

Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

Étude du potentiel thermique des centres de données

Étude du potentiel thermique des centres de données : récupérer la chaleur fatale des centres de données pour minimiser les besoins de chauffage du tissu urbain.

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Mindjid Maïzia, professeur de l'option Réseau à l'École Polytechnique de l'Université de Tours. Sa précieuse aide et son accompagnement ont façonné et organisé mon travail tout au long de mes recherches. Merci pour sa disponibilité et le temps qu'il a généreusement consacré pour m'épauler dans mon étude. Enfin, je tiens à le remercier pour son niveau d'exigence, sa rigueur et son mode de raisonnement, des qualités qui ont grandement enrichi non seulement ce devoir, mais aussi ma manière générale d'aborder les problématiques en structurant mon esprit d'ingénieur.

Je voudrais également témoigner ma gratitude à Pierre Aumont, étudiant de ma promotion, pour son aide et soutien tout au long de la réalisation de ce projet de recherche.

SOMMAIRE

1 Table des matières

2	<i>Introduction.....</i>	7
2.1	Contexte	7
2.2	Définition des termes du sujet	8
2.3	Cadre et objectifs de l'étude.....	8
3	<i>Estimation du potentiel thermique d'un centre de données</i>	8
3.1	Fonctionnement d'un centre de données	8
3.2	Estimation du potentiel thermique récupérable	9
4	<i>Estimation des besoins de chauffage du quartier.....</i>	12
4.1	Dépenses	12
4.2	Apports gratuits	13
5	<i>Allocation de la puissance récupérée au tissu urbain.....</i>	15
6	<i>Conclusion</i>	18
7	<i>Bibliographie</i>	20
8	<i>Annexes</i>	21

2 Table des annexes

Annexe 1 : Part des bâtiments chauffés par la chaleur fatale répartie selon le centre de données l'alimentant, à différentes heures.	21
Annexe 2 : Modèle pour déterminer les besoins de chauffage ou de refroidissement d'un bâtiment.	23
Annexe 3 : Modèle pour allouer la puissance récupérée aux bâtiments alentours.	27

2 Introduction

2.1 Contexte

Accord de Paris, Pacte vert pour l'Europe, loi Climat et résilience, ..., les mesures pour accélérer la transition énergétique se multiplient.

La France, engagée dans cette transition cherche à atteindre la neutralité carbone, réduire ses besoins et améliorer son efficacité énergétique.

Son objectif est de réduire sa consommation énergétique de 50% d'ici 2050 par rapport à 2012 (Sénat, 2023).

Le secteur résidentiel-tertiaire représente 43% de la consommation énergétique finale en France. C'est la plus grande part de consommation tous secteurs confondus. Le chauffage représente en moyenne plus de 60% des consommations énergétiques totales d'un logement (Ceren, 2018).

De plus, le secteur du numérique représente une part importante de l'empreinte carbone du pays, avec notamment les centres de données qui sont particulièrement énergivores.

En effet, aujourd'hui indispensables dans notre société connectée et dématérialisée, les centres de données consomment en moyenne, en France, 5,15 MWh d'électricité par mètre carré et par an, ce qui équivaut à la consommation d'une ville de 50 000 habitants pour un site de 10 000 mètres carrés (actu environnement, 2020).

Cette demande de quantité d'énergie considérable, est alors synonyme d'émissions de gaz à effet de serre. Le secteur du numérique représente aujourd'hui 3 à 4 % des émissions de gaz à effet de serre dans le monde (d'après Yanan et al., 2020).

Par ailleurs, la demande énergétique des centres de données est en hausse avec l'augmentation de la demande de performance des serveurs, la taille des données et le développement de la technologie. Ainsi, les coûts énergétiques liés à l'alimentation de ces espaces doublent tous les cinq ans. On compte en France, 264 centres de données et le Parlement prévoit une croissance annuelle de 21 % jusqu'en 2040 (Sénat, 2020). Ainsi, dans ce contexte de volonté de réduction de la consommation énergétique, l'enjeu est de réduire l'impact de la croissance du secteur du numérique sur l'environnement.

Ces espaces sont alimentés jour et nuit en électricité pour faire tourner les machines informatiques les composant. Ces équipements dégagent énormément de chaleur, et doivent donc être continuellement refroidis pour éviter la surchauffe. L'Ademe estime le gisement total de chaleur perdue à 3,61 TWh pour les centres de données.

Cette étude cherche donc à répondre à la problématique suivante. **La récupération de la chaleur dégagée par les centres de données permet-elle de réduire les besoins de chauffage du tissu urbain?**

L'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel thermique d'un centre de données. Il s'agit de déterminer dans quelle mesure la chaleur fatale du centre de données peut contribuer à répondre aux besoins de chauffage des bâtiments environnants.

L'hypothèse retenue à ce stade de l'étude est que la chaleur fatale d'un centre de données permet de réduire significativement les besoins de chauffage des bâtiments alentours.

2.2 Définition des termes du sujet

Un **centre de données** est une infrastructure qui regroupe l'ensemble des installations du système d'information d'une ou plusieurs organisations. Il s'agit d'un lieu physique sécurisé où sont entreposés de nombreux équipements électroniques et informatiques afin de stocker, traiter et diffuser des données informatiques et différents types d'applications.

Les centres de données sont indispensables au bon fonctionnement des entreprises et services publics, qui s'en servent pour organiser, héberger et traiter leurs données. On y retrouve donc des serveurs, des ordinateurs, supports de stockage, la fibre optique, commutateurs, des routeurs, un système de climatisation...

L'ensemble de ces éléments informatiques dégagent lors de leur fonctionnement, beaucoup de chaleur, appelée **chaleur fatale**. En effet, il s'agit de la chaleur rejetée par un procédé, de façon naturelle et inévitable. Sans mise en place d'une technique de récupération, cette chaleur s'échappe, ce qui représente un gaspillage significatif. Ainsi, l'objectif ici serait de récupérer cette chaleur perdue proposant un potentiel de valorisation très intéressant.

Elle peut alors alimenter un **réseau de chaleur**. Il s'agit d'un système de chauffage urbain à l'échelle d'une ville ou d'un quartier. Elle serait ainsi distribuée aux immeubles voisins pour répondre à leurs besoins de chaleur.

2.3 Cadre et objectifs de l'étude

Dans un premier temps, l'objectif de cette étude est de quantifier le nombre de logements pour lesquels le besoin de chauffage est satisfait grâce à la récupération de chaleur fatale émise par un centre de données.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de réaliser la courbe de charge d'un centre de données ainsi que de réaliser une estimation des besoins en chauffage des logements.

Dans un second temps, ce travail intègre plusieurs centres de données au quartier, afin d'allouer leurs puissances produites aux bâtiments environnants en les ordonnant en fonction de leur proximité aux centres de données. Cette approche vise à maximiser l'utilisation de la chaleur fatale dans le but de réduire de manière significative les besoins de chauffage du tissu urbain.

Dans ce travail, le cas d'étude n'est pas réel. Les centres de données considérés sont fictifs. Le modèle élaboré peut être appliqué à n'importe quelle zone géographique.

Pour obtenir des données cohérentes afin d'évaluer les besoins de chauffage, l'étude est effectuée sur le quartier des Mines à Paris. Les centres de données sont positionnés de manière aléatoire dans ce quartier, prenant la place d'un bâtiment existant.

L'ensemble des calculs et de la modélisation a été effectué à l'aide de l'application Toaster Integral.

3 Estimation du potentiel thermique d'un centre de données

3.1 Fonctionnement d'un centre de données

Un centre de données est un espace physique qui regroupe des équipements informatiques (serveurs, baies de stockage...) permettant le stockage, le traitement et la protection de données.

Ces données, sont regroupées dans des racks. Un rack ou baie est une armoire métallique constituée d'un espace dans lequel sont entreposés les équipements informatiques.

On appelle IT, ces équipements informatiques, c'est-à-dire l'ensemble des serveurs, le stockage et les équipements réseau.

Ces équipements informatiques tournent 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. La consommation énergétique est donc permanente, ce qui nécessite beaucoup d'énergie et génère énormément de chaleur.

Ainsi, lors de la conception d'un Data Center, un faux plancher de dalles perforées surélève les salles informatiques (IT) afin, d'assurer leur refroidissement (figure 1). On travaille ici sur les systèmes de refroidissement à air. Le refroidissement par air organise les rangées de serveurs en créant des allées froides et chaudes. Les allées froides fournissent de l'air frais directement aux serveurs, tandis que l'air chaud rejeté par les serveurs est évacué vers les allées chaudes.

