

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Datacenter et récupération de l'énergie fatale

Sous la direction de : Mindjid Maïzia

Pierre Aumont

Les datacenters représentent une part de moins en moins négligeable dans les consommations d'énergie finale en France. Combien d'énergie pourrait être économisée si la chaleur fatale dégagée de ces datacenters était employée pour chauffer des bâtiments ? Il est question, dans ce projet, de déterminer comment et combien d'énergie peut être récupérée (conditions urbaines et modalités de déploiement des infrastructures)

Directeur de recherche : Mindjid Maïzia

Auteur : Pierre Aumont

2023-2024

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'Études 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'École 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 voudrais particulièrement remercier mon directeur de recherche Monsieur Mindjid Maïzia, professeur de l'option Réseau au département Aménagement et Environnement de l'École Polytechnique de l'Université de Tours. Son précieux soutien et son généreux accompagnement ont été des piliers essentiels tout au long de ce travail de recherche. De par sa rigueur et son investissement, j'ai appris à organiser mon travail, à aborder les sujets avec un raisonnement méthodique, ce qui a permis d'enrichir ce travail et de cultiver mon esprit d'ingénieur. Ces qualités me seront très importantes dans l'objectif d'une prochaine insertion professionnelle.

Je voudrais également témoigner ma gratitude à Victoria Tré-Hardy, étudiante de ma promotion, pour son aide et soutien tout au long de la réalisation de ce projet de recherche.

Table des matières

1.	<i>Introduction</i>	7
1.1	Contexte	7
1.2	Définition des termes du sujet	8
1.3	Objectifs et délimitation de l'étude	9
2.	<i>Estimation de la puissance récupérable</i>	9
2.1	Caractéristiques d'un datacenter	9
2.2	Méthode de la récupération de la chaleur fatale	11
2.3	Quantification de la puissance récupérable	11
2.4	Application au cas d'études	14
3.	<i>Estimation des besoins de chauffage d'un bâtiment</i>	15
3.1	Calcul des déperditions.....	15
3.2	Calcul des apports gratuits	16
3.3	Application au cas d'études	16
4.	<i>Allocation de la chaleur fatale</i>	17
4.1	Les dispositifs techniques de la distribution de la chaleur fatale.....	17
4.2	L'ordonnancement pour l'allocation.....	18
4.3	Application au cas d'études	19
5.	<i>Résultats</i>	20
6.	<i>Conclusion</i>	22
7.	<i>Bibliographie</i>	23
8.	<i>Annexes</i>	24
	Annexe 1	24
	Annexe 2	28
	Annexe 3	32

1. Introduction

1.1 Contexte

Depuis quelques années, l'énergie devient un sujet de débats et de questionnements, avec un enchaînement de crises et de solutions qui mènent à des actions politiquement orientées et souvent mal reçues par la population. Et cela ne cesse de s'accroître avec récemment des sujets sur le prix de l'énergie depuis la guerre déclarée par la Russie à l'Ukraine. Viens s'ajouter à cela, la crise énergétique qui a frappé la France en plein hiver à cause d'une production d'énergie insuffisante. Cela a poussé l'État à mener des actions de sensibilisation quant à la consommation d'énergie ou encore la possibilité d'effacement diffus de certains postes de consommation permettant de supprimer les pics de consommation. Aujourd'hui, l'objectif est clair, il faut diviser par deux la consommation énergétique d'ici 2050 par rapport à 2012 (Sénat, 2023) et atteindre la neutralité carbone.

Aujourd'hui, plus de 80% de la population française vit en espace urbain et ce chiffre ne cesse d'augmenter. Ces unités urbaines constituées de logements sont en France le plus gros consommateur avec 42% de la consommation d'énergie finale, l'énergie livrée au consommateur pour satisfaire ses besoins. Le principal facteur est le chauffage, qui représente 66% de la consommation d'énergie finale d'un logement en France (Ceren, 2022).

En parallèle de cela, le numérique ne cesse de se développer. De plus en plus de données transitent à travers le globe et doivent être stockées, souvent à plusieurs endroits. Dans l'hexagone, on a vu émerger par centaines dans le pays des Datacenters. Aujourd'hui, au nombre de 264, ils sont de plus en plus gros et de plus en plus énergivores. En effet, stocker des données et les faire voyager demande beaucoup d'énergie, tellement d'énergie que sur les 476 TWh consommés en France en 2015, 56TWh étaient consommés par le numérique, soit 12% de la consommation électrique du pays. Parmi ces 56 TWh consommés par le numérique en France, 18% étaient destinés aux Datacenters (Data.gouv,2019). En 2019, on parlait déjà de 33,5 TWh d'énergie consommée par les Datacenters, qui connaissent déjà une croissance exponentielle. Corrélées à cette consommation énergétique, les émissions de gaz à effet de serre associées aux centres de données représentent 14% de l'empreinte carbone en France (Sénat,2020). Les datacenters, par leur fonctionnement dégagent de la chaleur, appelée chaleur fatale. Cette chaleur, perdue dans l'air, suscite actuellement à des nombreuses recherches concernant sa réutilisation.

Cette étude vise à étudier la récupération de la chaleur fatale et de répondre à la problématique suivante :

Comment le potentiel thermique des centres de données peut-il être utilisé pour réduire considérablement les besoins de chauffage des bâtiments situés dans des zones urbaines ?

Il s'agit de calculer le potentiel thermique valorisable d'un datacenter en place dans un tissu urbain et de déterminer dans quelles conditions de récupération et de distribution la chaleur fatale peut minimiser les besoins de chauffage des bâtiments alentours.

L'hypothèse formulée est que le potentiel thermique des centres de données est suffisamment élevé et les systèmes de récupération de la chaleur fatale assez efficaces pour réduire de manière significative les besoins de chaleur des bâtiments alentours raccordés à un réseau de chaleur urbain.

1.2 Définition des termes du sujet

Les **centres de données** ou **datacenters** représentent des infrastructures physiques centralisées, regroupant des équipements informatiques essentiels avec leurs dispositifs technologiques nécessaires au fonctionnement continu. Ces installations comprennent des éléments tels que le bâti, la climatisation, la filtration de l'air, la distribution de l'énergie, les entrées et sorties réseau, ainsi que des mesures de sécurité physique du site. La composante dédiée aux ordinateurs est communément appelée IT (Information Technology), tandis que l'ensemble, englobant à la fois l'IT et les éléments hors-IT, est systématiquement désigné sous le terme d'infrastructures.

Ces centres de traitement de données se matérialisent principalement sous la forme de bâtiments, constituant ainsi les enveloppes physiques de l'accumulation des données informatiques. Répartis à l'échelle mondiale, depuis des sites parfois atypiques comme des fjords en Finlande ou des barges dans la baie de San Francisco, les datacenters se multiplient surtout dans les banlieues des grandes métropoles et en zones urbaines. (Les datacenters enfoncent le cloud, 2018)

L'IT fonctionnent 365 jours par an, 24h/24 et ces « ordinateurs géants » dégagent une grande quantité de chaleur, qui n'est pas nécessairement réutilisée, appelée **chaleur fatale**. Cette déperdition de chaleur est générée par un procédé dont l'objectif n'est pas la production d'énergie, mais le fonctionnement des serveurs. C'est donc une conséquence de l'objectif initial. On retrouve cette chaleur fatale dans beaucoup d'industries très consommatrice d'énergie comme dans nos PME de types boulangeries, laveries, etc... Récupérer cette chaleur devient donc un réel enjeu économique et écologique pour éviter un gaspillage massif.

Si on arrive à récupérer cette chaleur, il nous faudra l'acheminer du Datacenter, point de récupération de l'énergie, à plusieurs bâtiments , ... qui ont un **besoin de chauffage**. Cette chaleur peut contribuer aux besoins énergétiques des logements afin de satisfaire à une température de consigne tout en prenant en compte les déperditions et apports des bâtiments. Pour acheminer cette énergie, on utilise un **réseau de chaleur** urbain. Un réseau de chaleur constitue un système centralisé de distribution de chaleur destiné à approvisionner plusieurs utilisateurs. Il est composé d'une ou plusieurs unités de production de chaleur, d'un réseau de distribution primaire par lequel la chaleur est acheminée à l'aide d'un fluide caloporteur, et d'un ensemble de sous-stations d'échange. Ces sous-stations sont responsables de fournir les bâtiments en utilisant un réseau de distribution secondaire.

