

Économies d'énergie engendrées par la récupération de chaleur émise par un data center et la mutualisation des besoins thermiques d'un quartier

Lucas Rodighiero

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, option RESEAU

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement. L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

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

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

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (PFE), 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.

Résumé :

En France, la part du secteur résidentiel-tertiaire dans la consommation totale de gaz naturel, de 49 % en 2019, est de plus en plus prédominante et essentiellement liée au chauffage des bâtiments (SDES, 2020). Du fait de cette forte dépendance aux énergies fossiles, il émet une quantité importante de gaz à effet de serre. Par ailleurs, les consommations énergétiques des data centers, qui représentent déjà près de 4 % de la consommation électrique mondiale, augmentent selon RTE de 5 % par an et sont totalement converties en chaleur. Il est question dans ce rapport d'adresser une réponse aux enjeux climatiques que soulèvent les chiffres précités. Ce dernier vise à mesurer les économies d'énergie réalisées à la fois par la valorisation de la chaleur émise par un data center et par la mutualisation des besoins thermiques d'un quartier.

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à Mindjid MAIZIA, directeur de recherche de ce projet de fin d'études et enseignant-chercheur au sein de Polytech Tours qui, dans un contexte inédit, a su me guider et me transmettre ses connaissances. Grâce à son écoute et son expertise, j'ai pu mener une mission en adéquation avec mes attentes et les attendus de la formation.

Je tiens également à remercier Sabine MADIN, Léonie MICHARD et Maxime OTT, camarades de promotion, pour leur aide précieuse dans les moments les plus délicats et qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Enfin, je remercie France GUILLEMIN et Alice BOURDA pour leur soutien et leur enthousiasme sans lesquels ce projet n'aurait pas abouti.

1. Introduction

D'une part, en France, le secteur résidentiel-tertiaire occupe la plus grande part de la consommation énergétique finale, tous secteurs confondus (Agriculture-Pêche, Industrie, Transports) et émet une quantité importante de gaz à effet de serre (SDES, 2020). Cela s'explique par l'utilisation de combustibles fossiles des systèmes produisant du chauffage et de l'eau chaude sanitaire. Sortir de cette dépendance aux énergies fossiles par des travaux d'isolation et un recours à des moyens de chauffage bas carbone est indispensable pour limiter le dérèglement climatique. Pour ce faire, les réseaux de chaleur alimentés en énergies renouvelables et de récupération présentent une solution efficace dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La substitution rapide d'énergies fossiles permise par ces derniers le qualifie de vecteur idéal pour mutualiser de manière massive des énergies peu carbonées. Avec un contenu moyen en CO₂ de 107 g/kWh, les réseaux de chaleur en France sont moins émissifs de 54 % par rapport au gaz naturel et 64 % par rapport au fioul domestique (SNCU, 2020).

D'autre part, le secteur du numérique est responsable de 4 % des émissions à l'échelle mondiale (The Shift Project, 2020). La cause principale étant l'augmentation du traitement et du stockage des données rendu possible par l'implantation des data centers. Ainsi, la consommation énergétique de ces centres de données qui représente près de 4 % de la consommation énergétique mondiale, croît selon RTE de 5 % par an. Ces centres de données regroupent des éléments comme des serveurs, des « racks » ou baies de stockage, des systèmes de réseaux et de télécommunications leur permettant d'échanger, de traiter et de stocker les données (Huang et al. 2020).

Si les data centers consomment de l'énergie afin d'assurer le fonctionnement continu des équipements informatiques, ils produisent en même temps une quantité importante de chaleur. Cette énergie thermique peut être récupérée et injectée dans des réseaux de chaleur. Compte tenu des enjeux climatiques, l'objectif lié à sa récupération est ainsi double. Dans un premier temps, il s'agit de rendre le mix énergétique fourni par les réseaux de chaleur

plus vertueux, et dans un second temps, de valoriser un flux qui resterait autrement sans usage.

1.2 Objectif de l'étude

Cet article se concentre dans un premier temps sur la réduction des besoins thermiques d'un quartier en récupérant la chaleur fatale émise par un data center. Il présente ensuite les effets de la dégradation des rendements d'une chaufferie sur sa consommation énergétique annuelle. Enfin, il s'intéresse aux économies d'énergie engendrées par la mutualisation des moyens de production de chaleur.

Le cas d'étude est le quartier du Belvédère de Talant (21240). L'ensemble urbain contient 772 bâtiments (Annexe 1).

