d'organisation (temps de travaux et contraintes liées au génie civil) et économique (niveau d'investissement, compétitivité d'une solution par rapport à une autre) sont les priorités des collectivités territoriales, des promoteurs immobiliers, des aménageurs et citoyens. Ces attentes différentes complexifient la mise en œuvre des réseaux de chaleur sur les territoires.

Avec l'intégration d'une source de chaleur fatale, une autre entité s'ajoute à ce jeu d'acteurs : le propriétaire de cette énergie. D'autres paramètres apparaissent alors, en plus des conditions techniques requises, pour que la valorisation soit viable. Cet acteur doit ainsi trouver un intérêt à fournir de l'énergie alors que son activité première est tout autre sachant que l'installation de systèmes de récupération de chaleur ne doit pas contraindre cette activité. Des raisons économiques (vente de chaleur) et de marketing (image verte, participation à l'économie circulaire du territoire) peuvent le convaincre mais la contractualisation reste un point délicat. Les freins majeurs sont financiers (détermination du porteur de l'investissement et des risques) et liés à la temporalité (engagement à fournir de la chaleur sur au moins vingt ans pour un opérateur de réseau de chaleur, soit une durée sur laquelle le propriétaire de la source de chaleur ne peut garantir son activité). Un portage fort est nécessaire pour qu'un projet de valorisation de chaleur fatale soit possible.

Ces conclusions ont été nourries par l'analyse de quatre cas d'étude : deux projets de récupération de chaleur fatale et d'intégration dans des réseaux de chaleur déjà en place, un projet en développement et un projet envisagé mais finalement abandonné. Ces analyses ont montré l'importance des collectivités territoriales comme porteurs majeurs. Dans les cas où les projets ont vu le jour, elles ont un rôle clé pour impulser les projets, provoquer la concertation entre acteurs et suivre les projets. Une autre conclusion ressort de ces réflexions : les sources fatales privilégiées pour une valorisation vers des réseaux de chaleur semblent être celles issues de services publics : UVE, eaux usées. Le dialogue et la contractualisation semblent en effet plus complexe avec des acteurs privés. Les points critiques sont notamment la pérennité incertaine des activités du secteur privé et le dialogue entre collectivité et ces acteurs. Néanmoins, dans le cas relativement rare de Dunkerque, une association d'industriels engagés pour des solutions de transition écologique est un partenaire privilégié des acteurs publics et des collectivités territoriales.

Les observations faites sur ces cas d'étude ont permis de tirer ces premières conclusions mais un échantillon plus grand de cas d'étude devrait être analysé pour les valider et les généraliser.

CHAPITRE 8 : PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Le constat fait dans le chapitre précédent met en avant l'importance du portage et de la concertation entre plusieurs acteurs (collectivité territoriale, aménageurs, propriétaires de chaleur fatale notamment) dans la faisabilité des projets de valorisation de chaleur fatale. En effet, ces paramètres peuvent être aussi déterminants que les conditions techniques et économiques évoquées dans la partie 2. Ce dernier chapitre porte sur des perspectives de recherche permettant d'orienter ces mêmes acteurs dans leurs prises de décision quant aux sources d'énergie fatale présentes sur leurs territoires.

La première piste explorée est la prise en compte de l'énergie fatale dans la planification urbaine et les stratégies énergétiques territoriales (8.1 La prise en compte de l'énergie fatale dans les stratégies énergétiques territoriales). Comme vu dans le chapitre 2, le développement des réseaux de chaleur est pensé en amont, à plusieurs échelles de territoire (national, régional puis local), à travers différents documents de stratégies et planification (SRADDET, PCAET, etc.). Il en va de même pour les EnR&R dont les sources d'énergie fatale font partie. L'objet de la première section de ce chapitre est d'étudier la véritable prise en compte des sources d'énergie fatale dans la planification urbaine et les stratégies énergétiques à travers l'analyse de plusieurs documents, aux échelles nationales, régionales et locales, et sur des territoires réels. L'objectif est d'observer les pratiques des collectivités vis-à-vis de l'énergie fatale et d'extraire les expériences positives et les manquements constatés dans les différents territoires étudiés.

La seconde piste évoquée est l'utilisation de l'aide à la décision multicritère comme méthode pour orienter le décideur sur les questions de valorisation d'énergie fatale (8.2 Analyse multicritère pour l'aide à la décision). L'intérêt des méthodes d'analyse multicritère est de mêler des aspects quantitatifs et qualitatifs (Vanderpooten, 2008), c'est-à-dire à la fois techniques (énergétiques, économiques, environnementaux) et liés à la mise en œuvre des projets (gouvernance, jeu d'acteurs) pour évaluer l'intérêt de projets. De plus en plus utilisés dans les sujets environnementaux, ce chapitre introduit le principe et l'intérêt pour la valorisation des sources urbaines de chaleur fatale.

8.1. La prise en compte de l'énergie fatale dans les stratégies énergétiques territoriales

Dans l'état des lieux des réseaux de chaleur en France en 2017 réalisé par la SNCU et la Fedene (2018), 761 réseaux de chaleur sont répertoriés, soit 27% de plus qu'en 2015. C'est environ 200 000 équivalent-logements raccordés en plus, comme le montre la Figure 8-1. Une partie de cette croissance peut raisonnablement être attribuée à l'évolution de la prise en compte de ces systèmes dans la planification urbaine et les stratégies énergétiques territoriales, qui systématisent les études concernant le développement de réseaux de chaleur (extension, densification, création). Pour rappel, la section 2.2.2 (page 71) rappelle avec quels niveaux de précision les réseaux de chaleur sont considérés dans les différents documents de planification, de l'échelle nationale jusqu'au schéma directeur d'un réseau.

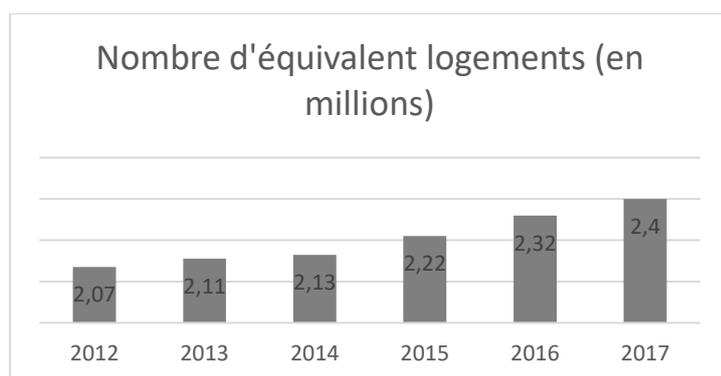


Figure 8-1 Evolution du nombre d'équivalents-logements desservis par les réseaux de chaleur (Fedene & SNCU, 2018b)

Selon l'état des lieux de la SNCU et la Fedene (2018), la quantité d'EnR&R intégrée aux réseaux de chaleur en France a plus que doublé entre 2005 et 2017 (de 8 TWh à plus de 16 TWh). Comme pour les réseaux de chaleur, l'identification des potentiels EnR&R est une action de plus en plus systématique dans les travaux de planification urbaine. Une note de l'ADEME (2019) synthétise les documents où l'étude des potentiels EnR&R locaux sont obligatoires selon les nouvelles réglementations issues des codes généraux des collectivités territoriales, de l'environnement et de l'urbanisme. Le Tableau 8-1 résume les dispositifs qui intègrent des études de potentiels EnR&R, à plusieurs échelles territoriales (région, intercommunalité, commune) et qui concernent donc différents acteurs. Cette note montre également que certaines études sont parfois réalisées dans le cadre d'une démarche volontaire et qui ne répondent donc pas à un cadre réglementaire spécifique. C'est le cas par exemple des schémas directeurs de l'énergie déjà évoqués.

Tableau 8-1 Le cadre réglementaire et les démarches volontaires des études des potentiels (ADEME, 2019)

Dispositifs intégrant une étude des potentiels	Collectivités territoriales concernées	Source juridique pour l'étude de potentiels obligatoire	
SRADDET : objectifs en matière de développement des EnR&R	Régions (en dehors de l'Ile-de-France, de la Corse et des Outre-Mer)	Art. R. 4251-5 du code général des collectivités territoriales	Etude de potentiel obligatoire
SRCAE : Évaluation du potentiel de maîtrise de l'énergie et développement de chaque filière d'EnR&R	Région Ile-de-France	Art. R. 222-1 du code de l'environnement	
PCAET – Partie diagnostic : Estimation du potentiel de développement des énergies renouvelables et de réduction de la consommation d'énergie finale	Etablissements publics de coopération Intercommunale de plus de 20 000 habitants en charge d'un PCAET	Art. R. 229-51 du code de l'environnement issu du décret n°2016-849 du 28 juillet 2016 relatif au PCAET	
Schéma Directeur des réseaux de chaleur et de froid : Evaluation de la part potentielle des énergies renouvelables et de récupération dans l'approvisionnement du réseau	Collectivités chargées d'un service public de distribution de chaleur ou de froid en service au 1er Janvier 2009	Art. L. 2224-38 du code général des collectivités territoriales issu de l'article 194 de la loi de transition énergétique	
Étude d'approvisionnement en énergie renouvelable d'une zone à aménager, pour toute action ou opération d'aménagement soumise à évaluation environnementale	Collectivités compétentes en matière d'aménagement	Art. L. 300-1 du code de l'urbanisme	
Territoire à énergie positive (TEPOS) : Scénarios énergétiques qui s'appuient sur des évaluations de potentiels EnR et des hypothèses de leur mobilisation dans le futur	Collectivités	Etude de potentiels Volontaires	
SDE : Instrument de planification volontaire en émergence. Connaissance des potentiels et contraintes de chaque territoire pour une réflexion globale sur l'optimisation du mix énergétique	Collectivités		
SCoT et PLU : Détermination des conditions permettant d'assurer la maîtrise de l'énergie et la production énergétique à partir de sources renouvelables (article L.121.1 du code de l'urbanisme) : leviers pour spatialiser les stratégies et objectifs du territoire en matière de MDE et d'EnR	Etablissements publics de coopération intercommunale, Communes		

Il serait intéressant d'analyser plus en détail ces études de potentiel, à travers des exemples concrets, en ciblant particulièrement les sources d'énergie fatale. L'objectif serait d'évaluer le niveau de détail porté sur l'énergie fatale dans ces études et d'analyser le lien entre ce niveau de détail et la réalisation effective de projets de valorisation de chaleur fatale sur le territoire. Ce travail pourrait confirmer ou infirmer l'hypothèse que la réalisation de projets de valorisation de chaleur fatale n'est possible que lorsque la planification urbaine et les stratégies énergétiques les intègrent dans le détail. L'étude doit être réalisée à plusieurs échelles géographiques (nationale, régionale, locale, échelle d'un projet d'aménagement) puisque ces études de potentiels sont réalisées dans le cadre de dispositifs dédiés à ces échelles.

Ce travail a été amorcé dans de cette thèse à travers l'analyse de plusieurs documents, et à différentes échelles. Les premiers éléments d'analyse permettent de mettre en évidence la grande hétérogénéité parmi les documents de planification urbaine et de stratégies énergiques quant à la prise en compte des sources d'énergie fatale.

8.1.1. Echelle nationale

Les études à l'échelle nationale concernant le potentiel énergétique des sources fatales ont déjà été évoquées dans le chapitre 3 (3.1.2, page 86). Elles évoquent des potentiels théoriques et des gisements bruts, calculés à partir de méthodes simplifiées qui utilisent des ordres de grandeur. Par exemple, dans son étude sur le potentiel national de chaleur fatale dans l'industrie (ADEME, 2017d), l'ADEME utilise la consommation énergétique des industries pour calculer une quantité d'énergie annuelle rejetée par certains procédés (séchoirs, fours, systèmes de refroidissement). D'un potentiel brut national d'énergie fatale évalué à plus de 100 TWh, l'étude propose également un potentiel valorisable dans des réseaux de chaleur en ciblant uniquement les sources à proximité de réseaux déjà existants (distance entre sources et réseaux non connue). Ce potentiel calculé s'élève à 16,7 TWh (pour des sources d'énergie fatale à plus de 60 °C).

A l'échelle nationale, ces potentiels énergétiques permettent de se rendre compte de la quantité d'énergie thermique dissipée et possiblement récupérable. Cependant, il s'agit avant tout d'ordre de grandeurs, sans localisation précise des potentiels. La répartition régionale du potentiel national, réalisée dans l'étude de l'ADEME (2017d), permet aux régions de s'emparer du sujet pour préciser ces gisements d'énergie fatale.

8.1.2. Echelle régionale

A l'échelle régionale, les SRCAE (définition section 2.2.2, page 71) centralisent les diagnostics de potentiels d'EnR&R. A partir de 2019, les SRADDET deviennent des nouvelles versions de ces schémas régionaux, et agrègent d'autres dispositifs d'aménagement du territoire (comme les schémas régionaux de développement touristique, d'infrastructures et de transports, ou encore le plan régional de prévention et de gestions des déchets).

Un SRCAE doit proposer un diagnostic de toutes les EnR&R de la région, et déclarer des objectifs chiffrés en matière de développement, qui s'approchent des trajectoires nationales fixées par la LTCVE.

A la lecture de plusieurs SRCAE (régions Ile-de-France, Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA), anciennes régions Centre, Nord-Pas-de-Calais), la première observation est qu'il y a une inégalité au niveau du niveau de détail accordé aux études de potentiels EnR&R, notamment quant à la prise en compte de l'énergie fatale. Par exemple, le SRCAE de l'ancienne région Centre⁵¹ évoque simplement l'énergie récupérée sur les incinérateurs de déchets dans la partie « situation du territoire ». Les autres sources d'énergies fatales (industrielles ou urbaines) sont oubliées, y compris dans la partie du « diagnostic du potentiel EnR&R ». Au contraire, la région PACA⁵² intègre des études réalisées sur la récupération de chaleur fatale issue de plusieurs sources : eaux usées, usines d'incinération, sources industrielles. Sur les eaux usées, le rapport distingue le potentiel disponible par département et par poste (en station

⁵¹ SRCAE région Centre (2012) : <http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/srcae-de-la-region-centre-a994.html>

⁵² SRCAE PACA (2013) : <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/schema-regional-climat-air-energie-r189.html>

d'épuration, en réseau d'assainissement ou au niveau des bâtiments), avec des ordres de grandeurs énergétiques annuels (Figure 8-2).

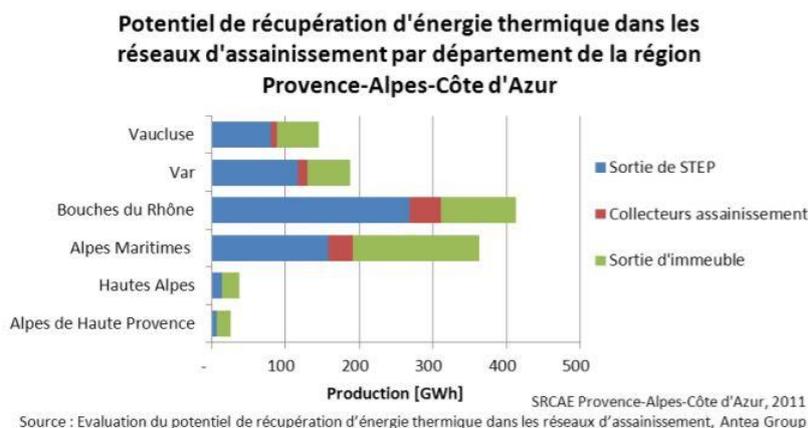


Figure 8-2 Résultats d'une étude sur le potentiel de chaleur fatale issu des eaux usées en région PACA (Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2013)

La prise en compte de l'énergie fatale dans les SRCAE n'est donc pas la même en fonction des régions. Celles qui abordent les questions du potentiel énergétique des sources fatales sont celles qui impulsent des études spécifiques sur ces sujets. C'est le cas de l'Île-de-France qui a réalisé plusieurs travaux sur ce sujet :

- L'ADEME Île-de-France a publié en 2017 un rapport suite à une étude de plusieurs années sur le potentiel d'énergie fatale dans la région (ADEME, 2017a). Dans cette étude, plusieurs sources sont caractérisées (principalement par leurs températures de rejet), cartographiées et potentialisées. Ce travail de calcul du potentiel a été précisé en plusieurs phases : du calcul de gisements maximaux (évalués à 26 500 GWh/an sur la région), l'étude a ajouté des contraintes financières, géographiques et techniques permettant d'obtenir un potentiel éligible à environ 900 GWh/an.
- A la suite de cette étude, les résultats ont été rendus public sur une plateforme cartographique appelée Energif (Réseau d'Observation Statistique de l'Énergie, 2019). Les potentiels énergétiques sont localisés et superposés avec des densités de demande (GWh/km²) afin de cibler des zones d'actions prioritaires.

La région Hauts-de-France est à l'origine d'études sur le potentiel de sources fatales industrielles. Fort du succès de l'expérience à Dunkerque avec la récupération de chaleur sur l'usine de sidérurgie (7.3.1, page 208), plusieurs travaux prospectifs ont été entrepris :

- Dans l'ancienne région Nord-Pas-de-Calais, des travaux ont répertorié et caractérisé l'énergie fatale industrielle sur le territoire (ADEME, 2012b). L'étude a été complétée par l'envoi d'un questionnaire aux industriels concernés, qui a permis d'extraire les sites les plus propices.
- Les questions de l'énergie fatale industrielle ont été prises en main par le Pôle d'Excellence Régional Energie 2020, qui anime la filière énergie de la région Hauts-de-France et mène plusieurs travaux sur le recensement d'énergie fatale (Bouve et al., 2014), étudie les moyens techniques pour valoriser la chaleur fatale de son territoire (Le Floch, 2016). A noter que l'association Ecopal, qui rassemble plus de 100 adhérents industriels de la région qui souhaitent œuvrer vers une transition écologique industrielle, fait partie du conseil d'administration d'Energie 2020, et participe donc à la coopération entre tous les acteurs (économiques, institutionnels, territoriaux et académiques) de la région.

A l'échelle régionale, l'intégration de l'énergie fatale dans la planification urbaine et les stratégies énergétiques est donc plutôt soumise à la volonté des responsables du SRADDET de la région. Une étude approfondie de tous les SRCAE serait nécessaire pour confirmer cette conclusion. Mais il est possible d'affirmer que l'énergie fatale ne dispose pas d'une étude spécifique obligatoire et cadrée comme ce qui est fait par exemple sur la biomasse. En effet, depuis 2017 et avec l'objectif de stimuler la filière, les régions doivent obligatoirement réaliser, en plus de leur SRADDET, un schéma régional biomasse (SRB). Il « vise à déterminer les orientations et actions à mettre en œuvre à l'échelle régionale ou infra-régionale pour favoriser le développement des filières de production et de valorisation de la biomasse susceptibles d'avoir un usage énergétique [...] »⁵³. Il présente les gisements de biomasse déjà mobilisés et ceux mobilisables dans le futur. Ce gisement doit être chiffré, notamment sur la possibilité d'alimenter des réseaux de chaleur futurs ou existants.

Un tel document de planification pour les énergies fatales à l'échelle régionale aurait peut-être l'intérêt de systématiser les études concernant le gisement disponible sur le territoire et d'uniformiser le niveau de précision de ces études, aujourd'hui inégales.

8.1.3. Echelle locale

L'échelle locale correspond à celle des communes, intercommunalités ou Métropoles. A cette échelle, les PCAET ont vocation à planifier le territoire en ayant un impact positif sur le changement climatique. Ils doivent impérativement contenir un diagnostic territorial sur les sujets du climat, de l'air et de l'énergie et proposer une stratégie territoriale avec des objectifs chiffrés et des moyens de mise en œuvre de ces stratégies.

Dans sa partie diagnostic, un PCAET doit donc obligatoirement exposer le potentiel de développement des EnR&R, ainsi qu'intégrer un schéma directeur des réseaux de chaleur avec une partie sur l'approvisionnement en EnR&R des réseaux.

Comme à l'échelle régionale, l'analyse de plusieurs PCAET permet de tirer quelques conclusions sur la prise en compte des sources d'énergie fatale, notamment dans la partie diagnostic du document. A noter qu'une quantité limitée de PCAET est déjà réalisée et disponible aujourd'hui. Pour rappel, cette démarche remplace depuis 2016 les PCET. Seuls les territoires dont les PCET (anciennes versions des PCAET) sont arrivés à terme sont susceptibles d'avoir réalisés un PCAET en 2019. L'ADEME recense sur une plateforme collaborative des démarches et des actions entreprises par des territoires (à plusieurs échelles)⁵⁴. Les PCAET font parties des démarches recensés. Quatorze PCAET réalisés sur des collectivités de plus de 50 000 habitants ont été analysés. Ce travail est rendu difficile par l'absence d'homogénéité entre les divers documents mis à disposition. En effet, une collectivité peut rendre disponible l'intégralité du document mais peut également ne mettre en ligne que des synthèses, des présentations ou des morceaux du PCAET.

Le Tableau 8-2 synthétise la prise en compte des sources d'énergies fatales dans les quatorze PCAET étudiés. La troisième colonne correspond à un niveau de détail quant à leur prise en compte dans ces documents. Le niveau 0 correspond à l'absence totale de considération d'au moins une source d'énergie fatale dans l'intégralité du PCAET. Le niveau 1 signifie que l'énergie fatale est abordée mais sans aucune donnée supplémentaire (quantité d'énergie déjà valorisée ou potentiel énergétique d'une source). Le niveau 2 équivaut à la prise en compte d'au moins une source d'énergie fatale et la présence d'une donnée chiffrée sur le potentiel énergétique de la source ou la quantité d'énergie déjà

⁵³ Article D.222-8 code de l'environnement

⁵⁴ Observatoire Territoires & Climat de l'ADEME : <https://www.territoires-climat.ademe.fr/observatoire>

valorisée ou encore la part de cette énergie dans le mix énergétique local. Le niveau 3 présente une précision accrue, avec la présence par exemple de supports cartographiques pour localiser les sources ou une différenciation entre le potentiel énergétique théorique et un potentiel plus réaliste. Le niveau 4 est attribué pour les PCAET réunissant tous les critères des précédents niveaux et d'éventuels autres informations (comme une différenciation entre les sources hautes et basses températures par exemple). Les critères correspondants aux différents niveaux de détail mériteraient d'être construits de manière plus rigoureuse. Ils sont à ce stade subjectifs et sont utilisés pour obtenir un aperçu de la prise en compte des sources d'énergie fatale dans les PCAET.

Tableau 8-2 Prise en compte des sources d'énergie fatale dans les PCAET

Collectivité territoriale	Sources abordées	Niveau de détail	Référence
Le Pays Bassin d'Arcachon Val de l'Eyre	UVE	2	(Sybarval, 2018)
Communauté d'agglomération Bergeracoise	Aucune	0	(SyCoTeB, 2018)
Rodez Agglomération	Aucune	0	(Rodez Agglomération, 2018)
CA du Puy-en-Velay	UVE	2	(CA Puy-en-Velay, 2019)
Communauté du Pays Voironnais	Aucune	0	(Communauté Pays Voironnais, 2018)
Saint Etienne Métropole	Industries Eaux usées	1	(Saint-Etienne Métropole, 2019)
Clermont Auvergne Métropole	UVE Industries Eaux usées	4	(Clermont Auvergne Métropole, 2018)
Grand Besançon	Industries Tertiaire	1	(Grand Besançon, 2018)
Grand Châtelleraut	UVE Eaux usées	2	(Grand Châtelleraut, 2016)
Orléans Métropole	UVE Industries	4	(Orléans Métropole, 2017)
Communauté de communes du pays d'Ancenis	Aucune	0	(Communauté de Communes du Pays d'Ancenis, 2016)
Saint-Brieuc Agglomération	Industries Eaux usées	1	(Saint-Brieuc Agglomération, 2018)
Saint-Quentin-en-Yvelines	UVE Industries Eaux usées Datacenter	3	(Conseil de développement de Saint-Quentin-en-Yvelines, 2018)
Communauté Urbaine de Dunkerque	Industries	2	(Communauté Urbaine de Dunkerque, 2015)

Quatre PCAET parmi ceux étudiés n'abordent pas du tout l'énergie fatale dans les versions disponibles de leurs diagnostics ou programmes d'actions. Les collectivités concernées sont la Communauté d'Agglomération Bergeracoise, Rodez Agglomération, la Communauté du Pays Voironnais et la Communautés de Communes du Pays d'Ancenis.

Trois PCAET ont un niveau de détail évalué à 1 avec des configurations similaires. Dans les cas de Saint-Etienne Métropole, de Grand Besançon, et de Saint-Brieuc Agglomération, aucun diagnostic n'est réalisé mais des études concrètes sont proposées dans le programme d'actions. Elles seront ciblées

sur l'industrie (groupes froids et effluents d'eau chaude) et sur les stations d'épurations du territoire pour Saint-Etienne Métropole, et sur deux industries pour Grand Besançon. Pour Saint-Brieuc Agglomération, la récupération sur eaux usées sera traitée dans une étude alors que la chaleur fatale industrielle fera l'objet d'une étude spécifique dans le cadre de la création d'un réseau de chaleur entre industries.

Les quatre PCAET qui présentent un niveau de détail sur l'énergie fatale évalué à 2 présentent des configurations différentes. Le PCAET du Pays Bassin d'Arcachon Val de l'Eyre contient dans son diagnostic la quantité d'énergie fatale valorisée via le traitement des déchets (78 GWh/an), mais il n'est pas précisé s'il s'agit d'une valorisation thermique, électrique ou des deux. Dans celui de la Communauté d'Agglomération du Puy-en-Velay, un potentiel de chaleur fatale industrielle semble mêlé avec le potentiel de solaire thermique sur le territoire (235 GWh/an). Il est simplement précisé que « le gisement de chaleur fatale disponible est difficile à estimer [...] ». Enfin, le PCAET du Grand Châtelleraut évoque l'énergie fatale dans son plan d'actions et indique que la récupération de chaleur sur eaux usées et sur l'incinération de déchets s'inscrivent dans l'objectif d'atteindre un taux de couverture des besoins de chaleur par des EnR&R d'au minimum de 15%.

Le PCAET de Saint-Quentin-en-Yvelines présente les résultats d'une étude approfondie de la chaleur fatale sur son territoire. Il n'est pas évalué à 4 selon les critères de cette analyse car les résultats de cette étude sont trop synthétiques : le potentiel chiffré de l'énergie fatale est cumulé entre toutes les sources et le détail source par source n'est pas disponible, malgré une cartographie qui permet de visualiser des ordres de grandeurs. Ainsi, il est précisé que l'étude prend en compte les datacenters du territoire, les eaux usées (stations d'épuration, réseau d'assainissement et sortie de bâtiments) ainsi qu'un UVE. Le potentiel maximal de toutes les sources cumulées est évalué à 282 GWh/an mais le potentiel réellement valorisable est de 93 GWh/an.

Enfin, deux PCAET présentent des niveaux de détail plus importants sur l'énergie fatale :

- Celui de Clermont Auvergne Métropole exprime le potentiel d'énergie récupérable sur les stations d'épuration du territoire, évalué à 77 GWh/an. Un potentiel net de 20 GWh/an est ensuite estimé à partir de considérations techniques (distances avec des bâtiments consommateurs compatibles) et économiques. D'autres sources d'énergies fatales sont également identifiées (industries, usine d'incinération), avec un potentiel total évalué à 400 GWh/an. Les data center sont également cités parmi les sources à repérer sur le territoire dans une fiche-action du plan d'actions du PCAET.
- Orléans Métropole a également intégré l'énergie fatale dans son PCAET avec un niveau de détail significatif. En plus de proposer un potentiel énergétique total (150 GWh/an), le diagnostic distingue les sources et le potentiel haute température (93 GWh/an pour les industries, usines d'incinération) des sources et du potentiel basse température (57 GWh/an). Ces résultats sont affichés sur une plateforme interactive en ligne, avec une répartition du potentiel sur toutes les communes de la Métropole.

L'échantillon de PCAET analysés dans ce travail n'est une nouvelle fois pas assez grand pour tirer des conclusions à l'échelle nationale mais un enseignement émerge malgré tout : le niveau de détail de la prise en compte de l'énergie fatale dans la majorité des PCAET est plutôt faible. Selon l'échelle de détail constitué dans cette analyse (colonne 3 du Tableau 8-2), dix PCAET sur quatorze sont à 2 ou en dessous. En d'autres termes, soit les sources d'énergie fatale ne sont pas du tout abordées dans le document, soit leur prise en compte est partielle : les sources d'énergies sont peu ou pas caractérisées,

les ordres de grandeurs évoqués cumulent plusieurs sources d'énergie fatale, parfois avec d'autres énergies.

Certains territoires proposent, malgré tout, des diagnostics et plan d'actions précis sur leurs sources d'énergie fatale, comme à Orléans Métropole ou à Saint-Quentin-en-Yvelines. Les PCAET concernés disposent de telles précisions car des études indépendantes aux autres sources d'énergie ont été menées par les territoires. Ces études ne sont pas systématiques à l'échelle locale. Comme pour l'échelle régionale, des territoires « proactifs » impulsent les bonnes pratiques pouvant permettre une meilleure prise en compte de l'énergie fatale en phase amont, c'est-à-dire lors de la planification des territoires.

Les PCAET sont des documents de planification récents (obligatoires depuis 2017 pour les intercommunalités de plus de 50 000 habitants) et peu de collectivités l'ont déjà réalisé. Il serait intéressant d'analyser un échantillon plus élevé de PCAET afin d'observer la prise en compte de l'énergie fatale dans ces derniers.

Perspectives quant à la prise en compte de l'énergie fatale dans les stratégies énergétiques territoriales

De l'échelle nationale à locale, les études de potentiel énergétique des sources de chaleur fatale sont majoritairement imprécises et surtout très inégales lorsqu'on les compare. Lorsque l'énergie fatale est évoquée, les sources urbaines sont notamment peu considérées. Ce constat est surtout visible à l'échelle régionale et locale.

Certaines régions, comme l'Île-de-France et les Hauts-de-France, sont à l'origine d'études assez approfondies sur ce sujet qui nourrissent leurs SRADDET et SRCAE (anciens SRADDET). Elles distinguent les sources hautes et basses températures et vont au-delà d'un potentiel énergétique brut en intégrant des contraintes physiques, techniques ou encore de localisation de la source par rapport à son environnement proche. Ces régions sont minoritaires mais l'échelle régionale n'est peut-être pas idéale pour approfondir les études de potentiels de sources d'énergie fatale qui présentent toutes leurs spécificités. Néanmoins, un manque de leur prise en compte dans les stratégies énergétiques régionales est constaté. Ce manque pourrait être réduit par une réglementation dédiée à ces sources d'énergies comme c'est le cas pour la biomasse qui, grâce à un schéma régional obligatoire, dispose d'un potentiel énergétique régional et un plan de développement plus précis.

Le constat est assez similaire à l'échelle locale. Les PCAET sont les documents de planification urbaine qui contiennent les stratégies énergétiques à l'échelle de communes, intercommunalités ou Métropoles. L'analyse de quatorze PCAET recensés par la plateforme « Territoires & Climat » de l'ADEME montre en effet une grande hétérogénéité de ces documents sur le sujet de l'énergie fatale. Certains PCAET (4 sur 14) n'évoquent pas du tout les sources d'énergie fatale de leur territoire. Quand ils l'évoquent, le niveau de détail est variable mais la majorité des PCAET propose des diagnostics incomplets : soit il manque des sources (notamment les sources urbaines), soit les chiffres sont imprécis (mêlés avec d'autres EnR&R ou exprimés en part d'EnR&R sur le territoire sans distinction entre les sources). Notons tout de même que certaines collectivités intègrent à leurs PCAET des études plus précises sur le potentiel d'énergie fatale de leurs territoires. Elles comprennent certaines sources urbaines (data center, eaux usées), distinguent le potentiel à haute température et basse température et estiment un potentiel brut et un potentiel net qui considèrent des limites techniques et économiques (distance entre les sources et les réseaux de chaleur, types de bâtiments compatibles avec un approvisionnement à basse température).

Ces conclusions sont tirées d'un échantillon de documents assez restreints (14 PCAET sur environ 120 communes de plus de 50 000 habitants en France). Il serait nécessaire d'effectuer ce travail sur un plus grand nombre de documents, principalement aux échelles régionales et locales. De plus, la plupart des outils de planification étudiés (SRADDET et PCAET) ont vu leur contenu évoluer récemment (en 2016). En fonction de leurs calendriers, les collectivités s'adaptent plus ou moins vite à ces changements et il serait intéressant de prendre en compte la date de parution de ces documents dans cette analyse. Nous pouvons supposer que les documents les plus récents auront une prise en compte de l'énergie fatale accrue, notamment grâce aux programmes d'accompagnement de l'ADEME et de la FNCCR déjà évoqués (2.3 **Gouvernance des réseaux de chaleur et accompagnement pour l'aide à la décision**).

L'étape suivante de cette piste de recherche consisterait à évaluer l'effet de la prise en compte détaillée de l'énergie fatale dans les stratégies énergétiques locales sur les territoires les plus avancés sur ces sujets.

8.2. Analyse multicritère pour l'aide à la décision

L'analyse multicritère pour l'aide à la décision, aussi appelée aide à la décision multicritère (ADMC) est une discipline issue de la recherche opérationnelle, une branche des mathématiques utilisée pour la gestion de systèmes complexes (Brauner, 2016). Cette section définit l'ADMC, évoque son utilisation dans les travaux sur l'aménagement urbain, l'énergie, les réseaux de chaleur et l'énergie fatale et introduit son intérêt pour poursuivre les réflexions de cette thèse sur la mise en œuvre de projets de valorisation de source de chaleur fatale.

Par définition, l'aide à la décision multicritère est « un processus qui utilise un ensemble d'informations disponibles à un instant donné, afin de formuler un problème et aboutir à une décision sur un objet précis. Dans le cadre de la décision multicritère (ADMC), l'objet de la décision est formé par un ensemble d'actions ou alternatives » (Nafi & Wery, 2010).