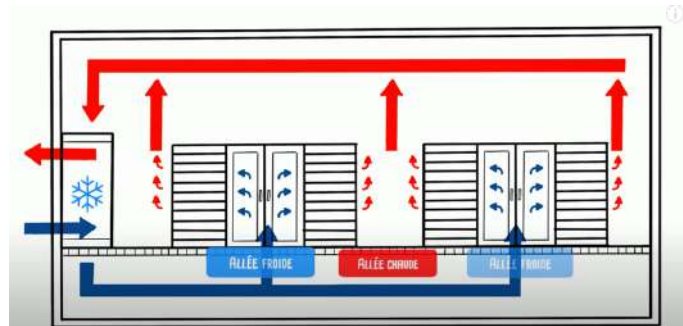


Figure 1 : Schéma d'alternance des allées chaudes et allées froides dans un centre de données.

3.2 Estimation du potentiel thermique récupérable

Le principe d'un groupe frigorifique est de produire du froid. Pourtant, il rejette de la chaleur durant son cycle. Cette chaleur, appelée chaleur fatale, pourrait être valorisée. Le but ici est donc de la récupérer afin de la réinjecter dans un réseau de chaleur.

En effet, le circuit de refroidissement est composé d'un fluide frigorigène capable de changer d'état pour produire de la chaleur côté condenseur (C) et du froid côté évaporateur (E), (figure 2).

Le compresseur (W) fournit l'énergie mécanique nécessaire à la circulation du fluide frigorigène. Il envoie le fluide vers le condenseur où sa chaleur est extraite et rejetée à l'extérieur. Une fois refroidi, le gaz se transforme en liquide et est dirigé vers le détendeur et l'évaporateur, où il est utilisé pour refroidir l'air ambiant. Ensuite, le liquide s'évapore à nouveau, produisant du gaz qui est renvoyé au compresseur. Ce cycle se répète continuellement de cette manière.

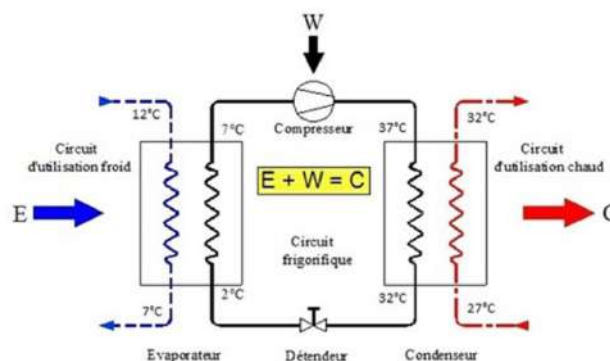


Figure 2 : Schéma du circuit frigorifique d'un groupe froid.

L'énergie évacuée par le condenseur représente l'énergie récupérable. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$Q = Br * \left(1 + \frac{1}{EER}\right)$$

Avec :

Q : Puissance récupérable en MW

Br : Puissance appelée par l'évaporateur pour refroidir le fluide en MW

EER : Efficacité énergétique du système de refroidissement ayant une valeur de 4 (d'après Carlan et al., 2017)

100 % de l'électricité consommée par l'IT se transforme en chaleur. On considère que 1 kW IT correspond à 1 kW de chaud à traiter. Ainsi, la puissance appelée par les salles informatiques conditionne les besoins de refroidissement et donc la chaleur fatale que l'on peut récupérer.

La puissance appelée par le système de refroidissement (Br) est déterminée de la manière suivante :

$$Br = Ai - D$$

Avec :

Br : Puissance appelée par l'évaporateur pour refroidir le fluide en MW

Ai : Apport interne, c'est-à-dire la puissance dégagée par l'IT en kW

D : Déperditions en kW

Ai, les apports internes correspondent à la chaleur dégagée par l'IT, soit à la puissance appelée par le système de refroidissement, tel que :

$$Ai = Sp * ui$$

Avec :

Ai : Apport interne, c'est-à-dire la puissance dégagée par l'IT en kW

Sp : Surface d'IT en m²

ui : Puissance appelé par l'IT égale à 500 W/m² (d'après Carlan F. et al., 2017)

Les centres de données sont classés en niveaux tiers selon leur fiabilité et leur disponibilité. Cette classification, définie par l'Uptime Institute, comporte quatre niveaux qui évaluent la robustesse des centres de données en fonction de leur conception et de leur capacité à maintenir les services en cas de maintenance ou de défaillance.

En fonction de la catégorie du centre de données, sa densité énergétique varie entre 250 à 1500 W/m². Une étude réalisée par Efficacy (de Carlan F. et al., 2017) a retenu que, quelle que soit la taille de la salle des serveurs, le niveau de puissance au m² d'IT est de 500 W. C'est donc cette valeur qui est utilisée dans ce modèle.

La salle d'IT est une salle sans fenêtre afin d'éviter les apports solaires par le vitrage qui vont chauffer la pièce et augmenter les besoins de refroidissement.

Les déperditions considérées ici, en hivers, comme des apports gratuits permettant le refroidissement du centre de données sont de deux types : par l'enveloppe et par la ventilation.

$$D = \Delta T * (Denv + Dven)$$

Avec :

D : Puissance perdue par déperditions kW

ΔT : Écart de température entre l'intérieur et l'extérieur en °C

Denv : Déperditions par l'enveloppe en kW/°C
Dven : Déperditions par la ventilation en kW/°C

Le comité TC 9.9 L'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), définit les normes environnementales des bâtiments hébergeant des équipements électroniques. En 2011, il établit ainsi qu'un centre de données doit maintenir une température comprise entre 15 et 27°C. Par conséquent, toutes températures extérieures appartenant à cet intervalle, ont un delta T nul, signifiant qu'il n'y a aucune perte de chaleur.

Dans ce travail, afin d'avoir des données réelles, les calculs de l'étude sont effectués sur le quartier des Mines à Paris. Un bâtiment du quartier est choisi aléatoirement afin de représenter le centre de données (figure 3).

On suppose que 80 % de la surface du plancher de ce bâtiment est occupé par l'IT.

Dans ce contexte, le bâtiment choisi pour symboliser un centre de données possède une surface d'IT d'environ 7300 m².

Sa consommation électrique annuelle d'informatique s'élève à 5,3 MWh/m²/an.

Avec une efficacité frigorifique de 4 (de Carlan F. et al., 2017), la puissance nominale récupérable, est de 4,7 MW.



Figure 3 : Quartier des mines, Paris (source : application Integral).

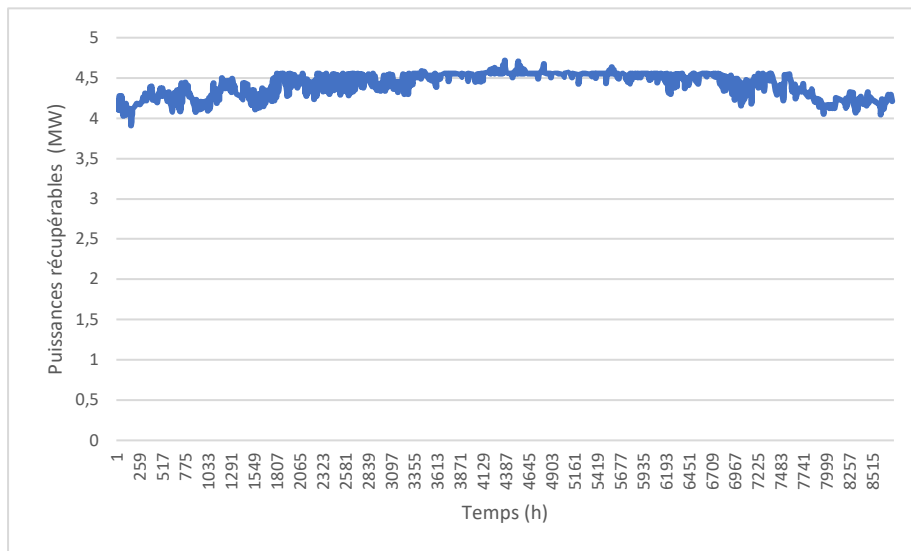


Figure 4 : Puissances récupérables du centre de données par heure sur une année.

Un centre de données fonctionne en continu 24h/24, générant ainsi une courbe de charge (figure 4) relativement constante tout au long de l'année, avec une légère diminution de la puissance observée pendant les premiers et les derniers mois. Cette variation s'explique par les basses températures extérieures, lesquelles soutiennent le système de refroidissement en offrant un refroidissement naturel aux serveurs.

