

Projet de Fin d'Études (PFE) 2020-2021

Datacenter et mutualisation de l'énergie

**Datacenter et mutualisation de l'énergie :
comment exploiter à l'échelle urbaine l'énergie
semi-fatale engendrée par la consommation
électrique des centres de données ?**

Directeur de recherche : Mindjid Maïzia

Auteur : Maxime Ott

2020-2021

AVERTISSEMENT

Cette recherche peut avoir 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 de cette recherche a 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 Réseaux, Espaces et Systèmes pour l'Environnement et l'Aménagement Urbain à l'École Polytechnique de l'Université de Tours. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté et conseillé. Je le remercie également pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les savoirs et méthodes indispensables à la conduite de cette recherche, ainsi que pour sa disponibilité et sa réactivité, cela même avec les contraintes imposées par la crise sanitaire. Son exigence m'a grandement stimulé et sa rigueur ainsi que son mode de pensée m'ont beaucoup inspiré.

Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance à **Lou Lorient**, **Sabrina Madin** et **Léonie Michard**, étudiantes de ma promotion, pour leur aide dans la réalisation de ce projet de recherche.

Présentation du sujet	5
Introduction.....	5
I. La consommation énergétique des centres de données, un enjeu environnemental notable	6
1) Une consommation énergétique difficile à évaluer	7
2) L'indicateur d'efficacité énergétique, un indicateur incomplet.....	8
3) Refroidissement naturel, énergies renouvelables, valorisation : comment articuler ces solutions pour minimiser l'impact environnemental des centres de données ?	9
II. Les réseaux de chaleur, un mode de chauffage d'avenir.....	9
1) Un mode de chauffage écologique	9
2) Un mode de chauffage au fonctionnement relativement simple.....	10
3) Un mode de chauffage qui possède des limites	11
III. Calcul des besoins en chaleur d'un ensemble urbain.....	12
IV. Etude de l'effet de la mutualisation de la chaleur fatale d'un centre de données sur les besoins en chaleur d'un ensemble urbain	14
1) Estimation du potentiel thermique valorisable	14
2) Calcul des besoins unitaires d'un ensemble urbain	16
3) Application de la méthode	16
Conclusion	18
Bibliographie.....	19
Annexe 1 : Définitions	22
Annexe 2 : Calcul des besoins en chauffage selon la RT1989	23
Annexe 3 : Détermination de la distribution temporelle des besoins en chauffage	31
Annexe 4 : Estimation des besoins en ECS d'un ensemble urbain.....	42
Annexe 5 : Calcul des besoins en chaleur tenant compte de la mutualisation de la chaleur fatale d'un centre de données	48
Annexe 6 : Etude de sensibilité sur la période de construction des bâtiments	56
Copyright	57

PRÉSENTATION DU SUJET

Il est avant tout nécessaire de rappeler le sujet tel qu'il est proposé par mon directeur de recherche, Monsieur Mindjid Maïzia. Son intitulé complet est le suivant :

*Datacenter et
mutualisation de
l'énergie, comment
exploiter à l'échelle
urbaine l'énergie semi-
fatale engendrée par la
consommation
électrique des centres
de données ?*

Le sujet est également précisé dans le paragraphe suivant : les consommations énergétiques des datacenters, qui représentent déjà près de 4% de la consommation électrique mondiale, croissent selon RTE de 5% par an, ce qui signifie que le niveau de ce poste aura plus que doublé dans moins de

quinze ans. Or, les consommations de ces équipements sont composées à près de la moitié de refroidissement ou de climatisation. Ce qui revient à dire que les datacenters sont avant tout des équipements qui produiront de plus en plus de chaleur à des horizons très proches. Sachant que la tendance est d'implanter de telles infrastructures en milieu urbain, quels seraient les effets si l'on décidait de profiter de ce surplus de chaleur pour satisfaire les besoins thermiques des villes ? Quelle serait alors la *trajectoire énergétique* des territoires urbains (plan climat) si l'on *mutualisait* une telle énergie ? Quid de la *courbe de charge électrique* à l'échelle territoriale.

Pour la suite je préférerai utiliser le terme « centre de données » plutôt que « datacenter » pour éviter l'anglicisme. Attention, les chiffres présentés ci-dessus sont inexacts, en effet, ils ont été revus à la baisse dans une récente étude car la consommation électrique des centres de données avait été surévaluée (Connaissance des énergies, 2020). Cela sera évidemment détaillé dans la suite de ce document.

INTRODUCTION

Aujourd'hui, plus de 4 600 centres de données existent dans le monde et consomment 1% de l'électricité mondiale, soit 205 térawattheures par an. Ils servent à organiser, traiter et stocker les données numériques du monde entier. Parce qu'ils consomment énormément d'énergie, ces centres de données ont un impact environnemental considérable : alors que le nombre de données numériques devrait quadrupler d'ici à 2025, les centres de données pourraient émettre jusqu'à 3.5% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, c'est plus que le secteur de l'aviation. Pour

éviter ce scénario, il existe trois moyens pour minimiser cette empreinte.

Dans un premier temps, l'utilisation d'énergies renouvelables : de plus en plus de centres de données fonctionnent avec des énergies renouvelables, c'est le cas par exemple du Lefdal Mine Datacenter construit dans une ancienne mine en Norvège. Il est directement alimenté par des centrales hydroélectriques et un parc éolien, ce qui en fait le premier centre de données neutre en carbone d'Europe.

Ensuite, le recours au refroidissement naturel : pour son centre de données situé à Hamina en Finlande, Google a créé un système de refroidissement fonctionnant à l'eau de mer. L'entreprise Microsoft, elle, a décidé d'immerger ses serveurs au large de l'Écosse, ce qui permet à la fois le refroidissement et la récupération de l'énergie des courants marins. Ce projet a démarré en 2015 et un centre de données test a été immergé en 2018 puis remonté à la surface en septembre 2020 pour analyser les résultats, résultats concluants d'après Microsoft qui souhaite désormais un déploiement plus massif (Microsoft, 2020).



Photo : Jonathan Banks pour Microsoft

Évidemment, il existe des technologies de refroidissement naturel plus conventionnelles, mais ce secteur mobilise de nombreuses recherches et innovations.

Enfin, la réutilisation ou valorisation de la chaleur : la chaleur dégagée par les centres de données peut

être utilisée pour subvenir à des besoins de chauffage. À Stockholm par exemple, le projet « Stockholm Data Parks », vise à installer des centres de données en centre-ville pour chauffer directement les logements (Brut, 2020 ; Masanet E. *et al.*, 2020). En France, à Bailly-Romainvilliers, la récupération de la chaleur fatale d'un centre de données permet de chauffer un centre nautique et un parc d'entreprises grâce à l'intégration d'une démarche de valorisation de l'énergie locale dans le projet d'aménagement.

C'est sur ce dernier moyen, la valorisation de la chaleur fatale, que se concentre ce projet de fin d'études. L'objectif est alors de déterminer le potentiel thermique des centres de données afin de réduire les besoins de chaleur des tissus urbains, et donc de répondre à la problématique suivante :

Le potentiel thermique des centres de données permet-il de réduire significativement les besoins en chaleur des tissus urbains ?

L'hypothèse formulée à ce stade est que le potentiel thermique des centres de données est suffisamment élevé pour le mutualiser et donc réduire les besoins de chaleur des tissus urbains.

I. LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES CENTRES DE DONNÉES, UN ENJEU ENVIRONNEMENTAL NOTABLE

Les centres de données sont des sites physiques qui hébergent les systèmes nécessaires au fonctionnement d'applications informatiques. Ils permettent de stocker et de traiter des données et sont constitués de composants informatiques – comme les serveurs, les unités de stockage de données et les équipements de réseau de communication – et d'éléments non informatiques comme les systèmes de refroidissement (ADEME,

2017). Les centres de données regroupent jusqu'à plusieurs milliers de serveurs informatiques. Un serveur est un ordinateur mis en réseau, souvent directement sur internet, pour héberger des données. Jusqu'au début des années 2000, ces serveurs étaient localisés directement dans les locaux des entreprises qui en avaient besoin, tandis que la plupart des particuliers stockaient leurs données en local sur leur ordinateur. Aujourd'hui,

tout a changé : on peut accéder à ses fichiers où que l'on soit. Par exemple, avec Google Drive ou Microsoft OneDrive, depuis son domicile, son lieu de travail, son smartphone, ... Les assistants vocaux comme Siri, Google Home ou encore Alexa fonctionnent également de cette façon : ils doivent se connecter à des serveurs distants sur internet. En fait, le stockage des données est externalisé par des sociétés spécialisées qui se chargent des aspects opérationnels et matériels. Ce qui permet aux entreprises de faciliter l'administration des serveurs en les confiant à des professionnels, et surtout de réduire les durées d'interruption lorsque des pannes se produisent. C'est ce qu'on appelle le « cloud computing », c'est-à-dire l'informatique dématérialisée (Sciences et avenir, 2018). À noter qu'il existe tout de même encore aujourd'hui des « petits » centres de données installés directement dans les locaux d'entreprises de petite taille. Ce ne sont donc pas des infrastructures indépendantes, ils font partie d'un bâtiment dont le but premier n'est pas la gestion et le stockage de données. Ainsi, dans cette étude, les centres de données seront définis comme des bâtiments indépendants et uniquement dédiés au stockage et à la gestion des données informatiques.

La multiplication et le développement de ces centres de données s'inscrit dans le contexte de la croissance du secteur du numérique. En effet, celui-ci, qui comprend également la consommation des équipements terminaux comme les ordinateurs ou les téléphones portables, des antennes, ou encore des routeurs, produisait en 2015 près de 4% des émissions de gaz à effet de serre et consommait entre 6 et 10% de la production électrique mondiale. Environ 30% de cette consommation électrique serait imputable aux centres de données (CNRS Le Journal, 2018) et leur capacité de stockage devrait encore être multipliée par quatre, par rapport à 2018, d'ici 2021 (Sciences et avenir, 2018).

1. Une consommation énergétique difficile à évaluer

Les chiffres concernant la consommation énergétique des centres de données diffèrent énormément selon les sources. En effet, il est très

difficile, pour des raisons de sécurité, d'obtenir des données précises sur ces équipements, les chiffres que l'on peut trouver dans la littérature et les différentes études se basent donc sur des estimations, estimations qui se sont récemment révélées être fausses. Par exemple, dans un rapport intitulé *"How to deal with technical and economic constraints to recover waste heat in France?"* (Leang S., Berthou M., Jumel S., 2017), on estimait que la consommation des centres de données en France en 2013 représentait sept térawattheures d'électricité – principalement destinée à l'alimentation des serveurs et au refroidissement – et que plus de la moitié de cette consommation, 3.6 térawattheures, était gaspillée car rejetée sous forme de chaleur sans être valorisée, ce qui représentait 3% de l'énergie thermique gaspillée en France la même année. En 2018 dans Sciences et avenir, on estimait cette fois que la consommation des centres de données français s'élevait à environ trois térawattheures en 2015, soit davantage que la consommation électrique de la ville de Lyon selon l'Union française de l'électricité. Enfin, selon RTE, les consommations énergétiques des centres de données représentaient déjà près de 4% de la consommation électrique mondiale en 2018 et auraient une croissance annuelle de 5%.

Mais une étude publiée en mars 2020, intitulée *"Recalibrating global data center energy-use estimates"* (Masanet E. et al., 2020) permet de nuancer les chiffres alarmants des dix dernières années, qui ont en fait été surévalués. Selon cette étude, en 2010, à l'échelle mondiale, les centres de données consommaient 194 térawattheures d'électricité. En 2018, la consommation est passée à 205 térawattheures. Cela représente une légère hausse de 6%. Pourtant, dans le même temps, l'activité des centres de données a augmenté de 550% et, finalement, leur consommation représente aujourd'hui « seulement » 1% de l'énergie consommée à l'échelle mondiale. Cette différence entre cette étude et les chiffres présentés depuis plusieurs années s'explique simplement par le fait que, selon ses auteurs, les analystes avaient extrapolé le lien entre la croissance de l'informatique dématérialisée et la consommation d'énergie des centres de données : les progrès d'efficacité énergétique n'auraient pas

été mesurés à leur juste niveau au cours des dernières années. Par exemple, la puissance nécessaire pour stocker un téraoctet de données aurait été divisée par neuf en dix ans. La consommation d'électricité des centres de données aurait ainsi été peu à peu sensiblement découplée de la croissance du volume de données traitées au sein de ces installations. Par ailleurs, les petits centres de données, majoritaires en 2010, ont laissé la place à des installations de grande taille, appelés centres de données hyperscale et à un recours croissant à l'informatique dématérialisée permettant de « solliciter les centres de données à la pointe de l'efficacité énergétique ». Au total, « l'intensité énergétique des centres de données dans le monde aurait diminué de 20% par an depuis 2010, une progression spectaculaire par rapport à d'autres grands secteurs » (Connaissance des énergies, 2020).

Il est également difficile de connaître le nombre exact de centres de données dans le monde et en France. Il y en aurait à l'heure actuelle environ 4600 dans le monde (Brut, 2020), dont près de 2500 en Europe : 429 au Royaume-Uni, 428 en Allemagne, 252 en France, 251 aux Pays-Bas, 50 en Irlande, ... (Vox Pop – ARTE, 2020). Selon Global Security Mag qui publie chaque année une cartographie des centres de données français, en 2020, la majeure partie des 252 centres de données français, 215 – dont 28 sont en construction – soit presque les trois quarts, sont des centres de données neutres, c'est-à-dire qu'ils n'appartiennent pas à un opérateur de service mais en abritent de nombreux. Pour ces 215 centres de données, on dispose généralement d'une localisation relativement précise, au moins le nom de la commune sur laquelle ils sont ou vont être implantés. À l'échelle nationale, c'est l'Île-de-France qui concentre le plus grand nombre de centres de données, 76 dont sept en construction (Global Security Mag, 2020). On remarque par ailleurs que plus de la moitié des centres de données dans le monde se situent en Europe. En effet, leur refroidissement représente aujourd'hui 30 à 40% de leur consommation totale en électricité lorsque l'on utilise des climatiseurs plutôt que des technologies de refroidissement

naturel (Vox Pop – ARTE, 2020). Pour maximiser le refroidissement naturel et faire des économies, les géants de l'internet comme Facebook ou Google ont délocalisé leurs serveurs dans des pays nordiques comme la Suède (Sciences et avenir, 2018).

2. L'indicateur d'efficacité énergétique, un indicateur incomplet

Depuis quelques années, le développement de méthodes de refroidissement naturel permet donc de limiter le recours aux systèmes de refroidissement classiques. Ce développement est largement soutenu par les géants du web car il permet d'améliorer l'indicateur d'efficacité énergétique, en anglais Power Usage Effectiveness ou PUE, qui est aujourd'hui l'indicateur le plus couramment utilisé pour qualifier l'efficacité énergétique d'un centre de données (Wikipédia, 2020). Ainsi, Google par exemple peut afficher un PUE moyen inférieur à 1.1, ce qui signifie que la quasi-totalité de l'énergie consommée par le centre de données l'est par les équipements informatiques. Mais cet indicateur est de plus en plus critiqué car il est incomplet, il ne prend notamment pas en compte la réutilisation éventuelle de la chaleur produite par les serveurs. À ce titre, l'ADEME préconise justement en priorité « la valorisation des calories rejetées par les centres de données [...] pour d'autres projets à son voisinage [...] ». Le recours au géo-cooling (technique de refroidissement naturel, *nda.*) ne sera envisagé que s'il est impossible de trouver une valorisation des calories perdues du centre de données vers des clients voisins, car l'efficacité énergétique globale du centre de données en énergie primaire est souvent moins bonne avec le géo-cooling que dans le cas de la valorisation locale de la chaleur » (ADEME, 2017). Cela permet de souligner un aspect important : le refroidissement naturel, bien que permettant de ne pas dépenser de l'énergie en climatisation et donc globalement de faire des économies d'énergie, diminue l'efficacité énergétique d'un centre de données. Il serait donc finalement plus efficace d'un point de vue énergétique de valoriser la chaleur produite par les serveurs plutôt que d'avoir recours à des

techniques de refroidissement naturel. Surtout, cela permettrait de ne pas gaspiller la chaleur produite par les serveurs mais plutôt de l'utiliser pour subvenir à d'autres besoins et donc diminuer la quantité d'énergie thermique à produire pour d'autres secteurs. Le PUE peut donc être contre intuitif puisqu'il ne reflète pas l'efficacité énergétique réelle. Le DCEM, pour Data Centre Energy Management, corrige les défauts du PUE en prenant en compte non seulement la consommation d'énergie et le coefficient d'efficacité énergétique, mais aussi la part des énergies réutilisées et renouvelables (Wikipédia, 2020). Cependant, ce n'est malheureusement pas ce dernier qui est aujourd'hui privilégié par les acteurs du domaine, principalement pour des raisons économiques car il serait plus coûteux et plus difficile de mettre en place des technologies de récupération de la chaleur fatale que des technologies de refroidissement naturel.

3. Refroidissement naturel, énergies renouvelables, valorisation : comment articuler ces solutions pour minimiser l'impact environnemental des centres de données ?