Pour Ben Mena (2000), les méthodes d'aide à la décision multicritère permettent « de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet ». En effet, l'analyse multicritère est une alternative à l'optimisation et aux analyses « coûts-bénéfices », qui, mathématiquement, sont des fonctions uniques où un critère est optimisé (très souvent économique). Ces méthodes prennent ainsi en compte les intérêts de plusieurs acteurs concernés par une décision, déclinés en critères et dont l'objectif est d'arriver à un choix qui concilie tous ces critères. Ces derniers peuvent être de toutes sortes, d'unités différentes et donc en principe incommensurables.

Plusieurs méthodes d'ADMC existent. Elles sont fonctions de divers problématiques (Roy & Bouyssou, 1993) et aboutissent à différents résultats : un choix entre une solution parmi plusieurs, un classement de ces solutions ou encore leur tri. Toutes les méthodes fonctionnent selon le même processus, découpées en quatre étapes majeures (Ben Mena, 2000; Nafi & Wery, 2010) :

- 1) **Déterminer les actions possibles.** Cette étape consiste à constituer tous les scénarios envisagés par tous les acteurs concernés par la problématique. Une sous-étape préalable à cette première phase est de définir le contexte, l'environnement et les acteurs du sujet, comme synthétisé dans la Figure 8-3 qui représente le processus complet de l'analyse multicritère ;
- 2) **Déterminer les critères à prendre en considération.** Les critères découlent des conséquences des actions. Ils sont de natures et d'unités différentes en fonction des acteurs, et peuvent être quantitatifs et/ou qualitatifs. Ils doivent être à la fois exhaustifs et non redondants. Une fois définis, ces critères doivent être évalués car ils n'ont pas tous la même influence. Ils sont alors pondérés, soit par les acteurs impliqués, soit après discussions entre ces acteurs ;
- 3) **Choisir la méthode d'ADMC.** En fonction du problème posé, la résolution peut se porter sur le choix d'une action, le classement des actions ou le tri des actions. Plusieurs méthodes existent en fonction de la résolution voulue ;
- 4) **Agréger les critères et analyser les résultats.** Cette étape consiste à agréger les critères de décision pour obtenir un unique critère final, qui synthétise tous les autres. Plusieurs méthodes sont possibles pour effectuer cette agrégation : par somme pondérée ou par agrégation additive.

Le résultat est l'obtention d'une note pour chaque action, permettant d'en choisir une ou de les classer et trier. Ces notes sont des recommandations, le choix final restant celui des décideurs. Ces derniers peuvent donc passer par l'analyse multicritère pour évaluer des options en intégrant des critères variés, qui représentent les priorités de tous les acteurs concernés par une option.

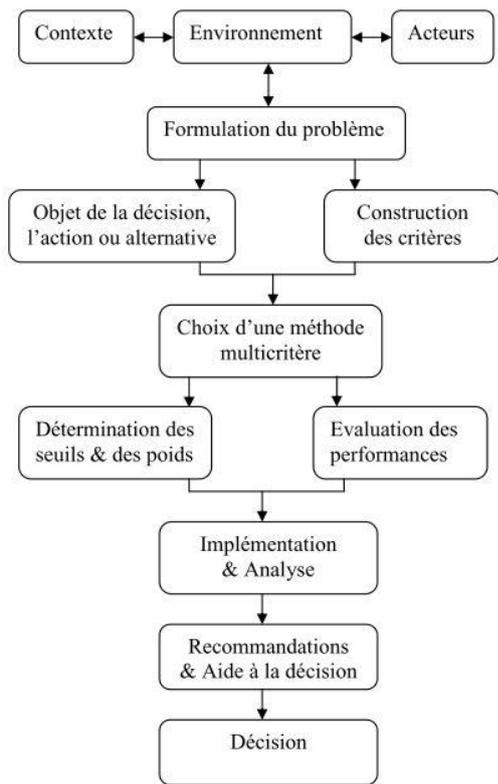


Figure 8-3 Processus de décision multicritère (Nafi & Werey, 2010)

L'analyse multicritère pour l'aide à la décision est de plus en plus utilisée dans des travaux sur l'aménagement urbain, l'évaluation environnementale de projets ou encore le choix entre plusieurs solutions énergétiques (Cherqui, 2005; Ghafghaziet al., 2010; Prévost, 2013; Rivallain, 2013; Ziemele et al., 2014). Ces méthodes appréhendent mieux la complexité de certains projets, notamment en milieu urbain où une action peut avoir des impacts directs et indirects sur plusieurs acteurs.

Ainsi, Cherqui (2005) a développé une méthode d'agrégation multicritère dans le cadre de ses travaux sur l'évaluation de projets d'aménagement durable à l'échelle de quartiers. Il justifie l'utilisation de ce processus par la nécessité d'étudier un projet urbain de façon holistique, c'est-à-dire dans sa globalité. Prévost (2013) passe également par l'analyse multicritère pour évaluer les impacts de documents de planification urbaine à la fois sur l'urbanisme règlementaire (zonage, contraintes d'aménagement, etc.) et sur la durabilité des territoires urbains. Ce travail cherche à quantifier des effets de natures différentes sur les territoires, d'où l'intérêt de passer par des méthodes multicritères.

Dans le secteur de l'énergie, l'aide à la décision multicritère est également utilisée, par exemple pour la mise en place de programmes de réhabilitation énergétique de bâtiments (Rivallain, 2013). Grâce à des méthodes d'ADMC, ces programmes répondent à la fois des critères environnementaux et économiques, tout en intégrant des indicateurs sur le bien-être des occupants des bâtiments ciblés. Perez et al. (2016) évaluent différents systèmes énergétiques de bâtiments via l'ADMC avec des critères économiques (coût global), énergétiques (taux d'EnR&R, et consommation), environnementaux (CO₂ émis) et sur la maturité des systèmes. A une autre échelle, Mourmouris (2013) s'appuie sur l'analyse multicritère pour prioriser le développement d'énergies renouvelables dans la planification énergétique d'une région en Grèce (critères économiques, technologiques, environnementaux et sociaux).

Le développement de réseaux de chaleur fait partie des actions étudiés dans plusieurs travaux sur le choix de systèmes énergétiques. Ziemele (Ziemele et al., 2014) évalue ainsi différents régimes de

température pour le développement de nouveaux réseaux de chaleur dans la région des pays baltes à partir de l'analyse multicritère. Cette technique lui permet de proposer un compromis entre pertes de distributions, coûts d'investissement, quantité d'émission de CO₂ et consommation électrique de pompes de distribution.

Certaines analyses multicritères portent sur l'approvisionnement de réseaux de chaleur via diverses sources d'énergies et notamment des sources fatales. Dénarié et al. (2019) évaluent ainsi plusieurs méthodes d'estimation du potentiel énergétique de sources industrielles de chaleur fatale dans la région de Milan, dans le cadre de leur éventuelle intégration au réseau de chaleur de la ville. Ils comparent cinq méthodes de calcul du potentiel en fonction de critères qualitatifs sur la qualité des données permettant de faire les calculs : l'origine de la donnée, son exhaustivité, sa mise à jour et son homogénéité au cours du temps (changement significatif de valeurs dû à un changement de technologie par exemple). Ces recherches montrent l'importance du détail des données d'entrée dans le calcul de potentiels énergétiques puisque l'étude évoque des différences significatives de résultats en fonction des méthodes, chaque méthode utilisant des données d'entrée de types différents.

Enfin, Ghafghazi et al. (2010) passe par une méthode d'ADMC avec l'objectif de trouver la meilleure source d'énergie de base pour le réseau de chaleur du quartier British Columbia de Vancouver. La collectivité a décidé d'utiliser la chaleur des eaux usées comme énergie de base du réseau de chaleur. Selon les auteurs, ce choix a été fait à la fois à partir des résultats d'études techniques et « de l'influence de différents acteurs ». Dans leur travail de recherche, les auteurs proposent de comparer les sources d'énergies locales présentes à Vancouver (gaz naturel, biomasse, chaleur fatale du réseau d'assainissement et géothermie) via plusieurs critères économiques (coûts d'investissement et de maintenance), environnementaux (CO₂ émis et particules fines émises), techniques (maturité de la technologie), la localisation de la source énergétique (proximité avec la chaufferie centralisée du réseau de chaleur) et la charge de trafic routier (pour le transport et la distribution de la biomasse en chaufferie). Cet exemple montre le mélange de critères quantitatifs (les critères économiques et environnementaux) et qualitatifs (les trois derniers critères cités). Ils ont été construits à partir des attentes de plusieurs acteurs regroupés en trois catégories : les développeurs qui représentent les professionnels qui réalisent les études et conçoivent la solution, le « groupe environnemental » qui évalue les scénarios techniques du point de vue des émissions qu'elles engendrent et un groupe qui représente la collectivité. Pour montrer le fort besoin de concertations entre les acteurs, l'étude développe deux scénarios, avec deux pondérations différentes des critères. Le premier scénario propose des pondérations avant dialogue entre les trois groupes d'acteur tandis que le second met à jour ces pondérations après échanges. La solution biomasse, vue négativement par le groupe « environnemental » et le groupe « collectivité » à cause des émissions de particules fines et le trafic routier engendré par le transport du bois, obtient la meilleure note dans le second scénario, contrairement au premier scénario qui favorisait la solution « eaux-usées ». Dans ce cas, la concertation entre les acteurs a permis au groupe « développeurs » d'exposer les effets de la solution biomasse et d'atténuer la vision négative de cette solution par rapport aux autres.

L'ADMC trouve donc son utilité dans des projets de développement de réseaux de chaleur, à divers échelles (planification territoriale, ou projets ciblés), pour évaluer des choix de différents types (méthodes de calcul, solutions d'approvisionnement énergétique, choix techniques) et intégrant des critères quantitatifs et qualitatifs. Les deux derniers exemples (Dénarié et al., 2019; Ghafghazi et al., 2010) montrent que les sources d'énergie fatale sont des objets pouvant être intégrés aux problématiques d'aide à la décision.

Ces travaux de thèse ont montré que la valorisation de sources urbaines de chaleur fatale à l'échelle des quartiers (via un réseau de chaleur) est dépendante d'une série de conditions de natures différentes. L'ADMC pourrait alors participer à orienter les décideurs sur ces questions en intégrant toutes ces conditions.

L'ADMC pourrait ainsi permettre de :

- Comparer une source d'énergie fatale avec d'autres énergies sur un projet d'aménagement précis. Comme dans l'exemple du quartier de Vancouver (Ghafghazi et al., 2010), une source d'énergie fatale pourrait être faire partie d'un scénario d'approvisionnement d'un réseau de chaleur, au même titre que d'autres énergies, renouvelables ou non. Les critères de l'analyse seraient alors à la fois quantitatifs et qualitatifs et de natures techniques (localisation, quantité d'énergie valorisée, compatibilité en température par rapport aux bâtiments raccordés, taux d'EnR&R), économiques (LCOE, temps de retour sur investissement, coûts d'investissements, coûts annuels de maintenance et d'exploitation), environnementaux (CO₂ émis) et liés à la mise en œuvre des solutions (pérennité de la solution, maturité, acceptabilité).
- Comparer et classer des sources d'énergies fatales sur un territoire. En plus des critères déjà cités, celui du mode de gestion de la source d'énergie fatale pourrait être ajouté à cette analyse. Comme vu dans le chapitre 7, il est plus facile de contractualiser avec des propriétaires dont la chaleur fatale provient de services publics (eaux usées, UVE).

Dans tous les cas, il serait nécessaire d'intégrer le point de vue de tous les acteurs concernés vis-à-vis de chaque critère. Chaque acteur (collectivité territoriale, opérateur d'un réseau de chaleur, propriétaire d'une source de chaleur fatale, usagers) pourrait alors proposer une pondération des critères en fonction de ses priorités. Ce travail devrait être testé sur un cas d'étude concret où la pondération des critères permettrait d'impulser la concertation entre les acteurs quant à une solution de valorisation d'énergie fatale.

L'étape suivante de cette piste de recherche serait de proposer une méthode généralisable qui regroupe tous les points critiques observés dans ces travaux de thèse et les bonnes pratiques pouvant rendre viable un projet de valorisation de chaleur fatale. Cette méthode, pouvant être sous forme d'un guide, pourrait rassembler les actions d'intégration des sources d'énergie fatale dans la planification urbaine et la stratégie énergétique des territoire, l'utilisation de Recov'Heat comme outil d'évaluation du potentiel des sources de chaleur fatale, et l'usage de l'ADMC pour initier la concertation entre les acteurs concernés sur le territoire.

CONCLUSION DE LA PARTIE 3

Le développement de réseaux de chaleur implique une multitude d'acteurs aux priorités différentes (environnementales, économiques, temporalité de travaux), ce qui peut rendre la mise en œuvre de ces projets complexes. Avec l'ajout d'une source de chaleur fatale dans ces réseaux, le propriétaire de cette énergie est un nouvel acteur à intégrer à cette complexité, au-delà des conditions techniques mises en avant dans la partie 2.

La contractualisation avec un propriétaire de chaleur fatale dépend de plusieurs aspects difficiles à anticiper : l'installation de systèmes de récupération de chaleur ne doit pas contraindre son activité, le propriétaire de cette chaleur doit y trouver un intérêt, financier ou marketing, sachant qu'il est rarement enclin à porter l'investissement, et cette contractualisation doit être compatible avec ses temporalités. Contrairement aux réseaux de chaleur, qui fonctionnent sur de longues durées et où les parties prenantes s'engagent contractuellement sur des périodes d'au moins vingt ans, les activités rejetant de la chaleur fatale sont souvent soumises à des temporalités plus faibles. Il est impossible dans certains cas de garantir une distribution de chaleur sur plus de cinq ans.

Un portage fort par les collectivités est impératif pour surmonter ces aspects et rendre possible un projet de valorisation de chaleur fatale via un réseau de chaleur. Plusieurs études de cas étudiés, sur différentes énergies fatales, ont en effet montré l'importance de ce portage des collectivités qui impulsent les projets et rassemblent les acteurs pour rendre le projet réalisable. Ces études ont également mis en avant que les sources d'énergie fatale issues d'infrastructures publiques sont plus facilement mobilisables pour la simple raison que les collectivités dialoguent directement avec les services de la ville concernés. La pérennité des sources, déjà évoquée, est également un point critique observé dans ces études de cas.

Deux pistes de recherche sont introduites dans le dernier chapitre. La première porte sur la prise en compte de l'énergie fatale dans la planification urbaine et les stratégies énergétiques. L'influence des documents associés à ces plans est assez visible sur le développement des réseaux de chaleur ces dernières années, qui connaissent une forte croissance avec près de 300 000 nouveaux équivalent-logements raccordés entre 2013 et 2018. L'hypothèse serait donc qu'une bonne intégration des sources d'énergies fatale dans ces documents, aux échelles régionales (SRADDET) et locales (PCAET) permettrait une augmentation du nombre de projets de valorisation de ces énergies. L'analyse de plusieurs de ces documents a montré une grande hétérogénéité vis-à-vis des sources d'énergie fatale : une grande majorité des documents étudiés les abordent superficiellement alors que certaines régions et certaines communes et intercommunalités ont réalisé des études plus détaillées, permettant de distinguer des sources hautes et basses températures, parfois de les localiser, avec des ordres de grandeur sur leurs potentiels énergétiques. Ces études restent marginales, l'énergie fatale ne bénéficie actuellement pas de la même considération que d'autres sources d'EnR. Cette piste doit être approfondie en analysant un panel plus large de documents de planification urbaine et en tenant compte de la date de parution de ces documents dont le contenu évolue. L'étape suivante serait d'observer les territoires ayant engagé des études avancées sur l'énergie fatale pour analyser l'influence de la prise en compte ces sources dans la réalisation de projets.

La seconde piste de recherche porte sur l'aide à la décision multicritère (ADMC) comme éventuelle méthode permettant d'orienter un décideur sur une action possible parmi plusieurs scénarios. Le principe est de décliner des objectifs, déterminés par des acteurs concernés par l'action, en critères, qui peuvent être qualitatifs et/ou quantitatifs et qui sont de différentes natures. Plusieurs méthodes

mathématiques comparent, trient ou classent des scénarios selon ces critères et déterminent donc le meilleur compromis. De plus en plus utilisée dans des études en aménagement et en énergie, l'ADMC est adaptée à la complexité des projets en milieu urbain où une multitude d'acteur est concernée directement et indirectement par un projet de développement. Ces méthodes pourraient être utilisées sur la question de la valorisation de sources d'énergie fatale, en intégrant à la fois des critères techniques, économiques, environnementaux et tous les freins de mise en œuvre observés dans cette dernière partie de manuscrit. Les points critiques soulevés ici comme la pérennité des sources fatales ou encore leur mode de gestion pourraient ainsi être intégrés à des études sur le meilleur approvisionnement possible d'un réseau de chaleur sur un quartier ou encore pour classer des sources de chaleur fatale entre-elles sur un territoire. Ces travaux auraient pour but d'impulser la concertation entre les acteurs concernés par de tels projets car la question de la pondération des critères leur seraient alors posée.

CONCLUSIONS ET OUVERTURES

Les RC sont des systèmes de chauffage mutualisés à l'échelle de plusieurs bâtiments. Installés dans les grandes villes au début du XX^{ème} siècle, ils ont évolué pour devenir aujourd'hui des systèmes importants de la transition énergétique en milieu urbain, grâce à leur capacité à mobiliser de la chaleur provenant de sources renouvelables et de récupération. En effet, plus de 50 % de l'énergie distribuée en France dans les RC provient d'EnR&R en 2017. Ils restent néanmoins des systèmes de chauffage minoritaires (environ 7 % de la population française est raccordée à un RC), leur développement étant limité par un fort investissement au démarrage, des contraintes de construction en milieu urbain (fermetures de routes et de voies, nuisances sonores, encombrement des sous-sols) et la réticence d'acteurs locaux concernés par de tels projets.

L'ambition énoncée dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte, en 2015, est de multiplier par cinq la quantité d'EnR&R livrée par les RC en 2030 par rapport à 2012. Parmi les pistes pour répondre à cet objectif, les sources d'énergie fatale sont encore peu valorisées. Il s'agit de sources de chaleur, produites par des activités dont l'activité initiale n'est pas la production de cette chaleur et qui sont rejetées dans l'atmosphère. La chaleur fatale émise par l'incinération des ordures ménagères est par exemple déjà largement valorisée en France, mais de nombreuses sources présentent des potentiels inexploités. Certaines de ces sources sont localisées à proximité des zones urbaines denses, soit les zones où les RC ont le plus d'intérêt à se développer.

L'objectif de ces travaux de thèse a été de se focaliser exclusivement sur les sources de chaleur fatale proches des zones urbaines denses et de proposer des méthodes pour évaluer l'intérêt de valoriser ces sources afin de les intégrer à des RC. Les sources de chaleur provenant des eaux usées (dans les réseaux d'assainissement et au niveau des stations d'épurations), des data centers, des blanchisseries industrielles, des entrepôts frigorifiques, des UVE et des verreries ont été étudiées.

Ces sources ont ainsi été décrites selon des critères techniques permettant de caractériser leur qualité énergétique (état, température, variabilité) et d'obtenir un ordre de grandeur quant à leur potentiel énergétique. Cette description a abouti à une catégorisation en deux classes : les sources hautes températures (UVE, verrerie) et basses températures (eaux usées, datacenter, blanchisseries, entrepôts frigorifiques). Au-delà de leur différence de température, ces deux classes présentent des sources aux potentiels énergétiques très distincts et ne sont pas localisées dans les mêmes zones. Quelques cas réels de valorisation de chaleur fatale montrent que les aménagements qui peuvent bénéficier des sources basses températures sont récents (bâtiments aux émetteurs de chauffage à basse température) et de petites tailles, la quantité d'énergie récupérable étant plus faible que les sources plus industrielles que sont les UVE et les verreries.

L'étape suivante a été la constitution de méthodes pour calculer plus finement ce potentiel et évaluer l'intérêt d'une éventuelle récupération de chaleur, en intégrant notamment l'intermittence de ces sources, leur température de rejet et leur compatibilité avec les besoins thermiques des bâtiments.

Un modèle, appelé Recov'Heat, a été développé en ce sens. Ce modèle propose en résultat des indicateurs techniques, économiques et environnementaux permettant d'évaluer la pertinence d'un projet de valorisation d'énergie fatale. Un algorithme, unique à chaque source, calcule la quantité d'énergie extractible à partir d'un minimum de connaissance sur une source ciblée. La simulation s'effectue au pas horaire et sur une année afin de représenter au mieux la variabilité du potentiel de chaque source. L'énergie réellement valorisable est ensuite calculée en comparant l'énergie extractible avec les besoins thermiques d'un ensemble de bâtiments paramétrables qui composent un quartier. Les technologies de valorisation (échangeurs, éventuellement pompes à chaleur) sont également dimensionnées en fonction des caractéristiques de la source étudiée et des besoins (compatibilité en température principalement).

Le modèle Recov'Heat a été validé sur plusieurs cas d'étude. Les résultats ont montré que les potentiels énergétiques calculés par le modèle et l'énergie réellement valorisée étaient proches malgré une tendance à surestimer ce potentiel dans Recov'Heat. Les écarts se justifient par l'approche du modèle, qui calcule un potentiel maximum récupérable sans prendre en compte d'éventuels contextes locaux comme l'arrêt de fonctionnement d'une activité qui émet de la chaleur fatale ou certains choix de dimensionnement qui ont été fait dans les cas réels.

Plusieurs simplifications dans le modèle Recov'Heat ont fait l'objet d'une analyse plus détaillée dans cette thèse. La modélisation des RC est réduite à une température de départ et une quantité d'énergie à fournir dans le modèle alors que la prise en compte de l'architecture du réseau et de son régime de température (températures aller et retour) sont en réalité impératives pour évaluer la faisabilité d'intégration d'une source de chaleur fatale. Enfin, lorsqu'il s'agit d'une source de chaleur fatale basse température, l'utilisation de PAC est nécessaire pour rehausser cette température. L'évaluation des performances des PAC dépend d'autres paramètres que ceux intégrés dans le modèle Recov'Heat : consommation d'auxiliaires et fonctionnement à charge partielle principalement.

La faisabilité d'un projet de valorisation de chaleur fatale dans un RC ne dépend pas seulement des paramètres techniques, économiques et environnementaux calculés dans le modèle Recov'Heat. En effet, la mise en œuvre de ces projets est rendue complexe par une multitude d'autres conditions.

L'analyse de plusieurs cas d'étude, portant à la fois sur des projets déjà réalisés, en cours de développement ou abandonnés, a montré l'importance du portage par la collectivité territoriale pour leur éventuelle réalisation. La complexité liée à l'interaction entre une multitude d'acteurs doit être appréhendée en amont pour rendre possible une contractualisation, notamment entre le propriétaire de la source de chaleur fatale et l'opérateur d'un RC. La pérennité d'une source et le type d'acteur (service public ou entreprise privée) qui la gère ont également une influence sur cette contractualisation. Des pistes de recherche sont proposées dans l'optique d'appréhender au mieux ces conditions. Une première revue de la place actuelle de l'énergie fatale dans la planification urbaine et la stratégie énergétique des territoires, aux échelles régionales et communales, met en avant le manque de prise en compte de ces sources malgré plusieurs bonnes pratiques observées sur des territoires. Ces premiers éléments nécessiteraient d'être confirmés et expliqués par une analyse plus approfondie. Enfin, l'aide à la décision multicritère est une méthode introduite pour prendre en compte le problème de concertations entre des acteurs concernés par un projet de développement de réseaux de chaleur avec valorisation de chaleur fatale et aux attentes différentes.

Si la valorisation de sources de chaleur fatale semble avoir un intérêt pour verdir les mix énergétiques des RC, nous pouvons nous interroger quant à la pertinence de ces solutions à long terme. Comme vu dans ces travaux, la pérennité des sources est une condition majeure à la réalisation des projets. Si une activité n'est pas certaine de perdurer sur environ vingt ans, il est difficile de contractualiser une revente de chaleur avec un opérateur de RC. Mais est-il souhaitable que cette activité produise de la chaleur fatale dans vingt années ? Le cas des datacenters montre que ces derniers tendent à améliorer leur efficacité énergétique, notamment grâce à l'utilisation de moyens passifs (sans apport d'énergie) de climatisation. Dans ce cas, il n'y a plus de rejet de chaleur à la sortie des groupes froids. Certaines activités, comme le transport et le traitement des eaux usées, seront toujours des sources de chaleur fatale mais certaines autres peuvent être amenées à se réduire dans le futur.

Enfin, la majorité des sources urbaines étudiées dans ces travaux sont à basse température. L'utilisation de PAC est donc indispensable pour produire de la chaleur (et/ou du froid) qui répond à des besoins de chauffage, de climatisation et d'ECS des bâtiments. Or les objectifs environnementaux des nouveaux aménagements sont de plus en plus ambitieux et commencent à imposer des taux d'EnR&R élevés, allant parfois jusqu'à 100 %. Les solutions de valorisation de sources locales d'énergie fatale à basse température ne sont pas 100 % EnR&R à cause de l'électricité consommée par les PAC. Elles peuvent néanmoins le devenir si l'électricité consommée provient de moyens de production renouvelable. Le couplage entre réseaux électriques et thermiques devient alors un enjeu important pour les territoires, dans l'optique d'optimiser leurs performances et leurs flexibilités.

BIBLIOGRAPHIE

- ABC CLIM. (2015). Pompe à chaleur, tout savoir sur son fonctionnement.
- AdCF. (2016). Du bilan des PCET à l'élaboration des PCAET.
- Ademe. (2015, June). Mise en place du réseau de chaleur de l'écoquartier Centre Sainte-Geneviève (Nanterre). *Cahier Technique: Construire La Ville Sur Elle-Même*, 117–118. Retrieved from <https://www.ademe.fr/construire-ville-meme>
- ADEME. (2009). Evolution des coûts d'investissements relatifs aux installations collectives bois énergie, 1–16.
- ADEME. (2012a). *Fonds Chaleur Renouvelable Méthode de calcul du niveau d'aide*.
- ADEME. (2012b). *Inventaire du gisement régional des énergies fatales perdues du Nord pas de Calais*.
- ADEME. (2014a). Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone[®]. Retrieved from [http://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/\[Base Carbone\] Documentation générale v11.0.pdf](http://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/[Base Carbone] Documentation générale v11.0.pdf)
- ADEME. (2014b). EnR'Choix - Le bon choix thermique pour votre territoire. Retrieved August 1, 2017, from <http://www.enrchoix.idf.ademe.fr>
- ADEME. (2015a). Etude des coûts d'investissement et d'exploitation associés aux installations biomasse énergie des secteurs collectifs et industriels I-.
- ADEME. (2015b). *La chaleur fatale industrielle*.
- ADEME. (2016a). *Coûts des énergies renouvelables en France*.
- ADEME. (2016b). *Déchets - Chiffres clés*. Ademe.
- ADEME. (2016c). Elus, l'essentiel à connaître sur les PCAET.
- ADEME. (2016d). Fonds chaleur 2016 - secteur réseaux de chaleur, 1–24.
- ADEME. (2017a). *Etude des potentiels de production et de valorisation de chaleur fatale en Ile-de-France*.
- ADEME. (2017b). *Industrie de la Blanchisserie*.
- ADEME. (2017c). *La chaleur fatale*. Retrieved from http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur_fatale-8821.pdf
- ADEME. (2017d). *La chaleur fatale*. Retrieved from https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2018/12/20171214_Rapport-global_restitution-enquete-2018-donnees-nationale-2017_v1.1.pdf
- ADEME. (2019). *L'étude des potentiels, un atout pour bâtir une stratégie territoriale*. Retrieved from <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/donnees-energetiques-territoriales-pour-planification-et-action-energie-climat-n3-010617.pdf>
- ADEME, & ATEE. (2015). Récupération de chaleur sur groupe de production de froid, 1–6.
- ADEME, & ATEE. (2016). [Synthèse] Étude de valorisation du stockage thermique et du power-to-heat, 1–230.

- ADEME, & CEREMA. (2017). Les données énergétiques territoriales pour la planification et l'action énergie-climat.
- ADEME, & CTTN-IREN. (2002). *La blanchisserie industrielle et l'énergie*.
- ADEME, & GrDF. (2018). *Optimiser le mix énergétique local*. Retrieved from <http://www.ademe.fr/optimiser-mix-energetique-local-planification-lamenagement>
- Adhikari, P. (2017). Feasibility study of waste heat recovery from laundry facility Case study : Mr Washing Man Oy, (February).
- AFPG. (2014). *Eco quartier Cap Azur: Chauffage et rafraichissement par géothermie sur eaux usées*. AFPG. Retrieved from <http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2015/04/Eco-quartier-Roquebrune-06.pdf>
- AFPG. (2015). Boucle d'eau tempérée : Pour une énergie verte et durable.
- AIDEE. (2000). *Carte des zones climatiques Répartition des départements par zone climatique*. Retrieved from http://www.aidee.fr/upload/actu/document/Carte_des_zones_climatiques
- AMORCE. (2011a). *Performances et recettes des Unités de valorisation énergétique des ordures ménagères (UVE)*. Retrieved from <http://www.amorce.asso.fr/fr/espace-adherents/publications/rdc/valorisation-energetique/dt-40-rce13-performances-et-recettes-des-unites-de-valorisation-energetique-des-ordures-menageres/>
- AMORCE. (2011b). Solaire thermique & Réseaux de chaleur.
- AMORCE. (2014). *Les compétences énergies des collectivités et leurs groupements (EPCI et syndicats)*. Retrieved from http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/85/98/85982807-b63f-47b5-a91e-2c64f0bf739c/enj_03_etude_competences_energies_nouveau.pdf
- AMORCE. (2016a). *Comparatif des modes de chauffage et prix de vente de la chaleur*.
- AMORCE. (2016b). *Le stockage thermique dans les réseaux de chaleur*.
- AMORCE. (2016c). Réforme territoriale: l'exercice des compétences énergie dans les territoires.
- AMORCE. (2017a). *Elaborer le volet énergie-climat du SRADDET*.
- AMORCE. (2017b). Guide de création d'un réseau de chaleur. <https://doi.org/RCT46>
- AMORCE, & ADEME. (2011). *Réseaux de chaleur & bâtiments basse consommation : l'équation impossible ?* Retrieved from http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/95/9c/959c90d0-fd20-4bce-88d6-a28ca156b8aa/rce12_bbc-rc.pdf
- AMORCE, & ADEME. (2015). *Schéma directeur d'un réseau existant de chaleur et de froid*.
- ANRU. (2015). *Enjeux énergétiques : leur prise en compte dans les projets de renouvellement urbain*. (L'aube, Ed.). Retrieved from <http://www.editionsdelalube.fr/catalogue/enjeuxenergetiques>
- APC. (2018). *Pour une meilleure prise en compte de l'énergie dans l'aménagement*.
- ASHRAE. (2016). 2016 Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices.
- Assainissement Durable. (2000). *Instruction Technique Relative Aux Reseaux D'Assainissement Des*. Retrieved from http://www.assainissement-durable.com/DM/ged/PUBLIC/textes_de_reference/int-77-284-instruction-technique-relative_reseaux-d-assainissement-agglomerations.pdf
- Aubras, A., Besselièvre, M., Lei, R., Pommier-gasnier, M., & Royer, M. (2017). *Zac de la saulaie: Quelle*

planification et gouvernance énergétique pour la mise en place de solutions énergétiques collectives sur le projet ?