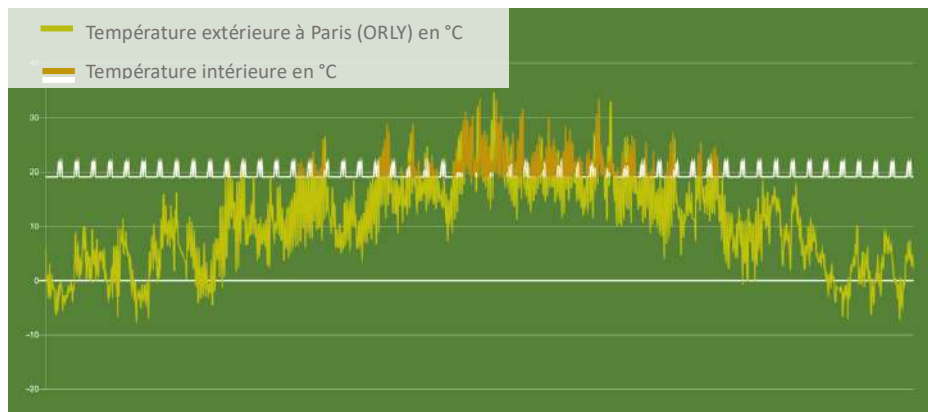


Figure 6 : Évolution de la température extérieure et intérieure en fonction du temps, sur une année, à Paris (source : application Integral).

La conductance des parois est déterminée par l'inverse de la résistance thermique, qui correspond au rapport entre la conductivité de l'isolant et son épaisseur.

Dans ce modèle, tous les bâtiments sont représentés sous forme de parallélépipèdes, garantissant ainsi une uniformité de conductivité pour les murs et les toits. La laine de verre, isolant le plus répandu en France, possédant une conductivité de $0,04 \text{ W/m}^2\text{°C}$ est appliquée avec une épaisseur de 20 cm, valeur recommandée par la RT2020.

Dans ce modèle les ponts thermiques ne sont pas pris en compte.

La plupart des bâtiments sont équipés de double vitrage ayant une conductance de $1 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Selon la RT 2012, le recouvrement minimum de la surface vitrée doit être égal ou supérieur à $1/6$ de la surface habitable. Par conséquent, le taux de vitrage est établi à 0,17.

4.2 Apports gratuits

Un apport gratuit est une source de chaleur naturelle contribuant au chauffage.

Ce modèle prend en compte les apports solaires et les apports internes (produits par les occupants et les équipements électriques, électroménagers).

Les variables d'entrées concernant les apports gratuits sont les suivantes :

- FS : facteur du vitrage (en %)
- u_i : apport interne unitaire (W/m^2)
- α_{sud} : part du vitrage sur la façade sud
- O_t : occupation du bâtiment

• Apports solaires

Le facteur de vitrage correspond à la part de rayonnement traversant la vitre et transmis à l'intérieur du bâtiment sous forme de chaleur.

Pour le double vitrage choisi, le facteur solaire associé est de 40 %.

Seules les vitres situées sur la façade sud de chaque bâtiment sont prises en compte pour évaluer les apports solaires. Avec l'hypothèse que chaque bâtiment est un parallélépipède, on considère que le bâtiment est composé de 4 façades dont une seule est exposée au sud, représentant ainsi une proportion équivalente à $1/4$ de la surface totale des parois du bâtiment.

- Apports internes

Les apports internes d'un logement proviennent de la chaleur générée à l'intérieur de l'espace habitable par diverses sources telles que l'éclairage, le fonctionnement des appareils électriques, la présence des occupants, ainsi que les activités humaines (exemple : la cuisson). Ces apports internes influencent ainsi les besoins en chauffage (ou en climatisation). Ils sont directement liés à l'occupation du logement. Selon ce modèle, en semaine, les logements ne sont occupés que le soir et le matin (occupation à 0,5), tandis qu'ils sont occupés toute la journée pendant le week-end (occupation à 1). Conformément à la réglementation RT2000, ils sont évalués à 4 W/m² pour les logements.

En prenant en considération ces divers paramètres les besoins annuels de chauffage d'un immeuble parisien de 500 m² sur 4 étages s'élèvent à 50 kWh/m²/an avec comme puissance nominale 14 kW (figure 7).

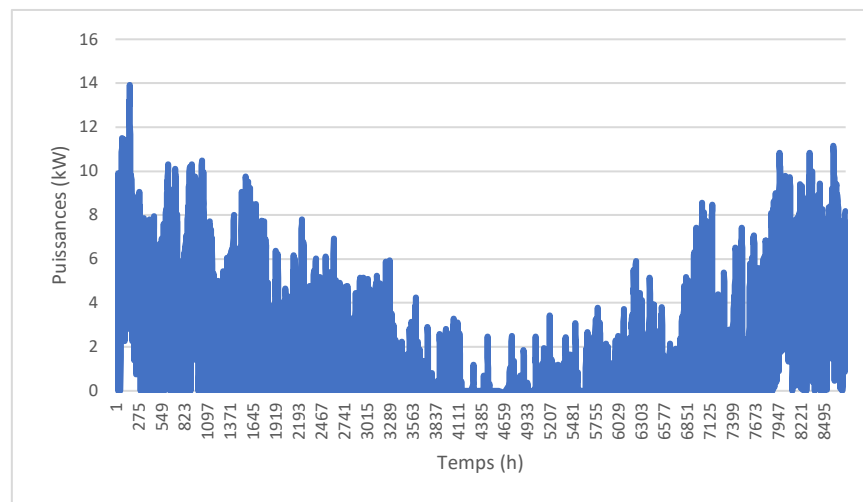


Figure 7 : Courbe de charge des besoins de chauffage (sans la prise en compte des pertes liées au système de chauffage) d'un immeuble d'une surface habitable totale de 500 m² sur une année.

L'intégration d'un système de chauffage augmente ces besoins, étant donné que les rendements des systèmes de chauffage ne sont pas parfaits.

L'objectif de cette étude est d'utiliser la chaleur fatale générée par les centres de données comme source de chauffage pour le tissu urbain. Le système de chauffage le plus adapté dans ce contexte est le réseau de chaleur. En effet, il s'agit de canalisations transportant de la vapeur ou de l'eau chaude vers les postes d'échange des bâtiments. Ainsi, seule cette infrastructure permet d'utiliser la chaleur fatale des centres de données en l'injectant directement dans le réseau.

Cependant, on fait l'hypothèse que toute la chaleur récupérée du centre de données est utilisée pour répondre aux besoins de chauffage du quartier. Le rendement est ainsi parfait (1).

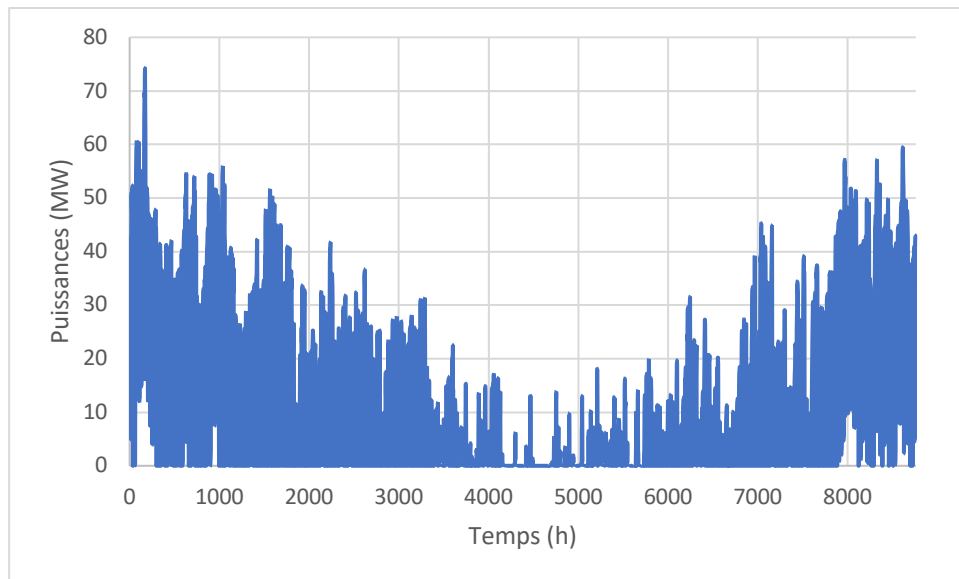


Figure 8 : Courbe de charge des besoins de chauffage ($\eta = 1$) du quartier étudié.