En résumé, les centres de données représentent une part non négligeable de la consommation d'énergie à l'échelle mondiale, 1% (Masanet E. *et al.*, 2020), et de l'énergie thermique gaspillée. Donc, dans un contexte où l'on sait que le nombre de centres de données augmente et va continuer d'augmenter dans les prochaines années pour suivre l'augmentation continue des flux de données dans le monde, et même si la consommation d'énergie n'est pas proportionnelle à leur nombre, il est nécessaire de prendre en compte cette problématique. Pour limiter l'impact de ces centres de données sur l'environnement, il faut alors évidemment favoriser l'utilisation d'énergies renouvelables, mais il faut d'abord miser sur leur efficacité énergétique et sur la récupération et la valorisation de l'énergie thermique produite par les serveurs, cela pour minimiser à la fois leur consommation et le gaspillage. Enfin, dans le cas où la récupération n'est pas possible ou pas suffisante, il faut favoriser les techniques de refroidissement naturel pour éviter d'avoir à produire de l'énergie pour cela.

II. LES RÉSEAUX DE CHALEUR, UN MODE DE CHAUFFAGE D'AVENIR

Les réseaux de chaleur, ou chauffages urbains, sont essentiels à la récupération et à la valorisation de la *chaleur fatale* (définition en annexe 1) des centres de données car ils permettent d'acheminer cette chaleur jusqu'aux bâtiments voisins. Ce sont ces réseaux qui permettent de mutualiser l'énergie, c'est-à-dire de partager la chaleur produite à l'échelle d'un quartier ou d'une ville par exemple, et cela en fonction des différents besoins. Il apparaît donc nécessaire d'apporter des précisions sur ceux-ci.

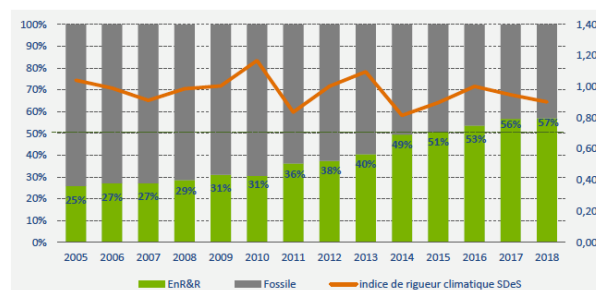
1. Un mode de chauffage écologique

Ces réseaux existaient évidemment bien avant l'apparition des centres de données. En effet, les premiers sont apparus en Europe sous l'Empire romain, ils prenaient alors la forme de circuits d'eau chaude desservant des bains publics et des serres. On en retrouve également au Moyen-Âge avec par exemple le réseau géothermique de Chaudes-Aigues construit au 19^{ème} siècle (Cerema, 2019). Mais c'est seulement au cours du 20^{ème}

siècle qu'ils se sont plus largement développés en France : avant 1950 dans de grandes villes aux besoins de chaleur importants comme Paris, Strasbourg, ou encore Grenoble. Puis dans les années 1950 et 1970 grâce à leur intégration dans des politiques d'urbanisation, et dans les années 1980 à la suite des chocs pétroliers. Depuis la fin des années 2000, ces réseaux sont perçus comme un outil de mobilisation des énergies renouvelables, permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, dont un tiers provient de la production de chaleur pour le résidentiel et le tertiaire (Cerema, 2019). Depuis quelques années, le développement des réseaux de chaleur est largement encouragé par le gouvernement. En effet, en 2015, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte introduit l'objectif de multiplier par cinq par rapport à 2012 la quantité de chaleur et de froid renouvelable véhiculée par les réseaux d'ici 2030. Afin d'atteindre cet objectif, la loi introduit également les principales pistes de développement : la réalisation de nouveaux réseaux lorsque cela est techniquement et économiquement viable, l'extension, la densification ou l'interconnexion des réseaux existants, par exemple à l'occasion de projets d'aménagement urbain, et le développement des énergies renouvelables et de récupération (ENR&R) afin de substituer les énergies fossiles au sein des réseaux existants.

Aujourd'hui, on dénombre plus de 760 réseaux de chaleur en France (Observatoire des réseaux de chaleur et de froid, 2020), majoritairement situés dans les grands centres urbains, avec une longueur cumulée de plus de 5 000 kilomètres et 25 térawattheures de livraison de chaleur chaque année (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019). Cette chaleur alimente à 91% des bâtiments résidentiels et tertiaires : ce sont 2,4 millions équivalents-logements qui sont desservis par ces réseaux, soit plus de 38 000 bâtiments raccordés. Le développement des réseaux s'accompagne d'un verdissement rapide de leur mix énergétique, de nombreux petits réseaux de chaleur ont notamment été créés dans des villes moyennes et des communes de moins de 5 000 habitants avec l'essor des écoquartiers. Ces petits réseaux utilisent principalement des chaufferies

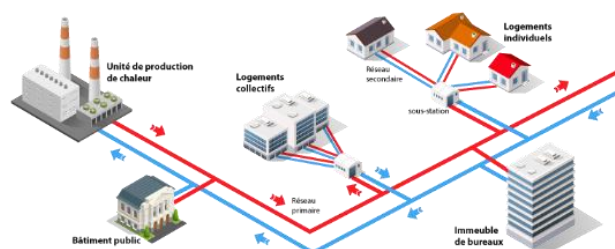
biomasse : en 2017 elles représentent 22% du mix énergétique, contre seulement 1% en 2005. La part de la chaleur provenant de l'incinération des déchets a également progressé, passant d'environ 13% en 2005 à 25% en 2017. Finalement, la part des ENR&R dans le mix énergétique des réseaux de chaleur est passée de 25% en 2005 à 57% en 2018, ce qui en a fait le mode de chauffage émettant le moins de gaz à effet de serre aujourd'hui. En effet, ces équipements n'émettent que 116 grammes de CO₂ par kilowattheure en moyenne, contre 234 grammes par kilowattheure pour le gaz par exemple (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019 ; Observatoire des réseaux de chaleur et de froid, 2020). Le graphique ci-dessous montre l'évolution des taux d'ENR&R dans les réseaux de chaleur de 2005 à 2018.



Évolution des taux d'ENR&R dans les réseaux de chaleur de 2005 à 2018 (Observatoire des réseaux de chaleur et de froid, 2020)

2. Un mode de chauffage au fonctionnement relativement simple

Un réseau de chaleur est un système permettant de fournir de la chaleur à plusieurs usagers en la produisant de manière centralisée puis en la distribuant grâce à des canalisations dédiées. Tout réseau de chaleur comporte une ou plusieurs unités de production de chaleur, un réseau de distribution primaire dans lequel la chaleur est transportée par un fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude), et un ensemble de sous-stations



d'échange à partir desquelles les bâtiments sont desservis par un réseau de distribution secondaire. L'unité de production de chaleur peut être, par exemple, une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM), une chaufferie alimentée par un combustible comme le gaz ou le bois, ou encore une centrale de géothermie profonde. Généralement un réseau comporte une unité principale qui fonctionne en continu et une unité d'appoint utilisée en renfort pendant les heures de pointe, ou en remplacement lorsque cela est nécessaire. Le réseau de distribution primaire est composé de canalisations dans lesquelles la chaleur est transportée par un fluide. Un circuit aller transporte le fluide chaud issu de l'unité de production et un circuit retour ramène le fluide qui s'est délesté de ses calories au niveau de la sous-station d'échange. Le fluide est alors à nouveau chauffé par la chaufferie centrale, puis renvoyé dans le circuit. La conception du réseau vise à assurer une densité thermique linéaire, c'est-à-dire le nombre de bâtiments raccordés par kilomètre de conduite posée, aussi élevée que possible afin de permettre la viabilité économique du réseau car le coût d'investissement est fortement lié au linéaire de conduite et les recettes au nombre d'usagers. Les sous-stations d'échange, situées en pied d'immeuble, permettent le transfert de chaleur par le biais d'un échangeur entre le réseau de distribution primaire et le réseau de distribution secondaire qui dessert un immeuble ou un groupe d'immeubles. La chaleur peut être générée à partir de diverses sources d'énergie. Les énergies fossiles telles que le gaz ou le fioul qui produisent de la chaleur par leur combustion, elles sont fortement émettrices de gaz à effet de serre même si elles sont bien adaptées à la fourniture de chaleur pendant les pointes. Mais aussi les énergies renouvelables comme la biomasse (bois, résidus agricoles, cultures énergétiques, ...) qui produit de la chaleur par combustion, ou la géothermie profonde qui permet la récupération de la chaleur de nappes aquifères via un échangeur thermique. Et enfin l'énergie de récupération telle que la chaleur fatale dégagée lors de l'incinération des déchets dans les UIOM ou celle issue de sites industriels (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020).

3. Un mode de chauffage qui possède des limites

Le fonctionnement des réseaux de chaleur est donc plutôt simple, mais un élément reste déterminant : la température du fluide caloporteur qui circule dans le circuit primaire. Ainsi, on distingue généralement trois types de réseaux. Le réseau « eau chaude » a une température comprise entre 60 et 110°C, il est généralement prévu pour les immeubles d'habitation et de bureaux, ou les hôpitaux et établissements industriels qui ne consomment pas de vapeur. Le réseau « eau surchauffée » a une température comprise entre 110 et 180°C, il est principalement utilisé dans les réseaux de grande taille qui alimentent des bâtiments avec des besoins de températures élevées comme par exemple des laveries, des abattoirs, ou des industries textiles. Enfin, le réseau « vapeur » a une température comprise entre 200 et 300°C, il est présent essentiellement pour la fourniture de chaleur industrielle et son utilisation est de plus en plus limitée (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020). On remarque alors que la température minimale de ces réseaux est de 60°C, et cela constitue une limite technique à la valorisation de la chaleur des centres de données pour le chauffage urbain. En effet, la température de la chaleur récupérable pour un centre de données est comprise entre 25 et 50°C (Sciences et avenir, 2018), elle est donc trop basse pour être compatible avec ces réseaux de chaleur traditionnels et doit être augmentée. Par exemple, dans un quartier ancien d'Amsterdam, la chaleur issue d'un centre de données est utilisée pour chauffer une piscine et des logements. Ce centre de données permet de couvrir 80% de la consommation de 5000 foyers, mais pour cela la température doit être augmentée de 30 à 80°C (Vox Pop – ARTE, 2020). À Paris, le réseau de chaleur principal est un réseau à 94% vapeur (Via Sèva, 2020), l'écart de température est donc encore plus important, ce qui rend impossible la valorisation de la chaleur issue des centres de données avec les technologies actuelles.

Cependant, cette limite tend à s'atténuer depuis quelques années avec le développement de nouvelles technologies. En effet, la nouvelle génération des réseaux de chaleur et de froid fait appel aux développements technologiques de la basse température (Sciences et avenir, 2018) couplée à de nouvelles techniques et matériaux de construction qui permettent de réduire à la fois la consommation des nouveaux bâtiments et les pertes de distribution, c'est-à-dire les pertes qui se produisent lors de la circulation de la chaleur dans les canalisations (Chiche S., Colombert M., Diab Y., 2016), mais aussi de la prédiction et de l'ajustement rapide à la demande, de la décentralisation des sources de production avec les boucles d'eau tempérée, et de l'intégration du numérique. Tout cela permet de rendre

exploitables plus facilement d'autres sources de chaleur par les réseaux, dont la chaleur issue du fonctionnement des centres de données, mais également la géothermie peu profonde ou encore la chaleur prélevée dans les eaux usées. Ces systèmes font appel à des pompes à chaleur qui permettent d'extraire l'énergie de la source pour la transférer au réseau (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020), mais dont l'efficacité dépend des conditions de fonctionnement, comme la température d'entrée et de sortie, le liquide frigorigène utilisé et le coefficient de performance (COP). Les principaux freins techniques deviennent alors ceux liés à la technologie de valorisation par pompe à chaleur (ADEME, 2017).

III. CALCUL DES BESOINS EN CHALEUR D'UN ENSEMBLE URBAIN

Pour pouvoir déterminer l'impact de la mutualisation de la chaleur fatale produite par un centre de données sur les besoins en chaleur d'un ensemble urbain, il faut d'abord calculer ces besoins. Les besoins en chaleur d'un ensemble urbain sont constitués des besoins en chauffage et des besoins en eau chaude sanitaire (ECS).

Pour calculer les besoins en chauffage, j'ai réalisé deux systèmes logiques. Le premier (Annexe 2) est basé sur la Réglementation Thermique 1989 (RT1989) et permet de calculer les besoins unitaires en chauffage d'un ensemble urbain sur une période donnée, la quantité d'énergie consommée durant une année rapportée à la surface habitable totale de l'ensemble urbain par exemple. Le second système logique (Annexe 3) permet de déterminer la distribution temporelle des besoins en chauffage d'un ensemble urbain à partir de la définition géométrique et des caractéristiques des bâtiments qui le constituent. Le croisement de ces deux informations, besoins sur une période donnée et distribution temporelle des besoins, permet théoriquement de déterminer

la dynamique des besoins en chauffage d'un ensemble urbain. Cependant, ces deux systèmes logiques se limitent à des applications théoriques (des ensembles urbains définis par des polygones non mitoyens générés de manière aléatoire). Pour pouvoir effectuer des calculs sur des ensembles urbains réels, ou théoriques mais avec des définitions géométriques plus cohérentes, j'utiliserai l'application « Typologie énergie » du logiciel Toaster Integral développé par mon directeur de recherche, Monsieur Mindjid Maïzia. En effet, ce logiciel est basé sur la même démarche et des calculs similaires à ceux appliqués dans mes systèmes logiques, mais va plus loin en permettant d'effectuer les calculs directement à partir d'un fichier de forme extrait d'un Système d'Information Géographique (SIG) contenant la définition géométrique des bâtiments, leur hauteur et leur période de construction. La définition géométrique et la hauteur des bâtiments sont des données disponibles dans la BD TOPO de l'IGN. La période de construction peut être soit une donnée soit une estimation.

N'ayant pas trouvé de base de données sur d'autres bâtis que le bâti parisien, j'ai décidé de réaliser une estimation. Celle-ci peut être faite de plusieurs manières selon le cas d'étude, je pourrais par exemple faire l'hypothèse que plus des bâtiments sont situés au centre d'une ville et plus ils sont anciens, que tous les bâtiments d'un ensemble urbain ont été construits ou réhabilités à la même période si je possède des informations qui vont dans ce sens, que la période de construction peut suivre une certaine distribution calculée pour un territoire donné, ou encore que la période de construction des bâtiments peut être affectée de manière aléatoire. C'est cette dernière hypothèse que j'ai décidé d'utiliser. En effet, en dehors de cas spécifiques comme de grands projets d'aménagement récents de nouveaux quartiers ou lotissement (cas pour lesquels on pourrait très certainement trouver des données relativement précises sur la période de construction), on peut facilement imaginer que les bâtiments d'un quartier ont été construits ou réhabilités à des périodes très différentes sans forcément de lien entre ces périodes de construction et de réhabilitation. Sur le bâti parisien par exemple, on observe, en zoomant sur un quartier de manière aléatoire, que les périodes de construction et de réhabilitation ne suivent pas de loi particulière (une grande partie des bâtiments sont dans la catégorie « Avant 1800 » mais une incertitude demeure sur les données car de très nombreuses valeurs sont égales à zéro dans le fichier exploité) :



Zoom sur le bâti d'un quartier parisien (source : apur)

Afin de confirmer la validité de cette hypothèse, j'ai réalisé une étude de sensibilité sur la période de construction. Pour cela, j'ai calculé les besoins unitaires d'un ensemble urbain en affectant à chaque bâtiment une période de construction de manière aléatoire (les différentes périodes prises en compte ainsi que les caractéristiques correspondantes pour les bâtiments sont résumées dans le tableau 1 en annexe 6). En effectuant le calcul quarante fois, j'ai obtenu un coefficient de variation de 2.40% pour un intervalle de résultats allant de 295 à 327 kWh.m⁻².an⁻¹ (le tableau 2 en annexe 6 regroupe les résultats obtenus). Le coefficient de variation étant très faible, le résultat du calcul des besoins est donc très peu sensible à la période de construction des bâtiments et l'hypothèse selon laquelle celle-ci peut être affectée de manière aléatoire est validée. Pour l'appliquer, il faudra cependant porter une attention particulière au nombre de bâtiments qui constituent l'ensemble urbain. En effet, si celui-ci est trop faible alors il est possible que la variabilité induite par les périodes de construction ne soit pas effacée dans le résultat.

Pour calculer les besoins en ECS d'un ensemble urbain, j'ai réalisé un système logique basé sur l'incertitude des horaires de début et de la durée des usages individuels (Annexe 4). Le calcul est donc effectué à partir d'une matrice regroupant les différents usages – chaque usage étant défini par une puissance appelée pendant une durée sur une plage horaire – et du nombre de bâtiments constituant l'ensemble urbain.

Le calcul des besoins en chaleur d'un ensemble urbain n'étant pas le cœur de ce PFE, j'ai décidé de ne pas plus détailler cela dans le corps du texte. Cependant, les trois systèmes logiques évoqués dans cette partie sont détaillés en annexes.