1.3 Objectifs et délimitation de l'étude

Pour ce travail, notre lieu d'études sera le quartier autour de l'école des Mines de Paris, qui est une zone urbaine avec une forte densité de bâtiments. Parmi l'ensemble des bâtiments de ce lieu d'études, 3 bâtiments sont considérés comme des datacenters fictifs.

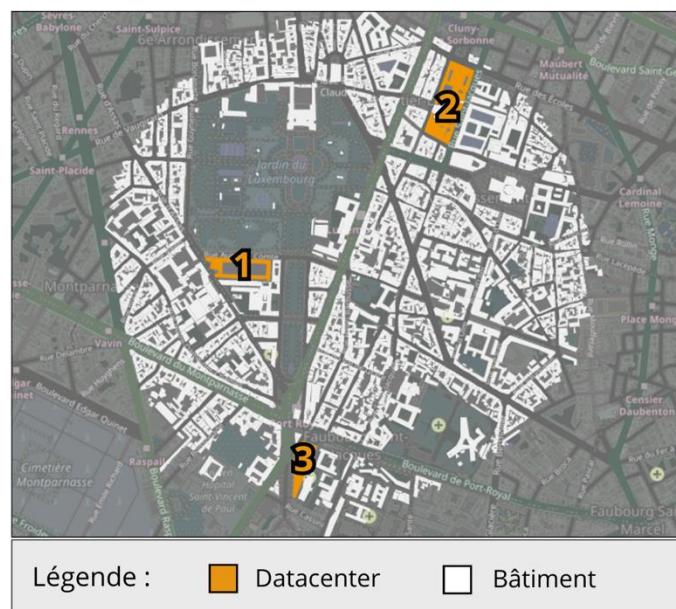


Figure 1 : Localisation des datacenters fictifs dans le quartier autour de l'École des Mines à Paris (source : Logiciel Integral)

Toutes les étapes de calcul et de modélisation ont été réalisées sur l'application Integral2023.

L'objectif est de déterminer combien de bâtiments pourraient bénéficier de la chaleur fatale des datacenters afin de réduire les besoins de chauffage du quartier étudié et donc de minimiser l'impact des centres de données sur l'environnement.

2. Estimation de la puissance récupérable

2.1 Caractéristiques d'un datacenter

Un Datacenter est une infrastructure qui regroupe des équipements informatiques pour le stockage de données. Il fonctionne toute l'année, 7j/7, 24h/24 et dégage donc continuellement de la chaleur.

Du point de vue du bâtiment en lui-même, les datacenters installés en zone urbaine sont climatisés et n'ont souvent aucune fenêtre afin d'éviter des apports solaires qui augmenteraient la température dans les pièces IT et entraîneraient donc des besoins de refroidissement supplémentaire. D'un autre côté, cela empêche de bénéficier de la température extérieure plus froide en hiver, qui pourrait refroidir les serveurs et donc diminuer la consommation énergétique du bâtiment en réduisant la climatisation. De faits, les déperditions d'un datacenter sont très faibles, n'étant pas impacté par les variations de températures extérieures.

Techniquement, les salles IT sont constituées de baies dans lesquelles sont rangés les serveurs qui stockent les données. Étant donné de la grande densité de serveurs, la chaleur augmente et dépasse

rapidement les seuils pour le bon fonctionnement des appareils informatiques. C'est pourquoi, au sein de ces infrastructures, on retrouve un travail sur la circulation de l'air et la climatisation des serveurs. Dans ce cas d'études, nous allons nous intéresser au refroidissement à l'air, bien qu'il existe plusieurs techniques de refroidissement.

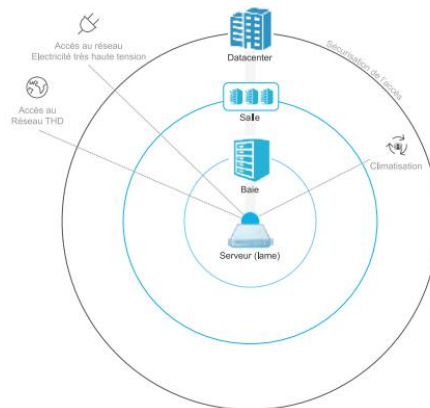


Figure 2 : Spatialisation hiérarchique des éléments constitutifs des datacenters (source : entreprise.gouv, 2015)

La technique de refroidissement par air consiste à faire passer de l'air froid dans les baies de serveurs par le bas, afin de pousser l'air chaud vers le haut, puis de le sortir de la salle IT en direction des allées.

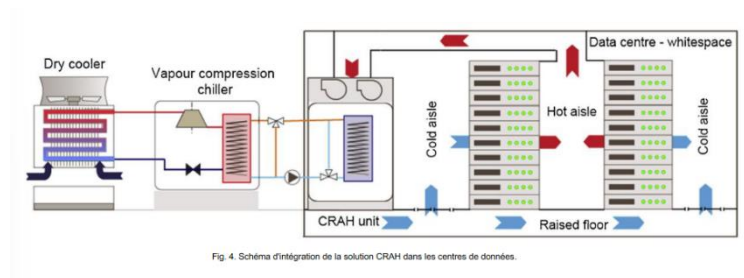


Figure 3 : technologie de refroidissement à l'air CRAH et système de traitement de l'air (source : Edouard Oroa, et al., 2019)

Par ailleurs, les datacenters sont classés selon un niveau TIER qui est souvent communiqué sur les fiches techniques des centres de données. Le niveau TIER qui va de « I à IV » correspond à une certification de construction et de fiabilité / sûreté qui donne la densité énergétique permise pour un centre de données en W.m-2.

	TIER 1	TIER 2	TIER 3	TIER 4
Niveau de redondance	N	N+1	N+1	2 (N+1)
Équipements électriques, climatiseurs et générateurs	× Sans redondance	✓ Redondance des composants critiques	✓ Doubles ou plus	✓ Doubles ou plus
Réseaux d'alimentation (électricité, refroidissement, communication)	× Uniques	× Uniques	✓ Doubles ou plus (actif / passif)	✓ Doubles ou plus (actif / passif)
Indépendance physique des composants de secours et des réseaux d'alimentation	× Non	× Non	× Non	✓ Oui, nécessite deux distributeurs d'électricité indépendants
Double alimentation des composants	× Non	× Non	✓ Oui	✓ Oui
Refroidissement continu	× Non	× Non	× Non	✓ Oui
Réserve pour les générateurs de secours	12 heures	12 heures	12 heures	12 heures
Temps d'arrêt annuel Taux de disponibilité	28,6 h 99,67 %	22 h 99,75 %	1,6 h 99,982 %	0,4 h 99,995 %

Figure 4 : Classement des datacenters en niveau TIER et spécificités techniques (source : entreprise.gouv, 2015)

2.2 Méthode de la récupération de la chaleur fatale

Le circuit frigorifique est composé de trois éléments essentiels. D'un côté, on a l'évaporateur qui permet de faire circuler du froid dans les baies et de l'autre, on a un condenseur qui permet de faire partir la chaleur. Entre le compresseur et le condenseur d'un groupe frigorifique, il y a le compresseur qui permet de faire circuler le fluide frigorigène qui maintient une température suffisamment élevée pour servir au chauffage de l'eau par échange de calories. Cette approche permet le transfert initial d'énergie thermique du fluide frigorigène vers le récupérateur, où l'échange thermique a lieu avec l'eau.

C'est au niveau du condenseur que l'on peut estimer la quantité de chaleur récupérable.

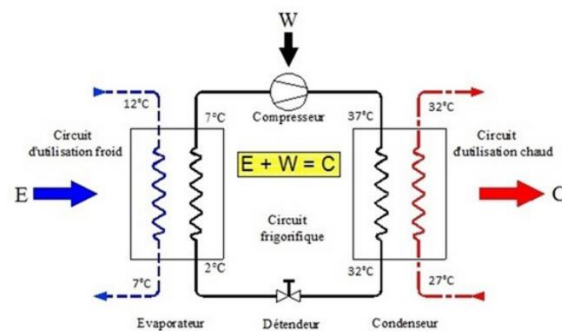


Figure 5 : Schéma du fonctionnement du circuit frigorifique d'un groupe froid (source : Edouard Oroa, et al., 2019)

2.3 Quantification de la puissance récupérable

La puissance évacuée au condenseur représente la variable que nous souhaitons obtenir, c'est la puissance récupérable, la chaleur fatale.

Le système de récupération de l'énergie possède une efficacité appelée EFF (Efficacité frigorifique).