- Barraqué, B. (2014). Pour une histoire des services d'eau et d'assainissement en Europe et en Amérique du Nord. *Flux*, 97–98(3), 4–15. <https://doi.org/10.3917/flux.097.0004>
- Ben Mena, S. (2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 4(2), 83–93.
- Blanchard, G. (2017). Quelle traduction des stratégies territoriales de transition énergétiques dans les choix opérationnels des projets d'aménagement ? L'exemple de Bordeaux Saint-Jean Belcier. *Développement Durable et Territoires*, (Vol. 8, n°2). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11752>
- Blanchard, O., & Debizet, G. (2016). Écoquartier, systèmes énergétiques et gouvernance : une base de données bibliographique. *Innovatio*, 2(Energies en (éco)quartier). Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01112786/document>
- Bongrand, A., Cohen, Y., Deshors, P., Mouton, M., Pellerin, T., & Perrier, C. (2019). *Quelle articulation entre les réseaux de chaleur et de gaz dans les opérations d'aménagement ?*
- Bontemps, A. (2014). Échangeurs de chaleur- Définitions et principes généraux. *Techniques de l'ingénieur*, 33(0). Retrieved from <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/echangeurs-de-chaleur-42376210/echangeurs-de-chaleur-be9515/>
- Bourret, B. (n.d.). *Les échangeurs de chaleur*.
- Bouve, T., BUTEZ, K., DOUCET-LITZLER, C., & POIRE, P. (2014). Recensement des projets de récupération d'énergie fatale en région Nord-Pas-de-Calais.
- Boye Petersen, A. (2018). Handbook Experiences from other urban waste heat recovery investments, (768936). Retrieved from <http://reuseheat.eu/2018/01/10/25-cases-urban-waste-heat-recovery/>
- Branche, L. (2014). Innovations dans les écoquartiers : quelques leçons pour la gouvernance de la transition énergétique, 14, 0–27.
- Brange, L., Englund, J., & Lauenburg, P. (2016). Prosumers in district heating networks - A Swedish case study. *Applied Energy*, 164, 492–500. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.020>
- Brauner, N. (2016). *Cours de recherche opérationnelle I*. Retrieved from http://chamilo1.grenet.fr/ujf/courses/INTRODUCTIIONALARECHERCHEOPERATIONNEL/document/RO.pdf%3FcidReq%3DINTRODUCTIIONALARECHERCHEOPERATIONNEL%26id_session%3D0%26gidReq%3D0
- Brejon de Lavergnée, M. (2002). Un secteur en transition ? L'industrie du verre en France au milieu du XIXe siècle. *Histoire, Économie et Société*, 21(4), 531–553. <https://doi.org/10.3406/hes.2002.2275>
- Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F., & Lävemann, E. (2015). Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy*, 151, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>
- Brueckner, S., Miró, L., Cabeza, L. F., Pehnt, M., & Laevemann, E. (2014). Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions - A categorization and literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.078>
- Byrne, P. (2015). Analyse exergetique du fonctionnement de thermofrigopompe. *Rencontres*

- Universitaires de Génie Civil, (May).
- CA Puy-en-Velay. (2019). *Profil climat air énergie*. Retrieved from http://www.orcae-auvergne-rhone-alpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/orcae/Profils_v1/Profil_200073419.pdf
- Caenen, L., Paron, E., Lakel, A., & Worbe, S. (2016). *Etat de l'art technique sur la récupération de la chaleur des eaux grises à échelle quartier*.
- CB Richard Ellis. (2010). *Focus Datacenters*.
- CCCE. (2014). *Règlement du service public d'assainissement*.
- CCIAG. (2016). La Compagnie de Chauffage de Grenoble. Retrieved from <http://www.cciag.fr>
- CEREMA. (2016a). *Acteurs des réseaux de chaleur*. Retrieved from http://reseaux-chaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/161220_Acteurs-des-RDC.pdf
- CEREMA. (2016b). *Réseaux de Chaleur : que dit la loi de transition énergétique ?*
- CEREMA. (2017a). *Réaliser un état des lieux et étudier le potentiel de développement des réseaux de chaleur/froid à l'échelle régionale*.
- CEREMA. (2017b). Réseaux de chaleur et aménagement. Retrieved from <https://fr.slideshare.net/reseauxchaleur/rseaux-de-chaleur-et-amnagement-transition-nergique-et-amnagement-80740010>
- CEREMA, & Bourrat, M. (2014). Réseaux de chaleur: Bases politiques.
- CETE de l'Ouest, & CERTU. (2011). *Réseaux de chaleur et PLU*.
- CETE de l'Ouest, CETE Méditerranée, CERTU, & DREAL Rhône-Alpes. (2011). *Études sur les énergies renouvelables dans les nouveaux aménagements*.
- Cewep. (2010). Twence WtE plant starts steam supply to salt production unit of AkzoNobel The, 1–3.
- Cherqui, F. (2005). *Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA*. Université de La Rochelle.
- Chiche, S., Colombert, M., & Diab, Y. (2015). Sources de chaleur fatale : quels réseaux de chaleur pour les valoriser ? In *34èmes Rencontres de l'AUGC* (pp. 1–8).
- Chiche, S., Goumba, A., Bonneau, P., Guo, X., & Colombert, M. (2016). Recov'Heat : Outil d'estimation du potentiel de sources de chaleur fatale en milieu urbain. In *SFT2016* (pp. 1–8).
- Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2014a). Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature. *Energy and Buildings*, *69*, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.017>
- Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2014b). Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. *Energy Procedia*, *45*, 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.031>
- Cisco. (2017). *Global Mobile Data Traffic Forecast Update , 2016 – 2021*. <https://doi.org/10.1109/SURV.2008.080403>
- CLCV. (2017). Il faut reprendre en main le chauffage urbain, 1–33. Retrieved from http://www.clcv.org/images/CLCV/DP_chauffage_urbain_copy_copy_copy_copy_copy.pdf
- Clermont Auvergne Métropole. (2018). *PCAET Clermont Auvergne Métropole*. Retrieved from https://clermont-ferrand.fr/docs/delib/CM30032018/30_03_2018_ODJ01.pdf

- Colombert, M., & Diab, Y. (2017). Évolution Du Rôle Des Acteurs Des Réseaux De Chaleur Dans La Conception Urbaine. *Géographie, Économie, Société*, 19(2), 197–220. <https://doi.org/10.3166/ges.19.2017.0010>
- Combe, M., & Woillez, J. (2015). *Note descriptive de la chaleur fatale issue des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)*.
- Commissariat Général au Développement Durable. (2010). *Services d'eau et d'assainissement: une inflexion des tendances ?* (Vol. 2004).
- Commissariat Général au Développement Durable. (2011). *Le service d' assainissement en France : principales données 2008. Chiffre et statistique*.
- Commissariat Général au Développement Durable. (2012). Les entrepôts et leur activité en 2010. *Chiffres & Statistiques*, 334, 1–12.
- Communauté de Communes du Pays d'Ancenis. (2016). Plan Climat Energie Territorial - PCAET - COMPA. Retrieved from <https://www.pays-ancenis.com/nos-actions/nos-projets/plan-climat-air-energie-territorial-pcaet/>
- Communauté Pays Voironnais. (2018). *Plan Climat Air Energie Territorial Pays Voironnais*. Retrieved from http://www.paysvoironnais.com/documents/Publications/PUBLICATIONS_INSTITUTIONNELLES/3volets-PCAET-final_15_06_2018.pdf
- Communauté Urbaine de Dunkerque. (2015). Plan Climat: Communauté Urbaine de Dunkerque. Retrieved from <https://www.communaute-urbaine-dunkerque.fr/planclimat/>
- Connolly, D. (2016). Heat Roadmap Europe 4 Overall Aim To identify how the EU can cost-effectively decarbonise its heating and cooling sectors ..., (695989), 27–28.
- Conseil de développement de Saint-Quentin-en-Yvelines. (2018). *DIAGNOSTIC DU PLAN CLIMAT AIR ENERGIE DE SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES*. Retrieved from <http://www.saint-quentin-en-yvelines.fr/lagglo/les-projets/sqy-sengage-pour-le-climat/pcaet-mode-demploi/>
- Conseil National de l'Emballage. (2013). Pourquoi ... les produits sont-ils emballés ainsi ? Retrieved from <http://www.conseil-emballage.org/pourquoi-les-produits-sont-ils-emballés-ainsi-2/>
- Coutard, O. (2010). Services urbains : la fin des grands réseaux ? In *Ecologies Urbaines*.
- Coutard, O., & Rutherford, J. (2013). Vers l'essor de villes « post-réseaux » : infrastructures, innovation sociotechnique et transition urbaine en Europe. *Quand l'innovation Fait La Ville Durable*, 2013, 1–29.
- CPCU. (2015). Histoire. Retrieved from www.cpcu.fr/content/download/2490/33458/file
- CPCU. (2017). Une distribution de chaleur verte et performante.
- CSTB. (2012). Réglementation thermique: Quelle est la définition d'un réseau de chaleur au sens de la réglementation thermique ? Retrieved January 1, 2017, from <http://www.rt-batiment.fr/index.php?id=144&faqid=183>
- Data Center Knowledge. (2016). Can Data Centers Really Revive Rural Towns? Retrieved January 1, 2017, from <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2016/08/29/can-data-centers-really-revive-rural-towns>
- Data Center Map. (2017). Colocation Data Centers. Retrieved January 1, 2017, from <http://www.datacentermap.com/datacenters.html>

- DataBank. (2015). Fossil fuel energy consumption.
- David, A., Mathiesen, B. V., Averfalk, H., Werner, S., & Lund, H. (2017). Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems. *Energies*, *10*(4), 578. <https://doi.org/10.3390/en10040578>
- Davies, G. F., Maidment, G. G., & Tozer, R. M. (2016). Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London. *Applied Thermal Engineering*, *94*, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.111>
- De Carlan, F. (2016). *Etat de l'art - Entrepôts frigorifiques - V0*.
- Debizet, G., Dupuy, G., & ADEME. (2016). *Scénarios de transtion énergétique en ville* (La Documen).
- Dénarié, A., Muscherà, M., Calderoni, M., & Motta, M. (2019). Industrial excess heat recovery in district heating: Data assessment methodology and application to a real case study in Milano, Italy. *Energy*, *166*, 170–182. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.153>
- Diab, Y., & Colombert, M. (2014). Le réseau d'assainissement : une ressource de chauffage durable en ville. In *32èmes Rencontres de l'AUGC* (pp. 1–10).
- Direction Générale des Finances Publiques. (2012). *TVA – Liquidation - Taux réduits - Abonnements à l'électricité, au gaz, à l'énergie calorifique et fourniture de chaleur distribuée par réseaux*.
- Douchet, F. (2015). *Optimisation énergétique de data centers par utilisation de liquides pour le refroidissement des baies informatiques*. Université de Bretagne-Sud.
- DRIEE, & RTE. (2016). *Dossier de presse "L'électricité en Ile-de-France."* <https://doi.org/10.1016/j.rfo.2014.07.011>
- Duiven, J. E., & Binard, P. (2002). Entreposage frigorifique : nouveaux développements. *Bulletin de l'Institut International Du Froid (IIF) / International Institute of Refrigeration*. Retrieved from http://www.lomag-man.org/entrepots_frigorifiques/documentation/2frarticles_bull02_2.pdf
- Durrenmatt, D. J., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, *48*(1), 548–558. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.017>
- Ebrahimi, K., Jones, G. F., & Fleischer, A. S. (2014). A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *31*, 622–638. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>
- EFFICACITY. (2015). *Etat de l'art technique de la récupération de chaleur fatale issue des blanchisseries industrielles*.
- EFFICACITY. (2017). *Data Center État des lieux*.
- Energy Cities. (2015). *Collaborer avec des industriels : le cas du réseau de chaleur de récupération industrielle de Dunkerque*. Retrieved from www.energy-cities.eu/db/Dunkerque_etude_dialogue_fr.pdf
- Energy Efficiency Guide for Industry in Asia. (2006). *Thermal Energy Equipment: Waste Heat Recovery*. *Energy Efficiency Guide for Industry in Asia*. Retrieved from http://www.energyefficiencyasia.org/docs/ee_modules/Chapter-Waste Heat Recovery.pdf
- Energycities. (2017). *La réappropriation locale de l'énergie en Europe*.
- Engie Cofely. (2011). *Plan du réseau*. Retrieved from <http://ginkobordeaux.reseau->

chaleur.com/votre-reseau-de-chaleur/plan-du-reseau/

- EPA Paris-Saclay. (2016). Schéma du réseau de chaleur et de froid de Paris Saclay. Retrieved from <https://www.epaps.fr/wp-content/uploads/2017/10/Schéma-du-réseau-de-chaleur-et-de-froid-de-Paris-Saclay-janvier-2016.pdf>
- Epp, A., & Darmayan, L. (2013). Evaluation du potentiel énergétique issu des eaux usées sur le territoire fribourgeois. Retrieved from https://www.fr.ch/eau/files/pdf60/infostep_2013_energie_eaux_usees_fr.pdf
- Euroheat & Power. (2015). District Heating and Cooling Statistics 2013, (September), 255.
- Evans, J. A., Foster, A. M., Huet, J. M., Reinholdt, L., Fikiin, K., Zilio, C., ... Van Sambeek, T. W. M. (2014). Specific energy consumption values for various refrigerated food cold stores. *Energy and Buildings*, 74, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.075>
- F2A. (2012). *Dossier Datacenter: contexte et problématiques* (Vol. 33).
- Fabre, P., Daniau, C., Gorla, S., Crouy-chanel, P. De, & Empereur-bissonnet, P. (2008). *Étude d'incidence des cancers à proximité des usines d'incinération d'ordures ménagères. Institut de veille sanitaire*.
- Faucheux, F., & Poumerade, C. (2009). GINKO - Ville de Bordeaux. *Palmarès Ecoquartier 2009*, (Sobriété énergétique et énergies renouvelables).
- Fedene, & SNCU. (2018a). *Les chiffres clés 2017 des réseaux de chaleur et de froid*. Retrieved from https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2018/11/SNCU_plaquette_2018_pages_vd.pdf
- Fedene, & SNCU. (2018b). *Les réseaux de chaleur et de froid: chiffres clés, analyses et évolution*. Retrieved from https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2018/12/20171214_Rapport-global_restitution-enquete-2018-donnees-nationale-2017_v1.1.pdf
- Fédération des industries du verre. (2012). *Rapport d'activité 2012*.
- Fédération des industries du verre. (2013). Evolution générale. Retrieved January 1, 2017, from http://www.fedeverre.fr/evolution_generale.html
- Fleiter, T., Steinbach, J., Ragwitz, M., Arens, M., Aydemir, A., Elsland, R., ... Naegeli, C. (2016). *Mapping and analyses of the current and future (2020-2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables). Work package 2: Assessment of the technologies for the year 2012*. Retrieved from https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Report_WP2.pdf
- FNCCR. (2018). *Etude territoriale de connaissance des potentiels de recuperation de chaleur sur son territoire*.
- Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>
- Fourment, J., & Fromentin, J. (2012). *Fours de verrerie*, 33(0), 0–26.
- Fuentes, E., & Waddicor, D. (2016). Improved characterization of water-to- water heat pumps part load performance. *REHVA Journal*, (August), 45–49.
- Gabillet, P. (2015). Energy supply and urban planning projects: Analysing tensions around district heating provision in a French eco-district. *Energy Policy*, 78, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.006>

- Gadd, H., & Werner, S. (2014). Achieving low return temperatures from district heating substations. *Applied Energy*, 136, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.022>
- Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., & Melin, S. (2010). A multicriteria approach to evaluate district heating system options. *Applied Energy*, 87(4), 1134–1140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.021>
- Girard-Madoux, L. (2012). *Guide de la planification énergétique territoriale*.
- Goth, J. (2010). District heating. *Fundamental, Series 8 M*. Retrieved from <https://www.energyinst.org/filegrab/?ref=3459&f=EIBI+CPD+module++Series+8+module+5>
- Goumba, A., Chiche, S., Guo, X., Colombert, M., & Bonneau, P. (2017). Recov'Heat: An estimation tool of urban waste heat recovery potential in sustainable cities. *AIP Conference Proceedings*, 1814(1). <https://doi.org/10.1063/1.4976257>
- Grand Besançon. (2018). Plan Climat Air Energie Territorial du Grand Besançon. Retrieved from <http://www.besancon.fr/index.php?p=1053>
- Grand Châtelleraut. (2016). *PCAET du Grand Châtelleraut - plan d'actions*. Retrieved from <https://www.grand-chatelleraut.fr/documents/812260/820220/Plan+d%27actions+énergie-climat+2016-2020/110a3946-ceb1-423c-8a6b-95721d0b1d1e>
- Grand Lyon. (2015). Schéma Directeur Energies Grand Lyon.
- Grand Lyon. (2017a). Chaleur fatale et réseaux de chaleur: un potentiel inexploité pour la compétitivité des réseaux ? *Assises Européennes de La Transition Energétique*, (Retour d'expérience du Grand Lyon), 85.
- Grand Lyon. (2017b). Le Schéma directeur des énergies Métropole de Lyon.
- Grand Lyon. (2017c). *Oullins La Saulaie Projet de ville*. Retrieved from https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/grands-projets/concertation-reglementaire/20171120_la-saulaie-oullins_presentation-projet.pdf
- Grand Lyon. (2017d). Répartition des réseaux de chaleur publics sur le territoire. Retrieved from https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/environnement/20171120_car te-reseaux-chaleur-froid-urbain.pdf
- Grand Poitiers. (2016). La carte du réseau de chaleur de Grand Poitiers.
- Grenelle Environnement. (2014). *Consommations et performances réelles des pompes à chaleur*.
- Guo, X., & Hendel, M. (2018). Urban water networks as an alternative source for district heating and emergency heat-wave cooling. *Energy*, 145, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.108>
- Guyard, P. (2017). Eco-quartier NANTERRE (St Geneviève) Historique et description du projet. In *Chaleur Fatale, Stockage et Réseaux*. Retrieved from <http://atee.fr/manifestations/chaleur-fatale-stockage-et-reseaux-de-chaleur>
- Hajek, I. (2013). Traitement des déchets et santé environnementale: la science, un facteur d'acceptabilité locale? L'exemple de l'incinérateur à Fos-sur-Mer. *Développement Durable et Territoires*, 4, 0–19.
- Hammond, G. P., & Norman, J. B. (2014). Heat recovery opportunities in UK industry. *Applied Energy*, 116(March 2015), 387–397. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.008>
- Hampikian, Z. (2017a). Distribuer la chaleur fatale des entreprises : la construction dynamique d'un

- réseau d'énergie décarbonée, entre flux et infrastructure. *Développement Durable et Territoires*, 8, 0–19.
- Hampikian, Z. (2017b). Structuration urbaine d'un réseau de chaleur et énergie fatale: La proximité comme variable dynamique. *Flux*, 109–110(3), 9–22. <https://doi.org/10.3917/flux1.109.0009>
- Hansen, K., Connolly, D., Lund, H., Drysdale, D., & Thellufsen, J. Z. (2016). Heat Roadmap Europe: Identifying the balance between saving heat and supplying heat. *Energy*, 115, 1663–1671. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.033>
- Harrison, V., & Letarte, P. (2013). Les bonnes pratiques énergétiques en réfrigération industrielle. Retrieved from https://aqme.org/sites/aqme.org/files/archives/DATA/TEXTEDOC/Les_bonnes_pratiques_enegetiques_en_refrigeration_industrielle.pdf
- Hélène, M. A., & Molinaro, H. (2017). *La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées*. Retrieved from http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/la-cloacothermie-ou-lenergie-renouvelable-des-eaux-usees#description
- Heliex Power. (2016). *GenSet Case Study : Glass*. Retrieved from <http://www.heliexpower.com/media/1235/hp-case-study-glass.pdf>
- HESPUL. (2015). *Intégrer l'énergie dans les projets d'aménagement* (Le Moniteur).
- Hexa Ingénierie. (2014). Etude pour le développement du chauffage urbain de la région de dunkerque.
- Hita, A., & Seck, G. (2011). Assessment of the potential of heat recovery in food and drink industry by the use of TIMES model. In *ECEEE 2011 Summer Study Energy Efficiency First: The Foundation of a Low Carbon* (pp. 735–743). Retrieved from <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00615211/>
- Homenuke, M., & Tokgoz, G. (2015). *Seeking Heat in Sewage Systems*. Vancouver: Kerr Wood Leidal - Consulting engineers. Retrieved from <https://www.districtenergy.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=2050c3e9-a6fd-5d78-2d41-c21642026cb4&forceDialog=0>
- Hughes, T. P. (1983). *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930. Technology and Culture* (Vol. 25). <https://doi.org/10.2307/3104214>
- IBGE. (2011). *comparatif des systèmes de chauffage et ECS pour les maisons individuelles et les immeubles à appartements en conception passive et rénovation basse énergie*. Retrieved from http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF_RT_BATEX_Fiche3.2_Systeme_FR_bis.pdf
- IGD, & AMF. (2009). *Indicateurs de performance pour les réseaux de chaleur et de froid*.
- Inddigo. (2011). *Solutions techniques pour optimiser les réseaux de chaleur dans un contexte de développement de bâtiments basse consommation*.
- InformationWeek. (2010). Analytics Gallery: 2010 Data Center Operational Trends Report. Retrieved January 1, 2017, from https://www.informationweek.com/analytics-gallery-2010-data-center-operational-trends-report/d/d-id/1090203?page_number=1
- INRS. (2010). *L'entreposage frigorifique*. Retrieved from <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED966>
- International Organization for Standardization. (2016). ISO/IEC 30134-2:2016 Preview Information technology -- Data centres -- Key performance indicators -- Part 2: Power usage effectiveness

- (PUE). Retrieved January 1, 2017, from <https://www.iso.org/standard/63451.html>
- Jean Carassus. (2007). *Comparaison internationale bâtiment et énergie*. Retrieved from <https://www.prebat.net/IMG/pdf/a-total-2008.pdf>
- Khoury, J., Services Industriels de Genève, & Ville de Genève. (2009). *Récupération de la chaleur des eaux usées Etude de cas de la Cité-Jonction (GE) Etude réalisée par*.
- Kim, C. (2017). Les boucles d'eau tempérée de plus en plus plébiscitées. *Techni.Cités*, pp. 1–3.
- Köfinger, M., Basciotti, D., & Schmidt, R. R. (2017). Reduction of return temperatures in urban district heating systems by the implementation of energy-cascades. *Energy Procedia*, 116, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.091>
- La fabrique de la Cité. (2014). *Quel rôle pour les villes dans la transition énergétique ?* Retrieved from [https://www.lafabriquedelacite.com/fabrique-de-la-cite/data.nsf/D81E038C58718A8DC1257E920042F2D8/\\$file/6_etude_energie_jan2014.pdf](https://www.lafabriquedelacite.com/fabrique-de-la-cite/data.nsf/D81E038C58718A8DC1257E920042F2D8/$file/6_etude_energie_jan2014.pdf)
- Lal Shrestha, N., Oppelt, T., Urbaneck, T., Camara, O., Herena, T., Oró, E., ... Macías, M. (2014). *Catalogue of advanced technical concepts for Net Zero Data Centres*.
- Lauenburg, P., & Wollerstrand, J. (2014). Adaptive control of radiator systems for a lowest possible district heating return temperature. *Energy and Buildings*, 72, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.011>
- Le Floch, A. (2016). Etat de l'art: valorisation des énergies fatales industrielles, chaleur basse température.
- Lebel, F. (2008). *Etude des phénomènes de corrosion à haute température en environnement type UVED – Développement d'un pilote laboratoire et quantification des paramètres clés gouvernant les mécanismes*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lefr, O., & Paris, F. C. (2014). Quelle place dans la loi ? Qui porte le projet ? Quel montage envisagé ? Quelles règles à respecter ?
- Legifrance. (1980). Loi n° 80-531 du 15 juillet 1980 relative aux économies d'énergie et à l'utilisation de la chaleur.
- Lemale, J., & Gourmez, D. (2008). *Pompe à chaleur géothermique sur aquifère Conception et mise en œuvre*.
- Lemmens, S. (2015). Waste heat recovery : potential , policy challenges and technology choices. *Conference: 38th IAEE International Conference, (April)*.
- Leonard, J., De Carlan, F., Castagna, G., & Guiot, T. (2017). *Data Center État des lieux*. Retrieved from https://www.efficacity.com/wp-content/uploads/2017/12/170407_Rapport-Datacenter.pdf
- Leonte, D. (2019). *Market and stakeholder analysis*.
- Lewis, J. O., Hógáin, S. N., & Borghi, A. (2013). Building Energy Efficiency in European Cities. *Urbact li*, 1–52. Retrieved from http://urbact.eu/fileadmin/general_library/19765_Urbact_WS6_ENERGY_low_FINAL.pdf
- Louwerens, T. (2014). *Data centre Investment: An investment model & associated risk-return profile*. Real Estate & Housing Faculty of Architecture.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

- Lygnerud, K., & Werner, S. (2017). Risk of industrial heat recovery in district heating systems 1. *Energy Procedia*, 116, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.063>
- Mabille, F. (2016). *Opportunités et stratégies de valorisation de la chaleur industrielle fatale*. CUD (Dunkerque). Retrieved from http://atee.fr/sites/default/files/11_-_cud_-_f.mabille_-_oportunitr_strategie.pdf
- Maes, P. (2014). Réseaux de chaleur Biomasse , géothermie , récupération et réseaux de froid. *Techniques de l'ingénieur*.
- Magnusson, D. (2012). Swedish district heating-A system in stagnation: Current and future trends in the district heating sector. *Energy Policy*, 48, 449–459. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.047>
- Malaquais, P. (2016). Urbanités # 6 – Novembre 2015 – La ville et les tuyaux Des « machines ouvertes » : rapprocher l' énergie des corps, 1–9.
- Manificat, A., & Megret, O. (2012). *Procédés de récupération/valorisation des énergies à bas niveau de température*.
- Marguerite, C. (2014). *Modèles intégrés pour l'évaluation des actions territoriales de réduction des émissions de gaz à effet de serre*. Université Nantes Angers Le Mans.
- Marquet, C. (2018). Ce nuage que je ne saurais voir. Promouvoir, contester et réguler les data centers à Plaine Commune. *Tracés*, 35. <https://doi.org/10.4000/traces.8235>
- MEDDE. (2007). Monographie sectorielle: Industries du verre, 1–55. Retrieved from http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Monographie_version_finale.pdf
- MEEDDM. (2010). *Réglementation thermique « Grenelle Environnement 2012 »*. Retrieved from http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/06_07_2010_-_generalisation_des_batiments_a_basse_consommation.pdf
- Megret, O., Bequet, L., Manificat, A., & Weber, C. (2011). *Transport longue distance et stockage d'énergie calorifique, en couplage avec des procédés de valorisation énergétique des déchets*.
- Menanteau, P., & Blanchard, O. (2013). L'énergie dans les écoquartiers: quels systèmes énergétiques et quels acteurs ? Une comparaison France - Europe.
- Meunier, F., Rivet, P., & Terrier, M. F. (2010). Froid industriel. *Aide-Mémoire*, 512 pages.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. (1953). Circulaire du 06/ 06/53 relative au rejet des eaux résiduaires par les établissements classés comme dangereux, insalubres ou incommodes en application de la loi du 19 décembre 1917 (abrogée), 1917. Retrieved from https://aida.ineris.fr/consultation_document/8589/version_pdf
- Ministère de la transition écologique et solidaire. (2015). Portail d'informations sur l'assainissement communal. Retrieved January 1, 2017, from <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/>
- Monstadt, J. (2009). Conceptualizing the Political Ecology of Urban Infrastructures: Insights from Technology and Urban Studies. *Environment and Planning A*, 41(8), 1924–1942. <https://doi.org/10.1068/a4145>
- Mourmouris, J. C., & Potolias, C. (2013). A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece. *Energy Policy*, 52, 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.074>

- MTES. (2009). La consommation d'énergie de l'industrie.
- Nafi, A., & Wery, C. (2010). Aide à la décision multicritère : Introduction aux méthodes d'analyse multicritère de type ELECTRE. In *Cours ENGEES Module Ingénierie financière* (pp. 1–21).
- Neugebauer, G., Kretschmer, F., Kollmann, R., Narodoslowsky, M., Ertl, T., & Stoeglehner, G. (2015). Mapping Thermal Energy Resource Potentials from Wastewater Treatment Plants. *Sustainability*, 7(10), 12988–13010. <https://doi.org/10.3390/su71012988>
- Nicolas Mary. (2011). Reconversion du réseau de chaleur urbain de Strasbourg-Hautepierre.
- Nuorkivi, A. (2016). District heating and cooling policies worldwide. In *Advanced District Heating and Cooling Systems*.
- Observatoire de l'Industrie Electrique. (2017). *Le cloud, les data centers et l'énergie*. Retrieved from https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/ufe_data_centers_0.pdf
- Orléans Métropole. (2017). Bilan du diagnostic Climat-Air Energie d'Orléans Métropole. Retrieved from <https://mapo.orleans-metropole.fr/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=70f5fe9d3028446199645c40aa5bcda5>
- Paris-Saclay, E. (2015). Le réseau de chaleur et de froid de Paris-Saclay. Retrieved from <https://www.epaps.fr/wp-content/uploads/2016/01/2015-09-18-Dossier-de-presse-CREM-VF.pdf>
- Parlement Européen. (2012). Directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique. *Journal Officiel de l'Union Européenne*, L 315/1, 1–56.
- Perez, N., Mailhac, A., Inard, C., & Riederer, P. (2016). Outil d'aide à la décision multicritère pour la conception de systèmes énergétiques à l'échelle du quartier. *Ibpsa*, (May), 1–8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4196.3121>
- Persson, U. (2015). *Quantifying the Excess Heat Available for District Heating in Europe*. Retrieved from <http://stratego-project.eu/wp-content/uploads/2014/09/STRATEGO-WP2-Background-Report-7-Potenital-for-Excess-Heat.pdf%5Cnhttp://maps.heatroadmap.eu>
- Pinson, G. (2006). *Projets de ville et gouvernance urbaine*. *Revue française de science politique* (Vol. 56). <https://doi.org/10.3917/rfsp.564.0619>
- Prévost, A. (2013). *Inférence(s) des documents d'urbanisme sur le territoire: Modélisation multicritère et évaluation durable. Application à la ville de Toulouse*. UTC.
- Prévot, H. (2006). Les réseaux de chaleur, 1–109.
- Quiquerez, L. (2017). *Décarboner le système énergétique à l'aide des réseaux de chaleur: état des lieux et scénarios prospectifs pour le canton de Genève*. Retrieved from <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:93380>
- RAC France. (2016). *Nouvelles compétences Climat-Energie des Collectivités territoriales*. Retrieved from <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/04/Nouvelles-compétences-climat-énergie-des-collectivités-territoriales-.pdf>
- Rack Solution. (2017). Top 10 Largest Data Centers in the World. Retrieved January 1, 2017, from <https://www.racksolutions.com/news/data-center-news/top-10-largest-data-centers-world/>
- Raoult, M. (2008). *Histoire du chauffage urbain*. (Editions L'Harmattan, Ed.).

- Rayczakowski, S. (2014). LES RESEAUX DE CHALEUR : de la planification à la réalisation.
- RECA. (2014). Potentiel d'économie d'énergie dans l'industrie et cartographie des chaleurs fatales.
- Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. (2013). *Schéma Régional Climat Air Energie Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Partie 2: Tendances, potentiels et enjeux*. Retrieved from http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SRCAE_Part2-Tendance_Potentiels_et_Enjeux_cle6caeb7.pdf
- Réseau d'Observation Statistique de l'Énergie. (2019). Energif ROSE. Retrieved from <https://www.iau-idf.fr/liau-et-vous/cartes-donnees/cartographies-interactives/energif-rose.html>
- Rezaie, B., & Rosen, M. A. (2011). District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements. *Applied Energy*, (June). <https://doi.org/10.106/j.apenergy.2011.04.020>
- Rito, M. (2016). Création d'un green datacenter : récupération calories dans le système de chauffage. In *JRES 2017* (pp. 1–19).
- Rivallain, M. (2013). *ETUDE DE L' AIDE A LA DECISION PAR OPTIMISATION MULTICRITERE DES PROGRAMMES DE REHABILITATION ENERGETIQUE*. Université Paris-Est.
- Rocher, L. (2013). Le chauffage urbain dans la transition énergétique: Des reconfigurations entre flux et réseau. *Flux*, (92), 23–35.
- Rodez Agglomération. (2018). Un plan climat pour le territoire. Retrieved from <https://www.rodezagglo.fr/fr/agglo/pcet/plan-climat-territoire.php>
- Rognon, F. (2010). *Chaleur des eaux usées: l'énergie sous nos pieds*.
- Rosén, T. (2016). *Active management of heat customers towards lower district heat return water temperature*.
- Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). *Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas* (Economica).
- Rutault, C., Rousseau, R., Motel, I., Hani, L., & Ragot, M. (2018). *Projet ZAC de La Saulaie: Concertation*.
- Saint-Brieuc Agglomération. (2018). Saint-Brieuc Agglomération: Plan Climat Air Energie Territorial. Retrieved from <https://www.saintbrieuc-armor-agglo.fr/en-un-clic/energies-et-climat/plan-climat-air-energie-territorial/>
- Saint-Etienne Métropole. (2019). *PCAET Saint Etienne Métropole - Stratégie et programme d'actions*. Retrieved from https://www.saint-etienne-metropole.fr/sites/default/files/2_pcaet-strategie_plan_actions.pdf
- Sallent Cuadrado, R. (2009). Return temperature influence of a district heating network on the CHP plant production costs, (June), 60. Retrieved from <http://hig.diva-portal.org/smash/get/diva2:228450/FULLTEXT01>
- Samarcande TLT. (2013). *Le renouvellement du parc d'entrepôts en Île-de-France*.
- SNCU. (2012). Les réseaux de chaleur EnR&R.
- SNCU. (2014). Enquête annuelle sur les réseaux de chaleur et de froid.
- SNCU. (2016). *Les chiffres clés 2015 des réseaux de chaleur*.
- Späth, P., & Rohracher, H. (2015). Conflicting strategies towards sustainable heating at an urban junction of heat infrastructure and building standards. *Energy Policy*, 78, 273–280.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.019>

- Spurr, M., Sivertsson, T., Moe, E., & Lehtmetts, M. (2014). *Economic and Design Optimization in Integrating Renewable Energy and Waste Heat with District Energy Systems*.
- Stéfan Le Dû. (2014). *Innovation dans les réseaux de chaleur*.
- Steinmo, J., & J, C. (2017). Energy Recovery Reference Project - Finnfjord.
- Sybarval. (2018). *Plan Climat Air Energie Bassin d'Arcachon Val de l'Eyre - Diagnostic territorial*. Retrieved from https://www.sybarval.fr/wp-content/uploads/2018/12/1.PCAET_DIAGNOSTIC_201218.pdf
- SyCoTeB. (2018). SoTDOCS - Le Plan Climat Air Energie Territorial. Retrieved from <http://www.scot-bergeracois.com/65-scotdocs/170-les-documents-du-scot>
- Syctom. (2015). Centre d'incinération du Syctom à Saint-Ouen.
- The Green Grid. (2012). Harmonizing Global Metrics for Data Centers Energy Efficiency. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 160. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Thépin, D. (2015). Les data centers franciliens : un essor sous contraintes ? *Métropolitiques*, 1–6. Retrieved from <http://www.metropolitiques.eu/Les-data-centers-franciliens-un.html>
- UNEP. (2013). *District Energy in Cities Milan Case Study*. Retrieved from <http://www.districtenergyinitiative.org/sites/default/files/publications/milan-case-study-290520171143.pdf>
- UNEP. (2015). *District Energy in Cities: Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy*.
- Uptime Institute. (2014). *Data Center Site Infrastructure Tier Standard : Operational Sustainability*. Uptime Institute, Llc.
- URBH. (2012). *Annuaire national des blanchisseries publiques*.
- Van de Voort, T., Zavrel, V., Torrens Galdiz, I., & Hensen, J. (2017). Analysis of performance metrics for data center efficiency. *The REHVA European HVAC Journal*, April, 37–43.
- Van Limpt, H., & Beerkens, R. (2013). Energy recovery from waste heat in the glass industry and thermochemical recuperator. *73rd Conference on Glass Problems*, 34(1), 3. <https://doi.org/10.1002/9781118710838.cn1>
- Vanderpooten, D. (2008). *Aide multicritère à la décision: Concepts, méthodes et perspectives*.
- Veolia. (2015). ENERGIDO, Les eaux usées donnent de l'énergie à la Ville.
- Veolia Eau. (2014). *ENERGIDO: Roquebrune-Cap-Martin Ecoquartier CAP AZUR*.
- Via Seva. (2017). L'annuaire des réseaux de chaleur et de froid.
- Vivian, J., Emmi, G., Zarrella, A., Jobard, X., Pietruschka, D., & De Carli, M. (2018). Evaluating the cost of heat for end users in ultra low temperature district heating networks with booster heat pumps. *Energy*, 153, 788–800. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.081>
- Wahlroos, M., Syri, S., Pärssinen, M., & Manner, J. (2017). Utilizing data center waste heat in district heating – impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.078>
- Water Wind Sun S.A. (2017). Des solution pour récupérer et valoriser l'énergie fatale.

- Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy*, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>
- Woillez, J. (2015). *Etat de l'art technique de la récupération de chaleur fatale de l'industrie du verre*.
- Woods, & Overgaard. (2016). Historical development of district heating and characteristics of a modern district heating system. In *Advanced District Heating and Cooling Systems* (pp. 3–16).
- Zhang, H., Shao, S., Xu, H., Zou, H., & Tian, C. (2014). Free cooling of data centers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.017>
- Ziemele, J., Pakere, I., Talcis, N., & Blumberga, D. (2014). Multi-criteria Analysis of District Heating Systems in Baltic States. *Energy Procedia*, 61, 2172–2175.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.102>
- Zottl, A., Nordman, R., & Miara, M. (2012). *Benchmarking method of seasonal performance*.

ANNEXES

ANNEXES PARTIE 1

ANNEXE 1.1	Indicateurs majeurs et complémentaires de la qualité d'un réseau de chaleur.....	264
ANNEXE 1.2	Description de la source fatale « eaux usées »	265
ANNEXE 1.3	Description de la source fatale « incinérateurs de déchets »	271
ANNEXE 1.4	Description de la source « data center ».....	278
ANNEXE 1.5	Description de la source fatale « blanchisseries industrielles ».....	286
ANNEXE 1.6	Description de la source fatale « verreries ».....	294
ANNEXE 1.7	Description de la source fatale « entrepôts frigorifiques ».....	299
ANNEXE 1.8	Calcul de l'énergie fatale récupérable au condenseur.....	304

ANNEXES PARTIE 2

ANNEXE 2.1	Zones Climatiques	305
ANNEXE 2.2	Pertes thermique UVE	306
ANNEXE 2.3	Détermination du coefficient de déperdition thermique	307
ANNEXE 2.4	Bibliothèque de données techniques, économiques et environnementales.....	308
ANNEXE 2.5	Analyses de sensibilité.....	309
ANNEXE 2.6	La thermofrigopompe	312

ANNEXES PARTIE 3

ANNEXE 3.1	Tableau récapitulatif des avantages/inconvénients du développement d'un réseau de chaleur pour les différents acteurs d'un aménagement (AMORCE & ADEME, 2011)	314
ANNEXE 3.2	Résumé des résultats du projet ReUseHeat, issus des travaux « analyse du marché et des acteurs » (Leonte, 2019)	315

ANNEXE 1.1 Indicateurs majeurs et complémentaires de la qualité d'un réseau de chaleur

Le Tableau A-1 liste les indicateurs majeurs (colonne de gauche) et complémentaires (colonne de droite) permettant de mesurer la qualité d'un réseau de chaleur. Ces indicateurs sont à renseigner obligatoirement dans les schéma directeur des réseaux de chaleur (AMORCE & ADEME, 2015). Ils proviennent d'un rapport de l'Institut de la Gestion Déléguée (IGD) et de l'Association des Maires de France (AMF) où les méthodes de calcul et de détermination de chaque indicateur sont explicitées (IGD & AMF, 2009).

Tableau A-1 Indicateurs de qualité des réseaux de chaleur (AMORCE & ADEME, 2015)

Indicateur majeur	Indicateur complémentaire
Assurer les besoins des abonnés en chaleur, eau chaude sanitaire et en froid	
Taux d'appel de puissance	Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance
Taux d'interruption pondéré du service	Taux d'interruption local du service Taux d'heures d'arrêts programmés par rapport aux heures d'arrêt
Puissance souscrite au km	Développement
Préserver durablement le cadre de vie et le milieu naturel et assurer la sécurité	
Bouquet énergétique Emission CO ₂	Rejets atmosphériques Rejets de polluants
Facteur de ressource primaire Consommation d'eau sur le réseau	
Coût des sinistres	Fréquence et gravité des accidents du travail
Assurer la pérennité de la fourniture de chaleur, d'eau chaude et de froid	
Renouvellement des installations	
Satisfaire les attentes de service des abonnés et usagers	
Prix moyen du MWh	Poids de la part proportionnelle aux consommations
Enquête de qualité et de satisfaction	Réclamations
	Réunions avec les représentants des usagers
Actions et initiatives engagées par l'opérateur à l'attention des abonnés	
Gérer la facturation du service dans le respect des obligations de service public	
	Demandes d'explication de fractures Taux d'avoirs
Organiser des relations de qualité entre l'autorité organisatrice, les citoyens et l'opérateur	
	Information des citoyens

ANNEXE 1.2 Description de la source fatale « eaux usées »

En France, tous les immeubles ayant accès à un réseau d'évacuation des eaux usées doivent obligatoirement être raccordés à ce réseau (article L.1331-1 du Code de la Santé Publique).

Les eaux possiblement déversées dans le réseau d'assainissement sont de différents types :

- Les eaux usées domestiques : eaux ménagères (lessive, cuisine, bains) et eaux vannes (urines et matières fécales) ;
- Les eaux pluviales ;
- Les eaux usées non domestiques : ces dernières sont déversées avec une autorisation préalable. Il s'agit des eaux de refroidissement, de rabattement de nappe et d'une façon générale des eaux telluriques (eau provenant de forages géothermique, eau de drainage de la nappe...) ou encore des eaux issues des piscines recevant du public (eaux de vidange, de lavage...). Pour avoir accès au réseau d'assainissement, ces eaux doivent respecter des normes, notamment au niveau du volume et de la qualité des eaux (quantité de polluants présents et température maximale de 30°C, pH compris entre 5,5 et 8,5) (CCCE, 2014).

Les réseaux d'assainissement dirigent les eaux usées vers des stations d'épuration où elles sont traitées. Ces deux points (collecteurs d'assainissement et stations d'épurations) sont les deux lieux où la chaleur des eaux usées est potentiellement récupérable. A noter qu'il existe des systèmes internes aux bâtiments pour récupérer la chaleur des effluents. Dans le cadre de l'intégration à des réseaux de chaleur, cette opportunité n'est pas regardée.

Réseaux d'assainissement

En France, pas moins de 5,8 milliards de m³ d'effluents sont acheminés en station d'épuration, soit une moyenne d'environ 220 m³/an par logement (Commissariat Général au Développement Durable, 2011). Il faut distinguer parmi les collecteurs d'assainissement, qui représentent 300 000 km de canalisation sur tout le territoire français, les réseaux unitaires et séparatifs. Les unitaires transportent les eaux usées domestiques, pluviales et non domestiques ensemble tandis que les réseaux séparatifs acheminent seulement les eaux usées domestiques vers l'épuration.

Les réseaux unitaires sont plus anciens et représentent environ 100 000 km et sont présents surtout dans les petites communes (< 400 habitants) ou au contraire dans des grandes agglomérations et des centres villes (>50 000 habitants). Les réseaux séparatifs représentent les 200 000 km restants.

Stations d'épuration

En 2015, on compte en France 21 079 stations d'épurations, qui équivalent à une charge de 78 millions d'équivalents-habitants⁵⁵ (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2015). L'objectif d'une station d'épuration est d'éliminer la pollution présente dans les eaux usées : matières en suspensions, matières organiques (carbone) et nutriments (azote, voir phosphore). Les matières en suspensions sont traditionnellement éliminées par une étape de décantation, alors que le carbone et l'azote sont abattus grâce à des procédés de traitement biologique.

⁵⁵ Equivalent-habitant : Unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Cette unité de mesure se base sur la quantité de pollution émise par personne et par jour (Directive européenne du 21 mai 1991 1 EH=60g de DBO5/jour soit 21,6 kg de DBO5/an, le DBO5 étant la demande biochimique en oxygène).

Caractéristiques de la chaleur issue des eaux usées

Le Tableau A-2 décrit la chaleur fatale des eaux usées selon les critères présentés dans la section précédente (3.3.1 **Critères de description**).

Tableau A-2 Description de la source fatale "Eaux usées"

Critères	Description
Etat	Liquide
Température	Basse température (10°C - 30°C)
Localisation	Urbain dense
Variabilité	Variabilité journalière et saisonnière
Potentiel énergétique	< 3 GWh/an
Pérennité	Long terme
Gestion	Publique et/ou privée

Le principe est de prélever les calories des eaux usées pour chauffer une source d'eau froide par des échanges thermiques. Cette source froide est donc pré-réchauffée et est utilisée comme entrée d'une pompe à chaleur. C'est donc une source de chaleur liquide, et à basse température.

En effet, l'eau usée circulant dans les collecteurs est plus ou moins chaude en fonction des saisons. Si la variation de la température extérieure n'influe pas la température dans le collecteur sur une journée, la différence de température extérieure entre les saisons se répercute sur les eaux usées. Les températures peuvent varier de 10°C à 30°C (Durrenmatt & Wanner, 2014), les valeurs seuils dépendent également de la localisation des collecteurs. Dans le Nord de la France, les températures des réseaux d'assainissements sont globalement plus faibles de plusieurs degrés par rapport aux réseaux situés dans le Sud de la France. La réglementation indique que toute eau rejetée dans les collecteurs d'assainissement doit être inférieure à 30°C (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 1953). Globalement, les réseaux séparatifs ont une température de quelques degrés supérieurs aux réseaux unitaires, qui contiennent également les eaux de pluie. La Figure A-1 représente divers profils annuels de température des eaux usées, à Nanterre (source : Efficacity), Montpellier (Veolia, 2015), Genève (Khoury et al., 2009) et Vancouver (Homenuke & Tokgoz, 2015). Tous montrent la même tendance, à savoir le réchauffement des eaux usées en été mais les températures diffèrent : de 9 °C à 20 °C pour un Nanterre et de 14 °C à 27 °C pour Montpellier. Des variations de températures sur une même journée peuvent également avoir lieu en fonction du lieu de la mesure et des eaux qui sont déversées. Certains rejets industriels (eaux de refroidissement par exemple) ont tendance à réchauffer ponctuellement et localement les températures du réseau d'assainissement (sans que l'eau ne dépasse les 30°C).

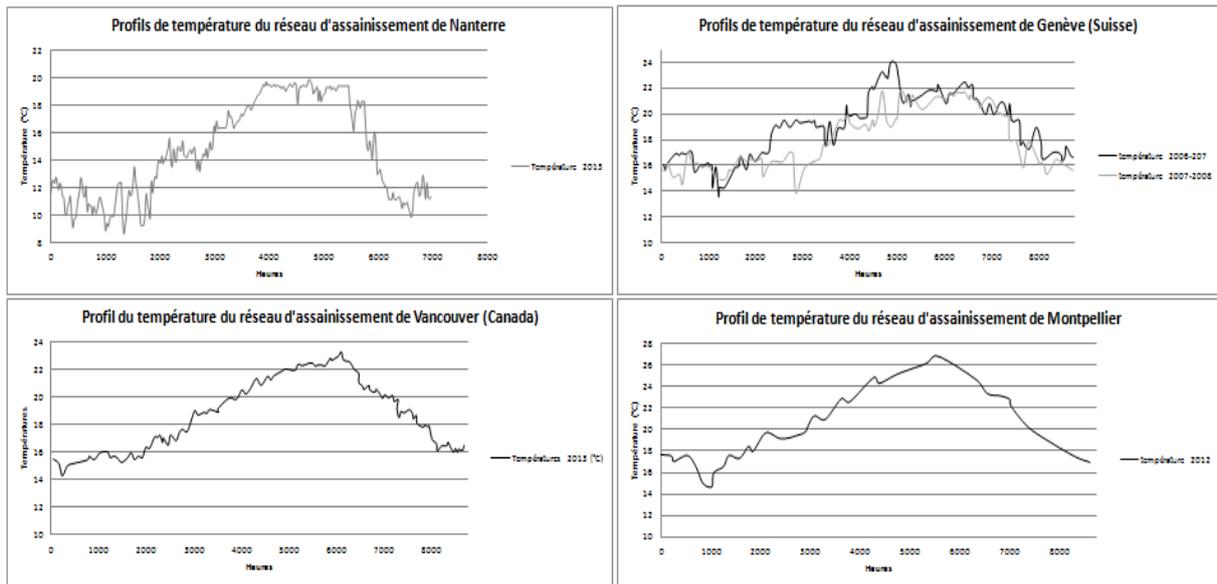


Figure A-1 Profils annuels de températures d'eaux usées

Tous les bâtiments en milieu urbain sont reliés à un réseau d'assainissement. Les canalisations souterraines passent donc en plein cœur des villes et se situent sous les grandes artères. Les tronçons du réseau sont de différentes tailles en fonction du nombre de bâtiments raccordés et certains tronçons agrègent les eaux usées de plusieurs quartiers. Un réseau s'achemine jusqu'à une station d'épuration. Cette dernière est très souvent située sur des aires moins denses comme des zones industrielles et péri-urbaines. Si ces deux points pour la récupération de chaleur sont envisageables (réseau d'assainissement et station d'épuration), les canalisations d'assainissement ont l'avantage d'être situés au plus près des bâtiments consommateurs de chaleur. Les exemples sur la figure suivante (Figure A-2), à Bologne (Italie) et dans le centre-ville d'Angers, illustrent bien que les réseaux d'assainissement suivent les artères des villes.



Exemple 1 : Carte de la ville de Bologne et tracé du réseau d'assainissement (Cipolla & Maglionico, 2014a)



Exemple 2 : Réseau d'assainissement départemental à Angers⁵⁶

Figure A-2 Exemple de tracés de réseaux d'assainissement

La variabilité de la source est ici représentée par son débit. Sa valeur conditionne directement la quantité de chaleur récupérable : plus elle est élevée, plus la quantité d'énergie extractible est importante. La variation du débit est donc une donnée clé pour appréhender la valorisation de la chaleur des eaux usées. Le débit fluctue suivant le nombre d'habitants raccordés au réseau et leur consommation d'eau. Ainsi, les systèmes d'assainissement et d'épuration sont dimensionnés en fonction du nombre d'équivalents habitants ($E.H$), tronçon par tronçon. Le débit moyen Q_m (en l/s) se calcule simplement avec le débit moyen journalier d'un habitant (qm en l/s) :

⁵⁶ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/reseau-de-collecte-des-eaux-usees-alm/>

$$Q_m = E.H * q_m$$

Ici, $E.H$ correspond au nombre d'habitants raccordés au tronçon du réseau d'assainissement et q_m est le débit moyen journalier d'un $E.H$. Mais le rejet d'eaux usées est une activité très intermittente et les débits se caractérisent par des pointes répertoriées à certains moments de la journée : le matin et le soir où le rejet d'eaux liés aux usages domestiques est très important. C'est pourquoi le débit de pointe Q_p est utilisé pour le dimensionnement des canalisations d'assainissement et dépend du coefficient de pointe p :

$$Q_p = Q_m * p, \text{ avec } p = a + \frac{b}{\sqrt{Q_m}} \text{ (} Q_m \text{ en l/s)}$$

Les valeurs de a et b sont prises à 1,5 et 2,5 et ces chiffres sont validés dans un document d'instruction (Assainissement Durable, 2000). Dans la figure suivante (Figure A-3), des profils journaliers de débits de sections de trois réseaux d'assainissement, Nanterre (source : Efficacy), Hyères (Caenen et al., 2016), Bologne (Cipolla & Maglionico, 2014a) et une station d'épuration, à Montpellier (Veolia, 2015) sont affichés et montrent les deux pics de la journée. Il s'agit de profils moyens issus de mesures, les débits variant chaque jour en fonction des activités (différences entre jours de semaine, de weekend, fériés, vacances scolaires, etc.). Les débits sont bien plus élevés au niveau des stations d'épurations car ces dernières cumulent tous les débits des eaux rejetées par tous les bâtiments reliés au réseau d'assainissement. Sur un même réseau d'assainissement, les débits peuvent varier tronçon par tronçon et sont de plus en plus élevés à l'approche de la station d'épuration. Dans leur étude sur la récupération de chaleur sur les eaux usées de Bologne (Italie), Cipolla étudie les variations et les écarts de débits entre différents sections du réseau et montrent ce phénomène (Cipolla & Maglionico, 2014b).

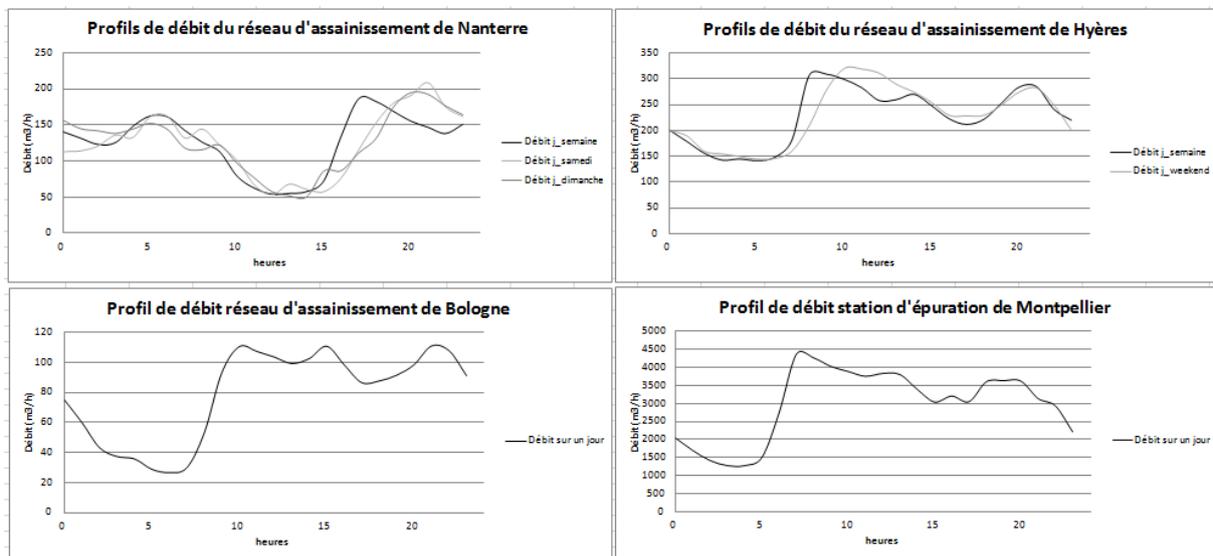


Figure A-3 Profils journaliers de débits d'eaux usées

Les périodes de pointe se retrouvent dans tous les profils, quel que soit le niveau moyen du débit. Ces profils sont utilisés pour le calcul détaillé des potentiels énergétiques : des profils de fraction horaires sont calculés. Ils permettent de retrouver des profils journaliers de débit, intégrant les périodes de pointes, à partir du débit moyen.

$$fh(i) = \frac{Q(i)}{Q_m * 24} \text{ où } fh \text{ correspond à la fraction horaire à l'heure } i \text{ et } Q \text{ le débit à l'heure } i.$$

L'énergie récupérable dépend donc principalement de la température des eaux usées et de leur débit d'écoulement mais certaines contraintes viennent limiter la valorisation de toute la chaleur présente.

En effet, la fonction première des réseaux d'assainissement et des stations d'épuration est de traiter les eaux usées, via un processus que la récupération de chaleur ne doit pas perturber. Ce dernier consiste à éliminer la pollution présente dans les eaux usées (matières en suspensions, organiques, nutriments) par des étapes de décantation et de traitement biologique. Si la température d'arrivée de l'eau usée est trop basse au niveau de la station d'épuration, la croissance des micro-organismes utiles au processus se voit perturbée. La valeur minimale théorique prise par les opérateurs est de 12°C (Caenen et al., 2016), même si en hiver, elle est parfois plus basse. Il faut donc veiller à ne pas trop refroidir les eaux usées.

Le calcul du potentiel est expliqué dans une session dédiée dans la partie 2 mais l'ordre de grandeur est de quelques GWh/an environ. Le retour d'expérience de valorisation de la chaleur des eaux usées dans des réseaux de chaleur traduit des quantités récupérées entre 1 et 4 GWh/an. Le principe est d'utiliser un couplage échangeur de chaleur et pompe à chaleur (PAC) pour préchauffer une eau à partir des eaux usées et de sortir de la PAC à la température d'usage, c'est-à-dire celle de l'émetteur de chauffage ou de l'ECS. Le potentiel peut être supérieur lorsque certaines conditions sont réunies (débit très important et grands échangeurs de chaleur).

Les réseaux d'assainissement existent depuis l'époque romaine mais ceux sous la forme d'aujourd'hui sont apparus dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle. La conception moderne de l'assainissement a vu le jour pour des raisons sanitaires, à une époque où le choléra toucha Londres (Barraqué, 2014). Une fois construit, les réseaux d'assainissement perdurent et subissent seulement des travaux de maintenance, sont étendus et modernisés. L'assainissement et les réseaux d'eau sont un enjeu pour les villes de demain du point de vue de la préservation de la ressource. C'est donc sur un très long terme que la chaleur des eaux usées est disponible en milieu urbain.

Enfin, au niveau du mode de gestion, un réseau d'assainissement, comme tous les réseaux d'une ville, est propriété de la collectivité territoriale. Comme pour les réseaux de chaleur, la commune peut alors directement gérer son réseau d'assainissement (gestion en régie) ou transmettre la gestion à une compagnie privée (gestion en délégation). En 2010, environ 75% des communes françaises gèrent en régie leur système d'assainissement via un service communal ou intercommunal, contre 45% en 2004 (Commissariat Général au Développement Durable, 2010). Propriétaire du réseau, la collectivité est donc propriétaire de la chaleur fatale qu'elle transporte. A Nanterre, la collectivité a été un acteur moteur pour la réalisation d'un projet de récupération de chaleur sur son réseau d'assainissement afin de la redistribuer sur le nouveau réseau de chaleur d'un écoquartier (Sainte Geneviève).

Une station d'épuration est quant à elle une activité industrielle classée pour l'environnement (ICPE) et gérée par une compagnie privée.

ANNEXE 1.3 Description de la source fatale « incinérateurs de déchets »

A l'origine, l'incinération des déchets était simplement un moyen de réduire leurs volumes. Le premier incinérateur est construit en 1876 en Angleterre (Megret et al., 2011). On y brûle donc les déchets à haute température dans des fours. L'effet est la réduction de 90% du volume et de 70% du poids des déchets.

En France, un grand nombre d'usines d'incinération, appelées usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) ou unité de valorisation énergétique (UVE), ont été construites dans les années 1950-1980. Leur objectif premier était de rendre un service de traitement des déchets ménagers. L'évolution des réglementations environnementales a fait évoluer leurs fonctionnements, notamment pour la question du traitement des fumées après l'incinération des déchets.

Dans son rapport annuel sur les déchets en France, l'ADEME annonce que 48 millions de tonnes de déchets sont traités en 2014 (ADEME, 2016b). En fonction de leurs contenus, ils partent pour l'incinération à 30 %, le déchargement à 36 %, le recyclage via valorisation de matière à 20 % ou la gestion biologique (compostage ou méthanisation de déchets organiques) à 14 %.

14,4 millions de tonnes de déchets ont été incinérés en 2014 (ADEME, 2016b). Aujourd'hui la volonté est de poursuivre sur l'évolution de ces usines et d'améliorer les performances énergétiques des installations en essayant de récupérer et de valoriser le maximum de l'énergie produite par les unités de traitement. La logique est de poursuivre trois objectifs :

- Assurer le service public de traitement des déchets des collectivités ;
- Atteindre des performances environnementales de plus en plus élevées en utilisant les technologies de pointes de la profession ;
- Tendre vers une performance énergétique la plus élevée possible.

Ce dernier objectif est assuré par l'optimisation des process mais aussi et surtout la récupération d'énergie. Elle est initialement thermique puisque le principe est de récupérer la chaleur de l'incinération dans les fours. La valorisation peut rester de l'énergie thermique ou être transformée en énergie électrique.

Fonctionnement de la valorisation

Le schéma de la Figure A-4 résume les différents process d'un incinérateur de déchets :

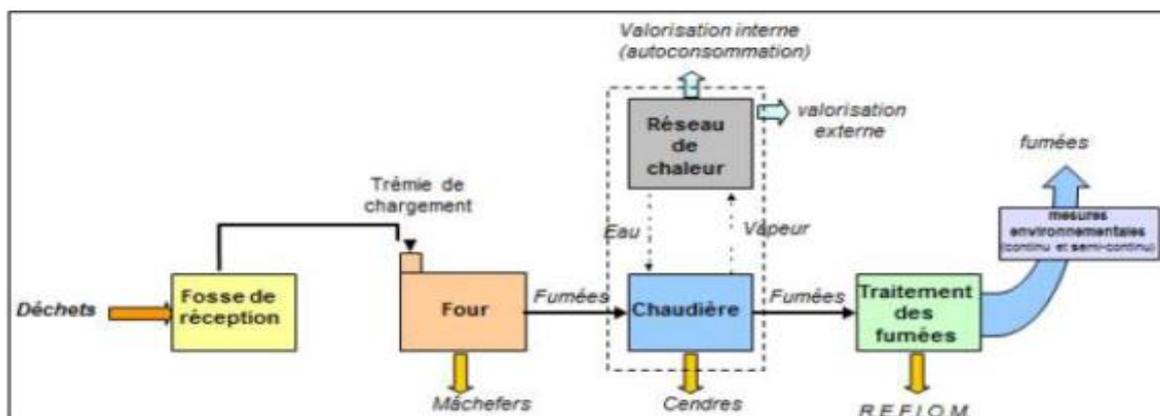


Figure A-4 Schéma de fonctionnement d'une usine d'incinération d'ordures ménagères (Megret et al. 2011)

Les déchets arrivent par bennes dans une fosse de réception et sont ensuite jetés dans un four. La combustion dégage de la chaleur et les gaz de combustion peuvent atteindre une température de 1 000°C. Ces gaz sont ensuite refroidis. C'est à ce niveau que la partie la plus importante de la valorisation de chaleur peut avoir lieu. Les calories des gaz de combustion sont transférées à de l'eau via échange de chaleur dans une chaudière. Plusieurs technologies de chaudières existent et réchauffent l'eau jusqu'à 250°C et en la passant sous forme de vapeur. De là, la valorisation peut être thermique et/ou électrique. Les fumées sortantes de la chaudière ne peuvent pas être relâchées dans l'atmosphère et sont traitées. L'objectif est de capter divers polluants : poussières, gaz acides, métaux lourds et dioxines. Ce traitement est réglementé par un arrêté spécifique⁵⁷ qui fixe et actualise les limites d'émission possible pour chaque polluant.

La valorisation d'énergie thermique se fait donc principalement au niveau de la chaudière. La chaleur est alors directement utilisée pour des applications de chauffage soit en interne (autoconsommation) soit par distribution dans des réseaux de chaleur. Parallèlement, cette énergie fatale peut être utilisée en énergie électrique : la vapeur passe dans une turbine qui fait fonctionner un alternateur, ce dernier convertit l'énergie en électricité (Figure A-5). Cette action est possible grâce à la quantité et la température élevées de la chaleur fatale. L'électricité est autoconsommée et/ou redistribuée sur le réseau électrique national.

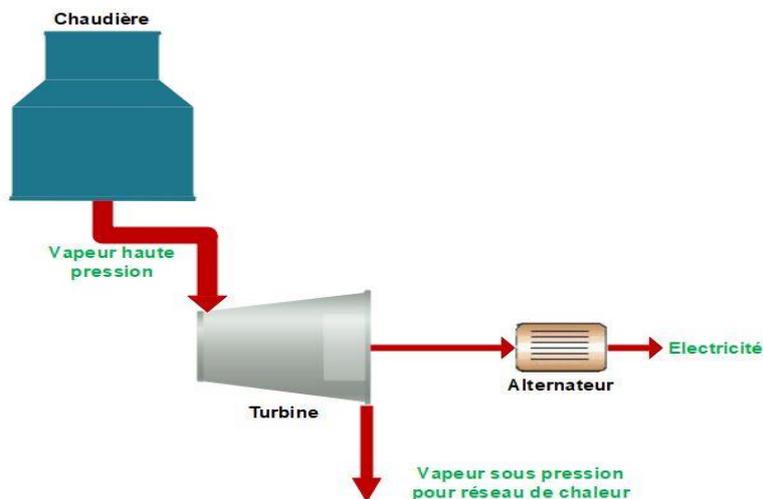


Figure A-5 Conversion de chaleur fatale en énergie électrique (source : auteur)

D'autres procédés liés à l'incinération émettent de la chaleur au niveau des gaines de fumées (cheminées) et au niveau des mâchefers (résidus solides issus de la combustion des déchets). Ces sources de chaleur sont marginales par rapport à la chaudière, comme expliqué dans la partie 2.

La récupération de chaleur sur ces usines d'incinérations est une action d'efficacité énergétique déjà largement généralisée. C'est pour cette raison que les usines d'incinération qui valorisent de l'énergie (114 usines d'incinération des 130 installées en France) prennent le nom d'usine de valorisation énergétique (UVE) ou de centre de valorisation énergétique (CVE). Parmi ces 144 UVE, 64 d'entre-elles valorisent à la fois de l'énergie thermique et électrique, 24 ne font que de la récupération thermique et 26 convertissent toute la chaleur fatale en électricité. Le choix de valorisation est fait en fonction de

⁵⁷ Arrêté du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000234557>

la localisation et des considérations économiques de chaque usine. Loin des zones urbaines et en l'absence de réseau de chaleur, la valorisation électrique sera préférée.

En 2014, près de 10 000 GWh d'énergie thermique ont été valorisés dans les UVE en France (ADEME, 2016b), dont 6 200 GWh redistribués dans des réseaux de chaleur. Pour rappel, cette énergie représente 27 % du mix énergétique des chauffages urbains en France. L'électricité produite par les UVE en 2014 représente près de 4 000 GWh ce qui fait 14 GWh de valorisation énergétique.

Caractéristiques de la chaleur issue des usines d'incinération d'ordures ménagères

Le tableau suivant (Tableau A-3) décrit la chaleur fatale des UVE selon les critères décidés dans la section précédente (3.3.1 **Critères de description**)

Tableau A-3 Description de la source fatale "UVE"

Critères	Description
Etat	Eau sous forme vapeur et air
Température	- Haute température (> 200°C) sur la chaudière - Basse et haute température (30-200°C) sur les autres postes
Localisation	Périurbain
Variabilité	En continu la journée, possibles variations saisonnières
Potentiel énergétique	Jusqu'à 800 GWh/an
Pérennité	Long terme
Gestion	Privée

Comme expliqué précédemment, le poste de récupération de chaleur le plus important sur une usine d'incinération est au niveau de la chaudière. Le schéma de la Figure A-6 résume son fonctionnement. Les parois de la chaudière sont constituées d'une multitude de tubes d'eau en métal qui suivent les gaz de combustion. Ces faisceaux de tubes (appelés économiseurs, surchauffeurs et évaporateurs) font offices d'échangeurs entre de l'eau qui provient de circuits fermés (eau sous forme de vapeur et pressurisée) et les gaz de combustion (Lebel, 2008). L'eau sous vapeur est donc chauffée avant sa valorisation comme énergie thermique ou en la convertissant pour produire de l'électricité. En sortie de chaudière, la température de l'eau est supérieure à 200°C, surchauffée et sous forme de vapeur.

Le second poste de récupération de chaleur possible se situe au niveau des fumées du four. Pour rappel, les fumées subissent un traitement réglementé et précis. Le processus évolue souvent ce qui contraint les éventuelles installations de moyens de récupération. Cependant, le principe consiste à condenser les fumées et de récupérer à la fois :

- La chaleur sensible en abaissant les températures des fumées jusqu'au point de rosé⁵⁸,
- La chaleur latente issue du changement de phase de l'eau qui passe de l'état gazeux à liquide.

La température de la chaleur, sous forme liquide, est ici entre 30 et 70°C et est donc considérée comme basse température.

⁵⁸ Point de rosé : température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise sans qu'elle produise de l'eau liquide

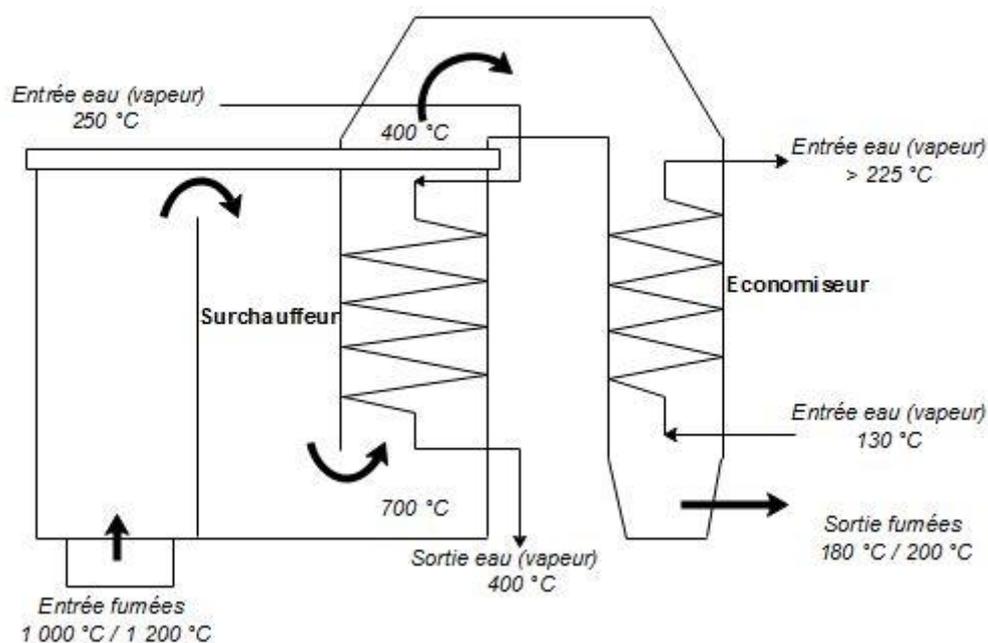


Figure A-6 Schéma de fonctionnement d'une chaudière d'UVE (source : auteur)

Globalement, les UVE sont installées proches des villes. La carte en Figure A-7 superpose les unités urbaines de plus de 50 000 habitants en France (données INSEE) et tous les UVE. Les villes les plus peuplées sont logiquement les plus émettrices de déchets et la majorité des UVE se trouvent naturellement dans ses zones.