5 Allocation de la puissance récupérée au tissu urbain

La puissance valorisable générée par le centre de données est allouée aux logements en fonction de leur proximité. Les logements les plus proches sont les premiers à bénéficier de la chaleur fatale récupérée. Le quartier des Mines compte 2774 bâtiments.

Parmi l'ensemble de ces 2774 bâtiments, trois, sont choisis de manière aléatoire, représentant des centres de données fictifs (figure 10). On considère que la surface d'IT représente 80 % de la surface totale de ces bâtiments.

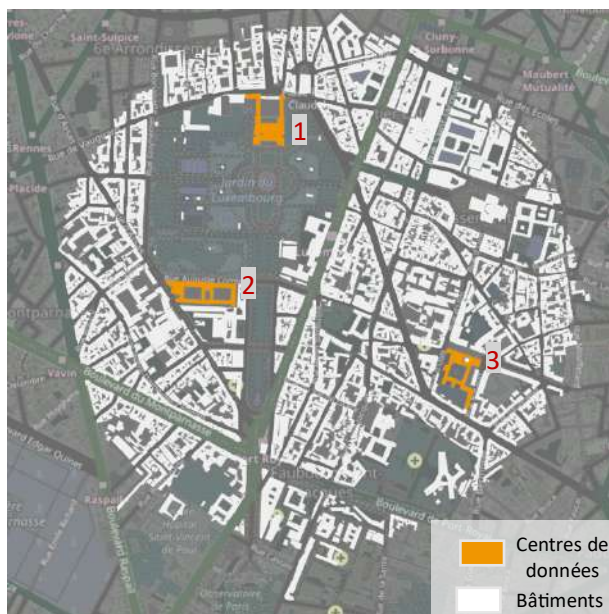


Figure 9 : Répartition des trois centres de données dans le quartier des Mines, Paris.

Centres de données	1	2	3
Surfaces d'IT en m ²	4500	13000	7300
Puissances nominales en MW	3,0	8,3	4,7

Tableau 1 : Puissances récupérables par centre de données.

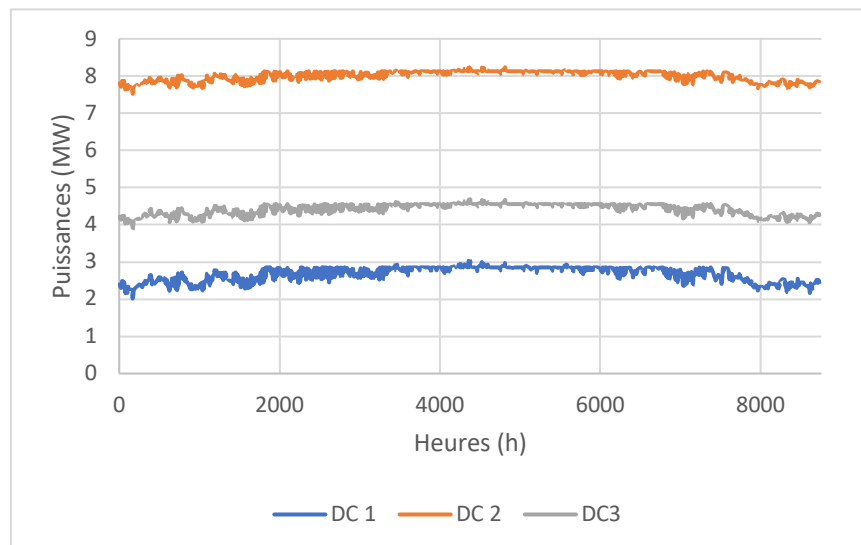


Figure 10 : Puissances récupérables des trois centres de données par heure sur une année.

La puissance récupérable de ces centres de données fictifs varie considérablement en fonction de la surface d'IT (figure 11). En effet, trois superficies distinctes ont été délibérément sélectionnées dans le but de comparer l'impact de la taille du centre de données sur les effets de la réduction des besoins de chauffage. Un centre de données avec une superficie d'IT de 4500 m² présente une puissance récupérable nominale près de trois fois inférieure à celle d'un centre de données de 13 000 m² d'IT (tableau 1).

A chaque instant, la puissance récupérable des centres de données est distribuée entre les différents bâtiments. Le choix du critère d'allocation est ici la distance. Ainsi, pour chaque bâtiment, on ordonnance les centres de données selon leur proximité au bâtiment (figure 11).

Le centre de données le plus proche est priorisé pour répondre aux besoins de chauffage du bâtiment. Si sa puissance valorisable est nulle, alors le deuxième centre de données le plus proche est sollicité. En cas d'indisponibilité, c'est alors le troisième centre de données le plus proche qui est considéré.

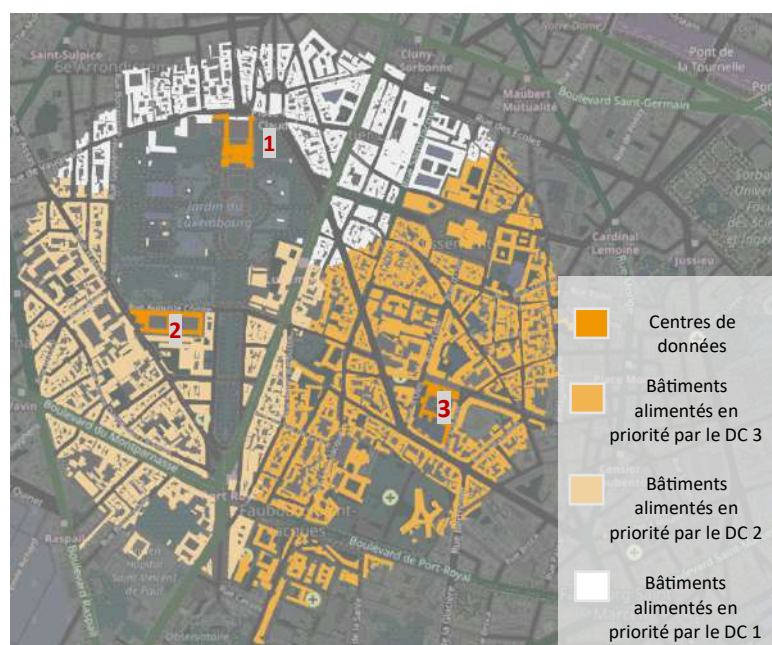


Figure 11 : Répartition des bâtiments en trois groupes suivant leur proximité au centre de données.

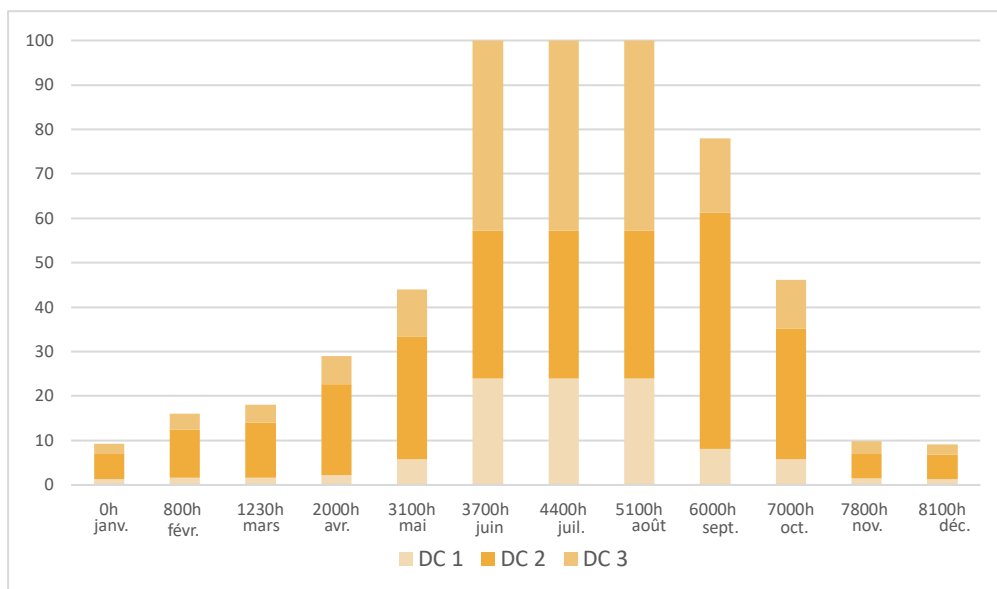


Figure 12 : Répartition (en %) par centre de données des bâtiments du quartier des Mines (Paris) dont les besoins de chauffage sont satisfaits par la chaleur fatale.