La puissance récupérée à l'évaporateur correspond à la puissance de refroidissement des serveurs. Ainsi, pour obtenir la quantité de chaleur récupérable, on utilise la formule ci-dessous.

$$C = Br * \left(1 + \frac{1}{EFF}\right)$$

Avec :

C : Puissance récupérable, puissance évacuée au condenseur en MW

Br : Besoins de refroidissement, puissance évacuée à l'évaporateur MW

EFF : Efficacité frigorifique

Pour obtenir une valeur de l'efficacité frigorifique EFF, la formule est la suivante.

$$EFF = \frac{PE}{PC}$$

Avec :

EFF : Efficacité frigorifique

PE : Puissance évaporateur

PC : Puissance compresseur

On remarque que si l'efficacité frigorifique est élevée, alors le compresseur aura besoin de moins puissance et consommera moins. La puissance récupérable en sortie sera également plus faible. À l'inverse, si le compresseur a besoin de plus de puissance et consomme plus, alors la puissance récupérable en sortie sera plus importante. La valeur courante de l'efficacité frigorifique est de 4 (Carlan et al., 2017).

Pour calculer les besoins de refroidissement, il est nécessaire de connaître les apports internes du datacenter ainsi que ses déperditions au cours du temps.

Ainsi, on a

$$Br = Ai - D$$

Avec :

Br : Besoins de refroidissement, puissance évacuée à l'évaporateur en MW

Ai : Apports internes du datacenter en MW

D : Déperditions du datacenter en kW

Les apports gratuits d'un datacenter ne sont composés que des apports internes, puisque comme expliqué précédemment, les datacenters étant des « thermos », il n'y a pas de fenêtres pouvant laisser entrer des apports solaires. Le calcul de ces apports internes se fait donc sur la puissance IT installées dans le centre de données. Selon son niveau Tiers, un datacenter possède une densité énergétique permise comprise entre 250 et 1500 W/m². Pour cette étude, il est considéré que la densité énergétique des équipements informatiques est de 500W/m², ce qui correspond environ à un datacenter de Tiers II.

On considère que la puissance installée, soit les 500 W/m² sont équivalent à des apports internes de 500 W/m², c'est-à-dire que pour 1W consommé, on a un apport interne d'une puissance de 1W.

$$Ai = Sp * ui$$

Avec :

Ai : Apports internes en W

Sp : Surface de plancher en m²

Ui : apports internes unitaires en W/m²

Etant très hermétique, le datacenter n'a donc pas beaucoup de déperditions. Pour calculer les déperditions d'une infrastructure de ce type, il est faut calculer la différence de température entre l'extérieur et la température désirée dans le datacenter. En parallèle, il s'agit d'estimer les déperditions par l'enveloppe ainsi que les déperditions par la ventilation du bâtiment.

$$D = \Delta T * (D_{env} + D_{ven})$$

Avec :

D : Déperditions du bâtiment en kW

ΔT : Différence de température entre l'extérieur et la température de consigne en °C

D_{env} : Déperditions du bâtiment par l'enveloppe en kW

D_{ven} : Déperditions du bâtiment par la ventilation en kW

À partir de l'application Intégral, il est possible d'obtenir les données météorologiques de la station d'Orly, étant située proche de notre cas d'études et d'obtenir les températures extérieures pour chacune des 8760h de l'année.

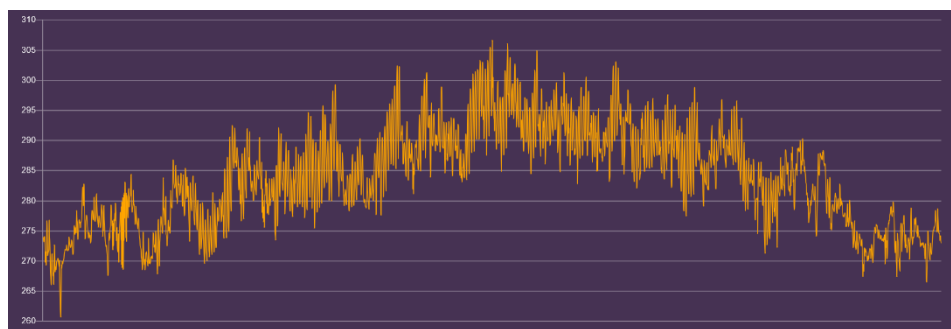


Figure 6 : Courbe des températures extérieures à la station météorologique de Paris ORLY
(source : Logiciel Integral)

La température à l'intérieur d'un datacenter doit être comprise entre 15 et 27 °C selon les directives de l'ASHRAE (Performance characteristics of a waste-heat recovery water-source, 2022). Ces valeurs sont calculées afin de ne pas dépasser les normes environnementales des bâtiments hébergeant des équipements informatiques tout en gardant une température optimale pour le fonctionnement de ces mêmes équipements.

En raison de son contact direct avec le milieu extérieur, un bâtiment présente des déperditions par l'enveloppe dépendent de deux facteurs :

- La surface de parois opaques (S_o), que l'on peut calculer facilement si l'on connaît le périmètre (P), l'emprise au sol (E) et la hauteur du bâtiment (h) avec la formule

$$S_o = P * h + E$$

- La Conductance des parois opaques (U_o), que l'on calcule en fonction de la conductivité thermique de l'isolant utilisé et de son épaisseur.

$$D_{env} = S_o * U_o$$

Ces déperditions sont aujourd'hui normées par plusieurs législations qui imposent des seuils via les RT2012 ou encore la RE2020.

De plus, pour conserver une bonne qualité de l'air, un bâtiment possède un système de ventilation qui lui aussi entraîne des déperditions énergétiques. Ces déperditions (D_{ven}) sont calculées à partir du volume à chauffer/refroidir du bâtiment (Q_v) et du taux de renouvellement de l'air souhaité (nv).

$$D_{ven} = 0.34 * Q_v * nv$$

Ce taux de renouvellement est lui aussi régi par la loi qui selon l'activité exercée dans le bâtiment impose un taux minimum de ventilation.

2.4 Application au cas d'études

Pour rappel, notre cas d'études est composé de 3 datacenters, que l'on peut géographiquement situer sur l'image ci-dessous. Les données autour des datacenters existants étant pour la plupart confidentielles et inaccessibles, il est difficile de savoir quel pourcentage de la surface totale des bâtiments est affecté aux salles IT.

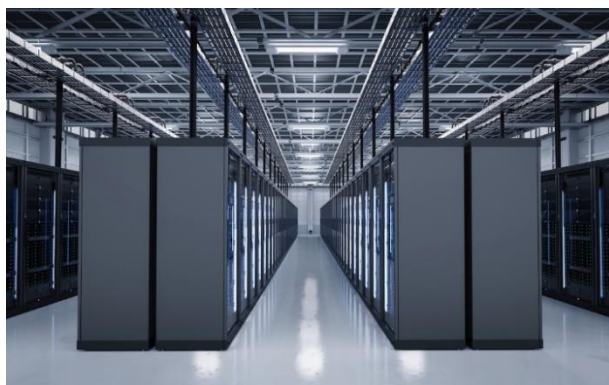


Figure 7 : Illustration des allées de serveurs dans un datacenter
(source : tabsher datacenter service)

Au vu de l'organisation des datacenters en allées, comme on le voit sur la photo ci-dessus, il paraît réaliste de considérer que 70% de l'espace est consacré aux équipements informatiques. En utilisant le logiciel de calcul, on obtient pour les 3 datacenters, les résultats suivants.

	Surface (m ²)	Puissance installée (W/m ²)	Puissance valorisable (MW)	Consommation électrique annuelle (MWh/m ² /an)
DC1	26195	500	12	5,41
DC2	11764	500	5	5,23
DC3	4795	500	2	5,04

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des datacenters du lieu d'études.

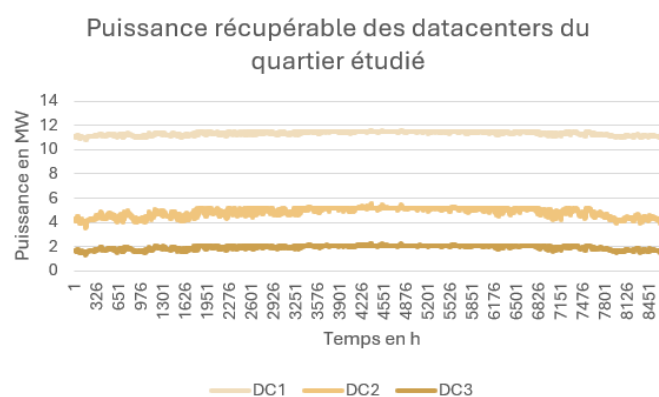


Figure 8 : Puissance valorisable par chacun des datacenters fictifs du lieu d'études

Le datacenter 1, ayant la plus grande surface, permet de récupérer tout au long de l'année et de manière continue, une puissance de 12 MW. Les datacenters 2 et 3, plus petits, permettent de récupérer des puissances respectives de 5 et 2 MW. Ainsi, sur l'ensemble du lieu d'études, on peut prétendre à valoriser une puissance totale de 19MW en continu.