IV. ÉTUDE DE L'EFFET DE LA MUTUALISATION DE LA CHALEUR FATALE D'UN CENTRE DE DONNÉES SUR LES BESOINS THERMIQUES D'UN ENSEMBLE URBAIN

L'objectif de cette partie est de calculer l'impact de la mutualisation de la chaleur fatale d'un centre de données sur les besoins thermiques d'un ensemble urbain afin de répondre à la question « Le potentiel thermique des centres de données permet-il de réduire significativement les besoins en chaleur des tissus urbains ? ».

1. Estimation du potentiel thermique valorisable

Le potentiel thermique valorisable est la quantité d'énergie fatale que l'on peut valoriser grâce au réseau de chaleur.

Consommation du matériel informatique et potentiel thermique récupérable

Le potentiel thermique valorisable dépend d'abord du potentiel thermique récupérable. La consommation première d'un centre de données est celle de son activité principale : l'informatique. Toute l'énergie utile au fonctionnement de l'informatique est rejetée dans le local, la « salle IT », sous forme d'apport thermique. Ce qui représente l'énergie récupérable. Pour déterminer la quantité de chaleur fatale dégagée par les équipements informatiques d'un centre de données, il suffit donc de déterminer la quantité d'énergie consommée par ce matériel.

Comme expliqué dans la première partie de ce PFE, il est très difficile pour des raisons de cybersécurité de connaître de manière exacte les caractéristiques techniques d'un centre de données. Il est cependant possible d'estimer de plusieurs façons la puissance nominale appelée par le matériel informatique d'un centre de données. J'en ai retenu deux d'entre elles.

En connaissant le nombre de salles IT, le nombre de blocs par salle, le nombre d'armoires par bloc, et la puissance nominale moyenne par armoire. Un bloc de centre de données est un groupe d'armoires informatiques combinées avec l'infrastructure énergétique et de refroidissement

qui est déployé comme une unité. Les salles sont planifiées par avance pour un certain nombre de blocs, qui peuvent être déployés ou mis à niveau séparément dans le temps. Un bloc contient plusieurs armoires informatiques (ou armoires de brassage ou baies de brassage ou armoire réseau) qui contiennent elles-mêmes les différents éléments informatiques (serveurs, onduleurs, ...) (Rasmussen N., 2012).

En connaissant la surface de la ou des salles IT – que l'on peut aussi estimer à partir de la surface totale du centre de données, Efficacy (De Carlan F. *et al.*, 2017) considère par exemple que la surface IT représente 30% de la surface totale d'un centre de données – et le niveau TIER (souvent communiqué par les gestionnaires de centre de données) qui permet de connaître la densité énergétique permise (puissance IT nominale unitaire en $W.m^{-2}$). La certification TIER est une certification conception, construction et durabilité opérationnelle délivrée par l'organisme Uptime Institute. Cette certification est déclinée en quatre niveaux, sous forme de « Tier de I à IV ». La plupart des centres de données se positionnent par rapport à cette certification, même sans être certifiés, ce qui permet d'avoir une idée relativement précise de la densité énergétique permise (De Carlan F. *et al.*, 2017) :

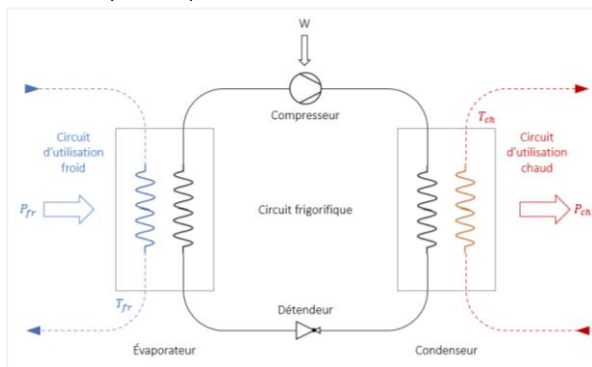
Niveau TIER	I	II	III	IV
Durée annuelle moyenne d'indisponibilité tolérée	28,8 heures	22 heures	96 minutes	24 minutes
Niveau de redondance	Pas ou peu de redondance	Redondance des équipements importants	Redondance passive des voies d'alimentation et de refroidissement	Redondance active des voies d'alimentation et de refroidissement
Maintenance sans indisponibilité	Non	Non	Oui	Oui
Résistance à toute défaillance	Non	Non	Non	Oui
Densité énergétique permise	$\geq 250 W/m^2$	$\geq 500 W/m^2$	$\geq 1\,000 W/m^2$	$\geq 1\,500 W/m^2$

*Niveau TIER et caractéristiques correspondantes (De Carlan F. *et al.*, 2017)*

À noter qu'au cours de son étude, Efficacy (De Carlan F. *et al.*, 2017) a retenu $500 W.m^{-2}IT$ comme ratio qui représente la puissance utile d'une salle serveur, quelle que soit sa taille.

Type de réseau de chaleur et potentiel thermique valorisable

Ensuite, le potentiel thermique valorisable dépend du type du réseau de chaleur auquel le centre de données est raccordé. En effet, il existe aujourd'hui quatre types de réseaux de chaleur : les réseaux basse température à une température inférieure à 60°C, les réseaux eau chaude à une température comprise de 60 à 110°C, les réseaux eau surchauffée à une température comprise de 110 à 180°C, et les réseaux vapeur à une température autour de 200 à 300°C. Mais la température de la chaleur récupérable pour un centre de données est comprise entre 25 et 50°C (Sciences et avenir, 2018). On peut alors utiliser une ou plusieurs pompes à chaleur pour augmenter la température, mais celles-ci sont limitées à une température de sortie de 85°C, ce qui réduit le nombre de réseaux de chaleur éligibles à la récupération de la chaleur fatale d'un centre de données. Pour les réseaux éligibles, la température du réseau a un impact sur la quantité d'énergie valorisable. En effet, pour récupérer la chaleur fatale, il faut impérativement utiliser une machine frigorifique. Le fonctionnement d'une machine frigorifique est représenté par le fonctionnement d'un système thermodynamique :



Avec P_{fr} la puissance de la source froide, P_{ch} la puissance de la source chaude, W la puissance appelée par le compresseur, T_{fr} la température cible de l'eau glacée (7°C en général pour un système de production par groupe froid eau-eau (De Carlan F. *et al.*, 2017)), et T_{ch} la température cible de l'eau dans le réseau de chaleur.

D'après le théorème de Carnot, l'efficacité d'une machine frigorifique réversible est :

$$e_{frigo,rev} = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}$$

Les températures sont exprimées en Kelvin (K). $e_{frigo,rev}$ est la valeur maximale de l'efficacité d'une machine frigorifique fonctionnant avec ces

sources. Une machine frigorifique fonctionnant sur un cycle non réversible a une efficacité plus faible que $e_{frigo,rev}$. D'après cette formule, l'efficacité est plus grande quand les températures des deux sources sont plus proches.

Pour rendre le résultat plus cohérent, je calcule un coefficient a tel que l'efficacité d'une machine frigorifique qui passe de $T_{fr} = 280,15 \text{ K}$ (7°C) à $T_{ch} = 308,15 \text{ K}$ (35°C) soit égale à 4, valeur courante selon Efficacy (De Carlan F. *et al.*, 2017).

$$J'ai donc e_{frigo} = a * \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}},$$

$$\text{avec } a = 4 * \frac{308,15 - 280,15}{280,15} = 0,3998.$$

On définit également l'efficacité d'une machine frigorifique par $e_{frigo} = \frac{P_{fr}}{W}$, P_{fr} étant la puissance intéressante (ou puissance « gratuite ») et W la puissance couteuse. On a donc $W = \frac{P_{fr}}{e_{frigo}}$ et, d'après le principe de conservation de l'énergie, $P_{ch} = P_{fr} + W$. Cela permet de calculer la puissance en sortie du groupe frigorifique (P_{ch}) – c'est donc la puissance valorisable – connaissant la puissance nominale appelée par le matériel informatique (P_{fr}), la température cible du réseau d'eau glacée (T_{fr}) et la température cible du réseau de chaleur (T_{ch}).

Dynamique des besoins en chauffage

En l'absence de dispositif de stockage, le potentiel thermique valorisable dépend également de la dynamique des besoins en chauffage de l'ensemble urbain concerné. En effet, un centre de données fonctionne en continu 24h/24 mais les besoins en chauffage évoluent au cours de la journée et des saisons. Ainsi, lorsque la puissance en sortie du groupe frigorifique est inférieure ou égale à la puissance appelée par les besoins, on peut valoriser toute la chaleur fatale (la puissance valorisable est alors égale à la puissance en sortie du groupe frigorifique), mais lorsque la puissance appelée par les besoins passe en dessous de la puissance utile du centre de données, alors on ne peut plus valoriser la chaleur fatale supplémentaire sans la stocker (la puissance valorisable est alors égale à la puissance appelée par les besoins en chauffage).

2. Calcul des besoins unitaires d'un ensemble urbain

Enfin, les besoins en chauffage sont égaux à la quantité d'énergie nécessaire restante pour répondre aux besoins de l'ensemble urbain après valorisation de la chaleur fatale du centre de données. Pour ne pas fausser le résultat sur les besoins unitaires (B_u), j'ajoute le surplus de consommation nécessaire pour l'augmentation de température par rapport à la référence (W_0) aux besoins en chauffage (B). Je n'ajoute pas la totalité de la consommation du compresseur car le centre de données fonctionne en continu 24h/24 donc il a besoin d'être refroidi tout le temps. La référence mentionnée ci-dessus est donc la puissance nécessaire lorsque $T_{fr} = 280,15\text{ K}$ (7°C) et $T_{ch} = 308,15\text{ K}$ (35°C), valeurs courantes sans récupération de la chaleur fatale selon Efficacity (De Carlan F. *et al.*, 2017).

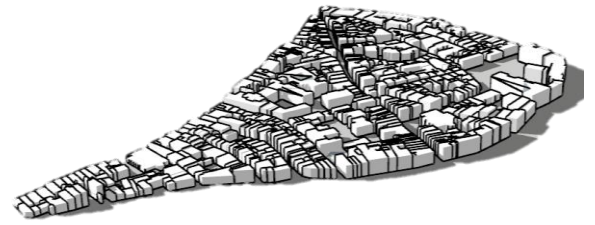
Remarque : si on dépense plus que ce que l'on gagne en valorisant la chaleur fatale, alors il est inutile de valoriser cette chaleur. Donc si $W - W_0 > P_{v_t}$, la puissance valorisable et la puissance supplémentaire de fonctionnement du compresseur sont donc nuls.

Pour répondre à la question « Le potentiel thermique des centres de données permet-il de réduire significativement les besoins en chaleur des tissus urbains ? », j'ai réalisé à partir des informations précédentes un système logique (Annexe 5) permettant de calculer les besoins unitaires d'un ensemble urbain en fonction des besoins en chauffage calculés grâce à l'application Toaster Energy, des besoins en ECS, du potentiel thermique récupérable et de la température du réseau de chaleur (qui traduit son type). Il suffit donc d'exécuter une première fois ce système logique avec un potentiel thermique récupérable nul (c'est-à-dire en mettant la variable « Puissance du centre de données » à zéro) puis avec le potentiel thermique récupérable du cas étudié, et de comparer les deux résultats.

3. Application de la méthode

Application à un ensemble urbain

Afin d'illustrer les résultats de la méthode détaillée dans les paragraphes précédents, j'ai décidé d'appliquer les calculs à un premier ensemble urbain. Pour cela, j'ai considéré l'ensemble ci-dessous constitué de 822 bâtiments (surface



habitable de 177 km^2) et fait l'hypothèse que tous les bâtiments ont été construits entre 2000 et 2009. Les caractéristiques des bâtiments pour la période susmentionnée sont résumées dans le tableau 1 de l'annexe 6.

J'ai donc calculé les besoins en chauffage grâce à l'application Toaster Energy puis importé le résultat dans mon système logique. Pour les besoins en ECS, j'ai considéré le cas théorique le plus défavorable en me basant sur les informations du cours : 1875 kWh.an^{-1} par bâtiment, soit 1542 MWh.an^{-1} pour l'ensemble. Pour la puissance du centre de données, j'ai considéré une puissance de 2 MW , ce qui pourrait correspondre, selon Efficacity (De Carlan F. *et al.*, 2017), à un centre de données d'une surface totale d'environ $13\,500\text{ m}^2$.

Sans récupération de la chaleur fatale du centre de données, les besoins en chaleur de l'ensemble urbain s'élèvent à $101\text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Avec récupération de la chaleur fatale, les résultats obtenus en fonction du type de réseau de chaleur sont résumés dans le graphique ci-dessous :

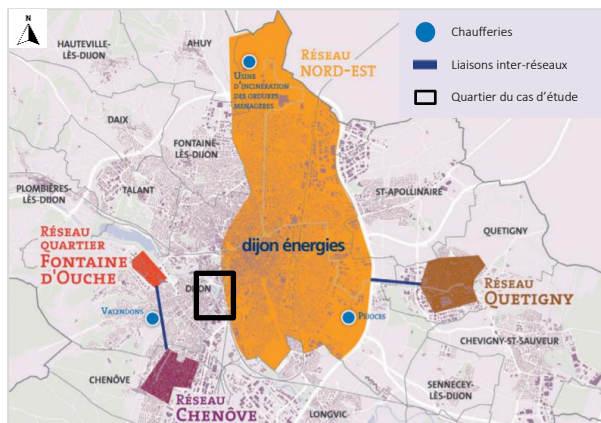


Pour cette application, la réduction des besoins en chaleur de l'ensemble urbain est comprise entre 53% et 75%, ce qui est très significatif. Cela permet donc de montrer que, pour cette première application, le potentiel thermique d'un centre de données de 2 MW est suffisamment élevé pour le mutualiser et réduire les besoins de chaleur du tissu urbain, et cela sans même avoir à stocker de l'énergie.

Ici, l'effet de la température du réseau est aussi très significatif, en effet, le gain d'un réseau basse température à 35°C par rapport à un réseau eau chaude à 85°C n'est pas négligeable : les besoins passent de plus de 47 à $25\text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, soit une diminution des besoins de presque 50%.

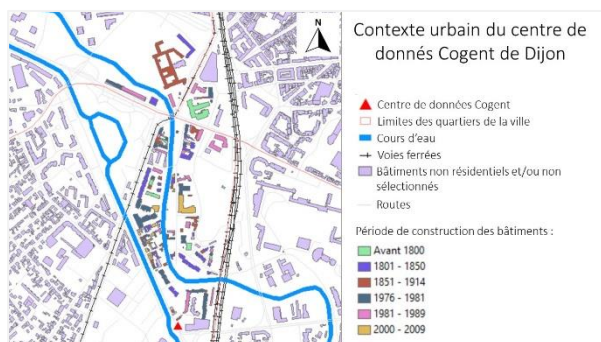
Étude de cas

Pour appliquer la méthode à un cas plus concret, j'ai décidé de réaliser une étude de cas sur le centre de données Cogent de Dijon. Ce centre de données est situé au croisement du centre-ville et des quartiers Port du Canal-Bourroches-Valendons, Université, Fontaine d'Ouche. La carte ci-dessous permet de visualiser les zones de diffusion des différents réseaux de chaleur existants de la métropole de Dijon.



Zones de diffusion des réseaux de chaleur de la métropole de Dijon (Dijon énergies, 2018)

Un zoom sur le quartier dans lequel est implanté le centre de données (carte ci-après) permet de le localiser. On remarque également qu'il s'agit d'un quartier très enclavé entre cours d'eau et voies ferrées. Pour sélectionner les bâtiments de mon étude de cas, j'ai donc pris en compte l'enclavement du quartier ainsi que la non-appartenance à une zone de diffusion des réseaux de chaleur existants. En effet, on peut imaginer qu'il serait compliqué de relier ce quartier aux réseaux existants en raison de son enclavement.



Un projet de valorisation locale de la chaleur fatale produite par le centre de données à sa proximité immédiate serait alors pertinent.

Comme pour le cas précédent, j'ai calculé les besoins en chauffage grâce à l'application Toaster Energy puis importé le résultat dans mon système logique. Pour les besoins en ECS, j'ai considéré le cas théorique le plus défavorable en me basant sur les informations du cours : 1875 kWh.an^{-1} par bâtiment, soit 375 MWh.an^{-1} pour l'ensemble. Pour la puissance du centre de données, je l'ai estimée à partir de sa surface (mesurée sur Google Maps) et des informations fournies par Efficacity (De Carlan F. et al, 2017), c'est-à-dire une surface IT égale à 30% de la surface totale du centre de données et une puissance utile de $500 \text{ W.m}^{-2}\text{IT}$. La puissance estimée est de $0,5 \text{ MW}$. J'ai utilisé cette approche car je n'ai pas trouvé de données sur les caractéristiques techniques de ce centre de données (surface, niveau TIER, ...). Enfin, concernant la période de construction des bâtiments, j'ai appliqué l'hypothèse selon laquelle celle-ci peut être affectée de manière aléatoire.

Sans récupération de la chaleur fatale du centre de données, les besoins en chaleur de l'ensemble urbain s'élèvent à $207 \text{ kWh.m}^{-2}\text{.an}^{-1}$. Avec récupération de la chaleur fatale, les besoins en chaleur de l'ensemble urbain s'élèvent à $183 \text{ kWh.m}^{-2}\text{.an}^{-1}$ avec un réseau de chaleur de type eau chaude à 85°C , soit une réduction de plus de 11%.