À la 1ère heure de l'année ainsi qu'à la 7800^{ième} et 8100^{ième} heure, correspondant à un instant fin novembre et début décembre, 9 à 10 % des bâtiments du quartier des Mines ont leur besoin de

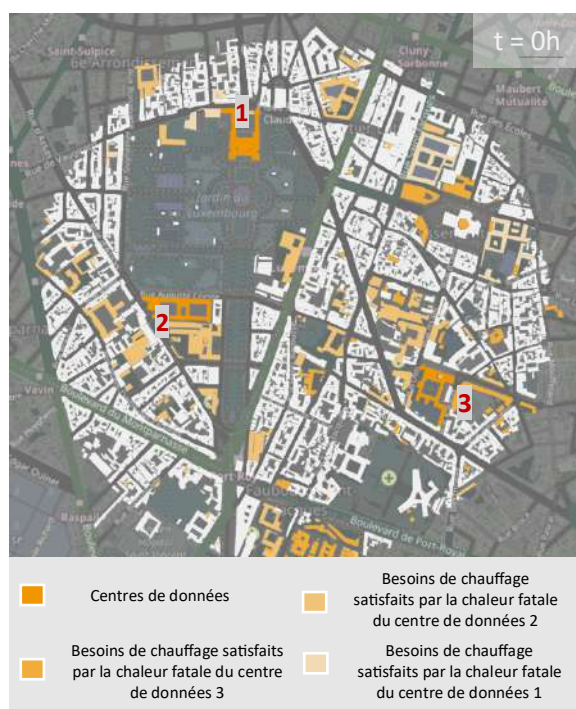


Figure 13 : Part des bâtiments chauffés par la chaleur fatale répartie selon le centre de données l'alimentant.

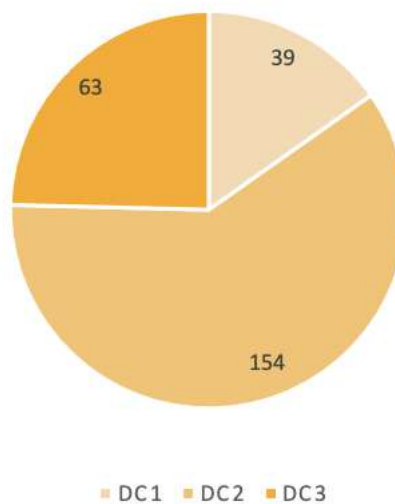


Figure 14 : Répartition par centres de données des bâtiments dont les besoins de chauffage sont satisfaits par la chaleur fatale récupérée (à t égale 0 heure).

chauffage satisfait par la chaleur fatale récupérée des centres de données. Cela représente environ 260 bâtiments (figure 14), soit 2700 logements en supposant une surface habitable de 46 m² par logement (valeur médiane pour un appartement à Paris).

De manière générale, en période hivernale (de novembre à mars), la chaleur fatale récupérée des centres de données satisfait à chaque instant jusqu'à 20 % (figure 11) des besoins de chauffage du

quartier, soit 500 bâtiments. En prenant 46 m² par logement on compte plus de 9 000 logements dont les besoins de chauffage sont satisfaits à la 1230^{ième} heure de l'année.

Dans ce cas d'étude, l'instant le plus froid de l'année c'est-à-dire où l'écart de température entre l'intérieure et l'extérieure est le plus important correspond à la 166^{ième} heure de chauffage.

C'est à cette heure, située au début du mois de janvier, que les besoins de chauffage du quartier des Mines ont atteint leur pic. La puissance récupérée des trois centres de données permet ainsi de répondre aux besoins de chauffage de 6% des bâtiments.

Par conséquent, dans le pire cas soit, lorsque les besoins de chauffage sont les plus élevés, la puissance récupérée des centres de données pourrait satisfaire les besoins de chauffage de 1610 logements (tableau 2).

Tableau 2 : Impact de la puissance récupérée des centres de données sur les besoins de chauffage à la 166^{ième} heure de l'année.

Pour t = 166 h	Nombre de bâtiments chauffés	Bâtiments chauffés (en %)	Surface totale chauffée (m ²)	Nombre d'appartements correspondant aux bâtiments chauffés
DC 1	27	1	8140	177
DC 2	99	4	37672	819
DC 3	48	2	28261	614
Total	174	6	74071	1610

Par ailleurs, l'histogramme (figure 11) adopte une allure de courbe gaussienne avec, pendant la période estivale un besoin de chauffage satisfait à 100% par la chaleur valorisable des centres de données. Les besoins de chauffage étant nuls, toute la demande est satisfaite et l'offre (la chaleur fatale récupérée), soit près de 16MW à chaque heure, n'est pas utilisée.

La période de chauffage s'étend généralement de mi-octobre à mi-avril, totalisant 6627 heures dans ce cas d'étude. Cependant, un centre de données fonctionne tout au long de l'année. Par conséquent, la chaleur fatale récupérée n'est pas exploitée de fin avril à début octobre.

Par conséquent, ce cas d'étude permet de montrer que le potentiel thermique d'un centre de données est suffisamment élevé pour réduire les besoins de chaleur du tissu urbain. En effet, même le centre de données de plus faible puissance étudié, le numéro 1, parvient à satisfaire en moyenne les besoins de chauffage d'une quarantaine de bâtiments pendant la période hivernale, ce qui équivaut à 340 logements (avec une moyenne de 46 m² par logement) (annexe 1).

6 Conclusion

Finalement, ce travail, sur la valorisation de la chaleur fatale dégagée par les centres de données met en avant le potentiel thermique inexploité de cette source d'énergie négligée.

A chaque heure de l'année, avec trois centres de données et une récupération de chaleur parfaite, c'est plus de 16 MW qui peuvent être récupérés. Cette puissance peut couvrir, à chaque instant, pendant la période hivernale (de novembre à mars), les besoins de chauffages de 170 à 550 bâtiments.

Les trois centres de données peuvent alors être vus comme des apports internes permettant une réduction des besoins de chauffage des habitations plus ou moins importante selon l'instant de l'année étudié. Le système de chauffage initial du logement intervient alors en appoint lorsque la puissance

fournie par les centres de données n'est pas suffisante pour répondre aux besoins. La récupération de la chaleur résiduelle permet ainsi de diminuer les besoins de chauffage sans toutefois réduire la consommation totale de chauffage. Avec une augmentation des centres de données ainsi qu'une augmentation, voir une stabilisation des besoins de chauffage, on ne fait que ralentir l'augmentation de la consommation énergétique.

Par ailleurs, il est nécessaire de noter l'importance de bien étudier le contexte urbain pour ces projets. Il faut notamment veiller à la zone de distribution du réseau de chaleur, qui doit être à proximité du centre de données. De plus, la valeur de la puissance récupérable est intrinsèquement liée à la surface d'IT du centre de données. Par conséquent, la mise en place d'un système de récupération de la chaleur fatale pour de petits centres de données pourrait ne pas avoir un impact significatif sur la réduction des besoins de chauffage du tissu urbain. Une analyse approfondie de ces facteurs est donc cruciale pour assurer le succès et l'efficacité de tels projets.

Enfin, je remarque deux limites à mon travail.

Tout d'abord, il sous-exploite le potentiel thermique des centres de données, car pendant la période estivale, lorsque les besoins de chauffage sont inexistants, une partie de cette puissance demeure inutilisée. Il serait pertinent d'intégrer les besoins d'eau chaude sanitaire au travail afin de proposer une étude plus complète sur la réduction des besoins de chauffage.

Enfin, la deuxième limite concerne l'exploitation du réseau de chaleur.

D'une part, proposer un ordonnancement des bâtiments alimentés par la puissance récupérée n'est pas pertinent puisque cette puissance valorisable se répartit dans le réseau de chaleur de manière aléatoire. Dans le cas étudié, établir un ordonnancement pour chaque bâtiment n'a pas de sens car la chaleur récupérée n'est pas acheminée spécifiquement du centre de données au logement par un réseau dédié.

Une approche plus judicieuse aurait consisté à instaurer un processus d'ordonnancement progressif. En effet, dans un système urbain, pas tous les bâtiments sont connectés au réseau de chaleur. En France, les systèmes de chauffage électriques sont les deuxièmes plus utilisés, après le gaz naturel (Ceren, 2018). Dans cette optique, il faudrait intégrer la dimension temporelle, afin de tenir compte du délai nécessaire pour que le bâtiment se connecte au réseau de chaleur urbain de la ville.

Ainsi, la première étape, aurait impliqué d'allouer aléatoirement la puissance récupérée, aux bâtiments déjà connectés au réseau de chaleur. En cas de sous-utilisation de la puissance récupérable, la seconde étape aurait consisté à ordonnancer les bâtiments restants en fonction de leur système de chauffage permettant ainsi un raccordement graduel au réseau de chaleur.