3. Estimation des besoins de chauffage d'un bâtiment

Pour qualifier le potentiel thermique récupéré des datacenters valorisable, il faut qu'il soit utilisé pour répondre aux besoins d'un ensemble urbain qu'il convient d'estimer par bâtiments.

Comme pour calculer les besoins de refroidissement des datacenters, il est possible d'utiliser le même système de calcul pour déterminer les besoins de chauffage (Bch) en kW de chacun des logements.

Il suffit d'inverser la formule finale et de faire la différence entre les déperditions (D) en kW et les apports gratuits (A) en kW.

$$Bch = D - A$$

Il convient, comme dans le cas des datacenters de calculer les déperditions et les apports gratuits.

Pour ces calculs, le modèle prend en compte les variables qui influent considérablement sur la consommation d'énergie d'un bâtiment, telles que l'occupation du bâtiment, les conditions climatiques, la ventilation et l'isolation (Pannier et al., 2018).

3.1 Calcul des déperditions

- T_e : Température extérieure, Paris Orly
- T_i : Température intérieure de consigne
- P : Périmètre du bâtiment
- N : Nombre de niveaux du bâtiment
- U_o : Conductance des surfaces opaques (murs + toit)
- U_v : Conductance des surfaces vitrées
- E : Emprise au sol du bâtiment
- α : Taux de vitrage
- N_v : Taux de renouvellement de l'air

Ainsi, ces variables sont les valeurs d'entrées à saisir pour connaître les besoins de chauffage. Côté déperditions, comme pour les datacenters, on a besoin de l'écart de température entre l'extérieur et la température intérieure désirée, des déperditions par l'enveloppe et des déperditions par la ventilation. On considère dans cette étude que tous les logements ont une température intérieure de consigne de 19° minimum, que l'isolation des bâtiments est la même pour tous (20 cm de laine de verre) et que tous les bâtiments ont un taux de vitrage de 0.17% de la surface des parois, imposé par la RT2012.

Les déperditions par l'enveloppe sont obtenues grâce à un ensemble d'équations (annexe 1) qui permettent d'obtenir les surfaces opaques et vitrées du logement qu'il suffit de multiplier par la conductance des murs et du vitrage. La conductance des murs est obtenue en faisant l'inverse de la résistance thermique de la paroi, elle-même obtenue en divisant l'épaisseur de l'isolant (20 cm de laine

de verre) par sa conductivité ($0.04\text{W/m}^2\text{°C}$). Ces calculs de conductance sont très simplifiés, puisque l'on néglige les ponts linéiques, qui augmentent les déperditions.

De même que pour l'isolation uniforme des bâtiments, on considère que tous les logements sont équipés de doubles vitrages d'une conductance de $1\text{W/m}^2\text{°C}$.

3.2 Calcul des apports gratuits

- α : Taux de vitrage
- FS : Facteur Solaire du vitrage
- γ : Rayonnement incident
- u_i : Apports internes unitaires

Le concept d'apports gratuits de chaleur fait référence aux apports de chaleur qui réduisent les besoins de chauffage.

Dans la plupart des logements, l'apport gratuit le plus important est amené par le rayonnement solaire. On calcule la puissance reçue en W/m^2 à chaque instant en fonction de l'inclinaison et de l'orientation de la paroi, ainsi que du jour et de l'heure. Dans notre étude, il a été considéré qu'aux instants où le logement reçoit du rayonnement solaire, $\frac{1}{4}$ de la surface totale des parois, c'est-à-dire une façade (Sud, Ouest,...) est touché par celui-ci. Connaissant alors le rayonnement solaire incident, on peut avec les données de surface de parois vitrées et le facteur solaire du vitrage, qui caractérise la capacité du vitrage à transmettre le rayonnement reçu, calculer les apports solaires.

De plus, il y a les apports internes unitaires qui correspondent à la quantité spécifique de chaleur générée à l'intérieur d'un espace donné, provenant de sources internes telles que les équipements électriques, l'éclairage, les appareils ménagers, et les occupants. Pour cette étude, les apports internes unitaires ont été fixés à 4W/m^2 .

Enfin, l'apport des datacenters est considéré comme un apport gratuit et non pas comme un nouveau système de chauffage. Cela revient à dire que tous les bâtiments conservent leur système de chauffage existant, cependant, les besoins de chauffage seront diminués en fonction de l'apport des datacenters.

3.3 Application au cas d'études

Finalement, on obtient les besoins de chauffage de $50\text{kWh/m}^2/\text{an}$, avec un besoin de puissance nominale de 14kW , pour l'exemple d'un bâtiment, d'une surface de 500m^2 .

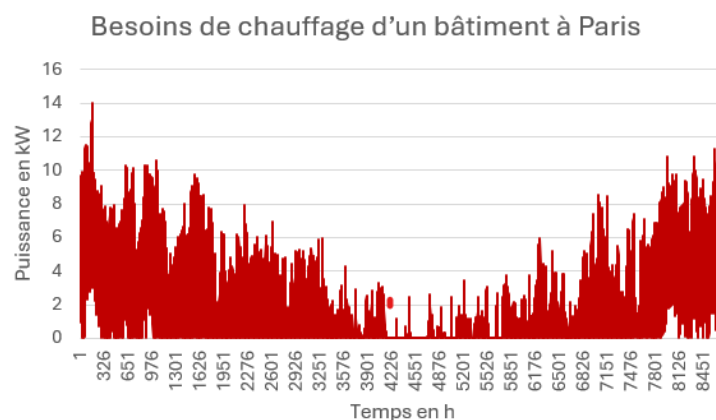


Figure 9 : Besoins de chauffage d'un bâtiment du quartier d'études, autour de l'École des Mines à Paris

4. Allocation de la chaleur fatale

4.1 Les dispositifs techniques de la distribution de la chaleur fatale

Comme cité précédemment, une fois la chaleur fatale estimée et récupérée, la condition nécessaire pour son application au chauffage des bâtiments est son injection dans les réseaux de chaleur urbains. Le chauffage urbain désigne un système fournissant de la chaleur de manière centralisée en un ou plusieurs emplacements à un nombre illimité de clients (Oróa. E et al., 2019). Les réseaux de chaleurs sont sous la forme de circuits d'eau chaude, fluide qui se transporte de la source de chaleur jusqu'aux bâtiments à chauffer. Même si cette solution de chauffage est ancienne, existant déjà sous l'Empire romain (Cerema, 2019), la tendance actuelle est d'augmenter la part de l'énergie thermique fournie par les réseaux de chauffage urbain.

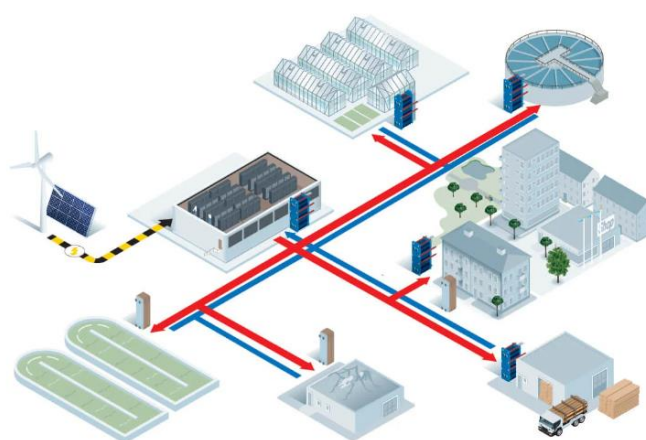


Figure 10 : Illustration d'un réseau de chaleur ayant comme source de production d'énergie un datacenter (source : Alfalaval, 2024)

En France, les réseaux de chaleur sont peu développés en raison de la forte concurrence des systèmes de chauffage à gaz et à l'électricité qui sont très compétitifs. Dans le cas de l'étude, nous ferons l'hypothèse facilitant de considérer que tous les bâtiments du quartier d'étude sont reliés directement aux 3 datacenters via un réseau de chaleur parfait de rendement égale à 1.