Ici, l'effet de la température du réseau est négligeable sur le résultat. En effet, le gain d'un réseau basse température à 35°C par rapport au réseau eau chaude à 85°C serait de moins de 200 kWh. Cela s'explique par le fait que la puissance du centre de données est faible et que les besoins unitaires de l'ensemble sont relativement élevés, ce qui permet de montrer qu'il n'y a pas toujours d'intérêt à utiliser un réseau basse température plutôt qu'un réseau eau chaude : il serait ici moins intéressant d'un point de vue économique.

Cependant, ce cas d'étude permet de montrer que, même pour un centre de données de faible puissance, le potentiel thermique est suffisamment élevé pour le mutualiser et réduire les besoins de chaleur du tissu urbain, et cela sans même avoir à stocker de l'énergie. En effet, la réduction de plus de 11% des besoins en chaleur n'est pas négligeable.

Pour conclure, la méthode scientifique développée et appliquée au cours de ce projet de recherche permet de répondre positivement à la problématique posée en introduction, à savoir : « Le potentiel thermique des centres de données permet-il de réduire significativement les besoins en chaleur des tissus urbains ? ». En effet, les deux applications réalisées ont toutes les deux montré que l'effet de la récupération de la chaleur fatale d'un centre de données sur les besoins en chaleur d'un ensemble urbain est significatif : j'ai pu observer une réduction des besoins allant jusqu'à 75% pour le premier et de plus de 10% pour le second, cela sans même avoir besoin de stocker de l'énergie.

D'un point de vue énergétique, on peut donc dire que la valorisation de la chaleur fatale produite par un centre de données peut permettre de réduire l'impact de nos usages informatiques. Cette valorisation nécessite cependant des investissements pour construire les réseaux de chaleur permettant de transporter l'énergie récupérée, ou relier le centre de données au réseau dans le cas d'un réseau existant. Ce sont souvent ces investissements, à la charge des gestionnaires de réseaux, qui freinent le développement de tels projets. En effet, ces gestionnaires veulent maximiser la densité thermique linéaire du réseau et, en général, celle-ci diminue lorsque l'on souhaite relier un centre de données au réseau pour valoriser sa chaleur fatale. Mais, en réalité, l'investissement supplémentaire nécessaire pour relier le centre de données est très faible par rapport au coût total d'un réseau et l'énergie récupérée est une énergie gratuite pour le gestionnaire. Cette récupération d'énergie peut même augmenter ses revenus si l'on considère que la récupération de la chaleur fatale du centre de données revient en fait à lui fournir du froid. Finalement, la valorisation de la chaleur fatale d'un

centre de données n'a pas forcément d'effet négatif sur la rentabilité du réseau, cet effet peut même être positif. Dans le cas de la création d'un réseau de chaleur qui prendrait en compte l'implantation d'un centre de données dès la première étape du projet, on peut également dire que la capacité de l'infrastructure de production (la chaufferie) sera plus faible, ce qui diminuerait le coût de cette infrastructure et donc augmenterait la rentabilité globale du projet.

Par ailleurs, il est nécessaire de souligner l'importance de l'étude du contexte urbain pour de tels projets. En effet, la zone de diffusion du réseau de chaleur doit être en adéquation avec la puissance du centre de données et les besoins en chaleur de l'ensemble urbain concerné : par exemple, le gain de la valorisation de la chaleur fatale produite par un centre de données de faible puissance sur un ensemble trop large ne serait pas significatif, mais pourrait l'être en affinant la zone de diffusion du réseau. Cela montre que l'on ne peut pas généraliser les résultats obtenus et qu'il faut étudier au cas par cas l'intérêt d'un tel projet.

Enfin, j'ai identifié deux limites de la méthode que j'ai développée. Concernant le calcul des besoins en ECS, il faudrait affiner la définition des usages dans mon système logique pour avoir des résultats plus cohérents et pouvoir les exploiter dans le calcul du bilan des besoins en chaleur plutôt qu'utiliser les valeurs données par mon directeur de recherche. De plus, je n'ai pas étudié le dimensionnement du réseau de chaleur : cette étude pourrait mettre en évidence d'autres freins à la valorisation de la chaleur fatale d'un centre de données. Par exemple, les pertes de distribution sur le réseau pourraient réduire l'effet de la mutualisation de la chaleur fatale d'un centre de données sur les besoins thermiques d'un ensemble urbain.

- Rasmussen N., 2012, https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=SPDr_NRAN-8FL6LW_FR, consulté le 12/11/2020, lien inactif à ce jour.
- De Carlan F., Guiot T., Leonard J.-C., Castagna G., 2017, Data Center État des lieux, https://www.efficacity.com/wp-content/uploads/2017/12/170407_Rapport-Datacenter.pdf, consulté le 08/11/2020.
- Dijon énergies, 2018, Le réseau de chaleur de Dijon métropole, http://technologie.ac-dijon.fr/IMG/pdf/2018_reseau-de-chaleur-de-dijon-metropole_0.pdf, consulté le 09/11/2020.
- John Roach (Microsoft), 2020, Microsoft finds underwater datacenters are reliable, practical and use energy sustainably, <https://news.microsoft.com/innovation-stories/project-natick-underwater-datacenter/>, consulté le 16/09/2020.
- Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., Koomey J., 2020, "Recalibrating global data center energy-use estimates", Science, Issue 6481, Vol. 367, pp. 984-986, DOI: 10.1126/science.aba3758.
- Connaissance des énergies, 2020, La consommation électrique des data centers a-t-elle été surévaluée ?, <https://www.connaissancedesenergies.org/la-consommation-electrique-des-data-centers-t-elle-ete-surevaluee-200304>, consulté le 08/03/2020.
- Le Big Data, 2020, L'impact des data centers sur l'environnement a été largement surestimé, <https://www.lebigdata.fr/impact-data-centers-environnement-surestime>, consulté le 08/03/2020.
- Brut, 2020, 3 initiatives pour réduire l'empreinte des data centers, <https://www.brut.media/uk/science-and-technology/3-initiatives-pour-reduire-l-empreinte-des-data-centers-4e4edd0b-50ab-4947-95c6-6f8ca50588f6>, consulté le 15/03/2020.
- ADEME, 2017, Étude des potentiels de production et de valorisation de chaleur fatale en Ile-de-France, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur_fatale_idf_010329.pdf, consulté le 24/02/2020.
- Sciences et avenir, 2018, Numérique et écologie : les data centers, des gouffres énergétiques ?, https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/informatique/numerique-et-ecologie-les-data-centers-des-gouffres-energetiques_121838, consulté le 13/02/2020.
- Vox Pop – ARTE, 2020, Faut-il limiter le nombre des data centers ?, <https://youtu.be/y923bPwAot0>, consulté le 16/02/2020.
- Global Security Mag, 2020, Cartographie des Data Centers en France, à Monaco et au Luxembourg - édition 2020, <https://www.globalsecuritymag.fr/Cartographie-des-Data-Centers-en,20200313,95388.html>, consulté le 26/03/2020.

- Leang S., Berthou M., Jumel S., 2017, "How to deal with technical and economic constraints to recover waste heat in France?", ECOS 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, San Diego, United States, hal-02147587.
- CNRS Le Journal, 2018, Numérique : le grand gâchis énergétique, <https://lejournel.cnrs.fr/articles/numerique-le-grand-gachis-energetique>, consulté le 30/03/2020.
- Neurones IT, 2020, Datacenter hyperscale, le datacenter de demain ?, <http://www.neurones-it.com/hyperscale-datacenter-de-demain/>, consulté le 12/02/2020.
- Ville-intelligente-mag, 2020, Récupérer la chaleur des datacenters pour chauffer la ville, https://www.villeintelligente-mag.fr/Recuperer-la-chaleur-des-datacenters-pour-chauffer-la-ville_a845.html, consulté le 04/03/2020.
- Chiche S., Colombert M., Diab Y., 2016, « Sources de chaleur fatale : Quels réseaux de chaleur pour les valoriser ? », 34^{èmes} Rencontres de l'AUGC, Mai 2016, Liège, Belgique, hal-01698879.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020, Réseaux de chaleur, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/reseaux-chaleur>, consulté le 29/03/2020.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019, Réseaux de chaleur et de froid : une filière d'avenir, https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2019.10.07_eb_ew_dp_reseauxchaleurfroid.pdf, consulté le 29/03/2020.
- Dochev I., Peters I., Seller H., Schuchardt G.K., 2018, « Analyzing district heating potential with linear heat density. A case study from Hamburg. », Energy Procedia, vol. 149, p. 410-419, DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.205.
- Observatoire des réseaux de chaleur et de froid, 2020, Évolution du bouquet énergétique, <https://www.observatoire-des-reseaux.fr/evolution-du-bouquet-energetique/>, consulté le 29/03/2020.
- Via Sèva, 2020, Cartographie interactive des réseaux de chaleur & de froid en France, <https://carto.viaseva.org/public/viaseva/map/>, consulté le 29/03/2020.
- Wikipédia, 2020, Indicateur d'efficacité énergétique, https://fr.wikipedia.org/wiki/Indicateur_d'efficacit%C3%A9_%C3%A9nerg%C3%A9tique#cite_note-4, consulté le 29/03/2020.
- 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>, consulté le 06/04/2020.
- Cerema – centre de ressources pour la chaleur renouvelable et l'aménagement énergétique des territoires, 2014, Carte : Densités thermiques et tracés des réseaux de chaleur en Île-de-France, 2014, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/carte-densites-thermiques-traces-reseaux-chaleur-en-ile-france>, consulté le 08/04/2020.

ANNEXE 1 : DÉFINITIONS

Selon le dictionnaire Larousse, la **mutualisation** est le fait de mutualiser, c'est-à-dire de faire passer un risque, une dépense, une consommation, ... à la charge d'une mutualité, d'une collectivité. Par exemple, d'après Wikipédia, la mutualisation est le partage par des individus ou groupe d'individus, de biens, de logements, d'équipements ménagers, d'outils, de moyens informatiques, ou de moyens de transport, de manière à optimiser l'accès à ces ressources et leur rentabilité par le partage des coûts, des frais d'entretien, d'assurance, de réparation, ... Ce type de mutualisation serait la piste la plus prometteuse pour réduire le bilan carbone des ménages français selon une étude publiée en 2011. Dans le contexte énergétique et dans le cas où on implante des centres de données en milieu urbain, la mutualisation de l'énergie peut alors être le fait de partager l'énergie semi-fatale produite en fonction des besoins à l'échelle d'un quartier par exemple, en utilisant un réseau de chaleur. Pour résumer cela simplement, la mutualisation est donc le fait de partager l'énergie produite à l'échelle d'un quartier ou d'une ville par exemple, et cela en fonction des différents besoins.

La **trajectoire énergétique** est la trajectoire d'évolution du mix énergétique, c'est-à-dire la répartition des différentes sources d'énergies primaires consommées dans une zone géographique donnée. Il faut prendre en compte l'utilisation de l'énergie semi-fatale des centres de données dans cette trajectoire. La **courbe de charge électrique** est la représentation graphique de l'évolution de la consommation d'énergie pendant une durée.

Selon [Wikipédia](#), dans le domaine de la maîtrise de l'énergie et de la rudologie, l'expression « **énergie fatale** » désigne la quantité d'énergie inéluctablement présente ou piégée dans certains processus ou produits, qui parfois, au moins pour partie, peut être récupérée et/ou valorisée. Ces énergies peuvent prendre différentes formes – chaleur, froid, gaz, électricité – et peuvent naître de process, d'utilités – c'est le cas des centres de données – ou de déchets. Ce terme désigne aussi l'énergie qui serait perdue si on ne l'utilisait pas au moment où elle est disponible, c'est le cas par exemple de l'électricité issue des éoliennes, des panneaux solaires ou celle produite par les centrales hydrauliques au fil de l'eau. Dans la description du sujet, il est question d'énergie semi-fatale simplement parce que, selon moi, contrairement aux éoliennes par exemple, la production de chaleur d'un centre de données n'est pas intermittente, elle est quasiment constante toute l'année. On peut donc la répartir plus facilement selon les besoins en fonction des prévisions.

Constitué des marchés européens du gaz et de l'électricité, le **marché de l'énergie** désigne, de façon générale, les différentes formes d'organisation du secteur de la production et de la commercialisation de l'énergie. Différents acteurs constituent ce marché : les producteurs et fournisseurs comme EDF, les transporteurs comme RTE, les distributeurs, l'autorité de régulation, et évidemment les clients. [Cette infographie](#) réalisée par un fournisseur d'énergie résume assez bien cet aspect.

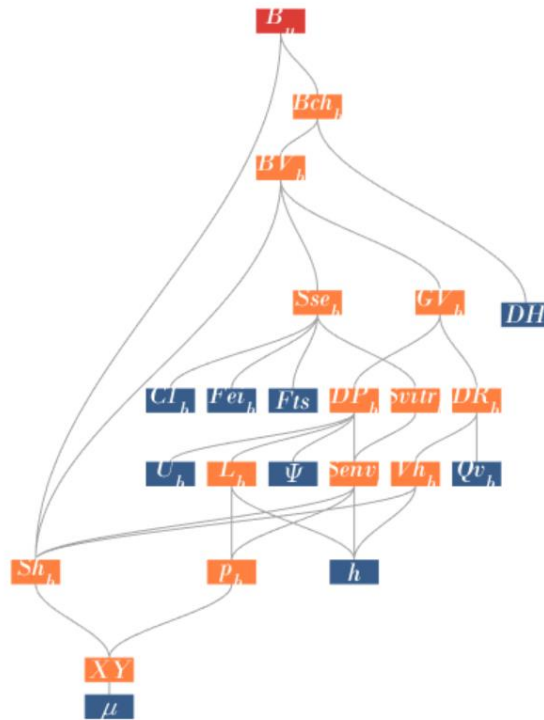
ANNEXE 2 : CALCUL DES BESOINS EN CHAUFFAGE SELON LA RT1989

I. Calcul des besoins en chauffage d'un ensemble urbain selon la RT1989	23
- 1. Besoins unitaires de l'ensemble urbain.....	24
- 2. Besoins annuels en chauffage pour chaque bâtiment	25
- 3. Coefficient de besoins annuels en chauffage pour chaque bâtiment	25
- 4. Degrés heures de chauffage.....	25
- 5. Surface transparente sud équivalent pour chaque bâtiment	26
- 6. Coefficient thermique de déperdition pour chaque bâtiment.....	26
- 7. Coefficient d'orientation de chaque bâtiment	26
- 8. Effet de masque pour chaque bâtiment	26
- 9. Facteur de transmission solaire des parois	26
- 10. Déperditions par les parois pour chaque bâtiment.....	27
- 11. Surface de vitrages de chaque bâtiment.....	27
- 12. Déperditions par renouvellement d'air pour chaque bâtiment	27
- 13. Coefficient de transmission thermique de l'enveloppe de chaque bâtiment	27
- 14. Linéaire des ponts thermiques de chaque bâtiment.....	27
- 15. Coefficient de transmission thermique des liaisons.....	28
- 16. Surface d'enveloppe de chaque bâtiment	28
- 17. Volume habitable de chaque bâtiment.....	28
- 18. Ventilation du logement pour chaque bâtiment.....	28
- 19. Surface habitable de chaque bâtiment	28
- 20. Périmètre de chaque bâtiment	29
- 21. Hauteur d'un étage	29
- 22. Description géométrique des bâtiments de l'ensemble urbain	29
- 23. Import de la description géométrique des bâtiments de l'ensemble urbain	29
II. Sources	30
III. Codes et propriétés.....	30

I. Calcul des besoins en chauffage d'un ensemble urbain selon la RT1989

Ce système logique est basé sur les informations de la RT1989 et permet de calculer les besoins en chauffage d'un ensemble urbain à partir de sa description géométrique.

$$B_u = \text{heatingneeds}(U, \mu, \Psi, h, Fts, Q_v, n, Fei, C1, DH)$$



- 1. Besoins unitaires de l'ensemble urbain

Les besoins unitaires de l'ensemble urbain correspondent aux besoins totaux de l'ensemble rapportés à la surface habitable totale. Cela permet de mesurer en partie la performance énergétique de l'ensemble et de faire des comparaisons avec d'autres tissus urbains.

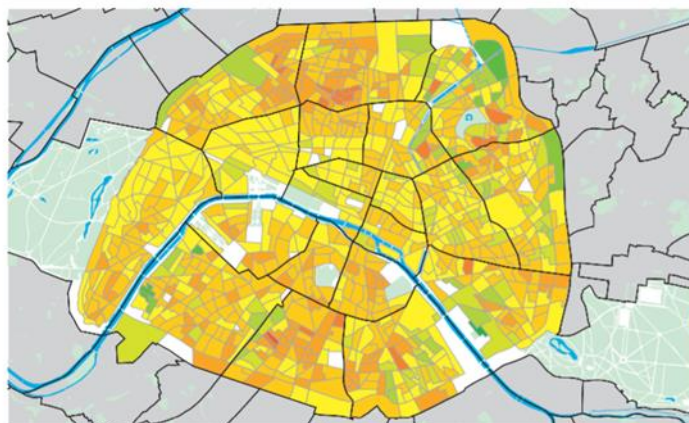
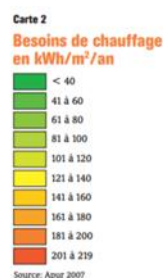
$$B_u = \frac{\sum (Bch_b)}{\sum (Sh_b)}$$

exprimé en kWh/m²/an

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 202.