Cependant, ces usines ne sont pas implantées en plein cœur urbains. Tout d'abord, il s'agit d'usines de grandes tailles. En France, elles incinèrent entre 7000 et 750 000 tonnes de déchets par an et peuvent dépasser les 200 000 m². Elles se retrouvent donc dans des zones industrielles. De plus, l'aspect sanitaire est un paramètre non négligeable, notamment pour l'acceptabilité des citoyens à vivre proche d'un incinérateur. Hajek (2013) démontre que la préoccupation de santé environnementale des populations influe sur la marge de manœuvre des opérateurs d'usines d'incinération. Le danger relatif aux rejets des usines d'incinération est également étudié. Selon une étude de l'institut de veille sanitaire (Fabre et al., 2008), il y a corrélation entre populations vivants à proximité d'usines d'incinération (moins de 2 km à la ronde) et risques de certaines maladies (hémopathies malignes, cancer du foie, sarcomes des tissus mous). Les UVE sont donc plutôt installées en zones périurbaines, à l'écart des centres urbains. Quelques kilomètres de canalisations sont donc très souvent nécessaires entre une UVE et réseaux de chaleur.

A noter que certaines UVE sont situées loin de grandes villes. Dans ce cas, la chaleur n'est pas valorisée sous forme thermique et l'intégralité de la valorisation se fait en électricité.

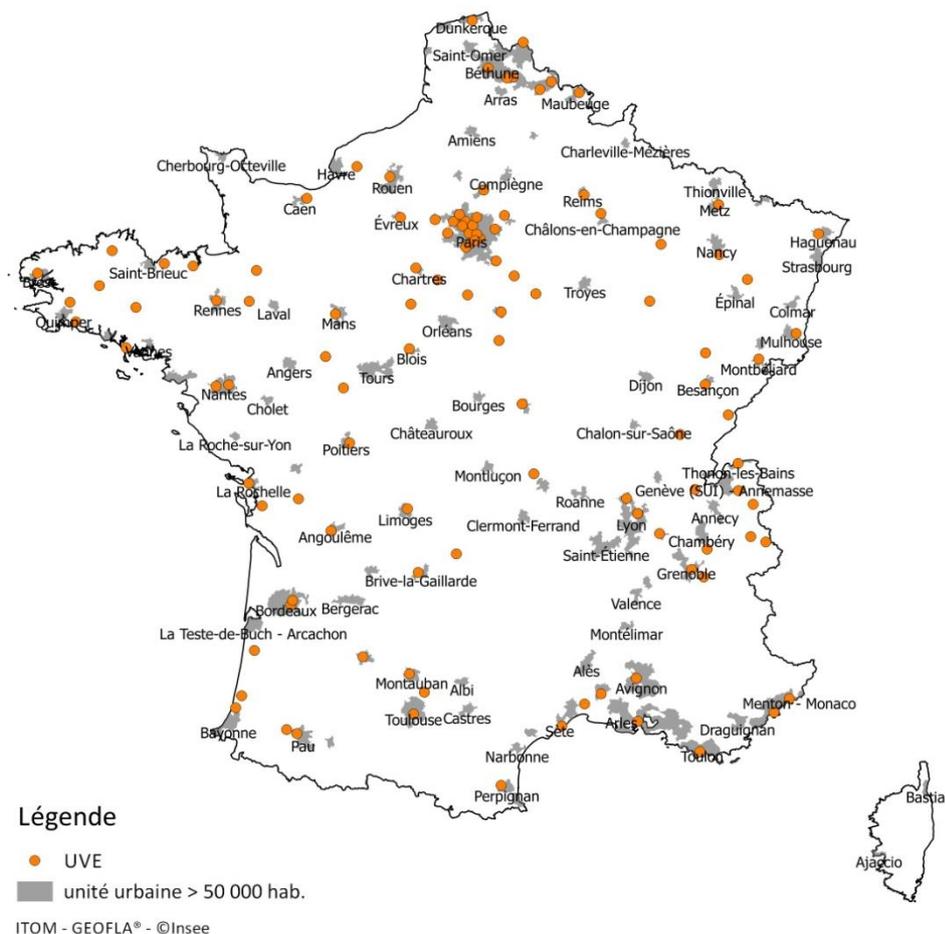


Figure A-7 UVE et unités urbaines en France métropolitaine (source : auteur)

L'incinération des déchets est un processus continu. Juste avant le passage au four, les déchets sont stockés dans une fosse de réception puis jetés par paquet de plusieurs kilogrammes grâce à un grappin. Le fait d'alimenter le four en continu permet d'utiliser seulement le pouvoir calorifique inférieur (PCI)⁵⁹ des déchets et de se passer d'une autre énergie pour la combustion. La valorisation énergétique ne subit donc pas de variation sur une journée. Pour des raisons de maintenance et/ou de remplacement de matériels, notamment au niveau du four, les usines ferment pour des durées de quelques jours ou semaines par an. Ces opérations sont faites en été dans les incinérateurs près des grandes villes d'habitations et en hiver dans les villes touristiques.

Le potentiel énergétique d'une UVE dépend de plusieurs paramètres déjà évoqués comme la quantité de déchets incinérés et le choix de valorisation de l'UVE (thermique, électrique, cogénération). En moyenne, l'ADEME annonce que la récupération d'énergie monte en moyenne à 964 kWh/tonne (ADEME, 2016b). Ce ratio est plus élevé si l'UVE valorise simplement de l'énergie thermique sans transformation électrique (1276 kWh/t). Selon ce chiffre, la plus petite UVE (7 000 tonnes/an) peut valoriser environ 7 GWh/an et la plus grande UVE (750 000 tonnes/an) jusqu'à 723 GWh/an. Ces statistiques ne prennent pas en compte la valorisation de chaleur sur fumées et les contextes des incinérateurs. Des variations du potentiel peuvent avoir lieu avec le PCI moyen des déchets incinérés notamment. Un calcul plus détaillé est expliqué dans la partie 2 mais l'ordre de grandeur montre un haut potentiel énergétique. Pour rappel, l'énergie est déjà largement valorisée dans les UVE en France.

⁵⁹ PCI : quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un combustible.

Après une augmentation constante de la quantité de déchets incinérés depuis les années 1980, la tendance est à la stagnation. D'une part la quantité de déchets par habitant a commencé à baisser au début des années 2000 et se maintient aujourd'hui (160 kg/habitant en 1960, 360 kg/habitant en 2001 et 277 kg/habitant en 2013 selon l'ADEME (2016a) et d'autre part le recyclage est un moyen de traiter les déchets de plus en plus développé. En effet, la Figure A-8 montre que la quantité de déchets recyclés entre 2000 et 2013 a presque doublé (de 3,7 à 7,3 millions de tonnes).

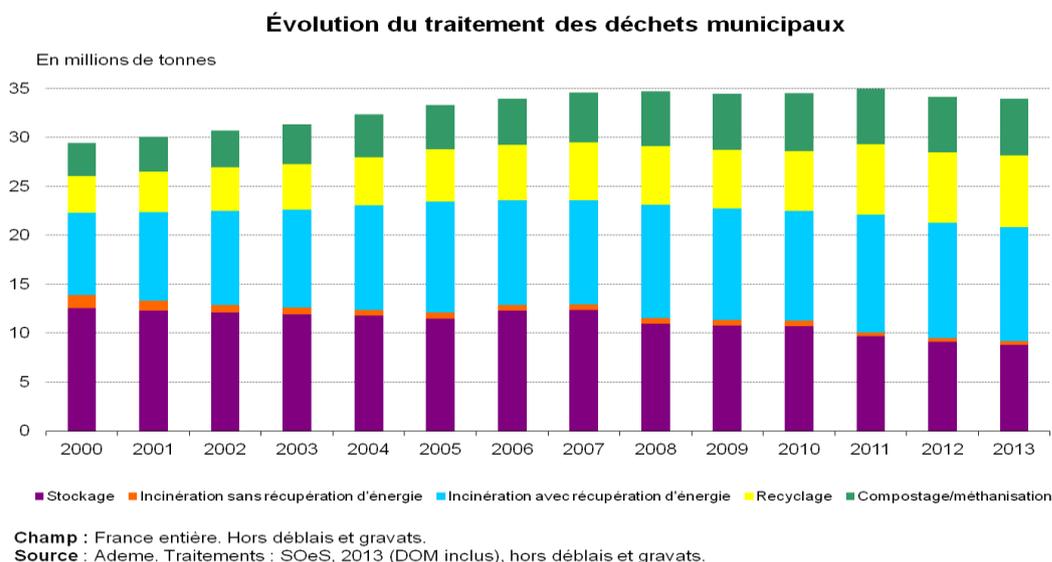


Figure A-8 Evolution du traitement des déchets municipaux (ADEME, 2016b)

La systématisation de la récupération d'énergie sur les procédés d'incinération et la meilleure performance des technologies de récupération font que la quantité de chaleur récupérée et distribuée aux réseaux de chaleur est encore en augmentation ces dernières années. La Figure A-9 exprime cette tendance.

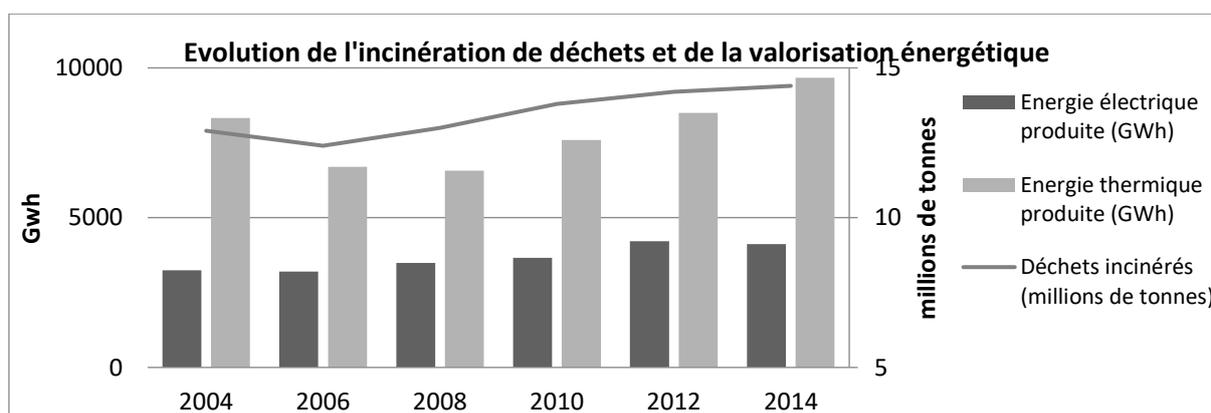


Figure A-9 Evolution de l'incinération de déchets et de la valorisation énergétique selon les chiffres de l'ADEME (ADEME, 2016b)

Si la baisse de l'incinération de déchets pourrait, à très long terme, remettre en question la valorisation de chaleur liée à ce procédé, la pérennité de la source de chaleur n'est donc pour l'instant pas menacée.

Enfin, l'exploitation des UVE est confiée à des sociétés privées dans le cadre de DSP (délégations de service public) car c'est la collectivité qui est initialement responsable du traitement des déchets sur son territoire. La revente de chaleur aux exploitants de chauffage urbain est déjà bien ancrée et

donc contractualisée (AMORCE, 2011a). Ainsi, les contrats entre les deux entités durent entre 10 et 15 ans avec des prix de revente de la chaleur est plus bas que la moyenne. Le prix moyen en 2011 est évalué à 24 €/MWh (hors taxe) alors que le prix moyen de revente est de 72,2 €/MWh (1.5). A noter qu'il y a une forte disparité de ce coût selon les UVE, qui peut être deux fois moins ou deux fois plus élevé. D'après Megret (2011), « La détermination du prix de vente de la chaleur s'avère être un positionnement très politique, potentiellement source d'une tension particulière entre les deux parties prenantes ».

ANNEXE 1.4 Description de la source « data center »

Un datacenter (appelé aussi centre de données en français) est un bâtiment ou une partie de bâtiment qui intègre des équipements informatiques, à savoir des serveurs, des unités de stockage de données (on parle de baies de stockage) et des systèmes de réseaux et télécommunications. Ces éléments stockent et traitent des données de toutes sortes, quelques soient leur propriétaire (particuliers ou entreprises) ou leur provenance. Ces salles informatiques doivent remplir des conditions de sécurité, température, pression et humidité en continu puisque la plupart des équipements fonctionnent 24h sur 24 et 7 jours sur 7.

Les data centers ont pris une place de plus en plus importante dans le paysage numérique. L'utilisation d'outils informatique et l'avènement d'internet ont contribué au développement massif du parc de data center d'aujourd'hui. En 2017, près de 4 000 data centers sont recensés dans le monde entier, dont 142 en France (Data Center Map, 2017). Les phénomènes de big data⁶⁰ et de cloud computing⁶¹ renforcent le développement l'extension programmée des data centers. La société CISCO, spécialiste dans le domaine des serveurs informatiques, dans son rapport de 2017 sur l'évolution de la circulation de données mobiles (Cisco, 2017), a indiqué que le trafic moyen mensuel de données mobiles sera multiplié par 7 entre 2016 et 2021, en passant de 7 exabytes à 49 exabytes (1 exabyte = 10^{18} bytes) comme le montre la Figure A-10. Le trafic de données mobiles représente environ 20 % du trafic de données global. Le nombre de data centers est donc forcément amené à croître également. D'ici 2025, 36 data centers supplémentaires sont attendus (projets connus) rien qu'en Ile-de-France, contre 42 en 2016 (DRIEE & RTE, 2016).

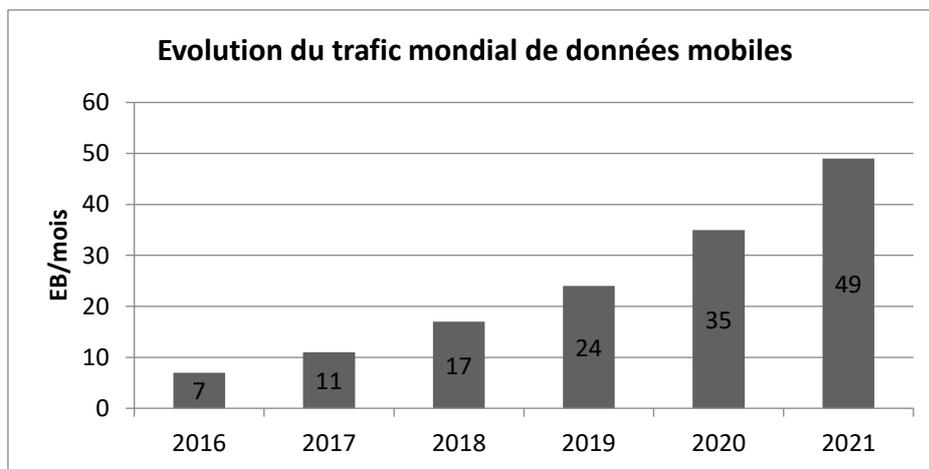


Figure A-10 Evolution du trafic mondial de données mobiles (Cisco, 2017)

Plusieurs types de data centers existent en fonction des services qu'ils proposent : il peut s'agir d'un hébergement simple, d'un hébergement accompagné de services numériques (ex : bandes passantes), de services liés au cloud computing, de colocation de data centers (locations de serveur au détail). Un data center peut être géré et dédié aux données d'une seule entreprise. Il peut même être intégrés aux locaux de cette entreprise, auquel cas il n'est pas forcément recensé.

Les data centers sont des installations énergivores. Ces centres représentaient en 2010 environ 1,5 % de la consommation électrique mondiale (Wahlroos et al., 2017) avec une augmentation de 5 % par

⁶⁰ Big data : traductible par « données massives », il s'agit du phénomène d'explosion de la quantité de données à traiter et à stocker et qui engendre la problématique des outils nécessaires pour faire face à cet essor

⁶¹ Cloud computing : traductible par « l'informatique des nuages » consiste à utiliser internet pour stocker et traiter des données en ligne en passant par des serveurs virtuels.

an. En France, près de 3 TWh sont consommés par les data centers, soit plus que toute l'électricité consommée par la ville de Lyon (Observatoire de l'Industrie Electrique, 2017). Les 42 data centers implantés en Ile-de-France requièrent une puissance de 210 MW (DRIEE & RTE, 2016), soit une moyenne de 5 MW par data center.

Cette consommation électrique est répartie en différents postes. Les équipements informatiques (serveurs principalement) représentent près de 50 % de la consommation, suivi des équipements de refroidissement des salles informatiques, entre 30 % et 50 % (Ebrahimi et al 2014). Les autres postes ont une consommation marginale : locaux techniques, lumières, pertes de distribution, etc.

Les besoins électriques des serveurs et des équipements informatiques représentent donc environ la moitié de la consommation énergétique des data centers. Ces matériels sont concentrés dans des espaces appelés les salles IT, qui consomment entre 250 W/m² et 3 000 W/m² en fonction du TIER du data center. Le TIER est une catégorisation des data centers en fonction de leur niveau de garanties, caractérisé notamment par la durée annuelle d'indisponibilité tolérée (en raison d'une défaillance ou maintenance) ou le niveau de redondance (pour suppléer une panne). Cette mesure est une certification créée par l'Uptime Institute, un consortium d'entreprises visant à participer à une meilleure efficacité des data centers (CB Richard Ellis, 2010; Uptime Institute, 2014). Le Tableau A-4 révèle les quatre tiers (de I à IV) et leurs caractéristiques : les tiers les plus élevés sont les plus sécurisés et ont un niveau de redondance élevé. Leur densité énergétique, mesurée en W/m² est donc la plus élevée. La redondance passive correspond aux équipements de secours activés en cas de besoin tandis que la redondance active signifie que les secours sont actifs, en parallèles des éléments principaux.

Tableau A-4 Critères des différents tiers de data centers (CB Richard Ellis, 2010)

TIERS	I	II	III	IV
Durée annuelle moyenne d'indisponibilité tolérée	28,8 heures	22 heures	96 minutes	24 minutes
Niveau de redondance	Pas ou peu de redondance	Redondance d'équipements importants	Redondance passive	Redondance active
Maintenance sans indisponibilité	Non	Non	Oui	Oui
Résistance à toute défaillance	Non	Non	Non	Oui
Densité énergétique permise	> 250 W/m ²	> 500 W/m ²	> 1000 W/m ²	> 1500 W/m ²

Pour mesurer la consommation des salles IT de data centers, il faut donc connaître leurs tiers et la taille de leur surface IT. Une étude de 2010 de Information Week Analytics a catégorisé 370 data centers aux Etats-Unis en fonction de la surface de leurs salles IT (InformationWeek, 2010). Il y a une forte disparité de surface, puisque les salles IT peuvent mesurer de quelques centaines de mètres carrés à plusieurs dizaines de milliers. Le plus grand data center du monde, basé proche de l'usine Tesla « Gigafactory », mesure près de 669 000 m² (Rack Solution, 2017). Comme le montre la Figure A-11, 11 % des data centers répertoriés dans l'étude d'informationWeek Analytics ont des salles IT de surface supérieures à 2 300 m² mais plus de 50 % sont inférieures à 185 m².

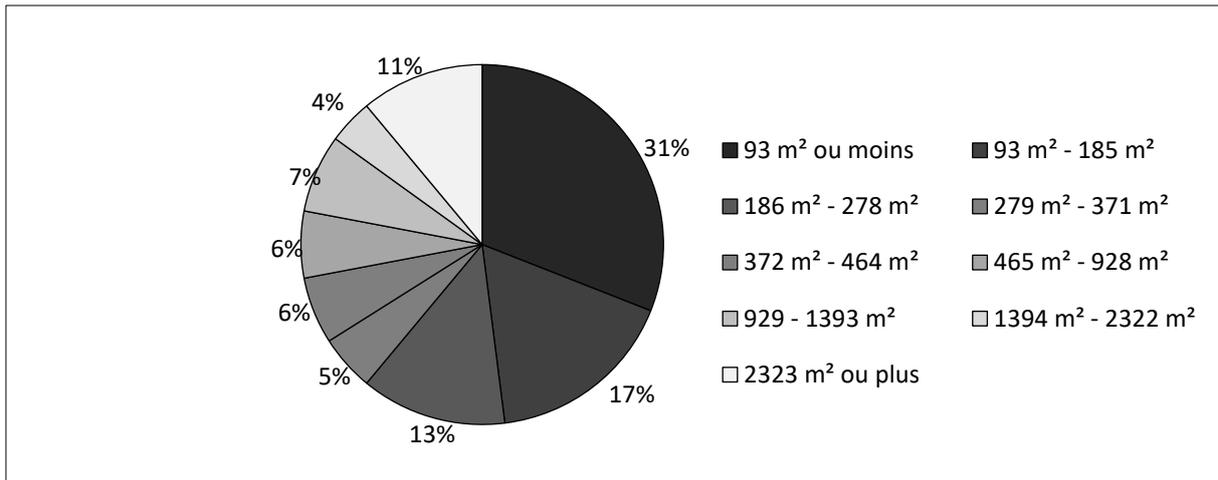


Figure A-11 Répartition des data centers par surface des salles IT (InformationWeek, 2010)

Refroidissement des data centers

L'autre poste important de consommation électrique est la climatisation des salles IT. Presque toute l'électricité nécessaire pour les besoins des serveurs est dissipée en chaleur par effet joule (Ebrahimi et al 2014). Ce phénomène a pour cause le réchauffement de la salle IT et une perturbation des équipements informatiques si la salle ne respecte pas de conditions de température et d'humidité minimales. L'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) est une organisation technique internationale spécialisée en génie thermique et climatique qui fait notamment office de référence dans le domaine de la ventilation des data centers. Dans un guide publiée en 2016 (ASHRAE, 2016), l'ASHRAE présente des conditions limites d'humidité et de température (Tableau A-5).

Tableau A-5 Limites d'humidité et de température recommandées dans un data center (ASHRAE, 2016)

Propriété	Valeur recommandée
Limite basse de température	18 °C
Limite haute de température	27 °C
Limite basse d'humidité	40 % d'humidité relative et 5,5 °C au point de rosée ⁶²
Limite haute d'humidité	60 % d'humidité relative et 15°C au point de rosée

La valeur maximale de température est passée à 27 °C alors qu'elle était à 16°C il y a 10 ans. L'amélioration de la durée de vie des équipements informatiques et leur meilleure robustesse à des températures plus élevées ont permis de moins refroidir les salles IT.

Le refroidissement est tout de même indispensable et s'opère grâce à un groupe frigorifique qui produit du froid par apport d'électricité. La chaleur fatale d'un data center est récupérable à la sortie de ce groupe froid. Plus la consommation électrique liée à la climatisation est élevée, plus le PUE du data center sera élevé. Le PUE (Power Usage Effectiveness) est un indicateur d'efficacité énergétique mis en place par Green Grid, un consortium international. Depuis Avril 2016, le PUE fait office de standard international ISO/IEC 30134-2⁶³. Il se calcule ainsi :

⁶² Point de rosée : température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise sans qu'elle produise de l'eau liquide

⁶³ ISO/IEC 30134-2: 2016 Preview Information technology -- Data centres -- Key performance indicators -- Part 2: Power usage effectiveness (International Organization for Standardization, 2016)

$$PUE = \frac{\text{Consommation énergétique totale du Data Center [kWh]}}{\text{Consommation énergétique des équipements informatiques [kWh]}}; PUE \geq 1$$

La valeur optimale du PUE est de 1 mais n'est pas atteignable. L'efficacité énergétique d'un data center peut être mesurée grâce à cet indicateur : plus il se rapproche de 1, moins le système de climatisation est consommateur d'énergie. En 2012, le PUE moyen des data centers français était de 2,5 environ alors que les data centers créés récemment présentent des PUE autour de 1,5 (Douchet, 2015). Cet indicateur est néanmoins discuté, notamment par T. Van de Voort (2017) qui met en lumière la limite du PUE vis-à-vis des data centers de TIER IV. Le PUE ne prend pas en compte la performance énergétique des équipements informatiques, la possible récupération d'énergie, la source d'énergie consommée par le data center et l'impact environnemental global du bâtiment. Un data center de TIER IV peut avoir un PUE performant s'il est équipé d'un système de refroidissement efficace et peu consommateur, mais peut dans le même temps avoir des besoins énergétiques très élevés pour sa surface IT avec une électricité produite par des générateurs polluants. D'autres études présentent donc de nouveaux indicateurs synthétisés par le consortium Green Grid (The Green Grid, 2012). Dans son étude T. Van de Voort propose le GUE (Grid Usage Effectiveness) qui prend en compte l'éventuel production locale d'énergie et l'autoconsommation du data center.

Plusieurs travaux recensent les différents types de groupes frigorifiques: eau-eau, air-eau, à détente directe ou par « free cooling » (Ebrahimi et al., 2014; EFFICACITY, 2017; Wahlroos et al., 2017; Zhang, Shao, Xu, Zou, & Tian, 2014). Les systèmes installés dépendent de la taille des data centers et de la performance recherchée, qui peut être économique, énergétique (baisse de la consommation électrique ou augmentation de l'énergie récupérable) ou une sécurité optimale.

Dans tous les cas sauf le free cooling, le système fonctionne comme un cycle thermodynamique (Figure A-12). Un fluide frigorigène présent dans le circuit frigorifique change d'état et libère de la chaleur au condenseur et du froid à l'évaporateur. Ce froid est utilisé pour la climatisation de la salle IT. C'est le compresseur qui opère le fonctionnement du cycle grâce à l'énergie mécanique qu'il fournit, elle-même transformée d'une énergie électrique consommée. D'après le premier principe de la thermodynamique sur la conservation de l'énergie lors d'un changement d'état, l'énergie restituée au condenseur (Q_c) correspond à la somme de l'énergie restituée à l'évaporateur (Q_f) et de l'électricité consommée par le compresseur (W) :

$$Q_c = Q_f + W$$

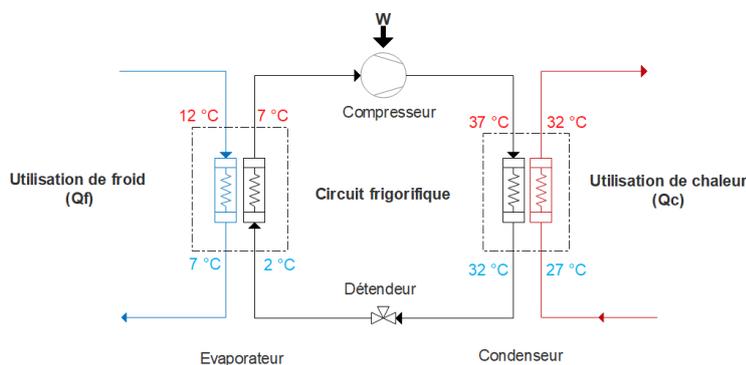


Figure A-12 Schéma de principe du système frigorifique

Dans les data center, les différences entre les groupes frigorifiques se situent au niveau des systèmes de distribution du froid après l'évaporateur ou du rejet du chaud après le condenseur.

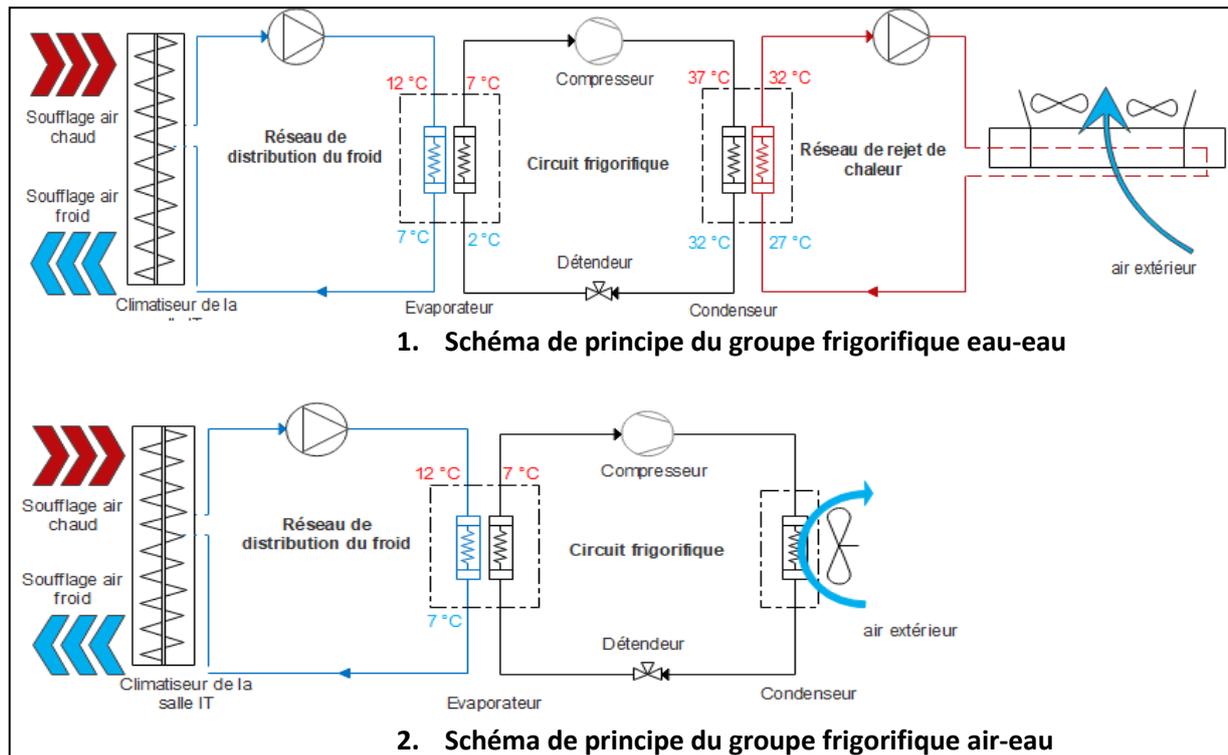


Figure A-13 Schémas de différents groupes frigorifiques

Dans le cas du groupe frigorifique eau-air et air-eau (Figure A-13), le climatiseur de la salle IT est une armoire installée dans le local et qui diffuse le froid par soufflage dans un faux plancher, avec reprise de l'air dans le plafond. La différence entre le système eau-eau et air-eau est au niveau du condenseur (condenseur à eau pour le premier et condenseur à air pour le second).

Les groupes froids à détente directe sont des systèmes moins fréquents. Ces installations se retrouvent dans les petits data center où les salles IT sont limitées en taille. L'évaporateur est situé dans la salle serveur et est représenté généralement par des appareils terminaux sous forme de ventilo-convecteurs, s'il s'agit d'air. L'unité extérieure, intègre le détendeur, le compresseur et le condenseur et rejette de l'air chaud. Entre les deux, le réseau de distribution de froid correspond au circuit frigorifique.

Le free cooling, traduisible par « rafraîchissement gratuit », est le principe d'utiliser une source froide de l'extérieur et de profiter de la différence de température entre l'extérieur (source froide) et l'intérieur (la salle IT du data center). Le froid extérieur peut provenir de l'air ou d'une source d'eau (Zhang et al., 2014) et permet donc une économie d'énergie sur le système de refroidissement ainsi que d'une réduction du PUE. Dans la pratique, il n'est jamais utilisable à 100% et est donc couplé avec un système de refroidissement classique. Le taux d'utilisation va dépendre de la qualité de la source extérieure (température et humidité pour l'air). Si ces paramètres le permettent, la source extérieure va être filtrée puis injectée dans le système de distribution de froid de salle IT. La seule électricité consommée sera celle des ventilateurs. Si les paramètres de température ou d'humidité de la source extérieure ne sont pas en adéquations avec l'environnement de la salle IT, le compresseur est mis en fonctionnement pour un fonctionnement classique.

Les équipements informatiques et les systèmes de climatisations nécessaires à la régulation de température de la salle IT rendent donc un data center particulièrement énergivore. Des innovations (free cooling, équipements plus performants) permettent de rendre peu à peu ces bâtiments de plus en plus performants du point de vue énergétique. Les prévisions sur l'évolution de la consommation

des données indiquent tout de même que des data centers vont se construire et que le besoin énergétique global du parc de data centers va continuer de croître.

Description via critères

Tableau A-6 Description de la source fatale "Data centers"

Critères	Description
Etat	Eau liquide
Température	Basse température (30°C environ)
Localisation	Urbain, périurbain
Variabilité	En continu la journée, possibles variations saisonnières
Potentiel énergétique	< 30 GWh
Pérennité	Court terme
Gestion	Privée

Comme expliqué dans la description des groupes frigorifiques, la récupération de chaleur peut se faire au niveau du rejet de chaleur des systèmes de froid. En fonction du condenseur (à eau ou air), l'état de la chaleur est l'air ou l'eau. La récupération de chaleur n'est efficace qu'avec un seul système de refroidissement : eau-eau. Dans le cas d'un condenseur à air, la chaleur est directement refroidie avec l'air extérieur et la récupération est donc impossible ou très limitée (Davies et al., 2016; Leonard et al., 2017).

A la sortie du condenseur à eau, la chaleur fatale est environ à 30°C. Cette valeur varie en fonction de la qualité de la production froid (et de la température souhaitée à la sortie de l'évaporateur) et des échangeurs qui lient les sous-circuits du système frigorifique. L'hypothèse prise sur le pincement des échangeurs est un $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Il s'agit donc d'une source basse température. L'apport de pompes à chaleur peut permettre de rehausser les températures pour répondre à des besoins de chauffage et d'ECS. Il est également possible d'agir sur le groupe frigorifique et d'augmenter la température de condensation. L'efficacité frigorifique est alors dégradée. Cette hypothèse est détaillée dans la partie 2.