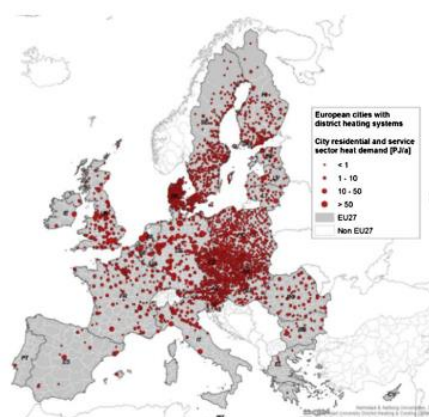


Figure 11 : Ville européennes équipées d'un réseau de chaleur urbain (Edouard Oroa, et al., 2019)

Afin d'obtenir les résultats les plus impactant possible, il est important d'ordonnancer l'allocation de la chaleur. En effet, l'impact sur les émissions de CO2 sera plus important si l'on réduit les besoins de

chauffage d'un bâtiment fonctionnant au fuel grâce à l'apport énergétique des datacenters plutôt que si l'on alloue cette puissance à une maison fonctionnant à l'électricité.

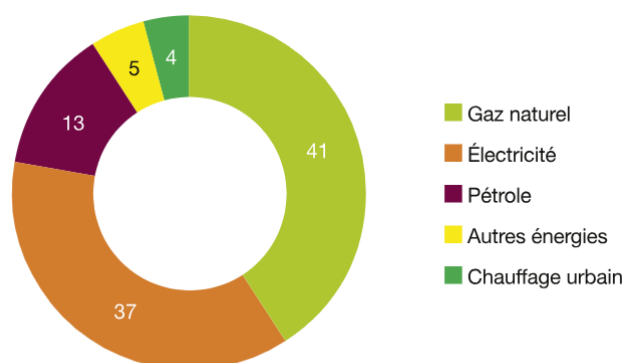


Figure 12 : Répartition en % de l'énergie du système de chauffage des bâtiment en France (source : Ceren, 2018)

En France, environ 80% des logements sont chauffés grâce à l'électricité et au gaz. Pour nos 2774 bâtiments, on considère que 50% sont chauffés au gaz et 50% sont chauffés à l'électricité.

Une fois le calcul des besoins de chauffage des bâtiments du quartier autour de l'École des Mines et la quantification de la chaleur récupérable pour chacun des datacenters, on obtient le graphique ci-dessous. On peut lire, heure par heure, les besoins et la puissance disponible. Pour des raisons d'affichage, l'échelle est logarithmique.

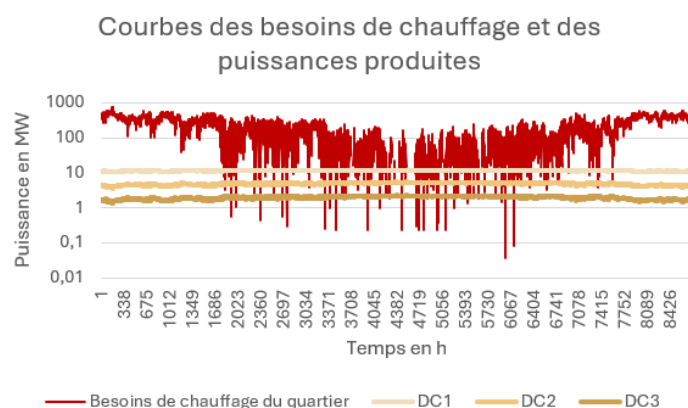


Figure 13 : Courbes de charge des besoins de chauffage du quartier d'études et de la puissance valorisable des 3 datacenters.

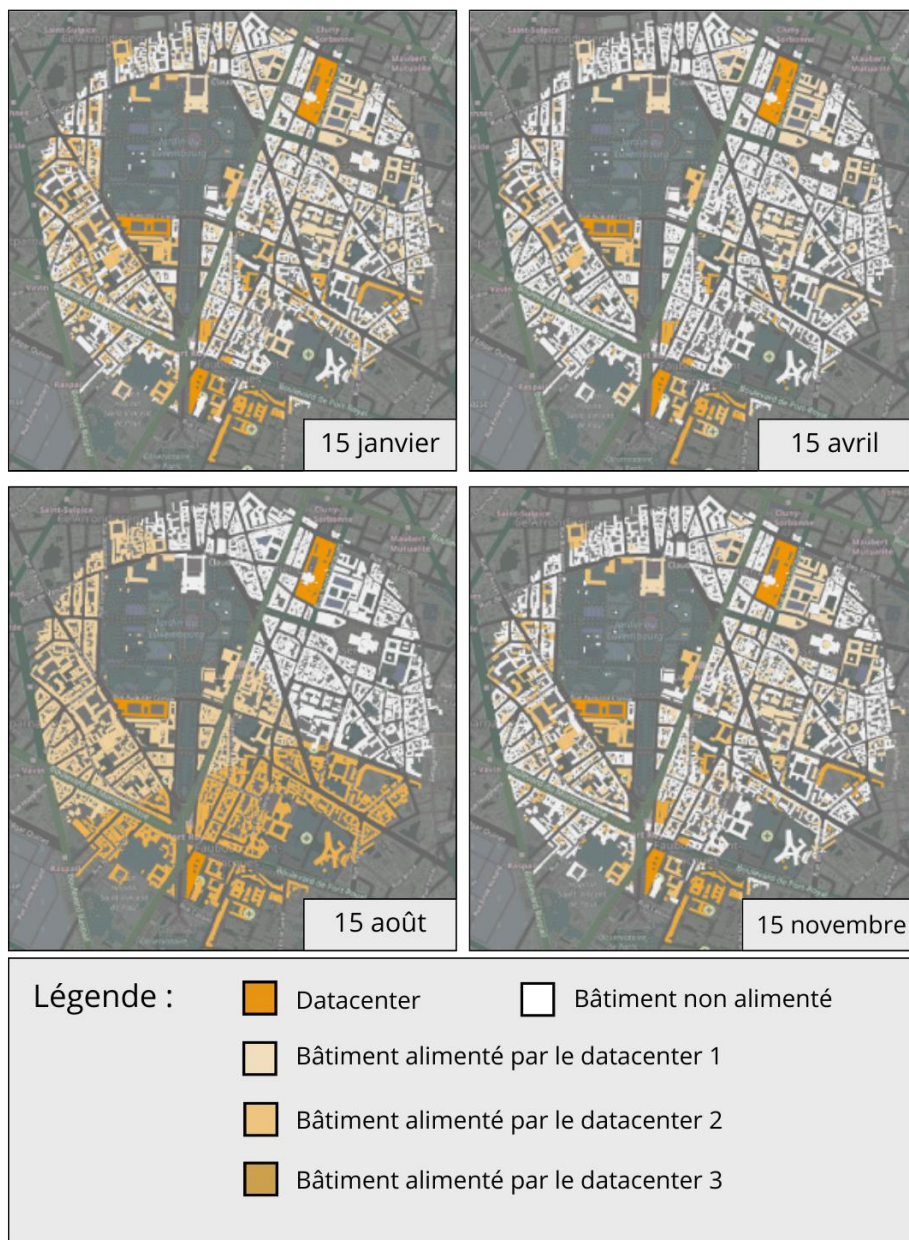
4.2 L'ordonnement pour l'allocation

Une fois ces données récoltées, on peut déterminer les leviers de l'allocation et mettre en application la méthode au cas d'études.

Le facteur déterminant dans cette étude pour l'allocation de la puissance est la distance du bâtiment aux datacenters. Pour chacun des logements, la puissance valorisable du datacenter le plus proche est priorisée, puis la puissance du deuxième datacenter le plus proche et enfin le dernier dans un éventuel cas.

4.3 Application au cas d'études

L'application au lieu d'études nous permet d'obtenir les résultats ci-dessous.



Figures 14, 15, 16, 17 : Bâtiments dont les besoins de chauffage ont été entièrement couverts par chacun des datacenters à différents instants (source : Logiciel Integral)

Pour que les résultats soient comparables, les images ont été prises au 15 de chaque mois à 7h du matin, heure où les besoins de chauffage sont importants.