Un critère d'ordonnancement pertinent aurait pu être d'allouer en priorité la puissance récupérée aux systèmes de chauffage à canalisation, tels que le gaz, car les travaux de raccordement sont plus simples. Il serait également envisageable d'ordonnancer en priorité les systèmes de chauffage les plus émetteurs de gaz à effet de serre.

D'autre part, la conception du réseau de chaleur, en tenant compte notamment des pertes liées à la distribution, n'a pas été étudiée. Ce manque d'analyse pourrait réduire l'efficacité de la valorisation de la chaleur fatale émise par un centre de données.

Ainsi, une exploration approfondie de ces deux aspects est essentielle pour maximiser les avantages potentiels de cette approche en matière de chauffage urbain durable.

7 Bibliographie

YANAN, Liu, XIAOXIA, Wei, JINYU, Xiao, ZHIJIE, Liu, YANG, Xu, YUN, Tian. Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers. 2020. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511720300761>

NIHAL GÜGÜLA ÜLA, Gül, GOKCÜLB, Furkan, EICKERD, Ursula. Sustainability analysis of zero energy consumption data centers with free cooling, waste heat reuse and renewable energy systems: A feasibility study. 2023. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222023775>

DE CARLAN, Florence, GUIOT, Thierry, LEONARD, Jean-Christophe, CASTAGNA, Gennaro. Data Centers : State-of-the-art report. 2017. Disponible sur : <https://www.districtenergyinitiative.org/sites/default/files/publications/data-centersstate-art-report-20112017429.pdf>

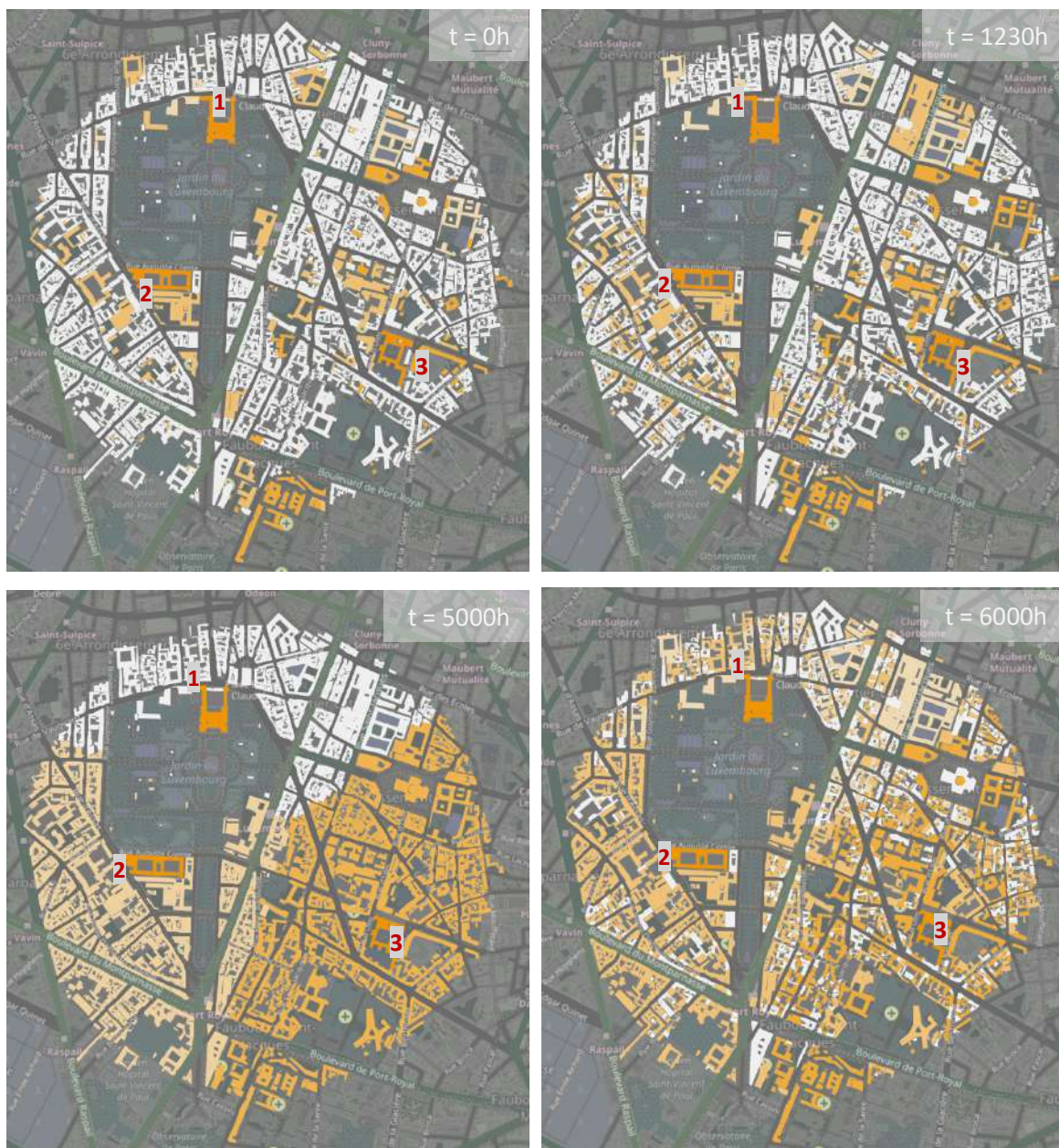
HUANGA, Pei, COPERTAROA, Benedetta, ZHANGA, Xingxing, SHENA, Jingchun, LÖFGRENA, Isabelle, RÖNNELIDA, Mats, FAHLEND, Jan, ANDERSSONB, Dan, SVANFERLDTB, Mikael. A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating. 2020. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919317969>

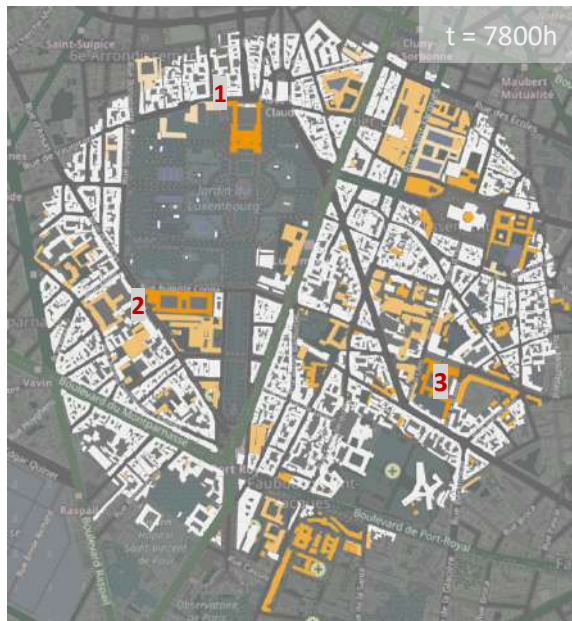
LUOA, Yang, ANDRESENA, John, CLARKEB, Henry, RAJENDRAC, Matthew, MAROTO-VALERA, Mercedes. 2019. A framework for waste heat energy recovery within data center. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219309191>

ASHRAE. Thermal Guidelines for Data Processing Environments: Expanded Data Center Classes and Usage Guidance. 2011. Disponible sur : https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2016/08/ashrae_2011_thermal_guidelines_data_center.pdf

8 Annexes

Annexe 1 : Cartes de la part des bâtiments chauffés par la chaleur fatale répartie selon le centre de données l'alimentant, à différentes heures.





Centres de données



Besoins de chauffage satisfaits par la chaleur fatale du centre de données 3



Besoins de chauffage satisfaits par la chaleur fatale du centre de données 2



Besoins de chauffage satisfaits par la chaleur fatale du centre de données 1

Estimation des besoins de chauffage/ refroidissement d'un bâtiment

Pour estimer des besoins de chauffage d'un logement ou de refroidissement d'un centre de données, on utilise un système similaire, avec des valeurs pour les apports et la température de consigne différentes.