Les data centers se retrouvent à la fois en zones urbaines, périurbaines. Dans de rares cas, ils sont installés en milieux ruraux mais des contraintes de fonctionnement viennent à l'encontre de ce type d'installation (Data Center Knowledge, 2016). Dans une étude sur les contraintes de l'essor des data centers, D. Thépin explique les avantages géographiques de la communauté d'agglomération Plaine Commune (Seine Saint Denis) qui en font la première concentration de data centers en Europe. Les grands critères de choix d'un lieu pour l'installation d'un data center sont donc (Thépin, 2015) :

- La préexistence d'un réseau d'alimentation électrique pour répondre aux besoins de l'industrie lourde ;
- Une bonne desserte en infrastructure de transport terrestre ;
- Un accès direct aux grandes artères du réseau internet ;
- La présence d'un foncier disponible, à un coût relativement bas, et situé à l'écart des zones exposées aux risques naturels ;
- La proximité des grandes concentrations de clients potentiels, et notamment de grands acteurs du numérique.

Le réseau électrique et sa stabilité sont des paramètres clés à regarder en amont d'un projet de construction de data center. Des postes sources⁶⁴ sont ainsi installés en Seine Saint Denis pour répondre aux besoins des centres de données : 1 000 MW en 2030.

Ces espaces de forte densité électrique se trouvent donc logiquement en milieux urbains. Les grands data centers sont cependant éloignés des centres urbains actuels en raison de leurs tailles (plusieurs milliers de mètres carrés) qui leur donnent un caractère industriel et de la perception locale souvent négative. Les raisons avancées sont les nuisances sonores (F2A, 2012), l'intégration esthétique et l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Les data centers fonctionnent en continu, c'est-à-dire 24h/24 et 7j/7. La puissance peut varier en fonction des contrats passés avec les clients mais est globalement stable sur une année. Des tests sur les groupes électrogènes sont réalisés régulièrement, provoquant des chutes des puissances appelées très ponctuellement. La redondance, si elle est passive ou active, a également une influence sur la consommation électrique. En fonction de cette puissance électrique, les besoins en froids sont plus ou moins importants mais le système reste actif tout au long de l'année. La Figure A-14 est un exemple de consommation électrique d'un data center qui illustre cette continuité (Wahlroos et al., 2017). Le graphique de gauche détaille mensuellement la consommation électrique des équipements informatiques et de la climatisation, qui vaut entre 30 % et 43 % de la consommation totale (en fonction de la température extérieure). Le graphique de droite représente la consommation électrique de serveurs de salle IT (chaque courbe étant la consommation électrique d'un serveur en watts) sur une semaine. Les variations peuvent correspondre à des appels de données en particulier ou des demandes de calcul mais ces courbes illustrent surtout la stabilité de la consommation dans le temps.

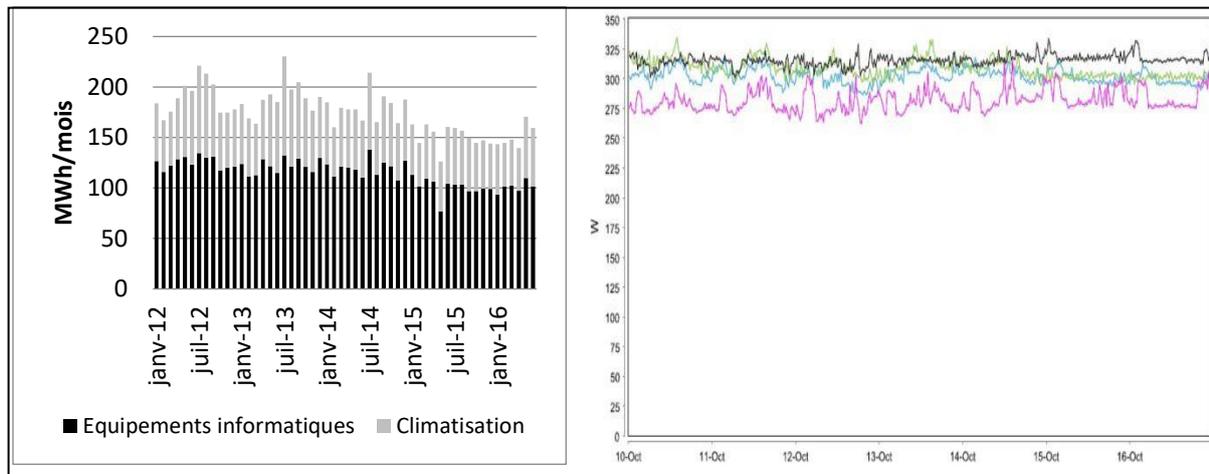


Figure A-14 Consommation électrique d'un data center à Espoo, en Finlande (Wahlroos et al., 2017)

La quantité de chaleur récupérable dépend directement de la puissance du groupe froid. Plus les besoins en climatisation seront élevés pour la salle IT, plus l'énergie fatale du datacenter récupérable au condenseur le sera également. La surface de la salle IT est donc une entrée clé pour déterminer ce potentiel énergétique, en plus du système de refroidissement utilisé. Quelques data center en Europe valorisent déjà la chaleur fatale des groupes froids et la redistribuent dans des réseaux de chaleur (3.2.2 Exemples de réalisations). Etant donnée la basse température de la source, une pompe à chaleur utilise la chaleur fatale avant la distribution dans le réseau. Les pompes à chaleur installées

⁶⁴ Poste source: il a pour rôle de relayer l'électricité du réseau de transport (RTE) au réseau de distribution. Un poste correspond à l'électricité consommé par environ 100 000 habitants.

dans les cas existants sont entre 1 MW et 8 MW, pour une énergie distribuée allant de 3 GWh/an et jusqu'à 26 GWh/an.

La pérennité d'un data center se traduit par sa durée de vie. Elle est d'environ 20 ans mais peut être plus courte en fonction des contextes. Devant l'expansion de données à traiter, des opérateurs de data center ferment leurs centres après la durée de vie des serveurs (estimée à 3 à 5 ans) pour en créer des nouveaux, plus grands et pouvant accueillir de plus grandes salles IT.

Les opérateurs des data centers sont des entreprises privées, évoluant dans un domaine concurrentiel et où la sécurité des données traitées est une priorité. Ce paramètre n'est pas négligeable et peut être un frein dans l'optique de contractualiser un échange de chaleur avec un opérateur de réseau. Si la question énergétique est bien présente dans la construction des nouveaux data center, l'efficacité énergétique est priorisée vers le free cooling et la baisse des consommations, comme le montre la pyramide de la Figure A-15, issu d'un rapport mandaté par l'Union Européenne sur les solutions techniques pour des data centers performants (Lal Shrestha et al., 2014).



Figure 1.1 Strategy for Net Zero Energy Data Centre

Figure A-15 Stratégies pour des data center passifs (Lal Shrestha et al., 2014)

ANNEXE 1.5 Description de la source fatale « blanchisseries industrielles »

L'activité d'une blanchisserie industrielle correspond à l'entretien professionnel des textiles. Ces industries sont à différencier avec des blanchisseries en lieux publics, souvent appelés laveries automatiques, où tout utilisateur peut venir laver et/ou sécher son linge. Une blanchisserie industrielle peut traiter plusieurs tonnes de linges par jour avec des moyens plus avancés. Les blanchisseries industrielles sont des Installations Classées pour l'Environnement (ICPE).

Dans le secteur privé, les clients de blanchisseries sont des restaurants, hôtels ou d'autres industries nécessitant des vêtements de travail pour leurs employés. Dans le secteur public, les hôpitaux, les établissements d'hébergement pour les personnes âgées dépendantes (EHPAD) ou les maisons de retraites passent par des blanchisseries industrielles pour traiter des draps, vêtements d'employés ou de patients, le linge de literie, etc.

En 2012, 979 blanchisseries du secteur public sont recensées en France (URBH, 2012). La Figure A-16 résume la répartition de ces blanchisseries en fonction de la quantité de linge traité. Elles ont une capacité de moins de 500 kg/jour de linge pour presque la moitié d'entre elles, alors que douze blanchisseries traitent plus de 15 000 kg/jour de linge. Au total, environ 1 600 tonnes/jour de linge sont lavées, essorés, séchés et parfois repassés avant un éventuel travail de finition pour certains types de linge.

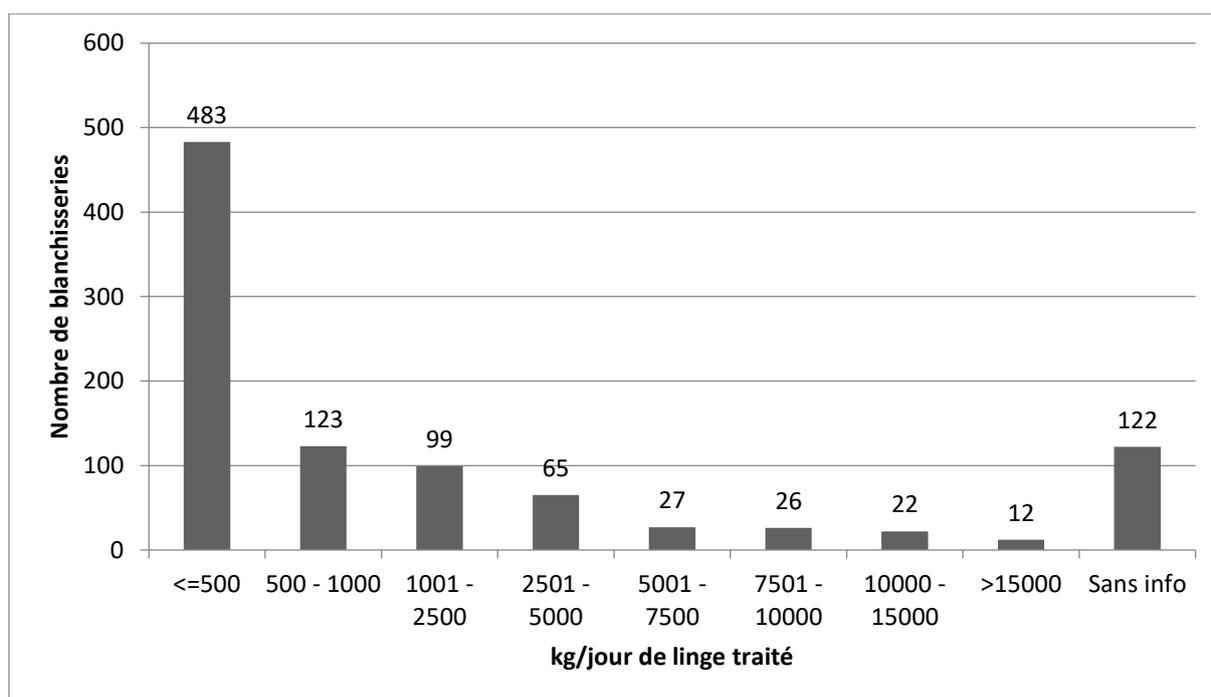


Figure A-16 Répartition du nombre de blanchisseries du secteur public en fonction de la quantité de linge traité

Cette industrie est très importante en consommation d'énergie, notamment pour l'eau du matériel de lavage. En moyenne, une blanchisserie consomme environ 2 kWh/kg de linge traité (ADEME, 2017b) en fonction des technologies utilisées, dont 90% pour les besoins thermiques. C'est un tiers de moins qu'au début des années 2000 (ADEME & CTTN-IREN, 2002), grâce à l'optimisation des procédés (baisse des températures de fonctionnement et système de contrôle notamment).

Pour les blanchisseries du secteur public, c'est donc près de 3 GWh/j d'énergie thermique, soit un ordre de grandeur de 750 GWh/an. Ce chiffre ne contient pas les besoins d'autres blanchisseries privées dont les données ne sont pas renseignées. Selon l'ADEME et le CTTN-IREN de 2002 (ADEME &

CTTN-IREN, 2002), la consommation totale de l'activité industrielle, correspondant aux blanchisseries privées, aux établissements de location de linge et des blanchisseries publiques, s'élève à 3,9 TWh en 2002, dont près de 3,6 TWh pour l'énergie thermique. Des chaudières à gaz sont installées dans les blanchisseries pour répondre à ces besoins.

Le processus de traitement du linge commence par le tri, qui sépare le linge plat (draps, alèses, nappes, serviettes), le linge en forme (vêtements professionnels, chemises de patients d'hôpitaux) ou des articles particuliers (éponges, tapis anti-poussières, textiles pour nettoyage, etc.) et est suivi d'une succession d'étapes : le lavage, l'essorage, le séchage et la finition. Certaines étapes ont des besoins thermiques, distribués sous différents vecteurs et résumés Figure A-17.

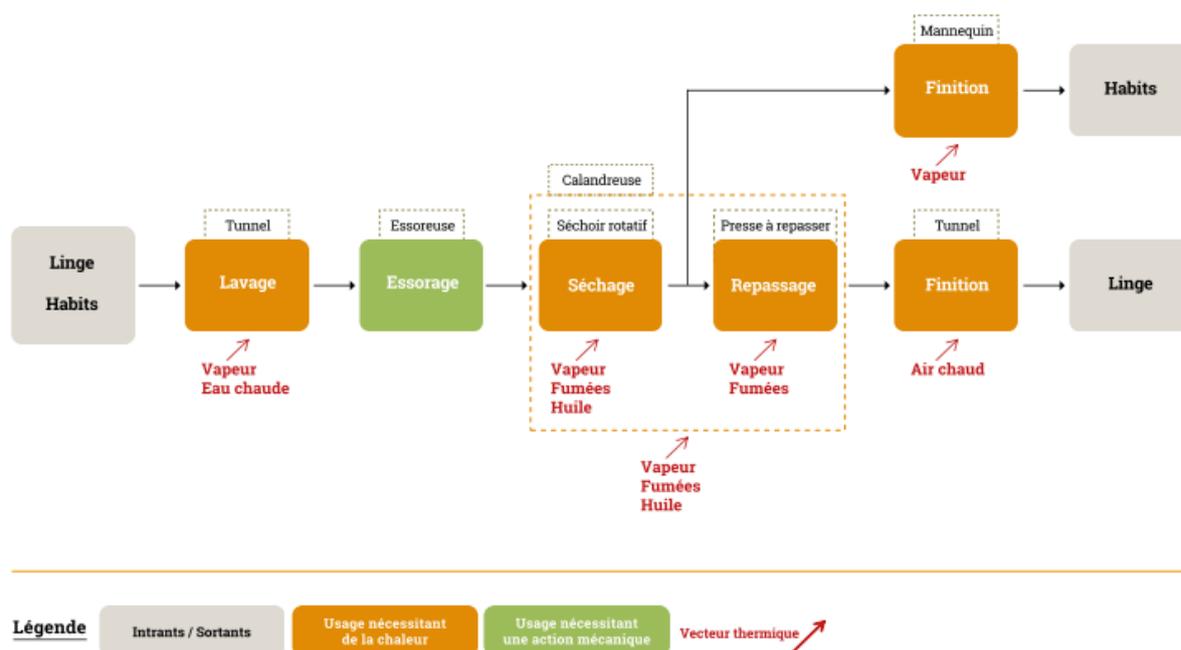


Figure A-17 Schéma simplifié du processus du traitement du linge (ADEME, 2017b)

Différentes technologies sont utilisées pour la réalisation de chacune des étapes, en fonction de la quantité de linge à traiter en un cycle, et de sa qualité (matière et fragilité). Le lavage peut se faire soit dans un tunnel de lavage, soit par un process discontinu. Le tunnel de lavage accepte tous les types de linge, avec une capacité de traitement allant de 800 kg/h à 1500 kg/h de linge et une consommation d'eau inférieure à 8 L/kg de linge. Il est suivi d'une essoreuse à pression ou centrifuge. Le process discontinu se fait par une laveuse essoreuse et est utilisé pour le traitement de linges particuliers (plus fragiles). La capacité est réduite (de 20 kg/h à 200 kg/h) et la consommation en eau est plus élevée ; entre 15 L/kg et 25 L/kg de linge traité (EFFICACITY, 2015).

Les étapes de lavage et de séchage/repassage représentent les processus les plus consommateurs de chaleur. La récupération de chaleur fatale est donc la plus intéressante à ces postes.

Le lavage utilise de l'eau chaude entre 35°C et 100°C en fonction des cycles de lavage demandés, la tendance étant de baisser les températures sous 60°C lorsque cela est possible (ADEME, 2017b). Dans le cadre de la récupération de chaleur fatale, le cas d'étude le plus pertinent est celui des tunnels de lavage puisqu'il traite bien plus de linge que le processus discontinu, plus rare et moins consommateur en énergie.

Le processus de lavage est résumé sur le schéma de la Figure A-18. Il s'effectue en quatre temps : pré-lavage, lavage, rinçage et neutralisation. Une fois le linge ajouté, de l'eau froide effectue le pré-lavage. De la vapeur d'eau est ensuite injectée et la température passe alors de 35 °C à 100 °C en fonction du programme demandé. Des agents chimiques sont ajoutés et nettoient le linge. Ces agents sont retirés lors de l'étape de rinçage, notamment grâce à l'ajout d'une eau adoucie ou de l'eau récupérée sur le lavage. Enfin, la neutralisation consiste à ajouter un agent neutralisant à pH acide et de l'eau afin de réduire le chlore sur les textiles.

Durant le cycle de lavage, une partie de l'eau peut être récupérée dans un réservoir. Elle peut ainsi servir de nouveau pour le même cycle de lavage. Malgré cette boucle de récupération (schématisé Figure A-18), une grande partie de l'eau est rejetée, à hauteur de 4 L/kg de linge traité. La température de cette eau dépend de la température du programme mais est d'environ 50°C (EFFICACITY, 2015). Adhikary (2017) a réalisé une étude détaillée de la récupération de chaleur sur une blanchisserie à Helsinki et évoque une température de rejet de 60°C.

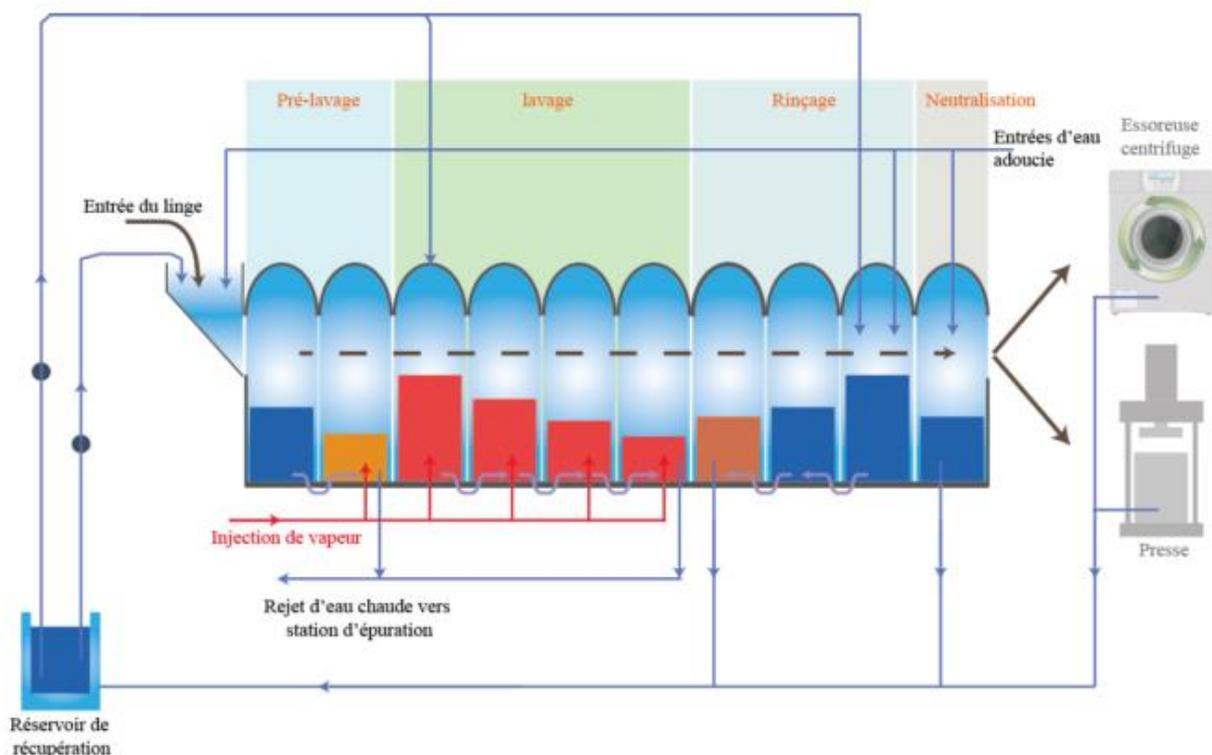


Figure A-18 Schéma de l'étape "lavage" du processus de traitement du linge d'une blanchisserie (EFFICACITY, 2015)

L'eau rejetée, appelée l'effluent, est destinée à l'épuration et est donc dirigée vers un réseau d'assainissement d'eaux usées classique. Cependant, comme expliqué dans la section sur la récupération de chaleur sur eaux usées en réseaux d'assainissement la température de l'effluent dans le réseau ne doit pas excéder 30°C. Deux solutions sont installées dans les blanchisseries pour répondre à cette contrainte.

La première est de refroidir cette eau avant de la rejeter à l'assainissement. Si le bâtiment est équipé d'une climatisation, le circuit de froid peut venir refroidir les effluents des tunnels de lavage. Sinon, un groupe froid peut être installé spécifiquement.

La deuxième solution, préférée dans les blanchisseries récentes, consiste à récupérer les calories de la chaleur de l'eau rejetée afin de la stocker et la réutiliser en interne pour préchauffer l'eau de lavage. Un échangeur à plaques est alors installé et permet à la fois de préchauffer une eau pour le lavage et

abaisser la température des effluents sous les 30 °C. Ce système, schématisé Figure A-19, est un procédé de récupération interne de chaleur fatale.

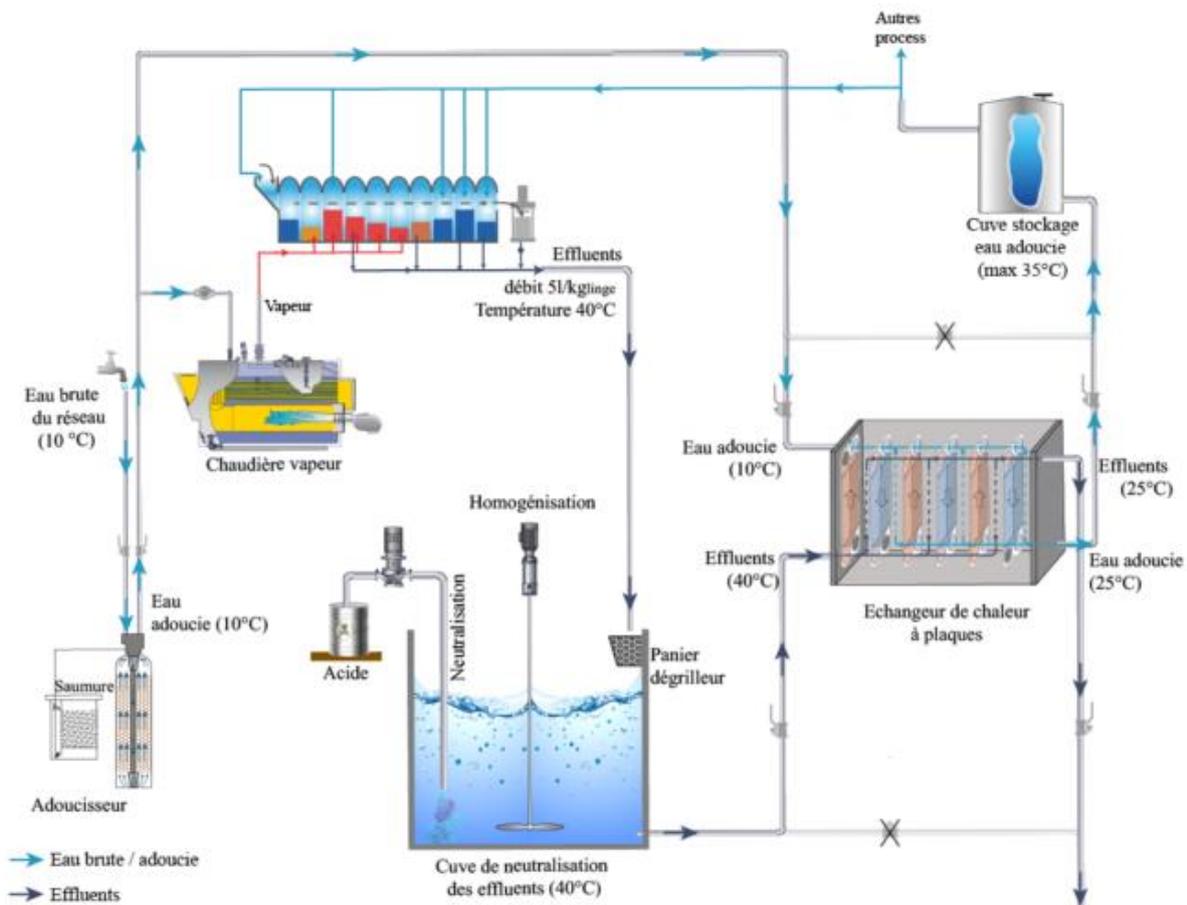


Figure A-19 Schéma du système de récupération de chaleur en interne sur les effluents de lavage (EFFICACITY, 2015)

L'étape qui suit le lavage est l'essorage. Ce process permet, grâce à champ de forces, de retirer l'eau présente dans le linge. La consommation énergétique de cette action est exclusivement électrique et permet à l'étape suivante, le séchage, d'être plus efficace.

Le séchage s'effectue grâce à des séchoirs rotatifs ou via une calandre (sécheuse-repasseuse) en fonction du type de linge traité. Pour les séchoirs rotatifs, cas le plus classique, des gaz brûlés sont diffusés et mélangés à l'air ambiant dans un cylindre ou une cuvette chauffante. Un cycle de séchage dure environ 20 minutes et nécessite un renouvellement de l'air via un système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC). A mesure que de l'air est apporté, l'air chaud est rejeté, soit par une centrale de traitement de l'air (CTA), comme illustré Figure A-20, soit directement en toiture. L'air rejeté est d'environ 60°C avec un débit estimé à 60 m³/h/kg de linge selon les fabricants (EFFICACITY, 2015).

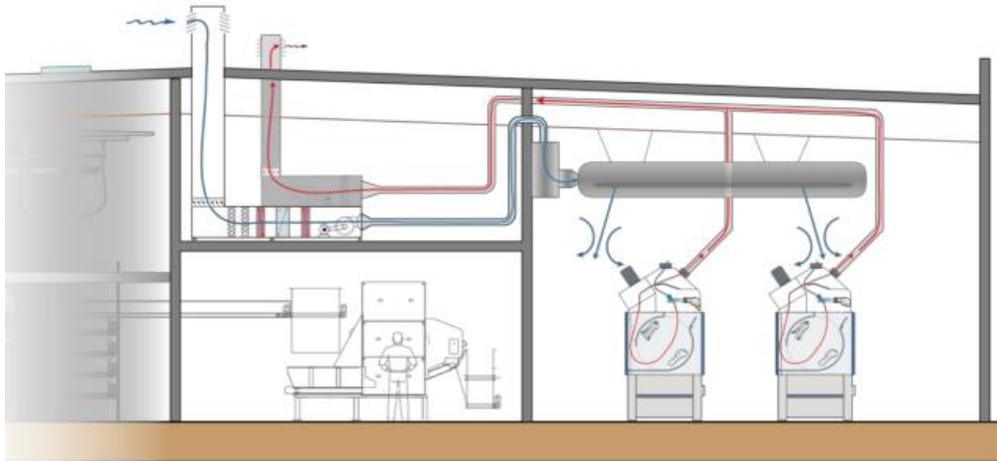


Figure A-20 Schéma de la diffusion d'air classique dans les séchoirs d'une blanchisserie avec reprise de l'air rejetée par une CTA (EFFICACITY, 2015)

La calandre, utilisé pour le linge plat (draps, alèses, etc.), fonctionne de façon à tendre le linge sur un tapis roulant pour que des rouleaux viennent sécher et repasser le linge. Les rouleaux sont chauffés par un fluide thermique, lui-même chauffé par de la vapeur. L'air rejeté par cette action est à une température plus élevée que pour les séchoirs rotatifs, entre 95 °C et 110 °C selon la fiche de l'ADEME (2017) et à 90°C dans le cas de la blanchisserie à Helsinki (Adhikari, 2017). Le débit d'air est en revanche plus faible, de l'ordre de 5 m³/h/kg selon les fabricants.

Enfin, la dernière étape de finition est également consommatrice de chaleur, mais en quantité plus faible et de façon moins diffuse. Il s'agit par exemple de repassage de chemises sur cintres ou mannequins. La récupération de chaleur n'est pas pertinente en ce point.

Description via critères

Tableau A-7 Description de la source fatale "Blanchisseries industrielles"

Critères	Description
Etat	Eau liquide et air
Température	- Basse température sur les effluents (30°C) - Moyenne température sur l'air rejeté (60 °C- 110 °C)
Localisation	Urbain, périurbain
Variabilité	Forte intermittence
Potentiel énergétique	< 2 GWh
Pérennité	Court terme ou long terme
Gestion	Publique ou privée

La récupération de chaleur sur une blanchisserie industrielle est donc éventuellement possible en deux points : les effluents après l'étape de lavage et sous forme liquide, et l'air rejeté après l'étape de séchage/repassage et sous forme d'air.

Les températures de récupération sont basses. Même si les effluents de lavage sont rejetés à 50°C, voir plus, ils doivent être sous le seuil des 30°C avant leur distribution dans un réseau d'assainissement. Une récupération interne est déjà effectuée sur ces effluents dans de nombreux cas. L'autre point de récupération, sur l'air rejeté lors du séchage, est à une température plus élevée, entre 60 et 110 °C en fonction des méthodes de séchage et de traitement de l'air.

Les blanchisseries industrielles privées peuvent se situer en milieu urbain dense ou dans en zone périurbaines. Leurs clients (principalement hôtels et restaurants) sont majoritairement en milieu urbains. Le linge est récupéré et acheminé jusqu'au centre de traitement par camions et les distances ne doivent donc pas être trop importantes. Cependant, elles privilégient les lieux avec de la place et un prix du foncier bas. Elles se retrouvent ainsi particulièrement dans des zones industrielles, situées en périphéries des centres urbains. La carte de la Figure A-21 représente les blanchisseries industrielles en Ile-de-France, des secteurs publics et privés (respectivement en bleus et noirs), qui traitent plus de 500 kg de linge par jour (URBH, 2012). Elles sont géolocalisées à leurs adresses et croisées avec les zones d'activités économiques (ZAE) en Ile-de-France. Ces zones, datant de 2014, sont répertoriées par la Région Ile-de-France⁶⁵, afin de guider les entreprises et industriels qui souhaitent acquérir du foncier et développer des infrastructures.

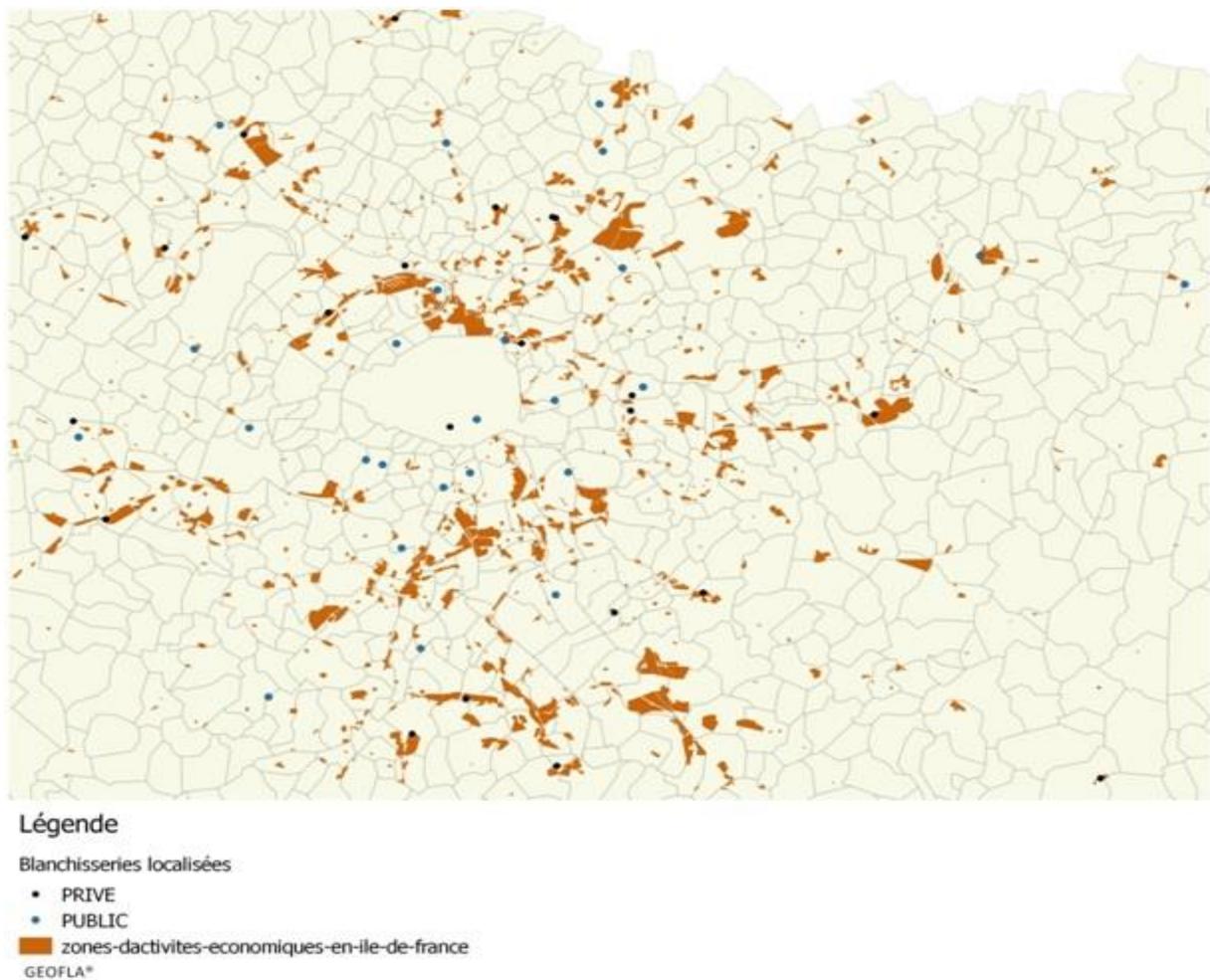


Figure A-21 Blanchisseries localisées en Ile-de-France superposées avec les ZAE (source : auteur)

La différence de localisation entre les blanchisseries des secteurs privés et publics est marquée : sur les 25 blanchisseries privées d'Ile-de-France répertoriées, 15 d'entre-elles sont situées dans des ZAE, alors qu'il n'y a qu'une blanchisserie publique dans les ZAE parmi les 29 répertoriées en Ile-de-France.