5. Résultats

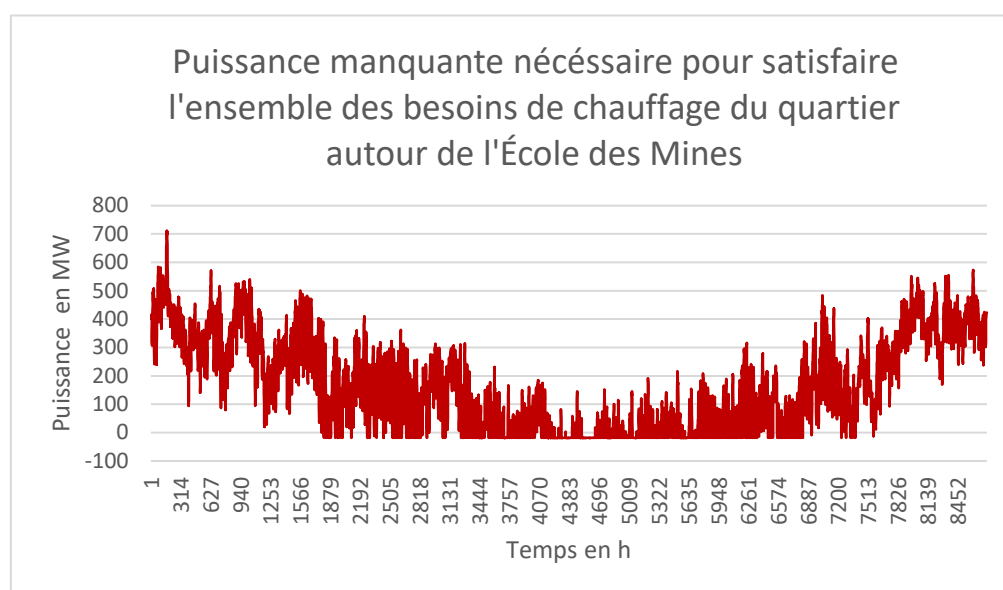


Figure 18 : Courbe de charge de la puissance manquante pour satisfaire l'ensemble des besoins de chauffage du lieu d'études

Lorsque l'on diminue à la puissance récupérée les besoins de chauffage du quartier étudié, on observe que durant les périodes hivernales, une grande partie des besoins n'ont pas été satisfaits. Cela est dû aux besoins plus importants en ces périodes où la température extérieure est plus froide que la température intérieure désirée la plupart du temps.

On remarque également que pendant la période estivale, on obtient des valeurs négatives, ce qui signifie que toute la puissance disponible n'a pas été utilisée. Ainsi, sur toute l'année, sur les 158 GWh récupéré par la chaleur fatale des datacenter, environ 35GWH ne sont pas utilisés.

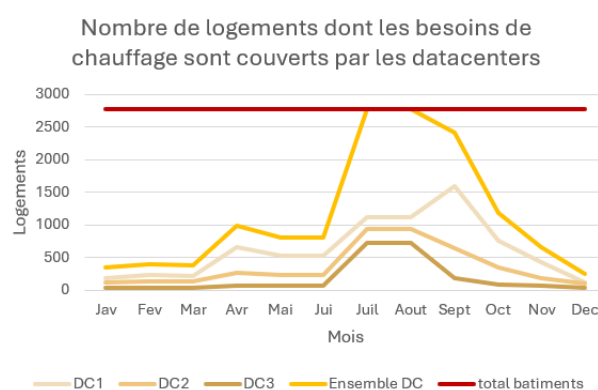


Figure 19 : Nombre de logements au cours de l'année dont les besoins de chauffage ont été couverts par chaque datacenter

Le graphique ci-dessus permet de voir le nombre de bâtiments dont la totalité des besoins de chauffage sont couverts pour chacun des datacenters ainsi que la somme. Le schéma montre que la totalité des besoins de chauffage sont couverts. Cela s'entend avec des besoins de chauffage nuls durant la période estivale.

Finalement, la récupération de la chaleur fatale des datacenters permet de réduire significativement les besoins de chaleur d'un quartier dans le tissu urbain. En effet, les 3 datacenters couvrent en moyenne sur toute l'année les besoins de chauffage de 1146 bâtiments.

Quantité annuelle d'énergie fournie par les datacenters

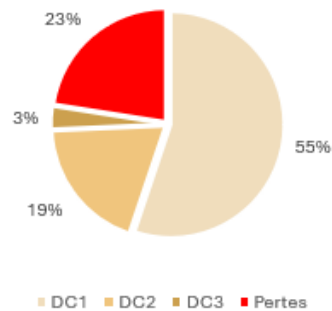


Figure 20 : Répartitions annuelles en % de la quantité d'énergie fournie par les datacenters aux bâtiments

Le quartier a une consommation de 1,7 TWh d'énergie pour le chauffage sur une année et dégageait (850 000 MWh * 0.429t CO₂/MWh) 364 650 t/CO₂, en prenant en compte que la moitié des logements se chauffent à l'électricité 0 tCO₂ / MWh et l'autre moitié au gaz 0.429 tCO₂/ MWh (données RTE). Avec les datacenters, si l'on définit que ceux-ci sont uniquement alimentés en électricité pour le fonctionnement par des sources d'énergie décarbonée, on passe à des émissions de l'ordre 330 000 t/CO₂ pour le quartier étudié, soit un gain annuel d'environ 35 000 t/CO₂.

6. Conclusion

Finalement, cette étude nous montre que la récupération de la chaleur fatale est un des leviers de la réduction des besoins de chauffage de bâtiments situés dans le tissu urbain proche des datacenters. En passant d'une puissance perdue, à la récupération de plus de 158GWh, on estime une réduction annuelle de plus de 35 tonnes de CO₂. Il est donc difficile de ne pas envisager cette possibilité. L'ensemble de l'énergie récupérée permet de couvrir en période hivernale pour près de 400 bâtiments, sans changer le système de chauffage d'origine des bâtiments. En le considérant ainsi comme un apport gratuit supplémentaire, le bâtiment conserve un appoint lui permettant de couvrir ses besoins si l'apport des datacenters n'est pas suffisant.

Cette démarche représente également un levier pour réduire l'impact environnemental du secteur numérique, en croissance exponentielle. En intégrant la récupération de la chaleur fatale dans la stratégie globale de durabilité des datacenters, il est possible d'atténuer les pressions sur les ressources énergétiques traditionnelles et de répondre aux objectifs mondiaux sur les enjeux climatiques.

Cependant, il est important de noter que les conditions de déploiement de ces systèmes sont souvent contraignantes, nécessitant la mise en place d'un réseau de chaleur. En France, où de tels réseaux sont encore assez peu déployés, la création de ces infrastructures engendre des travaux longs et lourds, ayant un impact économique conséquent sur le projet. La nécessité de passer par un réseau de chaleur peut ainsi représenter un défi logistique et financier non négligeable.

De plus, bon nombre de datacenters en France sont de taille moyenne à petite, avec des surfaces IT relativement réduites. Dans ces cas, la récupération de la chaleur fatale peut ne pas avoir un impact significatif sur la réduction des besoins de chauffage du quartier alentour. Cette réalité souligne la nécessité d'adapter les solutions de récupération de chaleur en fonction de la taille et de la capacité de chaque centre de données, tout en cherchant des moyens innovants d'optimiser l'utilisation de cette ressource.

Enfin, plusieurs limites se posent sur ce travail. Premièrement, l'ordonnancement a été effectué selon la distance au datacenter, cependant, toute la chaleur récupérée est directement envoyée dans la canalisation principale du réseau de chaleur et ensuite distribuée aux bâtiments. Ce critère n'a de sens que si les bâtiments étaient tous directement reliés au datacenter. Cependant, cette approche peut permettre de définir la taille du réseau de chaleur à installer en observant jusqu'où la chaleur est généralement envoyée. Une autre solution aurait été de répertorier les systèmes de chauffage existant dans les bâtiments et d'allouer la chaleur fatale en fonction de l'impact écologique qu'aurait la réduction de chauffage sur la consommation initiale du logement.

De plus, l'absence de prise en compte de la température à laquelle la chaleur est récupérée en sortie de datacenter constitue une limitation importante. L'implémentation de systèmes de pompe à chaleur peut s'avérer nécessaire pour ajuster la température de la chaleur fatale avant son injection dans le réseau de chaleur, afin de respecter les recommandations de température.

Enfin, l'inutilisation significative de l'énergie récupérée pendant les mois d'été, lorsque les besoins de chauffage sont minimes, souligne la nécessité d'explorer d'autres applications possibles. Une analyse approfondie des postes de consommation alternatifs pourrait permettre d'optimiser davantage l'utilisation de la chaleur fatale des datacenters.

7. Bibliographie

Oróa E., Tadeob P., Salomb J, 2019, Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.012>.

Shaoun X., Zhangun Z., Fengun Y., Wangb X., 2022, A review of energy efficiency evaluation metrics for data centers, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112308>.