Ce système logique est basé sur la RT1989.

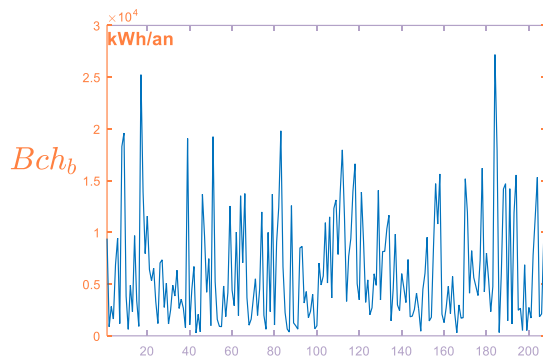
La valeur obtenue ci-dessus est le résultat du calcul effectué avec les paramètres détaillés dans les paragraphes suivants. Plusieurs simulations ont été réalisées et les résultats obtenus étaient toujours compris entre 100 et 300 kWh/m²/an. Cet intervalle est cohérent avec les résultats obtenus par l'apur qui s'est basé sur les mêmes explications (intervalle de 40 à 219 kWh/m²/an) et résumés sur la carte ci-dessous. L'écart de résultats peut être expliqué par le fait que pour mes applications numériques j'ai utilisé des polygones non mitoyens générés de manière aléatoire, tandis que l'apur a appliqué son modèle à un territoire réel.



- 2. Besoins annuels en chauffage pour chaque bâtiment

$$Bch_b = (BV_b \otimes DH).10^{(-3)}$$

exprimé en kWh/an



Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 275 et 27181.

- 3. Coefficient de besoins annuels en chauffage pour chaque bâtiment

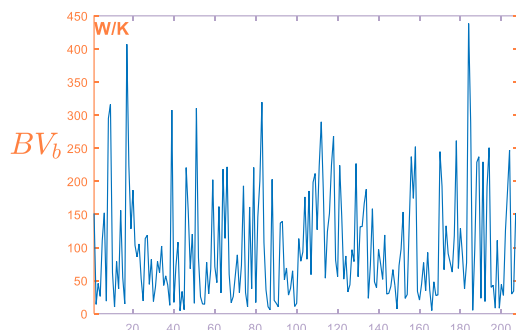
Pour approcher les besoins théoriques de chauffage, le coefficient GV est minoré des apports thermiques gratuits $GV \cdot F$ (voir code). F permet de prendre en compte l'inertie thermique des bâtiments.

Précisions sur les valeurs utilisées :

- 22,9 : apports internes en kWh/m² à Paris (zone H1),
- 410 : l'insolation verticale à Paris en kWh/m².

$$BV_b = f(Sh_b, Sse_b, GV_b, DH, F, X)$$

exprimé en W/K



Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 4.5 et 438.

- 4. Degrés heures de chauffage

DH = 62000 Kh à Paris.

DH exprime en même temps la rigueur du climat et le niveau de confort que l'on cherche à atteindre pendant la période de chauffage. Les DH pour chaque zone climatique sont égaux pour la France (en milliers de °C.h) à:

- zone H1: DH=63
- zone H2: DH=52
- zone H3: DH=37

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical croissant composé de 208 entiers naturels compris entre 62000 et 62000.

- 5. Surface transparente sud équivalent pour chaque bâtiment

$$Sse_b = Svitrb \otimes Fts \otimes Feib \otimes C1_b$$

exprimé en m²

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.0008 et 17.3.

- 6. Coefficient thermique de déperdition pour chaque bâtiment

Le coefficient thermique de déperdition regroupe l'ensemble des déperditions par les parois et par renouvellement d'air.

$$GV_b = DP_b + DR_b$$

exprimé en W/K

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 4.4 et 438.5.

- 7. Coefficient d'orientation de chaque bâtiment

Ce coefficient traduit le fait qu'une paroi peut ne pas être orientée au sud et donc ne bénéficie pas d'une insolation maximale. Pour l'application numérique, une valeur de C1_b est prise aléatoirement dans l'intervalle donné.

$$0.2 \leq C1_b \leq 1$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.2 et 1.

- 8. Effet de masque pour chaque bâtiment

Ce coefficient traduit le fait que le rayonnement solaire peut être obstrué par les constructions avoisinantes. Le coefficient dépend du type de voie (rue, boulevard, avenue, ...) et de la règle de prospect suivie. Pour l'application numérique, une valeur de Fei_b est prise aléatoirement dans l'intervalle donné.

$$0.43 \leq Feib \leq 0.9$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.43 et 0.9.

- 9. Facteur de transmission solaire des parois

On considère que les vitrages laissent passer 50% du rayonnement incident. On considérera de plus que 15% du rayonnement ne passe pas à cause des obstructions créés par exemple par les rideaux.

$$Fts = 0.425$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical croissant composé de 208 réels compris entre 0.425 et 0.425.

- 10. Déperditions par les parois pour chaque bâtiment

Les déperditions totales par les parois du bâtiment sont constituées de l'ensemble des déperditions par l'enveloppe et par les liaisons du bâtiment.

$$DP_b = (S_{env_b} \otimes U_b) + (L_b \cdot \Psi)$$

exprimé en W/K

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 4.4 et 341.8.

- 11. Surface de vitrages de chaque bâtiment

Généralement, on considère que la surface de vitrages représente 40% de la surface déperditive totale (c'est-à-dire la surface d'enveloppe non mitoyenne). Si l'on considère que 50% de la surface d'enveloppe est mitoyenne, on peut donc prendre 20% de la surface d'enveloppe pour la surface de vitrages.

$$S_{vitr_b} = 0.2 \cdot S_{env_b}$$

exprimé en m²

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.0076 et 75.6.

- 12. Déperditions par renouvellement d'air pour chaque bâtiment

$$DR_b = 0.34 \cdot (V h_b \otimes Q v_b)$$

exprimé en W/K

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 4.7e-06 et 96.7.

- 13. Coefficient de transmission thermique de l'enveloppe de chaque bâtiment

Ce coefficient traduit la perméabilité thermique de l'enveloppe, plus il est élevé et plus les pertes par l'enveloppe du bâtiment seront importantes. Généralement, on différencie le coefficient de transmission thermique de chaque paroi de l'enveloppe du bâtiment. Mais pour simplifier le système logique j'ai appliqué un coefficient à l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment. Les valeurs retenues ici sont celles pour des bâtiments construits après 1990. Pour des bâtiments construits entre 1800 et 1850 par exemple, U est plutôt compris entre 1,91 et 2,81.

$$0.65 \leq U_b \leq 0.87$$

exprimé en W/m²/K

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.65 et 0.87.

- 14. Linéaire des ponts thermiques de chaque bâtiment

Les ponts thermiques sont des discontinuités créées par les planchers et les façades du bâtiment. Ces discontinuités permettent à la chaleur de s'échapper. Généralement, on différencie les ponts thermiques créés par les différentes liaisons. Mais, pour simplifier le système logique, j'ai considéré un seul pont thermique constitué par toutes les liaisons.

$$L_b = p_b + \frac{h}{3} \otimes p_b + 4 \otimes h$$

exprimé en m

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 10 et 138.

- 15. Coefficient de transmission thermique des liaisons

$$0.15 \leq \Psi \leq 0.9$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 0.44.

- 16. Surface d'enveloppe de chaque bâtiment

$$S_{env_b} = Sh_b + h \otimes p_b$$

exprimé en m²

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.038 et 378.

Remarque : les très petites valeurs de surfaces d'enveloppe sont des anomalies qui peuvent également expliquer en partie l'écart entre mes résultats et ceux de l'apur.

- 17. Volume habitable de chaque bâtiment

$$Vh_b = Sh_b \otimes h$$

exprimé en m³

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 2.6e-05 et 550.

Remarque : les très petites valeurs de volume habitable sont des anomalies qui peuvent également expliquer en partie l'écart entre mes résultats et ceux de l'apur.

- 18. Ventilation du logement pour chaque bâtiment

La ventilation des logements dépend de leur période de construction. Avant la première réglementation thermique, la ventilation est naturelle, l'air est renouvelé par les fuites et les ouvertures des portes et fenêtres par les occupants. Pour les périodes plus récentes, la ventilation est mécanique et varie de 0,41 à 0,74 en fonction des exigences des différentes réglementations thermiques.

$$0.41 \leq Qv_b \leq 0.74$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.41 et 0.74.

- 19. Surface habitable de chaque bâtiment

Pour prendre en compte la place occupée par les murs et les parties communes, les surfaces habitables retenues sont les emprises au sol affectées d'un coefficient 0,8.

$$Sh_b = f(XY)$$

exprimé en m²

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 1e-05 et 220.

Remarque : les très petites valeurs de surfaces habitables sont des anomalies qui peuvent également expliquer en partie l'écart entre mes résultats et ceux de l'apur.

- 20. Périmètre de chaque bâtiment

$p_b = f(XY)$
exprimé en m

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.015 et 64.

Remarque : les très petites valeurs de périmètres sont des anomalies qui expliquent les anomalies sur les valeurs de surface habitable, volume habitable et surface d'enveloppe qui peuvent également expliquer en partie l'écart entre mes résultats et ceux de l'apur.

- 21. Hauteur d'un étage

$h = 2.5$
exprimé en m

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical croissant composé de 208 réels compris entre 2.5 et 2.5.

- 22. Description géométrique des bâtiments de l'ensemble urbain

Il s'agit d'un ensemble de polygones représentant les emprises au sol d'un ensemble de bâtiments.

$XY = \text{propiete}(\mu)$
exprimé Sans unité



Informations utiles pour commenter la variable : Ensemble de 208 polygones ou polygones d'origine x=104.2032 et y=103.2507.

- 23. Import de la description géométrique des bâtiments de l'ensemble urbain

Cette variable n'a pas d'intérêt calculatoire, elle permet simplement d'importer les valeurs de la variable XY.

$\mu = NaN$
exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Structure composée de 2 champs.

II. Sources

RT1989

III. Codes et propriétés

- 1. Code de "B_u"

B_u=(sum(Bch_b))/sum(Sh_b);

- 2. Code de "Bch_b"

Bch_b=(BV_b.*DH)*10^(-3);

- 3. Code de "BV_b"

n=2;

X=(22.9.*Sh_b+410.*Sse_b)./(GV_b.*DH);

F=(X-X.^n)./(1-X.^n);

BV_b=GV_b.*(1-F);

- 4. Propriétés de "DH"

Vecteur vertical croissant composé de 208 entiers naturels compris entre 62000 et 62000

- 5. Code de "Sse_b"

Sse_b=Svitr_b.*Fts.*Fei_b.*C1_b

- 6. Code de "GV_b"

GV_b=DP_b+DR_b;

- 7. Propriétés de "C1_b"

Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.2116 et 0.99994

- 8. Propriétés de "Fei_b"

Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.43211 et 0.89879

- 9. Propriétés de "Fts"

Vecteur vertical croissant composé de 208 réels compris entre 0.425 et 0.425

- 10. Code de "DP_b"

DP_b = (Senv_b.*U_b)+(L_b*Psi)

- 11. Code de "Svitr_b"

Svitr_b=0.2*Senv_b

- 12. Code de "DR_b"

DR_b = 0.34*(Vh_b.*Qv_b)

- 13. Propriétés de "U_b"

Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.65206 et 0.86918

- 14. Code de "L_b"

L_b=p_b+ceil(h)/3.*p_b+4.*h

- 15. Propriétés de "Psi"

Nombre réel égal à 0.43984

- 16. Code de "Senv_b"

Senv_b=Sh_b+h.*p_b;

- 17. Code de "Vh_b"

Vh_b=Sh_b.*h

- 18. Propriétés de "Qv_b"

Vecteur vertical composé de 208 réels compris entre 0.41505 et 0.7398

- 19. Code de "Sh_b"

for i=1:numel(XY)

Sh_b(i,1)=polyarea(XY{i}(:,1),XY{i}(:,2));

end

Sh_b=0.8*Sh_b;

- 20. Code de "p_b"

for i=1:numel(XY)

xy=XY{i};

x=xy(:,1);

y=xy(:,2);

x(end+1)=x(1);

y(end+1)=y(1);

p_b(i,1)=sum(sqrt(diff(x).^2+diff(y).^2));

end

- 21. Propriétés de "h"

Vecteur vertical croissant composé de 208 réels compris entre 2.5 et 2.5

- 22. Code de "XY"

XY = mu.XY;

- 23. Propriétés de "mu"

Structure composée de 2 champs.

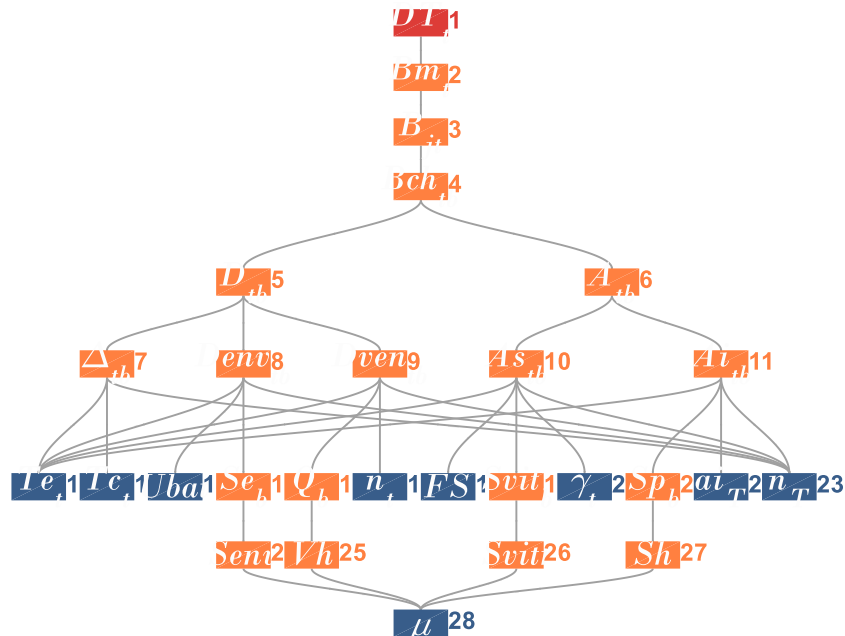
ANNEXE 3 : DÉTERMINATION DE LA DISTRIBUTION TEMPORELLE DES BESOINS EN CHAUFFAGE

I. Détermination de la distribution temporelle de la courbe de charge des besoins en chauffage d'un ensemble urbain.....	32
- 1. Distribution temporelle de la charge	33
- 2. Charge journalière maximale théorique.....	33
- 3. Charge totale pour chaque jour de l'année.....	33
- 4. Charge par bâtiment	33
- 5. Ensemble des déperditions	34
- 6. Ensemble des apports gratuits	34
- 7. Différence entre la température extérieure et la température de consigne	34
- 8. Déperditions par l'enveloppe du bâtiment	35
- 9. Déperditions par la ventilation du bâtiment	35
- 10. Apports solaires par le vitrage.....	35
- 11. Apports internes	36
- 12. Température extérieure.....	36
- 13. Température de consigne	36
- 14. Conductance du bâtiment.....	36
- 15. Surface d'enveloppe du bâtiment.....	37
- 16. Volume du bâtiment	37
- 17. Taux de renouvellement d'air du bâtiment.....	37
- 18. Facteur solaire du vitrage.....	37
- 19. Surface vitrée du bâtiment	38
- 20. Rayonnement reçu par l'enveloppe du bâtiment	38
- 21. Surface plancher	38
- 22. Apports internes unitaires selon le type de bâtiment.....	38
- 23. Nombre de bâtiments en fonction du type.....	39
- 24. Import de la surface d'enveloppe des bâtiments.....	39
- 25. Import du volume habitable des bâtiments.....	39
- 26. Import de la surface vitrée des bâtiments	39
- 27. Import de la surface habitable des bâtiments.....	39
- 28. Définition géométrique de l'ensemble urbain	40
II. Sources	40
III. Codes et propriétés.....	40

I. Détermination de la distribution temporelle de la courbe de charge des besoins en chauffage d'un ensemble urbain.

Ce système logique permet de déterminer la distribution temporelle de la charge des besoins en chauffage d'un ensemble urbain à partir de sa définition géométrique.