⁶⁵ Données consultables et téléchargeables : <https://data.iledefrance.fr/explore/dataset/zones-dactivites-economiques-en-ile-de-france/information/>

Les blanchisseries du secteur public sont principalement des blanchisseries rattachées à des hôpitaux ou des EHPAD. Les bâtiments peuvent être installés en milieux urbains (en plein cœur des villes) ou périurbains.

La chaleur fatale d'une blanchisserie provient de deux process qui fonctionnent durant les heures d'ouverture de la blanchisserie et sa quantité disponible dépend de la quantité d'activité. Chaque blanchisserie a ses propres horaires mais globalement, ces industries sont en activités cinq jours par semaine, du lundi au vendredi, et parfois le samedi. Durant une journée, le plus fréquent est d'avoir deux équipes, présentes 8h/jour (une heure de pause est comprise), avec une activité entre 6h et 21h. Dans la blanchisserie étudiée à Helsinki, les machines fonctionnent 13h par jours et six jours par semaine. Lors de jours fériés, les blanchisseries ferment, et leur activité peut baisser durant les périodes de vacances.

Les weekends, jours fériés et durant la nuit, il n'y a donc pas de chaleur fatale émise dans les blanchisseries industrielles. En plus de cette variabilité journalière, les rejets d'effluents et d'air sont discontinus et il est nécessaire d'évaluer cette intermittence pour évaluer la pertinence de récupération de cette source. Grâce à l'instrumentation de deux blanchisseries par la compagnie Assystem et l'institut Efficacy, une du secteur privé et l'autre du secteur public, des données sur la température et le débit des effluents de lavage ont été récupérées, deux valeurs clés pour calculer le potentiel énergétique de la source fatale. La Figure A-22 représente les débits mesurés (en litre par seconde), minute par minute, sur une journée travaillée de 15h d'une blanchisserie. L'intermittence du débit montre que l'écoulement des effluents s'effectue par à-coups. Ces à-coups durent en moyenne 5 minutes. Entre chaque période de rejet, le débit est nul. L'énergie récupérable est donc également intermittente.

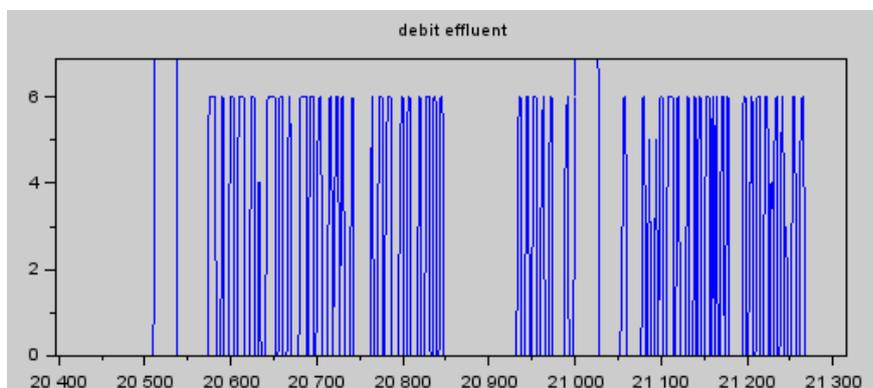


Figure A-22 Mesure du débit des effluents d'une blanchisserie sur une journée

Le potentiel énergétique des blanchisseries est de l'ordre de quelques giga wattheures. Les faibles débits (plus faibles que pour les eaux usées en réseau d'assainissement) font que la quantité d'énergie récupérable est assez faible. Dans de nombreux cas, la récupération d'énergie fatale issue des effluents est déjà, en partie, valorisée en interne (Figure A-19) ce qui limite encore plus le potentiel de récupération pour un réseau de chaleur.

Grâce à l'instrumentation des blanchisseries, des données de températures ont été récupérées. Il s'agit de températures des effluents rejetés après les cycles de lavage. La Figure A-23, où la température sur un mois est exprimée dans le graphique du bas au pas minutaire, montre une variation qui suit l'activité d'une blanchisserie et donc le débit. Le dimanche, lorsqu'il n'y a pas d'activité, l'activité est au plus bas, alors qu'elle dépasse régulièrement les 30 °C en période d'activité.

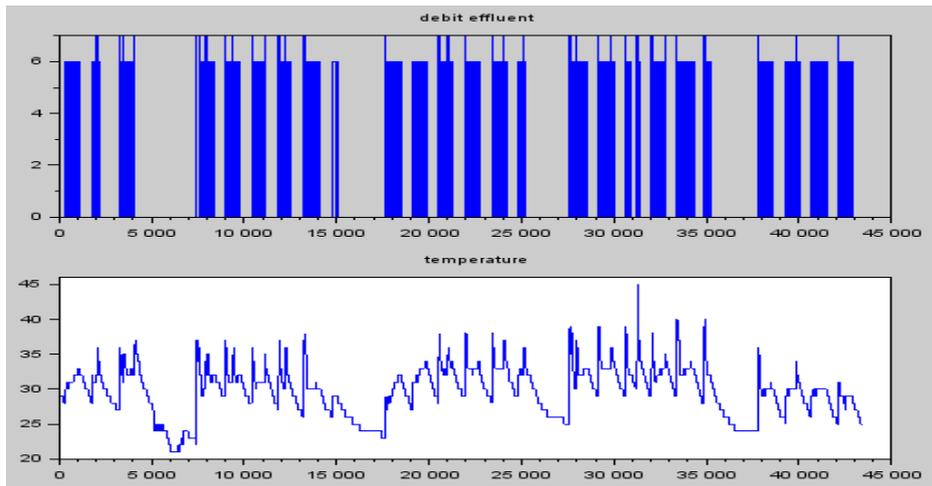


Figure A-23 Mesures de débit et de température des effluents d'une blanchisserie sur un mois au pas minutaire

Dans le cas d'étude d'Helsinki (Adhikari, 2017), le potentiel de récupération est estimé à 650 MWh/an, provenant majoritairement de l'air rejeté au moment du séchage. Cependant, la blanchisserie étudiée traite environ 100 kg de linge par jour. La quantité de linge influe sur l'énergie récupérable et les grandes blanchisseries ont donc un potentiel plus important. Un calcul avec des hypothèses reprenant ce rapport entre quantité de linge traité et chaleur récupérable est détaillé en partie 2.

Les blanchisseries privées peuvent voir leur activité fluctuer en fonction du nombre de clients. La pérennité de ces industries est donc très variable, ce qui est moins le cas pour les blanchisseries publiques reliées à des hôpitaux et des EHPAD. Ces derniers ont des durées de vie plus importantes et l'activité de leurs blanchisseries est assurée sur le long terme. A noter que l'efficacité énergétique des process est une question importante pour ces industries. Selon l'ADEME, une blanchisserie qui optimise ces process énergétiques pourrait baisser sa consommation à 0,8 kWh/kg de linge traité, contre 2 kWh/kg de linge aujourd'hui (ADEME, 2017b), avec un intérêt environnemental et économique.

Enfin, les blanchisseries industrielles sont donc gérées par des entreprises privées ou par des organismes publics si elles sont rattachées à des établissements publics qui nécessitent du traitement de linge en interne, comme les hôpitaux.

ANNEXE 1.6 Description de la source fatale « verreries »

Les verreries sont des industries qui fabriquent différentes gammes de verres, avec des utilisations diverses : du verre en cristal au plomb pour de l'artisanat ou du verre plat destiné à des industries comme l'automobile ou le bâtiment. En fonction du type de verre produit, les usines et techniques de fabrication utilisent des procédés divers et la quantité de verre produit peut varier de quelques tonnes par jour à 700 tonnes par jour (MEDDE, 2007).

En 2013, 4,5 millions de tonnes de verres ont été produites (Fédération des industries du verre, 2013). Cette quantité est en baisse depuis le début des années 2000, principalement due à la baisse de demande de verre creux. La Figure A-24 résume cette évolution avec le détail des trois principaux types de verre produit : le verre creux, le verre plat et la laine de verre, cette dernière étant marginale par rapport aux deux premiers produits.

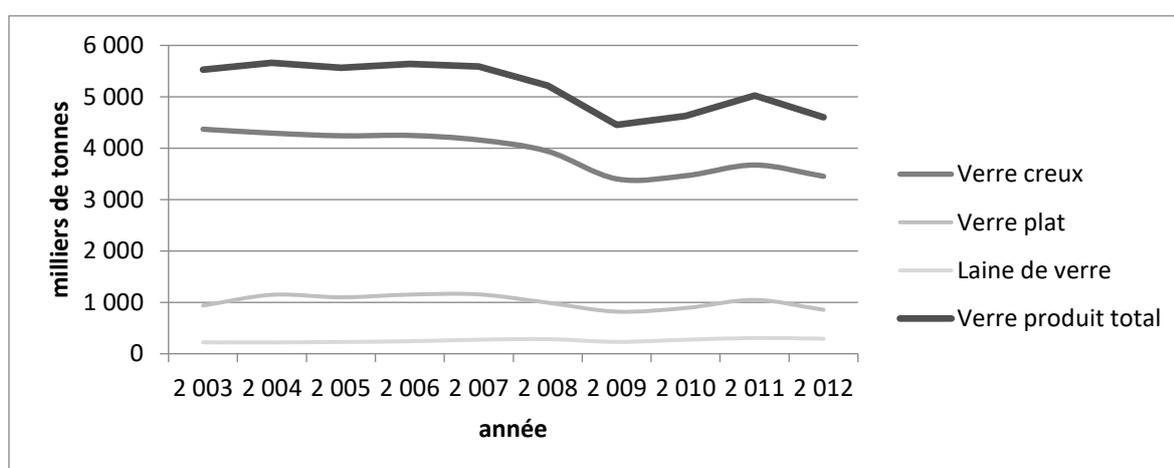


Figure A-24 Evolution de la production de verre en France - données issues de la Fédération des industries du verre (Fédération des industries du verre, 2012)

Ces industries sont classées pour la protection de l'environnement et particulièrement énergivores. Les statistiques du ministère du développement durable⁶⁶ indiquent que l'industrie du verre a consommé près de 1 200 ktep (environ 14 TWh) en 2009, soit 3,5 % de la consommation énergétique de l'industrie française dans son ensemble cette année-là. Le même ordre de grandeur est estimé en 2012 pour la consommation énergétique de l'industrie du verre en Union Européenne avec 3 % de l'énergie finale de toute les industries et environ 102 TWh consommés (Fleiter et al., 2016). Les rejets atmosphériques sont un enjeu important pour cette industrie. En 1997, les rejets dans l'Union Européenne de poussières (9 000 tonnes), d'oxydes d'azote (103 500 tonnes), d'oxydes de soufre (91 500 tonnes) et de dioxyde de carbone (22 millions de tonnes) représentaient environ 0,7 % du total des émissions de ces substances (MEDDE, 2007). Dans ce contexte, les réglementations européennes et françaises ont évolué, tout comme les innovations autour des procédés et le taux de recyclage du verre (de 40 % à 70 % entre 1995 et 2010 pour le verre d'emballage en France). Selon la fédération des industries du verre (Fédération des industries du verre, 2013), les rejets du liés à la production de verre creux ont baissé de 17 % pour le CO₂ entre 2005 et 2012 et de 90 % pour l'ensemble des rejets atmosphériques sur la même période.

⁶⁶ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/333/1200/consommation-denergie-lindustrie.html>

Il existe 42 verreries en France, réparties sur le territoire et généralement installés depuis plusieurs dizaines d'années. Initialement implantées à l'écart des villes, certaines ont été rattrapées par le tissu urbain et nombre d'entre elles sont à présent situées en zone urbaine, voire en pleine ville (à Paris, au Havre).

Le procédé de fabrication du verre varie en fonction du type de verre produit mais se décompose globalement en cinq étapes : le traitement des matières premières, la fusion, le formage, le traitement en aval et le contrôle qualité.

Après le traitement des matières premières, qui consiste à les séparer et trier en fonction des besoins, la fusion forme du verre brut. Cette fusion, étape la plus consommatrice en énergie, s'effectue à 1 500 °C et commence par un préchauffage de l'air de combustion, la fusion principale, l'affinage qui permet d'éliminer des bulles gazeuses issues de la fusion, l'homogénéisation du verre et le conditionnement. Cette dernière partie abaisse la masse de verre à une température compatible avec les traitements de l'étape suivante (Fourment & Fromentin, 2012).

La fusion s'effectue dans un four. Il en existe plusieurs types (à régénérateurs, à récupérateur métallique ou à oxycombustion) qui répondent à des besoins différents : température maximale et taille du four. La plupart des fours aujourd'hui sont équipés de régénérateurs qui récupèrent la chaleur des fumées du four afin de préchauffer l'air de combustion. Parmi les innovations d'efficacité énergétique de ces procédés, la chaleur des fumées du régénérateur est également récupérée dans les fours de dernières générations et préchauffent les matières premières solides. L'économie d'énergie de cette valorisation de chaleur interne serait de 18 % (Woillez, 2015).

Les étapes qui suivent (formage, traitement aval et contrôle qualité) diffèrent pour le verre plat, le verre creux et la fibre de verre mais dans tous les cas, des sous-étapes de fabrication s'effectuent avec des températures qui s'abaissent progressivement. Le schéma de la Figure A-25 résume le processus de fabrication du verre creux. Après le formage effectué à 1 000°C, la température passe à 600 °C pour un traitement de surface, une recuisson (200 °C – 500 °C) et un dernier traitement de surface (150 °C) avant le contrôle et la palettisation.

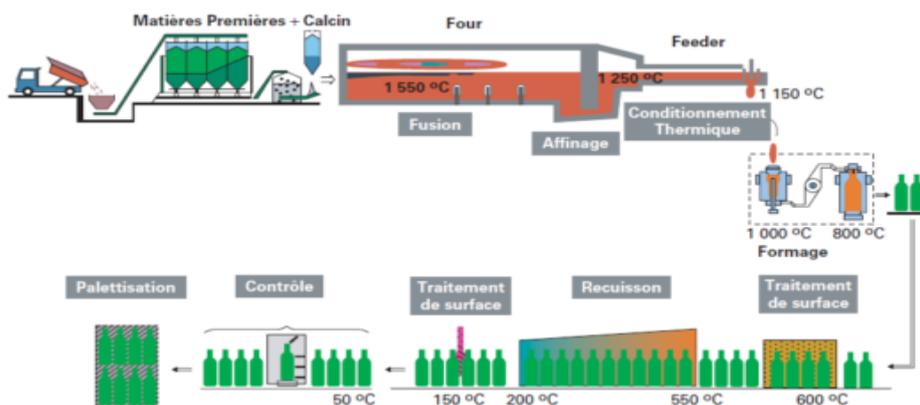


Figure A-25 Process de fabrication du verre creux (Conseil National de l'Emballage, 2013)

L'énergie nécessaire à la fusion des matières premières est estimée entre 1,2 kWh/t et 1,7 kWh/t de verre produit, comme le résume le Tableau A-8. Les fours à récupérateur consomment entre 5 % et 25 % plus que ceux à générateur (Fourment & Fromentin, 2012).

Tableau A-8 Ordre de grandeur des consommations énergétiques des fours à régénérateur (Fourment & Fromentin, 2012)

	Volume du four (m ³)	Capacité du four (tonne/jour)	Consommation énergétique par tonne de verre produit (MWh/t)
Verre creux	80	200	1, 16
Verre creux	30	65	1, 57
Verre plat	500	500	1, 74

100 % de l'énergie consommée est finalement dissipée, dans de l'eau de refroidissement ou dans l'atmosphère. Une partie de cette énergie est déjà récupérée en interne par les fours, mais des excédents de chaleur sont récupérables. Les fumées du four sont rejetées entre 300 °C et 600 °C (Fleiter et al., 2016) en fonction des technologies installées, et des circuits de refroidissement rejettent de l'eau à une température classique pour ce genre de montage, entre 40°C et 80°C (Woillez, 2015).

Description via critères

Tableau A-9 Description de la source fatale "Verreries"

Critères	Description
Etat	Eau et air
Température	- Haute température (300 – 600 °C) - Basse température (40 – 80°C)
Localisation	Périurbain
Variabilité	Continu
Potentiel énergétique	De quelques GWh à 400 GWh
Pérennité	Long terme
Gestion	Privée

Comme expliqué dans cette section et résumé dans le Tableau A-9, la récupération de chaleur sur verrerie peut se faire en plusieurs points du process, sur de l'eau ou des fumées, à basse température (40 °C – 80 °C) et haute température (300 °C – 600 °C).

La viabilité de la récupération de chaleur sur cette industrie pour des besoins de chauffage de bâtiments via un réseau de chaleur dépendra de la proximité entre l'usine de fabrication et les zones urbaines équipées du réseau de chaleur. Or, sur 36 verreries répertoriées et localisées⁶⁷, seulement 18 se situent à l'intérieur d'une unité urbaine de plus de 50 000 habitants. Ces usines sont cartographiées sur la Figure A-26.

⁶⁷ <http://www.fedeverre.fr/IMAGES/carte.jpg>

Le four est en fonctionnement. Le four peut durer plusieurs années avant un arrêt forcé pour maintenance ou réparation.

Le potentiel énergétique d'une verrerie pourra varier en fonction des technologies utilisées pour le four et du taux de récupération interne déjà en place, mais dépend surtout de la quantité de verre produit. Selon Van Limpt (2013), 100 % de l'énergie utilisée est dissoute par effet joule et est évaluée entre 3,6 GJ/tonne et 6,15 GJ/tonne de verre fondu en fonction du type de verre produit et des fours utilisés (soit entre 1 MWh/tonne et 1,7 MWh/tonne). La récupération interne peut permettre d'utiliser jusqu'à 60 % de cette énergie et le reste est donc potentiellement récupérable. On note $\varphi_{interne}$ la récupération interne, Q_t (en MWh/an) la quantité d'énergie dissoute par tonne de verre produit et $K_{journalier}$ la quantité de verre produit par jour (en tonnes), l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie fatale potentiellement récupérable, Q_{ef} (en MWh/an), peut s'exprimer ainsi :

$$Q_{ef} = Q_t * (1 - \varphi_{interne}) * K_{journalier} * 365,$$

$$\text{avec } 1 < Q_t < 1,7; 50 < K_{journalier} < 700; 0\% < \varphi_{interne} < 60\%$$

En réalisant ce calcul avec les limites maximales et minimales, les ordres de grandeur sont un minimum de 7,3 GWh/an et un maximum de 434,4 GWh/an. Il faut préciser ici que cette quantité d'énergie ne prend pas en compte les rendements d'une éventuelle récupération, qui, pour rappel, peut s'effectuer sur les fumées de rejet du four à haute température et/ou sur les circuits de refroidissement à eau, à basse température.

L'industrie du verre est en légère baisse d'activité depuis le début du XXIème siècle (Figure A-24) mais est encore présente. Elle emploie 19 000 salariés en 2012 contre 25 000 en 2005 (Fédération des industries du verre, 2012). Le verre creux continue d'être le type de verre le plus produit (plus de trois millions de tonnes en 2012), avec un chiffre d'affaire de plus de deux milliards d'euros (60 % du chiffre d'affaire globale de l'industrie verrière), mais la laine de verre est de plus en plus produite (+ 23 % de 2012 à 2013)⁶⁸, le marché de l'isolation étant de plus en plus porteur.

Selon Brejon de Lavergnée (2002), le secteur industriel a subi une grande évolution au cours du XIXème siècles et seules les grandes verreries sont restés solidement implantés sur les territoires, tandis que les entreprises de petites tailles ont disparues. La récupération de chaleur est donc plus probable sur de grandes verreries, dont l'activité est plutôt garantie.

⁶⁸ http://www.fedeverre.fr/evolution_par_secteur.html

ANNEXE 1.7 Description de la source fatale « entrepôts frigorifiques »

La fonction d'un entrepôt frigorifique est de recevoir et stocker puis expédier des marchandises sur une durée déterminée dans des chambres froides à des températures variables en fonction du type de marchandise traité. Les marchandises correspondent exclusivement à des denrées périssables (fruits et légumes, produits laitiers, produits de la mer, produits carnés et produits pharmaceutiques).

Les entrepôts frigorifiques font partis d'une plus large activité qu'est l'entreposage. En 2012, une enquête du Commissariat Général au Développement Durable (2012) a recensé tous les entrepôts de plus de 5 000 m² en France. 3 100 entrepôts ont été répertoriés, pour une surface totale de 60 millions de m². 720 de ces entrepôts sont frigorifiques, soit près d'un quart, avec une moyenne de 16 700 m² par entrepôt. Dans un état de l'art sur ce secteur, Efficacity indique que les entrepôts frigorifiques de plus de 5 000 m² ne représenteraient que 12 % du nombre total d'entrepôts frigorifiques en France, supérieur à 6 000 en 2001 (De Carlan, 2016). Toujours selon ce même état de l'art, le volume de la totalité de représenteraient s'approcherait de 22 millions de m³. Dans ce recensement, les entrepôts frigorifiques sont confondus avec toutes les activités du secteur tertiaire qui installent des groupes froids (commerces de gros alimentaire, boucheries, poissonneries, hypermarchés, commerces de produits surgelés, cafés, restaurants, hôtels, etc.).

La principale composante d'un entrepôt frigorifique est sa chambre froide. Il peut y en avoir plusieurs pour un entrepôt. Les températures de ces chambres sont variables en fonction de la marchandise à stocker : à température négative (froid négatif) pour 14 % d'entre elles, température positive (froid positif) pour 55 % ou température mixte (31 %). Les niveaux de température sont résumés dans le Tableau A-10.

Tableau A-10 Régimes de température des chambres froides d'entrepôts frigorifiques (données issues des rapports du Commissariat Général au Développement Durable (2012) et de l'INRS (INRS, 2010))

	Régimes de température	Part des entrepôts frigorifiques
Chambre à froid positif	0 °C < T < 15 °C	55 %
Chambre à froid négatif	-60 °C < T < 0 °C	14 %
Chambre mixte	0 °C < T < 15 °C	31 %

La production de froid nécessaire à ces chambres froides se réalise grâce à une installation frigorifique à compression, avec apport d'électricité. Le principe est le même que pour le refroidissement des data centers, qui utilisent des cycles frigorifiques (Figure A-12), seuls les régimes de températures avec les data centers sont différents. La récupération de chaleur est possible au niveau du condenseur du groupe frigorifique, qui évacue l'énergie calorifique. Comme pour les data centers, ce système est surtout envisageable si un circuit d'eau traverse le condenseur, plutôt qu'une évacuation d'air chaud.

Entre 60 % et 70 % de la consommation énergétique d'un entrepôt frigorifique correspond à l'apport électrique de l'installation frigorifique (Evans et al., 2014) et représente environ 35 % de l'électricité consommée par toute l'industrie alimentaire (1 300 TWh/an dans le monde). L'ADEME et l'ATEE évaluent la consommation électrique pour la production de froid des entrepôts frigorifiques à 1 027 GWh/an, l'équivalent de 12 % de la consommation électrique pour la production de froid total du tertiaire (ADEME et ATEE 2015). En 2002, l'Institut International du Froid (IRR) a estimé la consommation énergétique d'une chambre froide entre 30 et 50 kWh/m³/an (Duiven & Binard, 2002). Evans (2014) a centralisé d'autres données de la littérature qui confirme ce ratio, mais certaines études, issues de mesures et statistiques, évoquent une consommation énergétique pouvant être

supérieure à 300 kWh/m³/an et des écarts liés à la taille des chambres froides, leurs températures et technologies utilisées (liées à l'ancienneté de l'entrepôt).

Pour produire du froid positif (entre 0°C et 2 °C), la température au niveau de l'évaporateur doit être d'environ -8°C. Pour un entreposage à des températures négatives (- 25°C), la température à l'évaporateur est comprise entre - 32 °C et - 36 °C (De Carlan, 2016). La température au niveau du condenseur est d'environ 30 °C (Brange et al. 2016; Water Wind Sun S.A. 2017).

A noter que de nombreux entrepôts frigorifiques réalisent déjà des actions d'efficacité en récupérant de la chaleur, pour des besoins en interne : préchauffage d'ECS, chauffage d'eau de process, préchauffage d'eau de chauffage, préchauffage d'air ou encore dégivrage (ADEME & ATEE, 2015). Pour les entrepôts ayant des chambres froides à températures négatives, des problèmes de gel du sol peuvent avoir lieu et détruire la dalle sur laquelle l'entrepôt est installé. La solution est alors de réchauffer en continu le sol, grâce à l'énergie du condenseur (seulement une petite partie, environ 10 %), distribuée par un réseau de canalisation enterré (Meunier et al. 2010).

Description via critères

Tableau A-11 Description de la source fatale "Entrepôts frigorifiques"

Critères	Description
Etat	Eau
Température	Basse température (environ 30 °C)
Localisation	Périurbain
Variabilité	Continu mais des variations journalières
Potentiel énergétique	Entre 1 GWh/an et jusqu'à 50 GWh/an
Pérennité	Long terme
Gestion	Privée

Le Tableau A-11 résume donc la description de la source fatale « entrepôts frigorifiques selon les critères de description définis précédemment (3.3.1). La récupération est donc possible au niveau condenseur, à une température d'environ 30°C.

59 % des entrepôts frigorifiques de plus de 5 000 m² sont situés dans une zone logistique⁶⁹, principalement de type industriel. Les zones logistiques industrielles en Ile-de-France comprennent les zones d'activités économiques (ZAE) déjà évoquées dans la localisation des blanchisseries industrielles. La Figure A-28 représente les entrepôts frigorifiques d'Ile-de-France, superposées avec les ZAE. Les entrepôts frigorifiques sont des ICPE et sont par conséquent listés et localisés par le ministère de la transition écologique et solidaire⁷⁰. Environ 86 % des entrepôts frigorifiques répertoriés sont localisés dans des ZAE en Ile-de-France, d'où une localisation considérée comme périurbaine dans le Tableau A-11.

⁶⁹ **Zone logistique** : zone géographique aménagée de façon à permettre l'installation d'entrepôts. Il peut s'agir d'une zone industrielle, aéroportuaire, aménagée à vocation logistique, liée à une gare ferroviaire, portuaire maritime ou fluviale (Commissariat Général au Développement Durable, 2012)

⁷⁰ Données de localisation des entrepôts frigorifiques (Nomenclature IC : '1511') :

<http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/rechercheICForm.php>

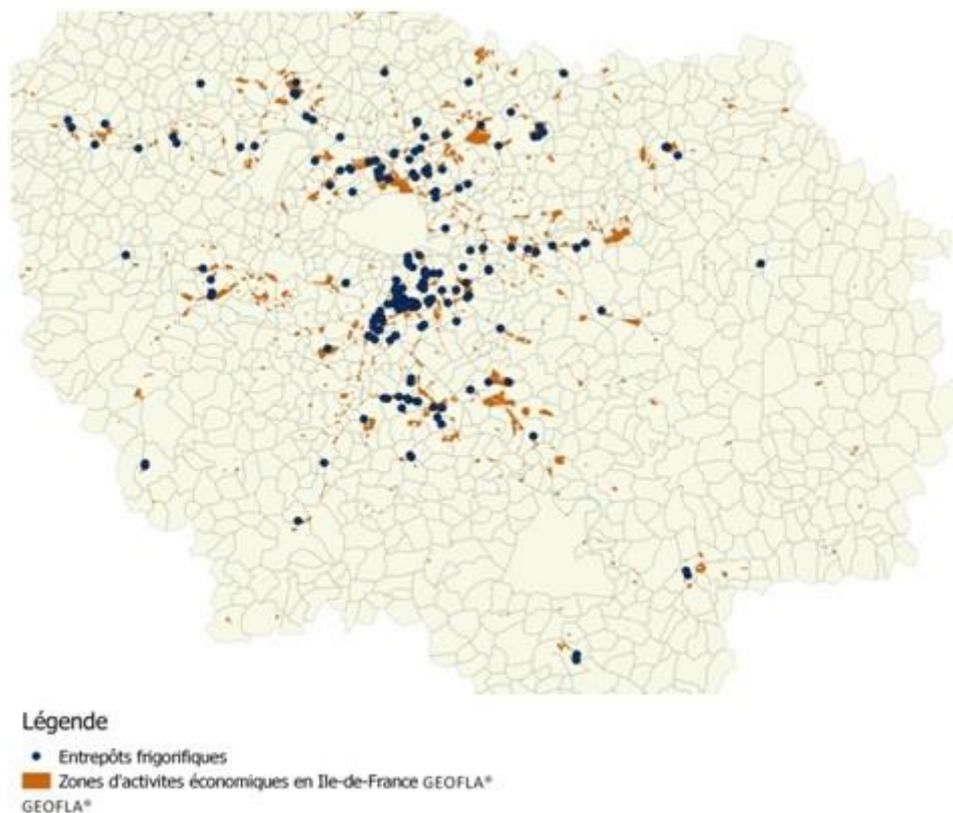


Figure A-28 Entrepôts frigorifiques localisés en Ile-de-France et superposés avec les ZAE (source : auteur)

Les entrepôts frigorifiques fonctionnent sur des journées de 10 heures ou 16 heures par jour en fonction de la taille des installations. Ils peuvent être ouverts le samedi. Durant ces heures travaillées, les employés reçoivent, stockent et expédient les marchandises entreposées. Cependant, les chambres froides conservent leur même température en continu, et les machines frigorifiques fonctionnent donc même lorsque l'entrepôt est fermé.

Les enquêtes menées par Efficacity avec un opérateur d'entrepôt frigorifique ont permis de connaître plus en détail la consommation électrique des groupes froids. La Figure A-29 représente une courbe de charge électrique d'un entrepôt frigorifique sur un an. La première observation est que les appels de puissance ne sont pas continus. En analysant en détail les consommations électriques, trois zones d'appels de puissance sont différenciables : la zone où la puissance maximale est appelée, la zone où la moitié de la puissance maximale est appelée et la zone où l'appel de puissance est nul.

Ce mode de fonctionnement est une optimisation de la consommation énergétique. Les groupes froids sont désactivés ou réduits en puissance quelques heures par jour, notamment au moment des heures pleines⁷¹. L'inertie des chambres froides leur permet de conserver un niveau de température suffisamment bas pour respecter les règles de conditionnement. Les profils d'appel de puissance sont variables en fonction des saisons (différence entre été et hiver) et des jours de la semaine (jours travaillés ou non), le détail de cette variabilité est repris dans la deuxième partie pour le calcul du potentiel énergétique sur entrepôts frigorifiques.

⁷¹ Heures pleines : les fournisseurs d'électricité proposent des tarifs comprenant des options heures pleines / heures creuses. En heures creuses (qui correspondent aux heures de la journée où la consommation électrique est plus faible), le tarif du kilowattheure est plus faible qu'aux heures pleines, qui correspondent aux heures de pointes.

La récupération de chaleur fatale sur les condenseurs, sans élément de stockage supplémentaire, est donc possible que lors des phases de fonctionnement du groupe frigorigène.

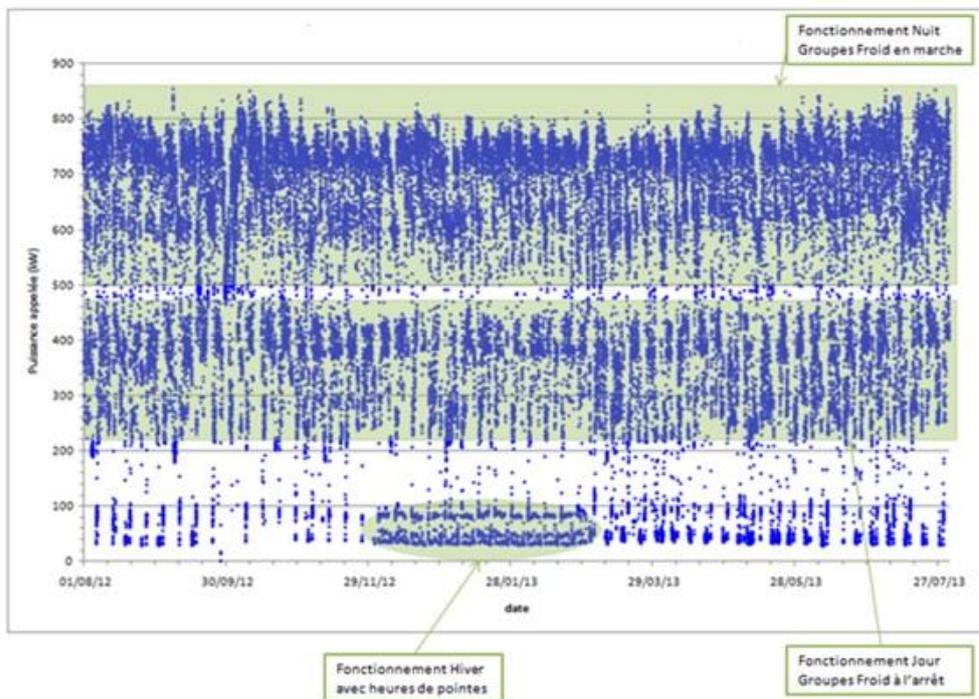


Figure A-29 Courbe de charge d'un entrepôt frigorifique sur une année (SOURCE : EFFICACITY)

Comme expliqué plus haut dans ce paragraphe, le potentiel énergétique des entrepôts frigorifiques dépend surtout de la taille des chambres froides. Théoriquement, la quantité d'énergie fatale récupérable au condenseur (Q_{ef} , en kWh/an) est calculable ainsi (obtention de la formule détaillée en 0) :

$$(2) \quad Q_{ef} = Q_v * V * (EER + 1)$$

Avec :

- $30 \text{ kWh/m}^3/\text{an} > Q_v > 100 \text{ kWh/m}^3/\text{an}$; Q_v correspondant à la consommation électrique par unité de volume (m^3) d'une chambre froide. L'hypothèse prise sur la valeur maximale de Q_v ($100 \text{ kWh/m}^3/\text{an}$) vient de la littérature, où des valeurs supérieures sont rarement évoquées.
- V , le volume de la chambre froide étudiée (en m^3).
- EER (Energy Efficiency Ratio), appelé en français le coefficient d'efficacité frigorifique, ou encore COP froid, et correspond à l'énergie absorbée (qui revient théoriquement à l'énergie du compresseur) sur l'énergie consommé. Plus la température de la chambre froide est basse, plus l'énergie absorbée est élevée et ERR est bas. Dans le cas des entrepôts frigorifiques :
- $2,5 > ERR > 1,4$

Pour un entrepôt frigorifique moyen de $16\,700 \text{ m}^2$ (ainsi qu'une hauteur moyenne de 8 mètres et en prenant l'hypothèse que 50% de la surface correspond à une chambre froide), l'énergie théorique récupérable est entre 3,8 GWh/an et 23,4 GWh/an.