Besoins de chauffage/ refroidissement sans les pertes

$B_t = D_t - A_t$ en kW

Pch est la résultante d'un bilan entre déperditions et apports de chaleur. Un rapport positif indique qu'il faut réchauffer la pièce. Il ne peut être négatif sinon ce n'est plus un besoin de chauffage.

```
Script :  
Bt = [];  
for (var t = 0 ; t < Dt.length ; t++ ){  
  Bt.push( Dt[t]-At[t]);  
  if (Bt[t]<0){Bt[t] = 0}  
}
```

Déperditions du bâtiment

$D_t = \Delta t \cdot (D_{env} + D_{ven}) / 1000$ en kW

Les déperditions font référence à la dissipation d'énergie thermique depuis un bâtiment vers son environnement extérieur. Ce modèle considère spécifiquement les déperditions associées à l'enveloppe du bâtiment ainsi qu'à la ventilation.

```
Script :  
Dt = [];  
for (var t = 0 ; t < Deltat.length ; t++ ){  
  Dt.push( Deltat[t]* (Denv+Dven)/1000);  
}
```

Apports gratuits du bâtiment

$A_t = (A_{it} + A_{st}) / 1000$ en kW

Un apport gratuit est une source de chaleur naturelle, pour un logement, elle contribue au chauffage. Pour un centre de données il s'agit de la chaleur fatale.

On prend en compte ici les apports solaires et de chaleur interne (produite par les équipements informatiques, électroménagers...).

```
Script :  
At = [];  
for (var t = 0 ; t < Ait.length ; t++ ){  
  At.push( (Ait[t]+Ast[t]) / 1000);  
}
```

Différence de température

$\Delta t = T_{it} - T_{e,t}$ en °C

Pour un logement : L'écart de température exprime à la fois la rigueur du climat et le niveau de confort souhaité en période de chauffage.

Pour un centre de données : Toutes températures extérieures appartenant à T_i , ont un delta T nul, signifiant qu'il n'y a aucune perte de chaleur

```
Script :  
Deltat = [];  
for (var t = 0 ; t < (Teit.length) ; t++ ){  
  Deltat.push( Tit[t]-Teit[t]);  
}
```

}

Déperditions par la ventilation

$$D_{ven} = 0.34.Q_v.n_v \text{ en } W/^{\circ}C$$

Les déperditions par la ventilation se réfèrent aux pertes d'énergie thermique associées au renouvellement de l'air.

```
Script :  
Dven = 0.34*Qv*nv;
```

Déperditions par l'enveloppe

$$D_{env} = S_o.U_o + S_v.U_v \text{ en } W/^{\circ}C$$

Les différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment engendrent des déperditions.

En hiver, lorsque la température intérieure est plus élevée que la température extérieure, la chaleur a tendance à se déplacer vers l'extérieur à travers les parois de l'enveloppe. À l'inverse, en été, lorsque la température extérieure est plus élevée que la température intérieure, la chaleur peut pénétrer à l'intérieur du bâtiment.

```
Script :  
Denv = So*Uo+Sv*Uv;
```

Apports solaires

$$A_{st} = S_v.FS.\gamma/4 \text{ en } W$$

Les apports solaires correspondent à la chaleur perçue par le soleil à travers les parois vitrées.

Pour des logements : Dans ce modèle seules les parois vitrées exposées au Sud perçoivent les rayonnements.

Pour un centre de données : ils sont nuls car la salle d'IT n'a pas de fenêtre.

```
Script :  
Ast = [];  
for (var t = 0 ; t < gammat.length ; t++) {  
Ast.push( Sv*FS*gammat[t]/4);  
}
```

Apports internes

$$A_{it} = u_i . S_p.O_t \text{ en } W$$

Pour un logement : Les apports internes dans un logement proviennent de la chaleur générée à l'intérieur de l'espace habitable par diverses sources présentes dans le logement, telles que l'éclairage, le fonctionnement des appareils électriques, la présence des occupants, ainsi que les activités humaines telles que la cuisson. Ces apports internes influencent ainsi les besoins en chauffage (ou en climatisation) du logement.

Pour un centre de données : Les apports internes correspondent à la chaleur dégagée par l'IT.

```
Script :  
Ait = [];  
for (var t = 0 ; t < 8760; t++) {  
Ait.push( ui * Sp*Ot[t]);  
}
```

Volume à chauffer/ refroidir

$$0 \leq Q_v \leq 7500 \text{ en } m^3$$

Volume du bâtiment à chauffer (pour les logements) ou à refroidir (pour un centre de données).

Conductance des parois opaques

$$U_o = 1/(e/\lambda) \text{ en } W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$$

La conductivité thermique (W/m.K) exprime la faculté de l'isolant à conduire la chaleur. Plus sa valeur est petite, plus l'isolant est performant.

Sa valeur correspond à l'inverse de la résistance thermique de chaque paroi ($1/R_{th}$). La résistance thermique d'une paroi se détermine en divisant l'épaisseur de l'isolant par sa conductivité. Elle exprime la faculté de l'isolant à « résister » au flux de chaleur. Plus R est grand, plus la paroi est isolante.

Script :
 $U_o = 1 / (e / \lambda)$;

Taux de renouvellement d'air

$0.5 \leq n_v \leq 0.5$ en vol/h

Ce taux désigne la quantité d'air venant de l'extérieur et devant être introduite à l'intérieur du bâtiment pour satisfaire les conditions de qualité de l'air.

L'ANAH recommande un taux de renouvellement de l'air de 0,5 vol/h.

Surface de paroi opaque

$0 \leq S_o \leq 250$ en m^2

Surface totale des parois opaques (excluant les surfaces vitrées).

rayonnement incident

$0 \leq \gamma \leq 747.9025803806527$ en W/m^2

Il s'agit du rayonnement reçu par la paroi directement issu du soleil. Dans ce modèle, seuls les apports solaires perçus par la façade sud du bâtiment sont pris en compte. Le rayonnement est donc calculé pour un angle de $0^\circ C$ entre la paroi et l'axe pointant vers le sud.

Surface de plancher

$500 \leq S_p \leq 2500$ en m^2

Pour des logements : Il s'agit de la surface totale habitée par secteur. Elle regroupe l'ensemble des valeurs pour chaque bâtiment appartenant à ce secteur.

Pour un centre de données : Il s'agit de la surface occupée par l'IT.

Apport interne unitaire

$3 \leq u_i \leq 1500$ en W/m^2

Pour des logements : D'après la réglementation RT2000, en France les apports internes sont de $4W/m^2$ pour les logements.

Pour un centre de données : Les centres de données sont classés en niveaux tiers selon leur fiabilité et leur disponibilité.

Cette classification, définie par l'Uptime Institute, comporte quatre niveaux qui évaluent la robustesse des centres de données en fonction de leur conception et de leur capacité à maintenir les services en cas de maintenance ou de défaillance.

En fonction de la catégorie du centre de données, sa densité énergétique varie entre 250 à $1500 W/m^2$.

Une étude réalisée par Efficacy (De Carlan F. et al., 2017) a retenu que, quelle que soit la taille de la salle des serveurs, le niveau de puissance au m^2 d'IT est de $500W$. C'est donc cette valeur qui est utilisée dans ce modèle.

Conductance des surfaces vitrées

$1 \leq U_v \leq 1$ en W/m^2C

En fonction du type de vitrage, la conductance des surfaces vitrées peut varier de 0,3 à 1,1 W/m² °C.

Le double vitrage à isolation renforcée ayant une conductance de 1W/m²°C, est le plus répandu.

Facteur solaire du vitrage

$$0.4 \leq FS \leq 0.4$$

Il s'agit de la part de rayonnement traversant la vitre et transmis à l'intérieur du bâtiment sous forme de chaleur.

Pour le double vitrage choisi, le facteur solaire associé est de 40%.

Conductivité

$$0.041 \leq \lambda \leq 0.041 \text{ en W/m}^2 \text{ °C}$$

La laine de verre, avec une conductivité de 0.041 est l'isolant le plus utilisé. On suppose donc que c'est cet isolant qui est présent dans tous les bâtiments.

Surface vitrée

$$0 \leq S_v \leq 15 \text{ en m}^2$$

On suppose 1/4 de la surface vitrée des logements est exposée Sud.

Pour un centre de données, il n'a pas de fenêtre.

Occupation

$$0.5 \leq O \leq 1$$

Les apports internes sont directement liés à l'occupation du bâtiment.

Pour des logements : ce modèle considère qu'en semaine, les logements ne sont occupés que le soir et le matin (taux d'utilisation de 0,5), tandis qu'ils sont occupés toute la journée pendant le week-end.

Pour un centre de données : l'occupation est de 1 à chaque instant, car l'IT fonctionne en permanence (24h/24 et 7j/7).

épaisseur de l'isolant

$$0.2 \leq e \leq 0.32 \text{ en m}$$

La RT2012 exige une épaisseur d'isolant pour les mur d'environ 20 à 30 cm d'épaisseur.