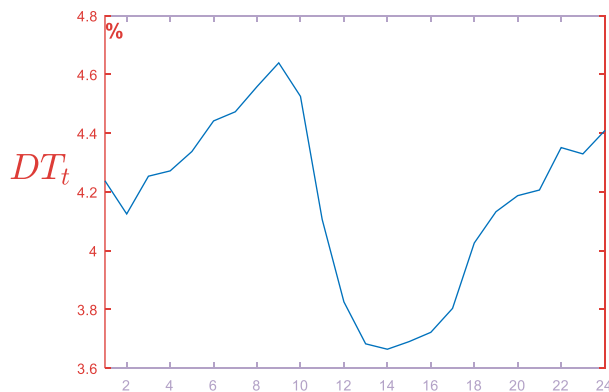
$$DT = \text{chargethermique}(T_e, T_c, U_{bat}, n_t, \mu, FS, \gamma_t, ai, n)$$



- 1. Distribution temporelle de la charge

$$DT_t = \left(Bm_t / \sum (Bm_t) \right) \cdot 100$$

exprimé en %



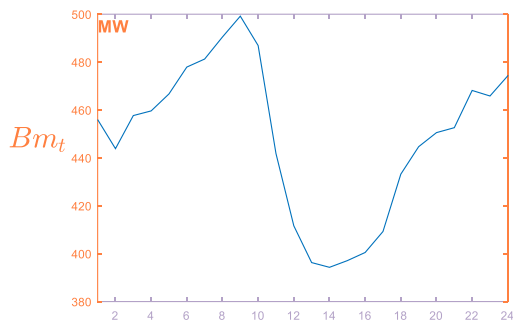
Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal composé de 24 réels compris entre 3.67 et 4.64.

- 2. Charge journalière maximale théorique

La charge journalière maximale théorique représente la charge pour le jour théorique le plus défavorable regroupant les valeurs les plus élevées de l'année pour chaque heure.

$$Bm_t = \max (B_{jt})$$

exprimé en MW



Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal composé de 24 réels compris entre 394 et 499.

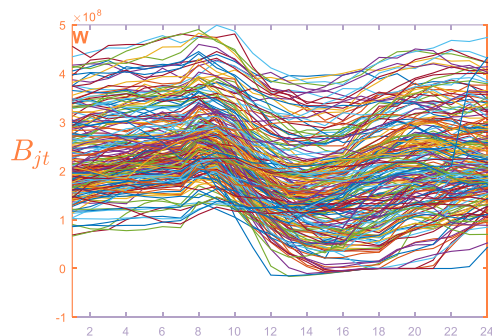
Remarque : les valeurs obtenues sont très élevées au regard du nombre de bâtiments (500). Cela peut être expliqué par les différentes approximations faites dans le modèle mais également par le fait que la description géométrique de l'ensemble urbain est simplement un ensemble de polygones non mitoyens.

- 3. Charge totale pour chaque jour de l'année

Remarques : Les valeurs des températures de consigne sont générées par Toaster plus et sont identiques pour tous les bâtiments, elles ne participent donc pas au foisonnement de la courbe. Les valeurs des températures extérieures et du rayonnement solaire sont identiques pour tous les bâtiments.

$$B_{jt} = \sum (Bch_{tb}');$$

exprimé en W

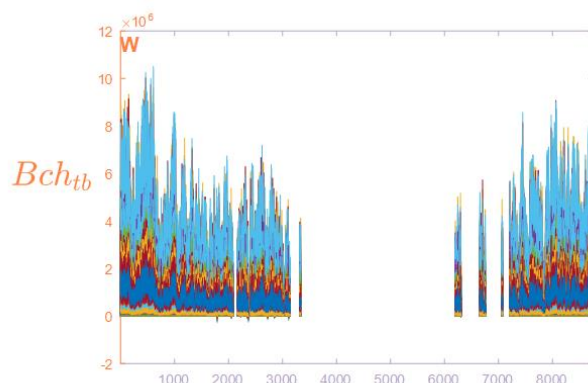


Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 24 sur 365 composée de réels compris entre -16635755 et Inf.

- 4. Charge par bâtiment

$$Bch_{tb} = (D_{tb} - A_{tb});$$

exprimé en W

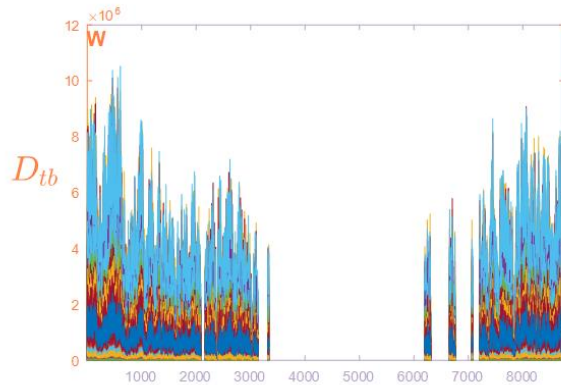


Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre - 277525 et Inf.

- 5. Ensemble des déperditions

$$D_{tb} = \Delta_{tb} \otimes (Denv_{tb} + Dven_{tb});$$

exprimé en W

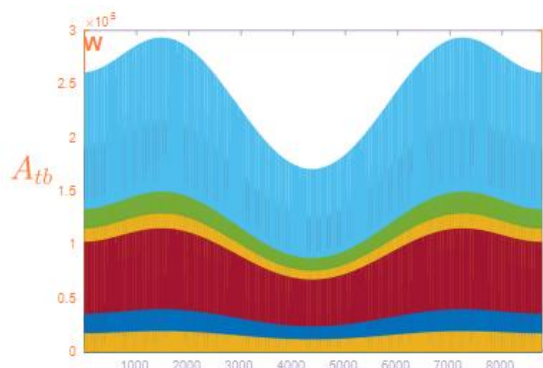


Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre 0 et Inf.

- 6. Ensemble des apports gratuits

$$A_{tb} = A_{itb} + A_{s_{tb}}$$

exprimé en W

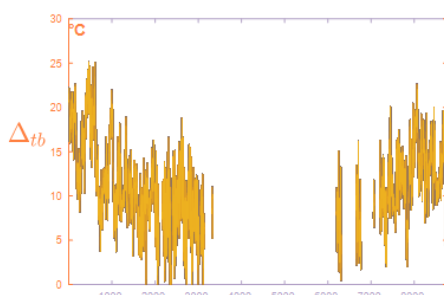


Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre 0.0024 et 293061.

- 7. Différence entre la température extérieure et la température de consigne

$$\Delta_{tb} = T_{c_t} - T_{e_t, n_T}$$

exprimé en °C



Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre 0 et Inf.

- 8. Déperditions par l'enveloppe du bâtiment

Un bâtiment perd forcément de l'énergie par conduction à travers son enveloppe. Ces déperditions peuvent être exprimées, de manière instantanée, comme la puissance perdue en un instant donné lorsque l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur est de 1°C. Dans la réglementation, cette variable est appelée coefficient de déperdition par transmission et est notée généralement HT.

$$D_{env_{tb}} = Se_b \otimes U_{bat}, Te_t, n_T$$

exprimé en W

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre 1.13 et 3249.

- 9. Déperditions par la ventilation du bâtiment

Les déperditions énergétiques par renouvellement d'air, sous la forme d'un transfert de chaleur par convection, sont ici représentées par la puissance perdue lorsque l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur est de 1 °C.

$$D_{ven_{tb}} = (0.34.10^3).(Q_b \otimes n_t), Te_t, n_T$$

exprimé en W

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre 0.2 et 437374.

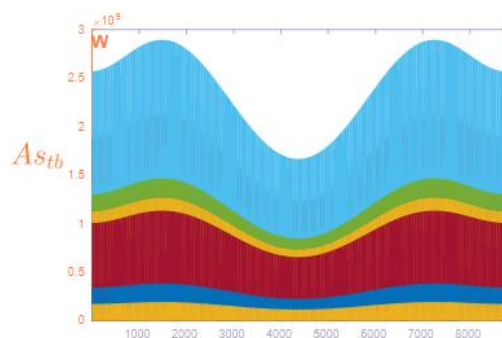
- 10. Apports solaires par le vitrage

Un bâtiment ne perd pas uniquement de l'énergie. Il en gagne aussi. Le premier gain est apporté par le soleil (principalement par le vitrage). Le type de chaleur que le soleil offre à un bâtiment arrive sous la forme d'un rayonnement. Il est important de contrôler l'ensoleillement d'un point de vue thermique pour plusieurs raisons :

- récupérer le plus possible les apports gratuits notamment lorsqu'on cherche à correspondre à des critères environnementaux ;
- tenir compte de ces apports en période d'été en cherchant à les réduire le plus possible pour éviter la surchauffe des espaces.

$$As_{tb} = S_{vit_b} \otimes FS \otimes \gamma_t, n_T, Te_t$$

exprimé en W



Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre 0 et 288944.

- 11. Apports internes

Une autre énergie gratuite est disponible dans le cadre du chauffage des bâtiments. Il s'agit des apports fournis par l'occupation des habitants, les appareils ménagers ou l'éclairage. En effet, une grande partie de l'énergie utile pour un usage est récupérable sous forme de chaleur pour un autre usage, en l'occurrence le chauffage. Attention, cela ne veut pas dire qu'il est souhaitable qu'un bâtiment consomme beaucoup en éclairage ou en appareil électrique car cela alourdirait forcément le bilan global du bâtiment. On dénombre deux types d'apports internes: d'une part l'occupation des habitants, d'autre part, les appareils présents dans le bâtiment.

$$Ai_{tb} = Sp_b \otimes ai_T, Te_t, n_T$$

exprimé en W

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8760 sur 500 composée de réels compris entre 0.002 et 4117.

- 12. Température extérieure

Vecteur des températures extérieures à Tours en 2017, pas de temps de 1h.

$$-5.3 \leq Te_t \leq 37.6$$

exprimé en °C

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical de réels compris entre -5.3 et 37.6.

- 13. Température de consigne

Les valeurs de la température de consigne pour chaque heure de la journée sont importées de Toaster plus, celles-ci prennent en compte l'occupation. Pour l'instant, tous les bâtiments ont les mêmes températures de consigne. Idéalement il faudrait que je parvienne à générer un vecteur de températures de consigne pour chaque bâtiment.

$$17 \leq Tc_t \leq \infty$$

exprimé en °C

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical de réels compris entre 17 et inf.

Remarque : les valeurs égales à l'infini permettent de mettre en évidence les périodes où l'on ne chauffe pas. Ces valeurs infinies posent un problème d'un point de vue mathématique, elles sont donc traitées dans les codes des variables en lien avec la température de consigne.

- 14. Conductance du bâtiment

Ubat correspond à la conductance globale d'un bâtiment. Matériellement, il s'agit de la puissance qu'un bâtiment perd par m² de surface d'enveloppe lorsque l'écart entre l'intérieur et l'extérieur est de 1°C. C'est la variable qui exprime le mieux le niveau d'isolation de l'enveloppe. Plus cet indicateur est bas, plus le bâtiment est réputé bien isolé. Une valeur de conductance du bâtiment est générée aléatoirement pour chaque bâtiment.

$$0.58 \leq Ubat \leq 3$$

exprimé en W/m²

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel compris entre 0.58 et 3.

Remarque : pour l'application numérique, j'ai affecté aléatoirement une valeur de U_{bat} dans l'intervalle donné pour chaque bâtiment.

- 15. Surface d'enveloppe du bâtiment

$$Se_b = S_{env}$$

exprimé en m^2

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.4 et 1346.

Remarque : les très petites valeurs de surface d'enveloppe sont des anomalies dues à la définition géométrique de l'ensemble urbain. Elles permettent en partie d'expliquer les résultats trop élevés pour la puissance appelée.

- 16. Volume du bâtiment

$$Q_b = Vh$$

exprimé en m^3

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.003 et 2573.

Remarque : les très petites valeurs de volume sont des anomalies dues à la définition géométrique de l'ensemble urbain. Elles permettent en partie d'expliquer les résultats trop élevés pour la puissance appelée.

- 17. Taux de renouvellement d'air du bâtiment

On peut estimer le besoin de renouvellement d'air à partir de normes d'hygiène à l'intérieur du bâtiment. Ce besoin est alors exprimé en $m^3/h/personne$ qu'il faut rapporter au volume du bâtiment pour obtenir des vol/h . Il indique la quantité d'air venant de l'extérieur qui doit être introduit à l'intérieur du bâtiment pour satisfaire aux conditions de qualité de l'air. Ce renouvellement d'air est généralement contrôlé par des systèmes techniques (Ventilation Mécanique Contrôlée, VMC) ou par les usagers (ouverture et fermeture des ouvrants). Le renouvellement d'air est également subi à cause d'une mauvaise étanchéité à l'air du bâtiment (sous les ouvrants par exemples). Dans les bâtiments réputés performants, on cherche au maximum à maîtriser le débit du renouvellement d'air grâce à des systèmes techniques tout en limitant au mieux la perméabilité des bâtiments. Pour simplifier les calculs, une valeur de taux de renouvellement d'air comprise dans l'intervalle ci-dessous est générée aléatoirement pour chaque heure de la journée pour chaque bâtiment.

$$0.2 \leq n_t \leq 0.5$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 24 réels compris entre 0.2 et 0.5.

- 18. Facteur solaire du vitrage

Pour le vitrage, élément principal dans les apports solaires, les fabricants donnent généralement la part du rayonnement qui sera transmis sous forme de chaleur : on appelle cette part le facteur solaire. C'est donc le pourcentage de rayonnement qui « traverse » le vitrage et qui « réchauffe » le bâtiment. Une valeur de facteur solaire dans l'intervalle donné ci-dessous est générée aléatoirement pour chaque bâtiment.

$$0.2 \leq FS \leq 0.8$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel compris entre 0.2 et 0.8.

- 19. Surface vitrée du bâtiment

$$S_{vit_b} = S_{vitr}$$

exprimé en m²

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.162 et 538.

Remarque : les très petites valeurs de surface vitrée sont des anomalies dues à la définition géométrique de l'ensemble urbain. Elles permettent en partie d'expliquer les résultats trop élevés pour la puissance appelée.

- 20. Rayonnement reçu par l'enveloppe du bâtiment

Les valeurs du rayonnement ont été calculées grâce à un autre système logique.

Pour simplifier le calcul, le rayonnement solaire totale a été assimilé au rayonnement solaire direct (l'irradiation reçue par la paroi et provenant directement du soleil). J'ai également considéré que tous les bâtiments reçoivent le même rayonnement.

$$0 \leq \gamma_t \leq 750.845$$

exprimé en W/m²

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 24 sur 1 composée de réels compris entre 0 et 750.845.

- 21. Surface plancher

$$S_{p_b} = S_h$$

exprimé en m²

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.001 et 1029.

Remarque : les très petites valeurs de surface plancher sont des anomalies dues à la définition géométrique de l'ensemble urbain. Elles permettent en partie d'expliquer les résultats trop élevés pour la puissance appelée.

- 22. Apports internes unitaires selon le type de bâtiment

Il s'agit des apports engendrés par des activités spécifiques à l'occupation des espaces. On donne en général des valeurs forfaitaires calculées par m² de surface habitable. Il faut cependant estimer plus finement ces apports lorsque les locaux sont consacrés à des fonctions très particulières mobilisant des équipements spéciaux. Pour cet exemple, je me suis référé aux valeurs données dans la RT2000 (voir "Nombre de bâtiments en fonction du type").

$$2 \leq a_{iT} \leq 7$$

exprimé en W/m²

[tableau de données](#)

2
4
7

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical croissant composé de 3 entiers naturels compris entre 2 et 7.

- 23. Nombre de bâtiments en fonction du type

Ce vecteur contient le nombre de bâtiments par type. Le type d'un bâtiment est caractérisé par la valeur des apports internes unitaires. Selon la RT2000, on a ces 3 types de bâtiments :

- $a_i=2 \text{ W/m}^2$: établissement sportif, stockage, atelier,
- $a_i=4 \text{ W/m}^2$: logement, hôtellerie,
- $a_i=7 \text{ W/m}^2$: bureau, salles de classes, commerces.

On peut donc modifier le nombre de bâtiments par type en modifiant les valeurs du vecteur n .

$$74 \leq n_T \leq 237$$

exprimé Sans unité

tableau de données
189
237
74

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 3 entiers naturels compris entre 74 et 237.

- 24. Import de la surface d'enveloppe des bâtiments

Variable d'import.

$$S_{env} = \text{propriete}(\mu)$$

exprimé en m^2

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.4 et 1346.

- 25. Import du volume habitable des bâtiments

Variable d'import

$$V_h = \text{propriete}(\mu)$$

exprimé en m^3

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.003 et 2573.

- 26. Import de la surface vitrée des bâtiments

Variable d'import

$$S_{vitr} = \text{propriete}(\mu)$$

exprimé en m^2

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.162 et 538.5.

- 27. Import de la surface habitable des bâtiments

Variable d'import.

$$S_h = \text{propriete}(\mu)$$

exprimé en m^2

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 500 réels compris entre 0.001 et 1029.

- 28. Définition géométrique de l'ensemble urbain

Variable d'import

$\mu = NaN$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Structure composée de 26 champs.