L'entreposage frigorifique est une activité industrielle indispensable au respect de la chaîne du froid et reste donc une activité pérenne. Les groupes froids des entrepôts nécessitent de la maintenance régulière mais les usines ne sont pas sujettes à des fermetures et délocalisations. Néanmoins, certaines usines déménagent au moment du renouvellement de leurs matériels, comme le montre le rapport

mandaté par la direction régionale et interdépartementale de l'Équipement et de l'aménagement en Ile-de-France (Samarcande TLT, 2013).

Les entrepôts frigorifiques sont gérés par des compagnies privées même si deux types d'entrepôts se différencient : privés et publics. Le propriétaire d'un entrepôt frigorifique privé exploite son local et la marchandise entreposée lui appartient également. Dans le cas d'un entrepôt frigorifique public, le propriétaire propose un service d'entreposage à ces clients, les propriétaires des marchandises.

ANNEXE 1.8 Calcul de l'énergie fatale récupérable au condenseur

D'après le premier principe de la thermodynamique, l'énergie disponible au condenseur d'une pompe à chaleur (Q_c) correspond à la somme entre l'énergie à l'évaporateur (Q_f) et l'électricité consommée au compresseur (W) :

$$(3) \quad Q_f + W = Q_c$$

Les performances de ces machines frigorifiques sont le COP (coefficient de performance) lorsque la PAC produit de la chaleur et le EER (ratio d'efficacité énergétique ou « energy efficiency » ratio en anglais) si la PAC fournit du froid. Ils se déterminent ainsi :

$$(4) \quad COP = \frac{Q_c}{W}; EER = \frac{Q_f}{W}$$

En fonction de la disponibilité des données, il est possible de calculer l'énergie disponible au condenseur par plusieurs moyens :

1. Si l'EER est connu :

$$Q_f + W = Q_c \rightarrow \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_f}{W} + 1 = EER + 1 \rightarrow Q_c = W * (1 + EER)$$

2. Si le COP est connu :

$$Q_f + W = Q_c \rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} + \frac{W}{Q_c} = 1 \rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{1}{COP} = \frac{COP-1}{COP} \rightarrow Q_c = Q_f * \frac{COP}{(COP-1)}$$

ANNEXE 2.1 Zones Climatiques

Les zones climatiques utilisées dans Recov'Heat sont inspirées de la Réglementation Thermique 2000 (RT 2000) qui a séparé les régions de France en trois zones, illustrées Figure A-30. La RT 2012 propose une division plus fine avec 8 zones climatiques (H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d, H3). Dans Recov'Heat, la version de la RT 2000 a été maintenue mais la zone H1a, qui correspond aux départements de la région Ile-de-France, a été ajoutée. La raison est que plusieurs données particulières à l'Ile-de-France (température d'eaux usées notamment), provenant du consortium Efficacity, sont intégrées à l'outil.

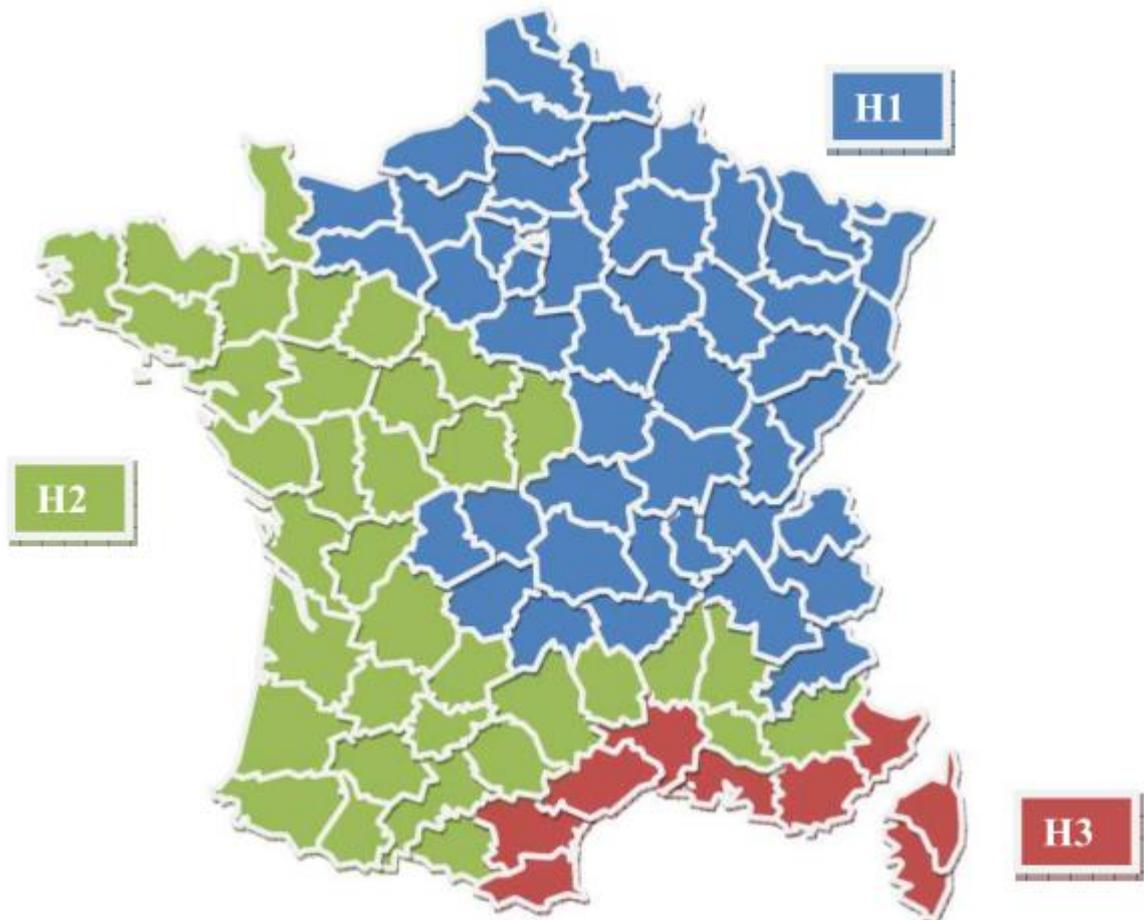


Figure A-30 Zones climatiques selon la RT 2000 (AIDEE, 2000)

ANNEXE 2.2 Pertes thermique UVE

Le Tableau A-12 exprime les pertes thermiques tout au long du processus d'incinération d'une tonne de déchet. L'hypothèse est de prendre un potentiel énergétique de 2 400 kWh/an/tonne. Ces chiffres proviennent de l'état de l'art sur la récupération de chaleur issue des UVE réalisé par Efficacity (Combe & Woillez, 2015).

Tableau A-12 Pertes thermiques lors du processus d'incinération d'une tonne de déchets (Combe & Woillez, 2015)

	Quantité d'énergie dissipée (kWh/an)
Perte chaleur sensible mâchefers	3,2
Perte vaporisation buées extracteur	15,9
Perte humidité mâchefers	2,4
Perte four	12
Perte gaz imbrûlés	0,3
Perte imbrulés mâchefers	17,9
Perte gaz sortie chaudière	422,7
Perte cendres volantes sortie chaudière	0,5
Perte cendres sous chaudière	0,8
Perte vapeur ramonage	15,6
Perte rayonnement chaudière	60
Perte purges	8,5
Energie air primaire entrant	-18,2
Energie eau d'extraction entrant	-1
Energie chaleur sensible déchets	-8,4
Energie air secondaire entrant	-7,8
Energie eau alimentaires purges	-4,2
Energie eau alimentaire ramonage	-3
Pertes totales	517,2

Sur un potentiel initial de 2 400 kWh/an/tonne de déchet, il faut donc environ retirer 517 kWh/an de pertes sur l'ensemble du processus, soit 22 %.

ANNEXE 2.3 Détermination du coefficient de déperdition thermique

Pour calculer le coefficient de déperdition thermique, il faut connaître le diamètre de la canalisation, qui dépend du débit du fluide qui circule dans cette canalisation. Ce débit peut se déterminer à partir de la puissance (donnée disponible) :

$$P = Qv_{eau} * C\rho_{eau} * \rho_{eau} * \Delta T$$

- $C\rho_{eau} = 4.195 \text{ kJ.kg.K}$ Chaleur massique de l'eau
- $\rho_{eau} = 971.6 \text{ kg.m}^3$ Masse volumique de l'eau
- Qv_{eau} : Débit volumique de l'eau, à déterminer
- P : Puissance valorisable, déjà déterminé.
- ΔT : Différence de température entre la chaleur fatale (connue) et la température extérieure du sous-sol, fixée à 10°C.

$$Qv_{eau}(L/s) = \frac{P}{C\rho_{eau} * \rho_{eau} * \Delta T} * 1000$$

A partir de ce débit calculé, et d'une hypothèse sur la vitesse d'écoulement (elle-même fonction du débit), le diamètre et le coefficient de déperdition thermique sont déterminés grâce à l'abaque de Diarès, affiché Figure A-31. Le Tableau A-13 reprend les valeurs utilisées en fonction des hypothèses faites sur la vitesse d'écoulement.

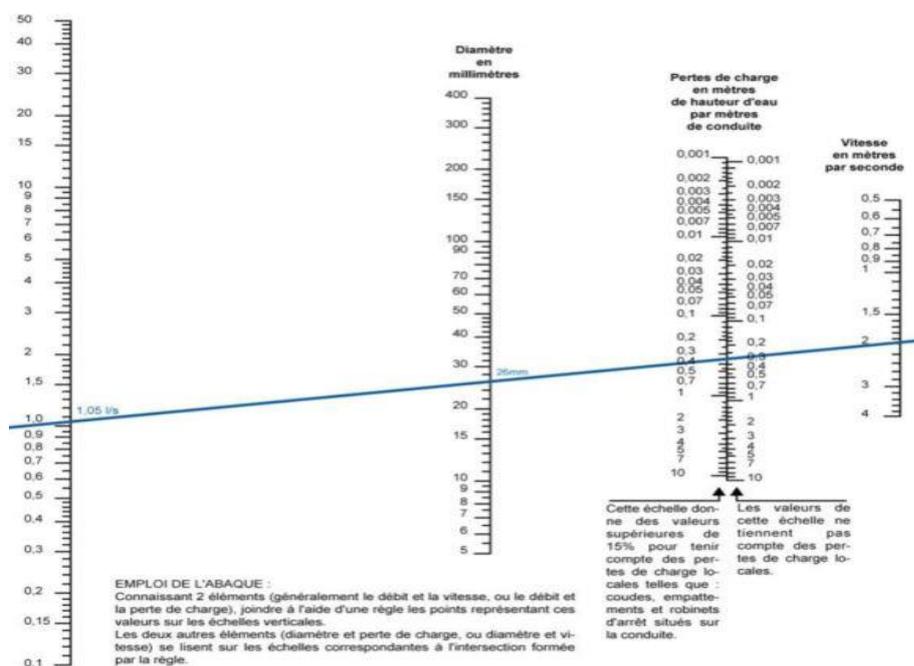


Figure A-31 Abaque de Diarès

Tableau A-13 Hypothèses sur la relation entre débit et coefficient de déperdition thermique

Débit (L/s)	DN	Coefficient de déperdition thermique (W/mK)
1	20	0.2538
3.8	50	0.2748
9	100	0.3098
31	200	0.3798
50	300	0.4498
50+	300+	0,7

ANNEXE 2.4 Bibliothèque de données techniques, économiques et environnementales

Tableau A-14 Bibliothèque de données techniques, économiques et environnementales

			Source
Coûts d'investissement			
Coût unitaire chaudière à gaz	100	€/kW	Données Efficacy
Coût unitaire échangeur de chaleur	2	€/MWh	(Steinmo & J, 2017)
Coût unitaire réseau de canalisation	500	€/ml	Données Efficacy
Coût raccordement au réseau de chaleur	100	€/kW	Données Efficacy
Coût unitaire sous-station	100	€/kW	Données Efficacy
PAC HT (Température condenseur > 90°C)	500 (< 1 MW) 360 (> 1 MW)	€/kW €/kW	(Vivian et al., 2018) Données Efficacy
PAC MT (Température condenseur entre 65 °C et 90 °C)	300 (< 1 MW) 250 (> 1 MW)	€/kW €/kW	
PAC BT (Température condenseur < 65 °C et 90 °C)	200 (< 1 MW) 170 (> 1 MW)	€/kW €/kW	
Etudes, AMO, MOE, Aléas, Assurance	15 %	% de l'investissement	Données Efficacy
Coûts de maintenance			
	5 %	% de l'investissement	(Vivian et al., 2018)
Emission de CO₂			
Gaz	238	g/kWh	Données Efficacy
Electricité	84	g/kWh	Données Efficacy
Coûts énergie primaire et CO₂			
Gaz	0,05	€/kWh	Données Efficacy
Electricité	0,09	€/kWh	Données Efficacy
CO ₂	8 + 6 %/an	€/kg _{CO₂}	Données Efficacy
Données financières			
Taux d'actualisation	4%	% par an	Données Efficacy

ANNEXE 2.5 Analyses de sensibilité

Une analyse de sensibilité est proposée sur trois paramètres qui peuvent influencer la faisabilité d'un projet de valorisation de chaleur fatale pour répondre à des besoins thermiques de bâtiments. L'analyse est effectuée à partir du cas d'étude sur un entrepôt frigorifique présenté dans le chapitre 5 (Chapitre 5- **Validation du modèle Recov'Heat et cas d'étude**).

Le premier paramètre analysé est la distance entre la source et les besoins. Le second est la température à laquelle l'énergie fatale doit être rehaussée (si nécessaire) pour être compatible avec les besoins (appelée température de départ dans ce chapitre). Le troisième paramètre concerne une donnée technique relative aux entrepôts frigorifiques, la température d'entreposage.

Analyse de sensibilité sur la distance entre source et besoins

Pour rappel, la distance entre sources et besoins est de 500 mètres dans le cas d'étude. Le Tableau A-15 révèle le taux d'EnR&R (%), les pertes de distributions (%) et le LCOE (€/MWh) obtenus par simulations lorsque la distance entre source et besoins varie entre 100 mètres et 5 000 mètres. La Figure A-32 illustre les effets de cette variation de de distance.

Tableau A-15 Analyse de sensibilité sur la distance entre source de chaleur fatale et bâtiments consommateurs

Distance (m)	Taux EnR&R (%)	Pertes (%)	LCOE (€/MWh)
100	60,7%	0,2%	49,1
200	60,7%	0,4%	49,9
500	60,6%	0,9%	52,2
800	60,6%	1,5%	54,5
1000	60,6%	1,8%	56,1
1500	60,5%	2,7%	60,0
2000	60,5%	3,7%	63,9
5000	60,1%	9,2%	87,9

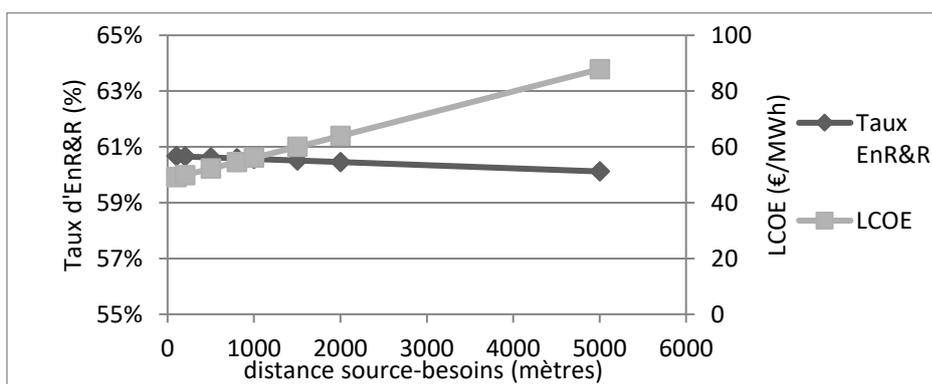


Figure A-32 Effets de la variation de la distance source-besoins sur le taux d'EnR&R et le LCOE

L'incidence de l'augmentation de cette distance est assez faible sur le taux d'EnR&R : il passe de 60,6% dans le cas réel (500 mètres) à 60,1 % si la distance était dix fois plus élevée (5 000 mètres). Cette baisse est exclusivement due à l'augmentation des pertes de distribution, qui montent à 9,2 % de l'énergie récupérable lorsque la distance est de 5 000m.

Le LCOE est l'indicateur le plus impacté par la variation de la distance entre source et besoins. Cette observation est logique étant donné que le coût du réseau de distribution est le poste de d'investissement le plus important (fixé à 500 €/m dans Recov'Heat). Ainsi, le LCOE augmente d'environ 1,6 % tous les 100 mètres supplémentaires.

Analyse de sensibilité sur la température de départ

Dans l'étude de cas, la température de départ est de 80°C. Il s'agit d'une température déterminée à partir des caractéristiques des bâtiments consommateurs de chauffage et d'ECS (date de construction ou de rénovation et émetteurs de chauffages présents) et pour une température extérieure minimale. Varier cette température permet d'analyser les performances du système de récupération dans le cas où il serait dimensionné sur un autre quartier, plus récent et dont les bâtiments possèdent des émetteurs de chauffage à plus basse température.

Les effets de la baisse de température de départ sont analysés sur le taux d'EnR&R, le COP des PAC et le LCOE. Le Tableau A-16 contient les résultats de l'analyse de sensibilité, effectuée avec une température de départ qui varie entre 80 °C et 65 °C. La Figure A-33 illustre les effets de cette variation.

Tableau A-16 Analyse de sensibilité sur la température de départ

Température départ (°C)	Taux EnR&R (%)	COP (sans unité)	LCOE (€/MWh)
80	60,6%	3,59	52,2
78	60,9%	3,62	51,8
75	61,3%	3,67	51,2
72	61,6%	3,71	50,6
70	61,9%	3,74	50,2
65	62,5%	3,83	43,0

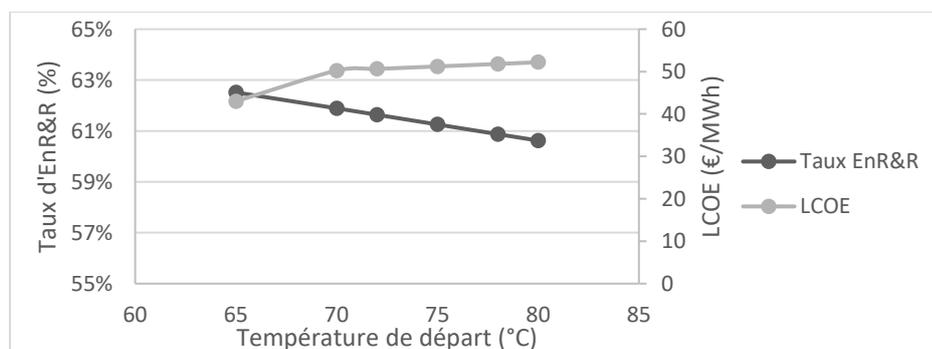


Figure A-33 Effets de la variation de la température de départ sur le taux d'EnR&R et le LCOE

Le COP des PAC, calculé à partir des températures de fonctionnement du système (équation (29), page 150) est amélioré au fil de la baisse de la température de départ (température au condenseur pour la PAC). Cette hausse du COP a une conséquence, à savoir la baisse de la consommation électrique des PAC. Cette baisse a deux effets :

- l'augmentation du taux d'EnR&R puisque l'énergie fatale est considérée comme décarbonée. Dans le calcul du taux d'EnR&R, seul l'électricité nécessaire pour faire fonctionner les PAC est prise en compte et est donc réduite lorsque le système fonctionne à plus basse température.

- la baisse des coûts annuels d'exploitation, qui contient la quantité d'électricité nécessaire pour le fonctionnement des PAC. Ce coût d'exploitation réduit est pris en compte dans le calcul du LCOE (équation (41), page 154) qui se voit également réduit.

La baisse de 10°C sur la température de départ par rapport au cas d'étude entraîne ainsi une augmentation du taux d'EnR&R de + 1,6 %, assortie d'une baisse du LCOE de 2 €.

Analyse de sensibilité sur la température d'entreposage

Dans l'algorithme de détermination du potentiel énergétique sur entrepôts frigorifiques de Recov'Heat, les chambres froides sont séparées en trois catégories de température : négative (< 0°C), et positive (> 0°C) et mixte. Dans le cas d'étude, il s'agit d'une chambre froide à température négative. L'efficacité frigorifique du groupe froid (EFF) est modifiée en fonction de cette température (Tableau 4-7, page 141). Le Tableau A-17 reprend les résultats de l'analyse de sensibilité et la Figure A-34 illustre les effets de ce changement de température.

Tableau A-17 Analyse de sensibilité sur la température d'entreposage des chambres froides d'un entrepôt frigorifique

Température d'entreposage	Taux EnR&R (%)	COP	LCOE (€/MWh)
T1 (T>0°C)	62,6%	3,59	51,5
T2 (T mixte)	61,4%	3,59	51,8
T3 (T<0°C)	60,7%	3,59	52,1

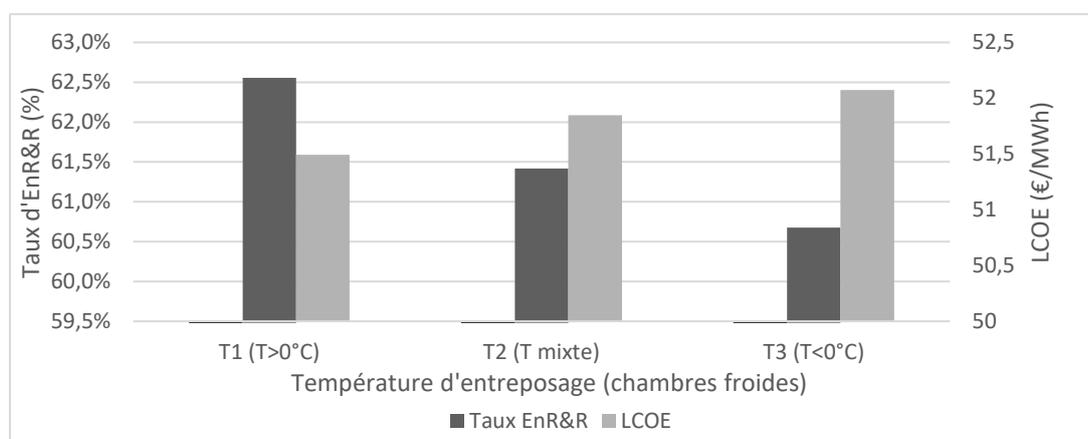


Figure A-34 Effets de la variation de la température d'entreposage (chambre froide) sur le taux d'EnR&R et le LCOE

ANNEXE 2.6 La thermofrigopompe

Une thermofrigopompe fonctionne de la même façon qu'une machine frigorifique avec des montages hydrauliques particuliers en fonction du mode de fonctionnement (distribution de chaud uniquement, de froid uniquement, de chaud et de froid en même quantité, de chaud plus que de froid ou enfin de froid plus que de chaud). Les montages sont illustrés Figure A-35.

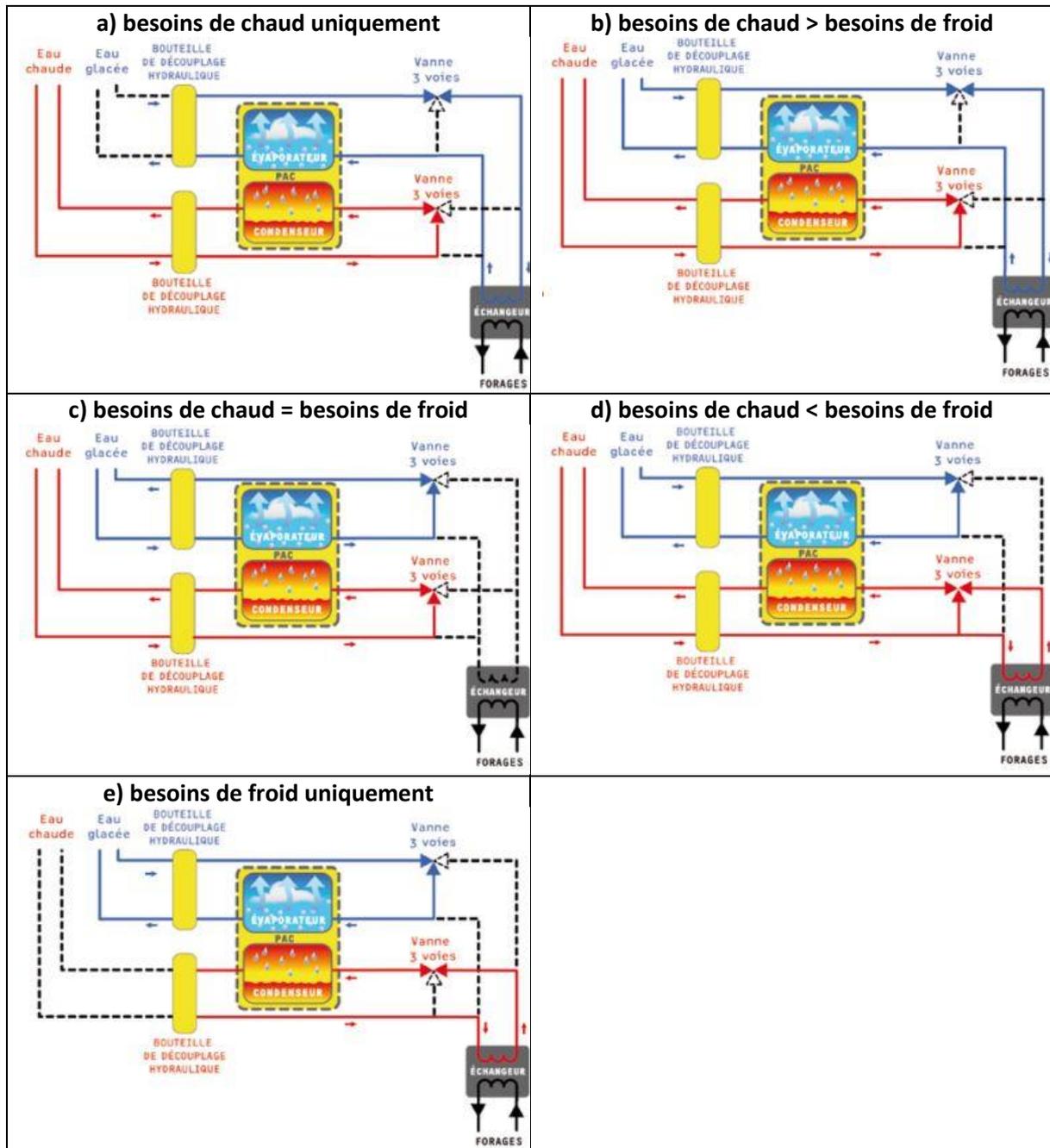


Figure A-35 Schémas de principe d'une thermofrigopompe (Lemale & Gourmez, 2008)

Lorsque les besoins sont uniquement en chaud ou en froid, la thermofrigopompe fonctionne comme une PAC avec distribution au niveau du condenseur pour le chaud (schéma a) et de l'évaporateur pour le froid (schéma e).

Lorsque les besoins de chaud et de froid sont simultanés avec un besoin supérieur pour le chaud (schéma b), l'excédent de froid est rejeté dans la boucle d'eau tempérée (ou l'aquifère dans un cas de géothermie comme sur la Figure A-35).

Lorsque les besoins de chaud et de froid sont simultanés avec un besoin supérieur pour le froid (schéma c), l'excédent de chaud est rejeté dans la boucle d'eau tempérée (ou l'aquifère dans un cas de géothermie comme sur la Figure A-35).

Lorsque les besoins de chaud et de froid sont simultanés avec un besoin égal pour le chaud et le froid (schéma d), l'équilibre est atteint et il n'y a pas d'échange avec la boucle d'eau tempérée (ou l'aquifère dans un cas de géothermie comme sur la Figure A-35).

ANNEXE 3.1 Tableau récapitulatif des avantages/inconvénients du développement d'un réseau de chaleur pour les différents acteurs d'un aménagement (AMORCE & ADEME, 2011)

	Collectivité	Aménageur	Maître d'œuvre	Promoteur	Usager
Economique	Investissement initial lourd équilibré par le choix d'une EnR&R (incertitude sur l'évolution du prix des énergies fossiles). Activité locale liée à l'utilisation d'une énergie locale	Investissement dans la partie distribution lourd (si pas d'aides du Fonds chaleur). Dans le cas d'une DSP, cet investissement est porté par un tiers. Il peut être répercuté sur le foncier ou le poste VRD	La prise en compte du réseau de chaleur dans l'étude de faisabilité représente un surcoût pas valorisé dans le prix de vente de l'étude	Surcoût éventuel sur le foncier. Le réseau de chaleur permet d'éviter de mettre en place du solaire thermique et des solutions individuelles. Il permet le respect du BBC ou de la RT 2012 à moindre coût	Bénéfique en coût global. TVA à 5,5 % sur abonnement et consommations Beaucoup moins de risque de subir la hausse du prix des énergies fossiles
Environnemental	Réduction des émissions de GES et évolution possible du mix énergétique. Outil efficace pour l'atteinte des objectifs du plan climat	Image : utilisation d'EnR&R locales (argument encore peu approprié par ces acteurs)			Consommation d'EnR&R
Opérationnel	Dimensionnement en fonction du phasage prévisionnel et de l'incertitude éventuelle sur les tranches successives Instrument de planification intéressant.	Dimensionnement et emplacement en fonction du phasage prévisionnel et de l'incertitude éventuelle sur les tranches successives. Outil de planification – vision globale sur l'énergie (pour des raisons de rentabilité, le réseau de gaz n'est pas amené jusqu'au logement individuel)	Phasage important. Pas de système individuel		Impossibilité de cuisson gaz si le réseau de gaz n'est pas tiré
Temps de travail : implication lors du montage	Implication des services de la collectivité (montage juridique, DSP, demandes de subventions...)	Peut être impliqué dans le montage juridique	Implication plus importante que si gaz ou tout électrique	Léger gain par la non implication sur les moyens de production de chaleur	Neutre
Temps de travail : suivi du réseau et de la vie de la ZAC	Implication des services de la collectivité (suivi avec l'exploitant)	Neutre			Pas de système individuel de production de chaleur ni à entretenir ni à renouveler

ANNEXE 3.2 Résumé des résultats du projet ReUseHeat, issus des travaux « analyse du marché et des acteurs » (Leonte, 2019)

	CUSTOMERS	DH OPERATORS	POLICY MAKERS	OWNERS OF UWH	INVESTORS
TECHNICAL KNOWLEDGE FOR UWHR	High	Technology is not a major barrier	No subsidies for UWHR equipment	Technology is not an issue. To find a convenient place for the UWH is a problem	Low knowledge
MATURITY OF UWHR SOLUTIONS	Little empirical evidence	Little engagement from the heat provider little empirical evidence	Little empirical evidence	Little empirical evidence	Very important High risks for new technologies
REPLICABILITY OF UWHR SOLUTIONS	High	High	High	Case specific	High
LEGAL FRAMEWORK IN PLACE	No clear legislation in place for UWHR	Municipalities have constraints by law: limiting the replicability, UWHR is limited in legislation (France, Spain)	No clear legislation in place for UWHR	No clear legislation in place of UWHR: makes the investment complex	The legal framework should be completed; Using of « Guarantee funds » granted by a public fund is desirable
PERMIT PROCEDURE FOR UWHR	No standard process	No standard process	No standard process	No standard process	No standard process
DO EXISTING DH NETWORKS ALLOW UWHR?	Yes	Yes but the high temperature do sometimes not make UWHR efficient	Too low temperatures of UWHR make them difficult to use in existing systems	The supply temperature is decisive	N/A
INCENTIVES TO OTHER ENERGY SOLUTIONS?	Yes: RES	Yes: efficient CHP and RES	Yes: RES	Yes: RES	Yes: RES
LEGIONELLA LEGISLATION	Not an issue	Not an issue	Not an issue	Not an issue	Not an issue
VALUE OF THE WASTE HEAT	No standardized calculation	Too long payback, the owner of the heat values the heat higher than the DH provider	N/A	The DH providers have price lists. The HWHR has a green premium	Debt service coverage ratio and payback period are very important; The investment volume is very important; high loans are more attractive
OTHER	No standardized contracts Taxes/other incentives Lack of knowledge about HWHR	Heat deliveries must be guaranteed	Low awareness of the UWHR potential No local funds for UWHR investments	To find a convenient place for the UWH is a problem. Small DH providers are skeptical to accept heat Difficult to estimate the payback DH providers are not interested in HWHR in summertime	There is no framework contract for this type of transaction, as there are many conditions to be stipulated