Pour la laine de verre il est recommandé de mettre 20 cm.

Température de consigne

$$19.1 \leq T_i \leq 33.55000000000001 \text{ en °C}$$

Pour un logement : La température de consigne fluctue entre 19 et 21,5 °C. Le modèle tient compte des dynamiques d'occupation du bâtiment. En semaine, la température intérieure est maintenue à 19°C. Pendant le week-end, lorsque les logements sont généralement occupés tout au long de la journée, la température peut augmenter jusqu'à 21,5 °C. L'inertie n'est pas prise en compte.

Pour un centre de données : Le comité TC 9.9 L'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), définit les normes environnementales des bâtiments qui hébergent des équipements électroniques. En 2011, il établit ainsi qu'un centre de données doit maintenir une température comprise entre 15 °C et 27 °C.

Température extérieure

$$-12.25 \leq T_{ei} \leq 33.55000000000001 \text{ en °C}$$

Température extérieure à Paris.

Allouer la puissance récupérée aux bâtiments

A un instant t , pour chaque bâtiment, si de la puissance récupérée demeure disponible au niveau des centres de données, les besoins de chauffage du bâtiment sont évalués, et un centre de données lui est attribué pour répondre à ses besoins.

Allocation

$Ab = fct(Qdt, Obd, \gamma t, Ot, Eb, Teit, Tit, Pb, Ot, Nb, hb, t)$ en DC

Vecteur indiquant quel centre de données a satisfait les besoins de chauffage de chaque bâtiment. Chaque élément du vecteur représente le numéro du centre de données (1, 2 ou 3) qui a répondu aux exigences thermiques du bâtiment correspondant. Toutes les valeurs nulles indiquent qu'aucun centre de données n'a pu satisfaire les besoins de chauffage du bâtiment.

La présence de la valeur 88 signifie qu'il s'agit d'un centre de données, ce qui implique l'absence de besoins de chauffage.

```
Script :
function logement(_gamma, _O, _E, _Tei, _Ti, _P, _h, _N){

var _alpha = 0.17;
var _lambda = 0.041;
var _e = 0.2;
var _ui = 4;
var _FS = 0.4;
var _Uv = 1;
var _nv = 0.5;
var _eta = 0.6;
_Sp = _E*(_N+1);
_Sv = _P*_h*_alpha;
_So = _P*_h*(1-_alpha)+_E;
_Uo = 1/ (_e/_lambda);
//alert(_e/_lambda);
_Qv = _E*_h;
_Ai = _ui * _Sp*_O;
_As = _Sv*_FS*_gamma/4;
_Denv = _So*_Uo+_Sv*_Uv;
_Dven = 0.34*_Qv*_nv;
_Delta = _Ti-_Tei;
_A = (_Ai+_As) / 1000;
_D = _Delta* (_Denv+_Dven)/1000;
_Pch = _D-_A;
if(_Pch<0){_Pch=0;}
_Bch = _Pch/_eta;

return _Bch
}
//.....
// logement :
//.....
// _N : Nombre d'étages
// _h : Hauteur du bâtiment
// _alpha : Part de vitrage
// _P : Périmètre
// _Ti : Température de consigne
// _Tei : Température extérieure avec déphasage et amortissement
// _E : Emprise au sol
// _lambda : Conductivité
// _e : épaisseur de l'isolant
// _O : Occupation
// _ui : Apport interne unitaire
// _Sp : Surface de plancher
```



```

// _gamma : rayonnement incident
// _FS : Facteur solaire du vitrage
// _Sv : Surface vitré_e
// _So : Surface de paroi opaque
// _Uv : Conductance des surfaces vitrées
// _Uo : Conductance des parois opaques
// _nv : Taux de renouvellement d'air
// _Qv : Volume à chauffer
// _Ai : Apports internes
// _As : Apports solaires
// _Denv : Déperditions par l'enveloppe
// _Dven : Déperditions par la ventilation
// _Delta : Différence de température
// _A : Apports gratuits du bâtiment
// _D : Déperditions du bâtiment
// _Pch : Besoins de chauffage des bâtiments
// _eta : Rendement
// _Bch : Puissance utile appelé_e en chauffage

//.....

Ab =[];

var i=0;
var valueB=0;
var al =[];//allocation pour 1 bat

for(var b=0 ; b
i=0;

while(i<=2){
var dc = Obd[b][i];

if(dc == 88){//cas ou c'est un DC
Ab.push(dc);
break;
}
var q = Qdt[dc][t] ;
if(q !=0){

valueB=logement(gammat[t],Ot[t],Eb[b],Teit[t],Tit[t],Pb[b],hb[b],Nb[b]);

if(valueB Ab.push(dc+1);
Qdt[dc][t] = q-valueB;

break;
}
if(valueB>q){
Qdt[dc][t] = 0;
}
}
if(i==2){
Ab.push(0);
break;
}
i+=1
};//fin while

}

```

DC le plus proche

$$0 \leq O \leq 88$$

Ordonnancement des centres de données pour chaque bâtiment.

Chaque ligne de la matrice représente un bâtiment, et les trois centres de données sont numérotés de 0 à 2. La première colonne indique le numéro du centre de données le plus proche du bâtiment, satisfaisant ainsi son besoin de chauffage en premier. La deuxième colonne indique le numéro du deuxième centre de données le plus proche qui satisfait les besoins de chauffage du bâtiment si le premier ne peut pas, et ainsi de suite.

Puissance valorisable

$$1972.5241312493204 \leq Q \leq 8274.38408695816 \text{ en MW}$$

Courbes de charges des 3 centres de données étudiés.

Instant où la puissance est allouée aux bâtiments

$$0 \leq t \leq 8760 \text{ en h}$$

Il s'agit de l'instant pour lequel on alloue la puissance récupérée du centre de données aux bâtiments.

Occupation

$$0.5 \leq O \leq 1$$

Les apports internes sont directement liés à l'occupation du logement. Selon ce modèle, en semaine, les logements ne sont occupés que le soir et le matin (taux d'utilisation de 0,5), tandis qu'ils sont occupés toute la journée pendant le week-end.

Température extérieure avec déphasage et amortissement

$$-12.25 \leq Te_i \leq 33.55000000000001 \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Température extérieure (ici Paris).

Température de consigne

$$19.1 \leq Ti \leq 33.55000000000001 \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Température intérieure du logement.

rayonnement incident

$$0 \leq \gamma \leq 747.9025803806527 \text{ en W/m}^2$$

Il s'agit du rayonnement reçu par la paroi directement issu du soleil. Dans ce modèle, seuls les apports solaires perçus par la façade sud du bâtiment sont pris en compte. Le rayonnement est donc calculé pour un angle de 0°C entre la paroi et l'axe pointant vers le sud.

Emprise au sol

$$0.5314515321525108 \leq E \leq 11764.180901480064 \text{ en m}^2$$

Emprise au sol du bâtiment.

perimetre

$$3.852161267975614 \leq P \leq 1498.337755406713 \text{ en m}$$

Périmètre du bâtiment.

Nombre d'étage.

$$0 \leq N \leq 12 \text{ en etage}$$

Nombre d'étage du bâtiment.

Hauteur

$$0 \leq h \leq 54 \text{ en m}$$

Hauteur du bâtiment.

**Directeur de recherche :
Mindjid Maizia**

Victoria Tré-Hardy
PFE/DAE5
UIT/Réseau
2022-2023

Étude du potentiel thermique des centres de données : récupérer la chaleur fatale des centres de données pour minimiser les besoins de chauffage du tissu urbain.

Résumé :

Avec la croissance majeure du numérique et la quête concomitante de réduction de la consommation énergétique en France, il devient impératif d'utiliser toute source d'énergie gaspillée, perdue ou inexploitée. Les centres de données, jouant un rôle essentiel dans notre société de plus en plus numérique et dématérialisée, fonctionnent en continu 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, générant ainsi de la chaleur. Cette chaleur, connue sous le nom de chaleur fatale, peut alors être récupérée pour répondre aux besoins de chauffage des bâtiments environnants. Ce travail détermine la courbe de charge d'un centre de données afin d'estimer la puissance récupérable à chaque instant. Il évalue les besoins de chauffage des bâtiments et, en utilisant un modèle d'allocation, il distribue cette puissance valorisable dans le tissu urbain via les réseaux de chaleur. L'étude se concentre sur la manière dont cette puissance peut contribuer à la réduction des besoins en chauffage des bâtiments environnants.

Mots Clés : Chaleur fatale, centre de données, valorisation, besoins de chauffage, réduction, allocation, ordonnancement, réseau de chaleur.