II. Sources

Cours, Météo-France (SYNOP), Toaster plus

III. Codes et propriétés

- 1. Code de "DT_t"

DT_t=(Bm_t/sum(Bm_t))*100

- 2. Code de "Bm_t"

B_j_t(B_j_t==inf)=0;

Bm_t=max(B_j_t);

Bm_t=Bm_t*10^(-6);

- 3. Code de "B_j_t"

B_j_t=sum(transpose(Bch_t_b));

B_j_t=reshape(B_j_t,24,numel(B_j_t)/24);

- 4. Code de "Bch_t_b"

Bch_t_b=(D_t_b-A_t_b);

- 5. Code de "D_t_b"

D_t_b=Delta_t_b.*(Denv_t_b+Dven_t_b);

- 6. Code de "A_t_b"

A_t_b=ai_t_b+As_t_b ;

A_t_b(isnan(A_t_b))=0;

- 7. Code de "Delta_t_b"

Te_t= repmat(Te_t,1,sum(n_T));

Tc_t= repmat(Tc_t,1,sum(n_T));

Delta_t_b=Tc_t-Te_t ;

Delta_t_b(Delta_t_b<0)=0;

- 8. Code de "Denv_t_b"

Ubat=0.58+(3-0.58)*rand(1,sum(n_T));

Ubat= repmat(Ubat,size(Te_t),1);

Se_b=transpose(Se_b);

Se_b= repmat(Se_b,size(Te_t),1);

Denv_t_b=Se_b.*Ubat ;

- 9. Code de "Dven_t_b"

Q_b=transpose(Q_b);

Q_b= repmat(Q_b,size(Te_t),1);

n_t=0.2+(0.5-0.2)*rand(size(Te_t,1),sum(n_T));

Dven_t_b=(0.34*10^3)*(Q_b.*n_t);

- 10. Code de "As_t_b"

FS=0.2+(0.8-0.2)*rand(1,sum(n_T));

FS= repmat(FS,size(Te_t,1),1);

Svit_b=transpose(Svit_b);

Svit_b= repmat(Svit_b,size(Te_t,1),1);

gamma_t= repmat(gamma_t,1,sum(n_T));

As_t_b=Svit_b.*FS.*gamma_t ;

- 11. Code de "Ai_t_b"

a= repmat(ai_T(1),size(Te_t,1),1);

b= repmat(ai_T(2),size(Te_t,1),1);

c= repmat(ai_T(3),size(Te_t,1),1);

ai_T=[repmat(a,1,n_T(1)) repmat(b,1,n_T(2))

repmat(c,1,n_T(3))];

Sp_b=transpose(Sp_b);

Sp_b= repmat(Sp_b,size(Te_t,1),1);

Ai_t_b=Sp_b.*ai_T ;

- 12. Propriétés de "Te_t"

Nombre réel égal à -1.1198

- 13. Propriétés de "Tc_t"

Nombre réel égal à Inf

- 14. Propriétés de "Ubat"

Nombre réel égal à 2.9849

- 15. Code de "Se_b"

Se_b=Senv ;

- 16. Code de "Q_b"

Q_b=Vh ;

- 17. Propriétés de "n_t"

Vecteur vertical composé de 24 réels compris entre 0.20893 et 0.49709

- 18. Propriétés de "FS"

Nombre réel égal à 0.75637

- 19. Code de "Svit_b"

Svit_b=Svit_r ;

- 20. Propriétés de "gamma_t"
Nombre réel égal à 277.5343

- 21. Code de "Sp_b"
Sp_b=Sh ;

- 22. Propriétés de "ai_T"
Vecteur vertical croissant composé de 3 entiers naturels compris entre 2 et 7

- 23. Propriétés de "n_T"
Vecteur vertical composé de 3 entiers naturels compris entre 74 et 237

- 24. Code de "Senv"
Senv = mu.Senv ;

- 25. Code de "Vh"
Vh = mu.Vh ;

- 26. Code de "Svitr"
Svitr = mu.Svitr ;

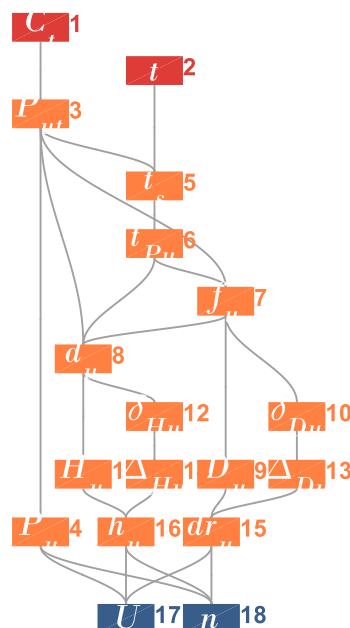
- 27. Code de "Sh"
Sh = mu.Sh ;

- 28. Propriétés de "mu"
Structure composée de 26 champs.

ANNEXE 4 : ESTIMATION DES BESOINS EN ECS D'UN ENSEMBLE URBAIN

I. Calcul des charges en ECS d'un ensemble urbain	42
- 1. Charge totale.....	43
- 2. Instants ordonnés de la consommation d'ECS	43
- 3. Charge pour chaque instant de la consommation d'ECS.....	43
- 4. Ordonnées	43
- 5. Instants ordonnés des différents usages liés à la consommation d'ECS	44
- 6. Ensemble des instants des différents usages liés à la consommation d'ECS.....	44
- 7. Fin de l'usage	44
- 8. Début de l'usage	44
- 9. Durée de référence de l'usage	45
- 10. Durée ajoutée ou retranchée par rapport à la durée de référence	45
- 11. Horaire de référence de l'usage.....	45
- 12. Horaire avancé ou reporté par rapport à l'horaire de référence	45
- 13. Incertitude sur la durée de l'usage.....	45
- 14. Incertitude sur l'horaire de l'usage	45
- 15. Durée de l'usage	46
- 16. Plage horaire de l'usage	46
- 17. Matrice des usages	46
- 18. Nombre de bâtiments.....	46
II. Codes et propriétés	47

I. Calcul des charges en ECS d'un ensemble urbain



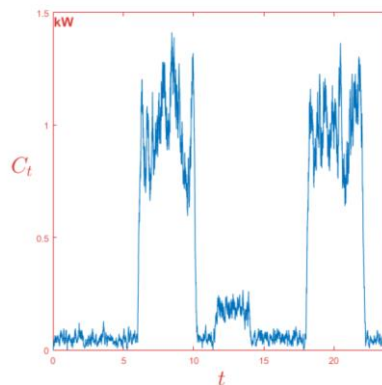
$$[C_t, t] = \text{chargeselec}(U, n)$$

- 1. Charge totale

La charge totale représente l'évolution de la puissance appelée par les usages au cours de la journée. Avec les usages considérés, les besoins en ECS sont très faibles en comparaison avec les ordres de grandeurs généralement obtenus pour les besoins en chauffage (mais également au regard des informations données dans le cours : 750 kWh/an pour un bâtiment avec 2,5 personnes, contre environ 3,3 MWh/an pour 822 bâtiments ici). Cependant, il est nécessaire de prendre en compte ces besoins car pour les ensembles urbains les plus performants, ceux-ci ne sont pas négligeables. Il pourrait être intéressant d'affiner la matrice des usages afin d'observer l'impact des besoins en ECS sur le bilan d'un ensemble urbain.

$$C_t = \sum (P_{ut}, 1)$$

exprimé en kW



Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal composé de 26282 entiers naturels compris entre 0 et 1472.2.

- 2. Instants ordonnés de la consommation d'ECS

$$t = t_s'$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal croissant composé de 26282 réels compris entre 0 et 24.

- 3. Charge pour chaque instant de la consommation d'ECS

$$P_{ut} = f(P_u, d_u, f_u, t_s)$$

exprimé en W

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 6576 sur 26282 composée d'entiers naturels compris entre 0 et 22.

- 4. Ordonnées

$$P_u = \text{repmat}(U(:, 1), n, 1)$$

exprimé en W

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 entiers naturels compris entre 6.2 et 22. Ce vecteur est la répétition de la première colonne de la matrice des usages, donc des puissances de chaque usage, autant de fois qu'il y a de bâtiments dans l'ensemble urbain.

- 5. Instants ordonnés des différents usages liés à la consommation d'ECS

$t_s = \text{unique}(t_{Pu})$
exprimé en h

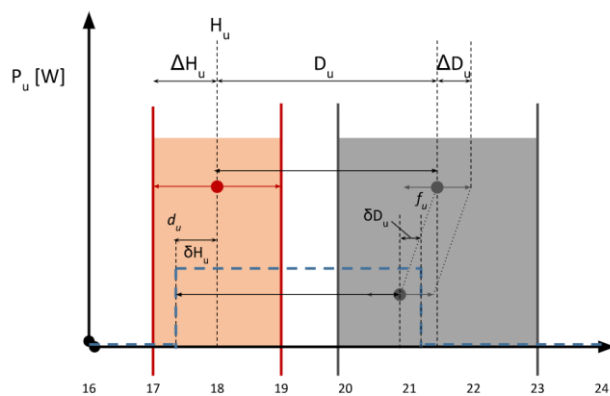
Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical croissant composé de 26282 réels compris entre 0 et 24.

- 6. Ensemble des instants des différents usages liés à la consommation d'ECS

$t_{Pu} = f(d_u, f_u)$
exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 26306 réels compris entre 0 et 24.

- 7. Fin de l'usage

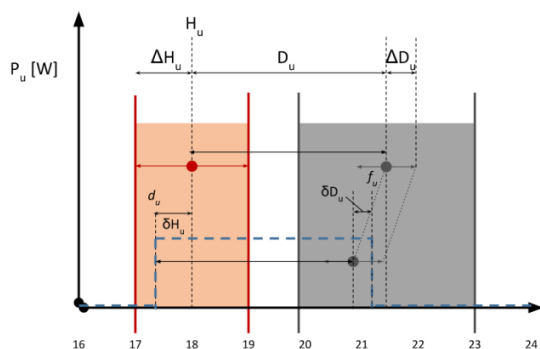


La fin f_u de la consommation d'ECS correspond à un instant décalé par rapport à la durée de référence D_u d'une incertitude δD_u . Cette incertitude est une durée prise au hasard dans l'intervalle ΔD_u grâce à un coefficient correspondant à un hasard compris entre 0 et 1.

$f_u = D_u + d_u + \delta D_u$
exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre 0.069 et 24.076.

- 8. Début de l'usage



Le début d_u de la consommation d'ECS correspond à un instant décalé par rapport à l'horaire de référence H_u d'une incertitude δ_{Hu} . Cette incertitude est une durée prise au hasard dans l'intervalle Δ_{Hu} grâce à un coefficient correspondant à un hasard compris entre 0 et 1.

$$d_u = H_u + \delta_{Hu}$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre 0.012 et 23.992.

- 9. Durée de référence de l'usage

$$D_u = \frac{dr_u, 2}{2}$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre 0.06 et 0.19.

- 10. Durée ajoutée ou retranchée par rapport à la durée de référence

$$\delta_{Du} = (1 - 2 \cdot \text{rand}(\text{size}(\Delta_{Du}))) \otimes \Delta_{Du}$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre -0.1 et 0.1.

- 11. Horaire de référence de l'usage

$$H_u = \frac{h_u, 2}{2}$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre 8 et 20.

- 12. Horaire avancé ou reporté par rapport à l'horaire de référence

$$\delta_{Hu} = (1 - 2 \cdot \text{rand}(\text{size}(\Delta_{Hu}))) \otimes \Delta_{Hu}$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre -11.99 et 11.99.

- 13. Incertitude sur la durée de l'usage

$$\Delta_{Du} = \frac{d(dr_u, 1, 2)}{2}$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre 0.04 et 0.11.

- 14. Incertitude sur l'horaire de l'usage

$$\Delta_{Hu} = \frac{d(h_u, 1, 2)}{2}$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 6576 réels compris entre 1 et 12.

- 15. Durée de l'usage

$$dr_u = \text{repmat}(U(:, [45]), n, 1)$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 6576 sur 2 composée de réels compris entre 0.02 et 0.3.

- 16. Plage horaire de l'usage

$$h_u = \text{repmat}(U(:, [23]), n, 1)$$

exprimé en h

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 6576 sur 2 composée de réels compris entre 0 et 24.

- 17. Matrice des usages

Pour appliquer le système logique à un cas concret, j'ai défini le tableau ci-dessous regroupant différentes catégories d'usages : entretien (vaisselle, linge, ...), hygiène (douche), et autres (cuisine, lavage des mains, ...).

Usage	Puissance appelée (kW)	Plage horaire		Durée	
		Heure de début au plus tôt (h)	Heure de fin au plus tard (h)	Durée minimale (h)	Durée maximale (h)
Entretien	6,2	7	9	0,02	0,1
Entretien	6,2	11,5	14	0,02	0,1
Entretien	6,2	18	22	0,02	0,1
Hygiène	22	6	10	0,08	0,3
Hygiène	22	18	22	0,08	0,3
Autres	8	0	24	0,02	0,1
Autres	8	0	24	0,02	0,1
Autres	8	0	24	0,02	0,1

L'encadré orange est la matrice regroupant les différents usages pris en compte.

Définition d'un usage : puissance déclenchée à un instant donné et appelée pendant une certaine durée.

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 8 sur 5 composée de réels compris entre 0 et 24.

- 18. Nombre de bâtiments

n=822

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Entier naturel égal à 822.

II. Codes et propriétés

- 1. Code de "C_t"

```
C_t=sum(P_u_t,1)/1000 ;
```

- 2. Code de "t"

```
t=t_s' ;
```

- 3. Code de "P_u_t"

```
P_u_t = zeros(numel(P_u),numel(t_s));  
for i=1:numel(P_u)  
    id=t_s>=d_u(i) & t_s<=f_u(i);  
    P_u_t(i,id)=P_u(i);  
end
```

- 4. Code de "P_u"

```
P_u= repmat(U(:,1),n,1) ;
```

- 5. Code de "t_s"

```
t_s=unique(t_P_u) ;
```

- 6. Code de "t_P_u"

```
dt=1/3600/10;  
t_P_u=[  
    0  
    d_u-dt  
    d_u  
    f_u  
    f_u+dt  
    24  
    ];  
t_P_u(t_P_u<0)=0;  
t_P_u(t_P_u>24)=24;
```

- 7. Code de "f_u"

```
f_u=D_u+d_u+delta_D_u ;
```

- 8. Code de "d_u"

```
d_u=H_u+delta_H_u ;
```

- 9. Code de "D_u"

```
D_u=sum(dr_u,2)/2 ;
```

- 10. Code de "delta_D_u"

```
delta_D_u=(1-  
2*rand(size(Delta_D_u))).*Delta_D_u ;
```

- 11. Code de "H_u"

```
H_u=sum(h_u,2)/2 ;
```

- 12. Code de "delta_H_u"

```
delta_H_u=(1-  
2*rand(size(Delta_H_u))).*Delta_H_u ;
```

- 13. Code de "Delta_D_u"

```
Delta_D_u=abs(diff(dr_u,1,2))/2 ;
```

- 14. Code de "Delta_H_u"

```
Delta_H_u=abs(diff(h_u,1,2))/2 ;
```

- 15. Code de "dr_u"

```
dr_u= repmat(U(:,[4 5]),n,1) ;
```

- 16. Code de "h_u"

```
h_u= repmat(U(:,[2 3]),n,1) ;
```

- 17. Propriétés de "U"

Matrice de 7 sur 5 composée de réels compris entre 0 et 2000

- 18. Propriétés de "n"

Entier naturel égal à 100

ANNEXE 5 : CALCUL DES BESOINS EN CHALEUR TENANT COMPTE DE LA MUTUALISATION DE LA CHALEUR FATALE D'UN CENTRE DE DONNÉES

I. Système logique permettant de calculer les besoins unitaires en chaleur d'un ensemble avec ou sans récupération de la chaleur fatale d'un centre de données.....	49
- 1. Besoins unitaires	49
- 2. Besoins en ECS	49
- 3. Surface habitable	49
- 4. Besoins en chauffage de l'ensemble urbain.....	49
- 5. Hauteur des bâtiments	50
- 6. Emprise au sol des bâtiments	50
- 7. Courbe de charge de la chaufferie.....	50
- 8. Puissance supplémentaire de fonctionnement du compresseur	50
- 9. Variable d'import	51
- 10. Puissance valorisable	51
- 11. Puissance appelée pour le chauffage par l'ensemble urbain pour chaque heure de l'année	51
- 12. Puissance en sortie du groupe frigorifique	52
- 13. Puissance de référence du compresseur	52
- 14. Puissance appelée par bâtiment pour chaque heure de l'année	52
- 15. Puissance appelée par le compresseur du groupe frigorifique	52
- 16. Efficacité de référence	52
- 17. Variable d'import	52
- 18. Puissance utile du centre de données.....	53
- 19. Efficacité du groupe frigorifique	53
- 20. Température de référence de la source froide	53
- 21. Température de référence de la source chaude	53
- 22. Import des résultats de Toaster Energy	54
- 23. Température cible du circuit d'eau glacée	54
- 24. Température cible du réseau de chaleur	54
II. Codes et propriétés	54

- 5. Hauteur des bâtiments

$h_b = \text{propriete}(\text{space})$
exprimé en m

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 200 entiers naturels compris entre 1 et 33.