Jang Y., Lee D., Kim J., Ham S-H., , Kim Y., 2022, Performance characteristics of a waste-heat recovery water-source heat pump system designed for data centers and residential area in the heating dominated region, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105416>.

Huang Y., Deng Z., Chen Y., Zhang C., 2023, Performance investigation of a biomimetic latent heat thermal energy storage device for waste heat recovery in data centers, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120745>.

De Carlan F., Guiot T., Leonard J.-C., Castagna G., 2017, Data Center État des lieux, https://efficacity.com/wp-content/uploads/2017/12/170407_Rapport-Datacenter.pdf.

Euclde, 2021, Datacenters : la consommation d'énergie au cœur de nos priorités, <https://www.euclde.com/datacenter-consommation-energie/#>.

Cerema – centre de ressources pour la chaleur renouvelable et l'aménagement énergétique des territoires, 2019, Les réseaux de chaleur en France, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/les-reseaux-de-chaleur-en-france>.

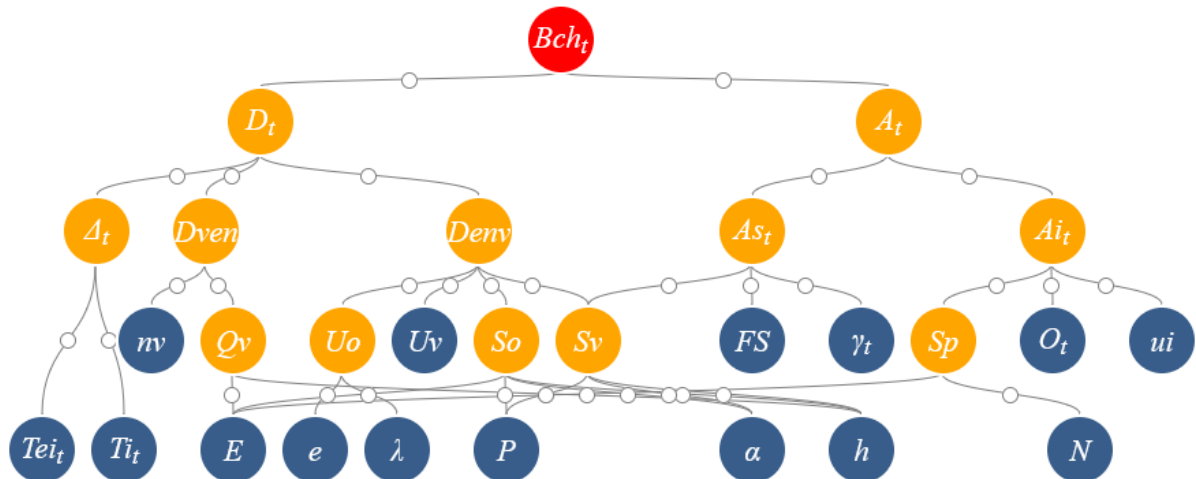
LaTribune, Marin J., 2019, La France encore trop tiède sur les réseaux de chaleur, <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/transitions-ecologiques/la-france-encore-trop-tiede-sur-les-reseaux-de-chaleur-834555.html>

8. Annexes

Annexe 1

Besoins de chauffage / refroidissement

Modélisation des étapes de calcul des besoins de chauffage ou de refroidissement des bâtiments du cas d'études.



Besoins de chauffage/refroidissement des bâtiments

$Bcht = Dt - At$ en kW

$Bcht$ 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.

En inversant le calcul, $Bcht = At - Dt$, alors on obtient les besoins de refroidissement du bâtiment.

Script :

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

Déperditions du bâtiment

$Dt = \Delta t \cdot (Denv + Dven) / 1000$ 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

$At = (Ait + Ast) / 1000$ en kW

Un apport gratuit est une source de chaleur naturelle diminuant les besoins de chauffage.
On prend en compte ici les apports solaires et de chaleur interne (produite par les occupants et les équipements électriques, 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

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

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

Déperditions par la ventilation

$D_{ven} = 0.34 \cdot Q_v \cdot n_v$ en W/°C

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

Script :
 $D_{ven} = 0.34 \cdot Q_v \cdot n_v$;

Déperditions par l'enveloppe

$D_{env} = S_o \cdot U_o + S_v \cdot U_v$ en W/°C

Les parois du bâtiments étant directement en contact avec l'extérieur, 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 :
 $D_{env} = S_o \cdot U_o + S_v \cdot U_v$;

Apports solaires

$A_{st} = S_v \cdot F_S \cdot \gamma_t / 4$ en W

Les apports solaires correspondent à la puissance reçue par le rayonnement solaire à travers les parois vitrées.

Dans ce modèle seules les parois vitrées exposées au Sud perçoivent les rayonnements, tout au long de la journée.

Script :
Ast = [];
for (var t = 0 ; t < gammat.length ; t++) { Ast.push(
 $S_v \cdot F_S \cdot \text{gammat}[t] / 4$);
}

```
}
```

Apports internes

$A_{it} = u_i \cdot S_{p,Ot}$ en W

Les apports internes sont obtenus en multipliant les apports internes unitaires par la surface de plancher et par l'occupation du bâtiment.

Script :

```
Ait = [];
```

```
for (var t = 0 ; t < 8760; t++) { Ait.push( u_i * 
```

```
Sp*Ot[t]);
```

```
}
```

Température extérieure à Paris Orly avec déphasage et amortissement

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

Température intérieure de consigne

$19 \leq T_i \leq 19$ en °C

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 assurer une certaine qualité de l'air. Les recommandations pour la santé indiquent une valeur minimale de 0.5 vol/h.

Volume à chauffer du bâtiment

$Q_v = E \cdot h$ en m³

Script :

```
Qv = E*h;
```

Conductance des parois opaques

$U_o = 1 / (e / \lambda)$ en W/m² °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.

Pour l'étude, on considère que tous les bâtiments sont isolés avec 20 cm de laine de verre d'une conductivité de 0.041W/m²°C.

Script :

```
Uo = 1 / (e/lambda);
```

```
//alert(e/lambda);
```

Épaisseur de l'isolant

$0.2 \leq e \leq 0.2$ en m

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

L'isolation avec 20cm de laine de verre est courante.

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.

Conductance des surfaces vitrées

$$1 \leq U_v \leq 1 \text{ en W/m}^2\text{°C}$$

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

°C. Pour l'étude, tous les bâtiments sont équipés de doubles vitrages d'une conductance de

$$1 \text{ W/m}^2\text{°C}.$$

Surface de paroi opaque

$$S_o = P.h.(1-\alpha)+E$$

Surface totale des parois opaques comprenant les murs (excluant les surfaces vitrées) et le toit du bâtiment.

Script :

$$S_o = P \cdot h \cdot (1 - \alpha) + E;$$

Surface vitrée

$$S_v = P.h.\alpha \text{ en m}^2$$

1/6 de la surface des parois doit être vitrée.

Script :

$$S_v = P \cdot h \cdot \alpha;$$

Facteur solaire du vitrage

$$0.4 \leq F_s \leq 0.4$$

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%.

rayonnement incident

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

Il s'agit du rayonnement solaire reçu par la paroi. 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.

Surface de plancher du bâtiment

$$S_p = E.(N+1) \text{ en m}^2$$

Il s'agit de la surface totale habitée par secteur. On obtient la surface de plancher en multipliant l'emprise au sol du bâtiment par son nombre d'étages.

Script :

$$S_p = E \cdot N;$$

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.

Apport interne unitaire

$$4 \leq u_i \leq 4 \text{ en W/m}^2$$

Les apports internes unitaires qui correspondent à la quantité spécifique de chaleur générée à l'intérieur d'un espace donné, provenant de sources internes telles que les équipements électriques, l'éclairage, les appareils ménagers, et les occupants. Pour cette étude, les apports internes unitaires ont été fixés à 4 W/m^2 , fixés par la RT2012.

Emprise au sol du bâtiment

$$0 \leq E \leq 50000 \text{ en m}^2$$

Surface du bâtiment au sol.

Périmètre du bâtiment

$$0 \leq P \leq 5000 \text{ en m}$$

Taux de vitrage

$$0.17 \leq \alpha \leq 0.17$$

La RT 2012 impose un recouvrement de surface vitrée minimum supérieur ou égale à $1/6$ de la surface habitable.