- 6. Emprise au sol des bâtiments

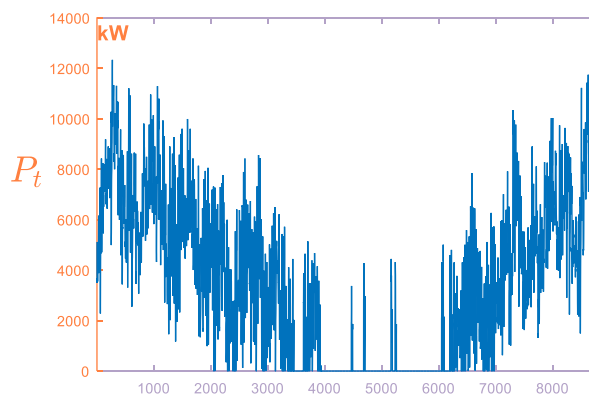
$a_b = \text{propriete}(\text{space})$
exprimé en m

Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur vertical composé de 200 réels compris entre 1.07 et 4159.19.

- 7. Courbe de charge de la chaufferie

Pour subvenir aux besoins de l'ensemble urbain, il est généralement nécessaire d'avoir une chaufferie permettant de produire la chaleur restante après valorisation de la chaleur produite par le centre de données.

$P_t = Bch_t - Pv_t$
exprimé en kW

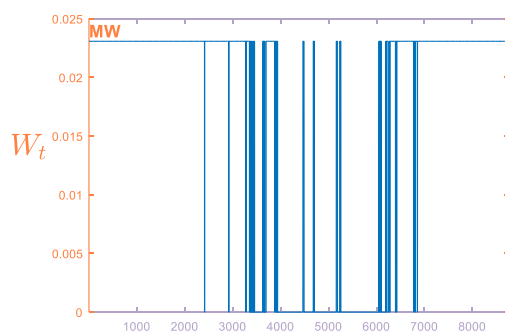


Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal composé de 8760 réels compris entre 0 et 12337.73.

- 8. Puissance supplémentaire de fonctionnement du compresseur

Il s'agit de la puissance supplémentaire nécessaire pour le fonctionnement du compresseur par rapport au cas de référence (pas de récupération de la chaleur fatale).

$W_t = f(Pv_t, W, W_0)$
exprimé en MW



Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal composé de 8760 réels compris entre 0 et 0.023.

- 9. Variable d'import

Cette variable permet d'importer les caractéristiques géométriques des bâtiments (périmètre, hauteur, emprise au sol).

$space = propriete(\mu)$

exprimé Sans unité

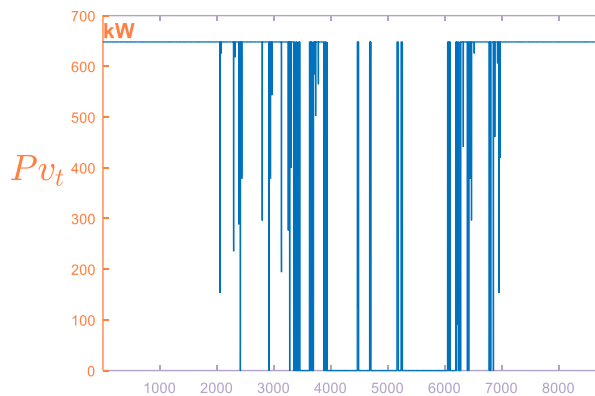
Structure contenant les champs ou les propriétés
 p_b "double" de format 200 sur 1
 h_b "double" de format 200 sur 1
 a_b "double" de format 200 sur 1

Informations utiles pour commenter la variable : Structure composée de 3 champs.

- 10. Puissance valorisable

$Pv_t = f(Pch, Bch_t, W, W_0)$

exprimé en kW

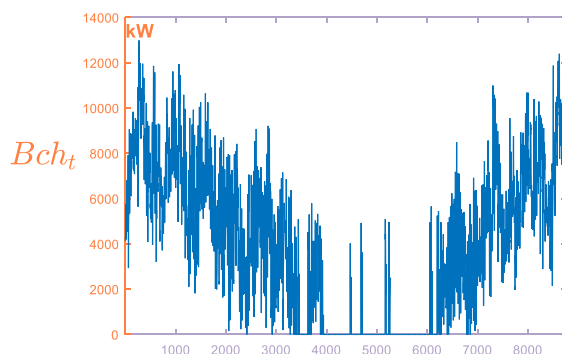


Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal composé de 8760 réels compris entre 0 et 648.08.

- 11. Puissance appelée pour le chauffage par l'ensemble urbain pour chaque heure de l'année

$Bch_t = Bchi_{tk}$

exprimé en kW



Informations utiles pour commenter la variable : Vecteur horizontal composé de 8760 réels compris entre 0 et 12985.81.

- 12. Puissance en sortie du groupe frigorifique

$$P_{ch} = P_{fr} + W$$

exprimé en MW

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 0.65.

- 13. Puissance de référence du compresseur

$$W_0 = P_{fr}/e_0$$

exprimé en MW

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 0.12.

- 14. Puissance appelée par bâtiment pour chaque heure de l'année

$$Bchi_u = \text{propiete}(\epsilon)$$

exprimé en kW

Informations utiles pour commenter la variable : Matrice de 200 sur 8760 composée de réels compris entre 0 et 1401.9.

- 15. Puissance appelée par le compresseur du groupe frigorifique

$$W = P_{fr}/e$$

exprimé en MW

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 0.15.

- 16. Efficacité de référence

L'efficacité de référence est l'efficacité de la machine frigorifique calculée avec les températures de référence.

$$e_0 = a.(T_{fr0}/(T_{ch0} - T_{fr0}))$$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 4.

- 17. Variable d'import

Il s'agit d'une variable d'import permettant d'exploiter les résultats obtenus grâce à l'application Toaster Energy.

$$\epsilon = \text{propiete}(\mu)$$

exprimé Sans unité

Structure contenant les champs ou les propriétés

Ubatl_b "double" de format 200 sur 1
Peril_b "double" de format 200 sur 1
Bchil_b "double" de format 200 sur 1
Bchil_t "double" de format 200 sur 8760
Ubatj_b "double" de format 200 sur 1
Perlj_b "double" de format 200 sur 1
Bchjl_b "double" de format 200 sur 1
Bchjl_t "double" de format 200 sur 8760

Informations utiles pour commenter la variable : Structure composée de 8 champs.

- 18. Puissance utile du centre de données

La puissance utile du centre de données est la puissance appelée par le matériel informatique. Cette puissance est rejetée sous forme de chaleur dans la salle IT. Ici,

$$P_{fr} = 0.5$$

exprimé en MW

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 0.5.

- 19. Efficacité du groupe frigorifique

L'efficacité énergétique (ou efficacité thermodynamique) est un nombre sans dimension, qui est le rapport entre ce qui peut être récupéré utilement de la machine sur ce qui a été dépensé pour la faire fonctionner. Selon le théorème de Carnot, l'efficacité d'une machine frigorifique est :

$$e_{frigo,rev} = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}$$

Les températures sont exprimées en Kelvin (K). $e_{frigo,rev}$ est la valeur maximale de l'efficacité d'une machine frigorifique fonctionnant avec ces sources. Une machine frigorifique fonctionnant sur un cycle non réversible a une efficacité plus faible que $e_{frigo,rev}$. D'après cette formule, l'efficacité est plus grande quand les températures des deux sources sont plus proches.

Pour rendre le résultat plus cohérent, je calcule un coefficient a tel que l'efficacité d'une machine frigorifique qui passe de $T_{fr} = 280,15 \text{ K}$ (7°C) à $T_{ch} = 308,15 \text{ K}$ (35°C) soit égale à 4, valeur courante selon Efficacy (De Carlan F. et al., 2017).

$$\text{J'ai donc } e_{frigo} = a * \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}},$$

$$\text{avec } a = 4 * \frac{308,15 - 280,15}{280,15} = 0,3998.$$

exprimés Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 3.38.

- 20. Température de référence de la source froide

La température de référence de la source froide est la température cible du circuit d'eau glacée en l'absence de système de récupération de la chaleur fatale. Ici, j'ai considéré qu'il n'y a pas de différence entre ces deux températures, la température de référence de la source froide est donc égale à 7°C , soit :

$$T_{fr0} = 280.15$$

exprimé en K

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 280.15.

- 21. Température de référence de la source chaude

La température de référence de la source chaude est la température en sortie du système de refroidissement lorsqu'il n'y a pas de système de récupération de la chaleur. Généralement, celle-ci est égale à 35°C , soit :

$$T_{ch0} = 308.15$$

exprimé en K

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 308.15.

- 22. Import des résultats de Toaster Energy

Cette variable est simplement une variable qui permet d'importer les résultats obtenues grâce à l'application Toaster Energy.

$\mu = NaN$

exprimé Sans unité

Informations utiles pour commenter la variable : Structure composée de 6 champs.

- 23. Température cible du circuit d'eau glacée

La température cible du circuit d'eau glacée est la température de l'eau qui circule dans le circuit de refroidissement du centre de données. Généralement elle est de 7°C, soit :

$T_{fr} = 280.15$

exprimé en K

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 280.15.

- 24. Température cible du réseau de chaleur

La température cible du réseau de chaleur est la température de l'eau qui circule dans le réseau, celle-ci est comprise entre 35 et 85°C, soit :

$308.15 \leq T_{ch} \leq 358.15$

exprimé en K

Informations utiles pour commenter la variable : Nombre réel égal à 313.32.

II. Codes et propriétés

- 1. Code de "B_u"

$B_u = ((Bch * 10^6) + (Becs * 10^3)) / Sh$;

- 2. Propriétés de "Becs"

Entier naturel égal à 375

- 3. Code de "Sh"

$Sh = \sum(a_b * (h_b / 3))$;

- 4. Code de "Bch"

$Bch = (\sum(P_t) * 10^{(-6)}) + (\sum(W_t) * 10^{(-3)})$;

- 5. Code de "h_b"

$h_b = space.h_b$;

- 6. Code de "a_b"

$a_b = space.a_b$;

- 7. Code de "P_t"

$P_t = Bch_t - Pv_t$;

- 8. Code de "W_t"

$W_t = \text{zeros}(1, \text{numel}(Pv_t))$;

for i=1:numel(Pv_t)

if (W-W_0)*1000>Pv_t(i)

W_t(i)=0;

else if (W-W_0)*1000<=Pv_t(i) & W~=0

W_t(i)=W-W_0;

else if (W-W_0)*1000<=Pv_t(i) & W==0

$W_t(i)=0$;

end;

end;

end;

end;

- 9. Code de "space"

space = mu.space ;

- 10. Code de "Pv_t"

$Pv_t = \text{zeros}(1, \text{numel}(Bch_t))$;

for i=1:numel(Pv_t)

if Bch_t(i)<(1000*Pch)

Pv_t(i)=Bch_t(i);

else if Bch_t(i)>=(1000*Pch)

Pv_t(i)=1000*Pch;

end;

end;

end;

for i=1:numel(Pv_t)

if (W-W_0)*1000>Pv_t(i)

Pv_t(i)=0;

end;

end;

- 11. Code de "Bch_t"

$Bch_t = \sum(Bch_i.b_t)$;

- 12. Code de "Pch"

Pch=Pfr+W;

- 13. Code de "W_0"

W_0=Pfr/e_0;

- 14. Code de "Bchi_b_t"

Bchi_b_t = epsilon.Bchi_b_t ;

Bchi_b_t(Bchi_b_t<0)=0;

- 15. Code de "W"

W=Pfr/e;

- 16. Code de "e_0"

a=4*((308.15-280.15)/280.15);

e_0=a*(Tfr_0/(Tch_0-Tfr_0));

- 17. Code de "epsilon"

epsilon = mu.epsilon ;

- 18. Propriétés de "Pfr"

Nombre réel égal à 0.5

- 19. Code de "e"

a=4*((308.15-280.15)/280.15);

e=a*(Tfr/(Tch-Tfr));

- 20. Propriétés de "Tfr_0"

Nombre réel égal à 280.15

- 21. Propriétés de "Tch_0"

Nombre réel égal à 308.15

- 22. Propriétés de "mu"

Structure composée de 6 champs.

- 23. Propriétés de "Tfr"

Nombre réel égal à 280.15

- 24. Propriétés de "Tch"

Nombre réel égal à 313.3202

ANNEXE 6 : ÉTUDE DE SENSIBILITÉ SUR LA PÉRIODE DE CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS

Tableau 1 - Périodes et caractéristiques

Période de construction	Conductance des parois opaques (W/m²)	Conductance des parois vitrées (W/m²)	Conductance de la toiture (W/m²)	Facteur de surface de toit*	Taux de vitrage**	Facteur solaire du vitrage	Taux de renouvellement de l'air	Coefficient d'inertie	Apports internes (kWh/m²/an)
Avant 1800	1.83	4.95	1.83	1.5	0.13333	0.65	0.7	2.983	22.3
1801-1850	2.065	4.95	2.065	1.5	0.2	0.65	0.7	2.983	22.3
1851-1914	2.215	4.95	2.215	1.5	0.2	0.65	0.7	2.983	22.3
1976-1981	1.8	2.8	1.8	1	0.33333	0.65	0.5	2.983	22.3
1981-1989	1.15	2.8	1.15	1	0.26667	0.65	0.5	2.904	22.3
2000-2009	0.65	1.2	0.65	1	0.26667	0.65	0.4	2.904	22.3

*Facteur de surface de toit par rapport à la surface au sol

**Taux de vitrage par rapport à la surface totale de l'enveloppe

Tableau 2 – Résultats

Ces résultats ont été obtenus en utilisant le système logique présenté en annexe 6 avec une puissance égale à zéro pour le centre de données (c'est-à-dire un cas habituel sans récupération de chaleur fatale). L'ensemble urbain utilisé ici est celui étudié dans la première application.

Période de construction	Besoins unitaires	Tirage aléatoire 24	314,75
Tirage aléatoire 1	316,16	Tirage aléatoire 25	313,71
Tirage aléatoire 2	310,82	Tirage aléatoire 26	305,94
Tirage aléatoire 3	300,29	Tirage aléatoire 27	324,39
Tirage aléatoire 4	312,56	Tirage aléatoire 28	315,56
Tirage aléatoire 5	317,52	Tirage aléatoire 29	318,01
Tirage aléatoire 6	314,25	Tirage aléatoire 30	306,55
Tirage aléatoire 7	319	Tirage aléatoire 31	317,98
Tirage aléatoire 8	313,35	Tirage aléatoire 32	306,66
Tirage aléatoire 9	326,78	Tirage aléatoire 33	309,03
Tirage aléatoire 10	312,61	Tirage aléatoire 34	317,9
Tirage aléatoire 11	320,34	Tirage aléatoire 35	316,28
Tirage aléatoire 12	320,02	Tirage aléatoire 36	322,19
Tirage aléatoire 13	317,38	Tirage aléatoire 37	308,75
Tirage aléatoire 14	322,58	Tirage aléatoire 38	302,48
Tirage aléatoire 15	309,52	Tirage aléatoire 39	310,42
Tirage aléatoire 16	327,14	Tirage aléatoire 40	309,12
Tirage aléatoire 17	305,07		
Tirage aléatoire 18	308,07		
Tirage aléatoire 19	316,38		
Tirage aléatoire 20	300,07		
Tirage aléatoire 21	295,14		
Tirage aléatoire 22	323,01		
Tirage aléatoire 23	304,53		
		Minimum	295,14
		Maximum	327,14
		Écart type	7,53
		Moyenne	313,31
		Coefficient de variation	0,0240
		Coefficient de variation (%)	2,40

Mindjid Maïzia : toaster integral, 2016-2022, PolyTech Tours.

Systèmes logiques en annexes générés avec toaster systems et publiés avec MATLAB® R2015a.

Directeur de recherche :

Mindjid Maïzia

Maxime Ott

PFE/DAE5

UIT/RESEAU

2020-2021

Datacenter et mutualisation de l'énergie : comment exploiter à l'échelle urbaine l'énergie semi-fatale engendrée par la consommation électrique des centres de données ?

Résumé : Afin d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris, il est nécessaire d'explorer toutes les solutions susceptibles de nous permettre de réaliser des économies d'énergie à grande échelle. Parallèlement, on constate que de plus en plus de datacenters sont nécessaires pour répondre à la croissance du secteur du numérique, et que la tendance est d'implanter de telles infrastructures en milieu urbain. L'objectif de cette étude est alors de montrer que la mutualisation de la chaleur fatale produite par un datacenter permet de faire des économies d'énergie. Pour cela, j'ai d'abord réalisé un état de l'art sur la mutualisation de la chaleur fatale des datacenters. Ensuite, j'ai réalisé des modèles logiques permettant de calculer les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire d'un ensemble urbain. Enfin, j'ai réalisé un modèle permettant de calculer l'effet de la mutualisation de la chaleur fatale d'un datacenter sur les besoins en chaleur d'un ensemble urbain en prenant en compte le type de réseau de chaleur utilisé, ainsi que des variations journalières et inter saisonnières des besoins en chaleur. L'application de ces modèles à deux cas d'étude m'a permis de montrer que le potentiel thermique des centres de données permet de réduire significativement les besoins en chaleur des tissus urbains. Cependant, cette réponse ne peut être généralisée, en effet le contexte urbain du datacenter influe fortement sur le gain potentiel.

Mots Clés : datacenter, mutualisation, énergie fatale, valorisation, bilan énergétique, besoins en chaleur, bâtiment, réseaux de chaleur.