Hauteur du bâtiment

$$0 \leq h \leq 1000 \text{ en m}$$

Nombre de niveaux

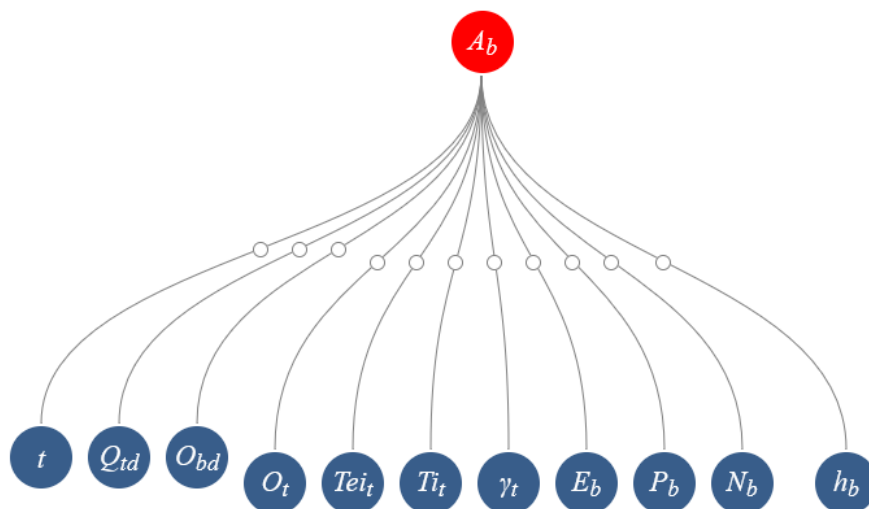
$$1 \leq N \leq 350$$

A Paris, dans le 11^{ème} arrondissement, les immeubles possèdent en moyenne entre 5 et 6 étages.

Annexe 2

Allocation ordonnancée de la puissance récupérée

Modélisation des étapes de calcul pour l'allocation de la puissance récupérée de manière ordonnée.



Allocation

Ab = fct(Qtd,Obd,γt,Ot,Eb,Teit,Tit,Pb,Ot,Nb,hb,t)

Vecteur représentant les bâtiments dont les besoins de chauffage ont été couverts par la puissance récupérée par l'un des datacenters (1,2 ou 3) à un instant t. Les bâtiment ayant un numéro 88 représentent un datacenter, qui émet de la puissance.

```
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 //al.push(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 = Qtd[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); Qtd[dc][t] = q-valueB;

break;
}
if(valueB>q){
//al.push(dc*100); Qtd[dc][t] = 0;
}
}
if(i==2){
Ab.push(0); break;
} i+=1
} //fin while
}

```

heures

$0 \leq t \leq 8760$ en h

INsant pour lequel on cherche à connaître si les besoins de chauffage des bâtiments ont été couverts par les datacenters.

Courbes de charge par DC

$1315.893438 \leq Q \leq 11609.69004$ en kW

Courbe de charge des 3 datacenters. C'est la puissance disponible au départ pour répondre aux besoins de chauffage des bâtiments. Elles ont été obtenues en calculant les besoins de refroidissement des datacenters multipliés par l'efficacité frigorifique du groupe froid.

DC le plus proche

$0 \leq O \leq 88$

Il s'agit de la matrice d'ordonnancement en fonction de la proximité à chaque datacenter pour chaque bâtiment. La première colonne représente le numéro du datacenter le plus proche (0, 1 ou 2 respectivement pour les datacenters 1, 2 et 3), qui allouera en priorité sa puissance à ce bâtiment. Si le datacenter n'a pas assez de puissance, alors c'est le deuxième datacenter le plus proche, en colonne 2, qui allouera sa puissance au bâtiment et ainsi de suite.

Occupation du bâtiment

$$0.5 \leq O \leq 1$$

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

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

Température extérieure issue de la station météo de Paris Orly.

Température de consigne

$$19 \leq T_i \leq 19 \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Température intérieure de consigne, fixée à 19°C.

rayonnement solaire incident

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

Il s'agit du rayonnement solaire reçu par la paroi. 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 du bâtiment

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

Périmètre du bâtiment

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

Nombre de niveaux du bâtiment

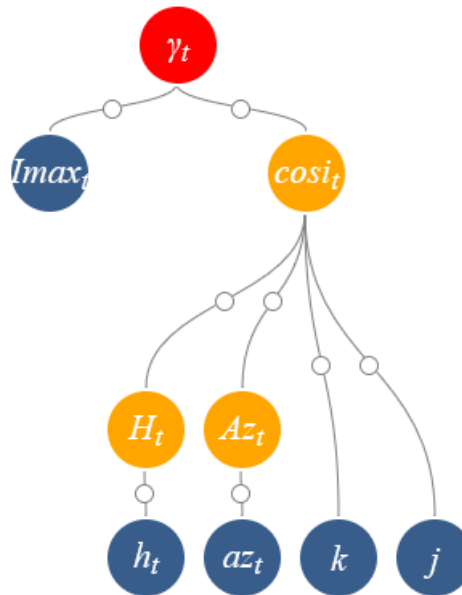
$$0 \leq N \leq 12 \text{ en niveaux}$$

Hauteur du bâtiment

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

Rayonnement solaire incident

Modélisation de calcul du rayonnement solaire incident pour les bâtiments du quartier étudié.



rayonnement incident

$\gamma_t = \cos i_t \cdot I_{max_t}$ en W/m^2

Il s'agit du rayonnement global reçu par le rayonnement solaire. Dans cette étude, il n'a pas été pris en compte le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi.

```
Script :
gammat = [];

for(var t=0; t < var value =
cosit[t]*Imaxt[t]; if (value<0) {
value =0;
}
gammat.push(value) ;

}
```

Rayonnement solaire maximal

$0 \leq I_{max} \leq 1005.7829498316097$ en W/m^2

C'est le rayonnement incident sur le plan normal au rayon solaire.

$$\cos i_t = \cos(H_t) \cdot \sin(j) \cdot \cos(Az_t - k) + \sin(H_t) \cdot \cos(j)$$

```
Script :
cosit = [];
for (var t = 0 ; t < Ht.length ; t++) {
cosit.push( cos(Ht[t])*sin(j)*cos(Azt[t]-k)+sin(Ht[t])*cos(j));
}
```

Hauteur solaire

$H_t = h_t \cdot \pi / 180$ en rad

Plus précisément, la hauteur solaire est l'angle entre la direction du soleil et un plan horizontal tangent à l'endroit d'observation.

```
Script :  
Ht=[];  
  
for (var t =0; t < Ht.length; t++) Ht.push(ht[t]*Math.PI/180);  
  
}
```

Azimut solaire

$A_z = a_z \cdot \pi / 180$ en rad

L'azimut solaire fait référence à la direction horizontale du soleil par rapport à un point d'observation donné.

```
Script :  
Azt=[];  
  
for (var t =0; t < Azt.length; t++) Azt.push(azt[t]*Math.PI/180);  
  
}
```

Hauteur solaire

$0 \leq h \leq 64.37078872502346$ en °

Azimut solaire

$-176.16286641541203 \leq a_z \leq 170.33657737270744$ en °

orientation paroi

$-3.14 \leq k \leq 3.14$ en rad

Il s'agit de l'angle de la paroi par rapport à la façade sud.

Inclinaison paroi

$-3.141592653589793 \leq j \leq 3.141592653589793$ en rad

Il s'agit de l'angle de la paroi avec le plan horizontal

Directeur de recherche :
Mindjid Maïzia

Pierre Aumont
PFE/DAE5
UIT/Réseau
2023-2024

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 :

À l'heure où le changement climatique prend une importance croissante et où le secteur numérique accroît continuellement son impact sur l'environnement. Les datacenters, lieux de stockage des données dans des serveurs, sont parmi les installations les plus énergivores de par leur fonctionnement continu. Les serveurs dégagent donc continuellement de la chaleur, qui n'est pas réutilisée et est donc appelée « chaleur fatale ». Il devient impératif d'améliorer l'efficacité énergétique des datacenters. Une solution prometteuse consiste à exploiter la chaleur fatale afin de réduire les besoins de chauffage des bâtiments environnants. Cette étude se concentre sur le calcul des besoins de chauffage d'un bâtiment afin d'obtenir les besoins de chauffage du tissu urbain, sur la mesure de la quantité de chaleur récupérable ainsi que sur les modalités d'allocation de la puissance valorisée à travers un réseau de chaleur. Une application pratique est réalisée dans le quartier entourant l'École des Mines, permettant de visualiser l'impact de cette technique sur un environnement urbain réel, en intégrant trois datacenters fictifs dans l'analyse.

Mots Clés : datacenters, chaleur fatale, besoins de chauffage, réseaux de chaleur, récupération, ordonnancement, allocation, réduction.