Hypothèse retenue : la récupération de chaleur fatale auprès d'un data center couplée à la mutualisation des besoins thermiques engendrent des économies d'énergie significatives à l'échelle d'un quartier. Tout l'objet de l'étude sera de réfuter ou de valider cette hypothèse à partir de simulations réalisées grâce à des logiciels de calcul standards.

2. Dynamique des besoins énergétiques du quartier Talant Belvédère

La courbe de charge que suit la puissance appelée par le chauffage (ECC) et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) constitue le point de départ de l'étude. Les besoins en chauffage sont calculés à partir du module « Typologie Energie » de l'application Toaster Integral. Ce dernier analyse les besoins énergétiques à l'échelle urbaine en prenant en compte des paramètres clés présentés par la suite.

2.1 Dynamique des besoins en chauffage

Les besoins de chauffage sont la résultante d'un bilan effectué à l'échelle du bâtiment selon la réglementation thermique 1989. Ce bilan est le résultat des déperditions par l'enveloppe et par renouvellement d'air auxquelles sont retranchées les divers apports gratuits, principalement les apports solaires et internes. Dans cette étude, les bâtiments sont classés selon la performance thermique de leur enveloppe, dépendant directement de l'année de

construction (Annexe 2). Le modèle intègre les facteurs impactant sensiblement la consommation d'énergie d'un bâtiment comme l'occupation d'un bâtiment, le climat, la ventilation et l'isolation (Pannier et al., 2018).

Les variables d'entrées liées au bâti sont les suivantes :

U_{mur} : Conductance des murs en $W/m^2.K$
 $U_{vitrage}$: Conductance du vitrage en $W/m^2.K$
 U_{toit} : Conductance de la toiture en $W/m^2.K$
 F_{toit} : Surface de toit du bâti sans unité
 $Tx_{vitrage}$: Taux de vitrage en %
 $FS_{vitrage}$: Facteur solaire du vitrage en %
 Nv_{air} : Taux de renouvellement de l'air en vol/m^3
 $Inertie$: Coefficient d'inertie
 Ai : Apports internes en kWh/m^2

La température de consigne à l'intérieur des locaux varie arbitrairement de 19 à 21 °C. La température extérieure quant à elle, résulte de la moyenne glissante des températures prises sur les 20 dernières années par la station météorologique Dijon-Longvic.

Le modèle tient compte de la dynamique d'occupation des bâtiments. Ces derniers sont inoccupés la journée en semaine, et occupés toute la journée les week-ends.

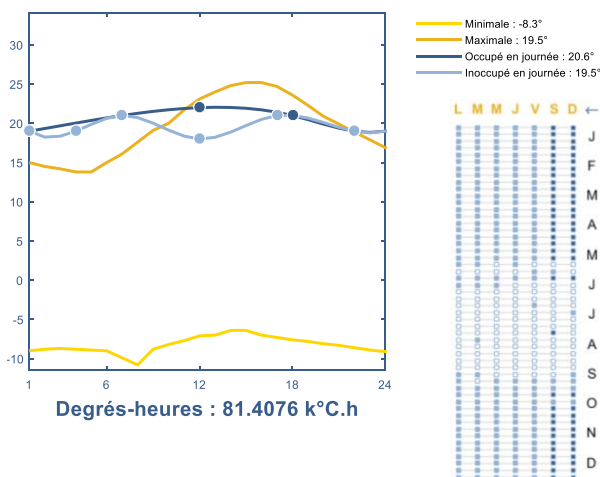


Fig. 1. Températures moyennes journalières minimales et maximales à Talant et à l'intérieur des locaux en fonction de leur occupation

La **Figure 1** présente à la fois l'évolution des températures moyennes journalières minimales et

maximales à Talant, et l'occupation des locaux. Elle fait apparaître également la quantité de degrés heures DH. Cette dernière exprime en même temps la rigueur du climat et le niveau de confort recherché pendant la période de chauffage. Dans son expression, la variable ne tient pas compte des effets inertiels des bâtiments. Or, ces derniers jouant un rôle important lorsque que le bâti est ancien, un coefficient d'inertie « *Inertie* » est pris en compte.

Afin de ne pas surestimer les besoins thermiques du quartier, le chauffage des locaux est stoppé lorsque la température extérieure moyenne est supérieure à 15 °C pendant trois jours consécutifs.

En tenant compte de ces différents paramètres, les besoins annuels du quartier en chauffage s'élèvent à $B_{ECC} = 90,1 GWh$. Quant à la puissance maximale appelé sur le réseau, elle est de $P_a = 34,9 MW$.

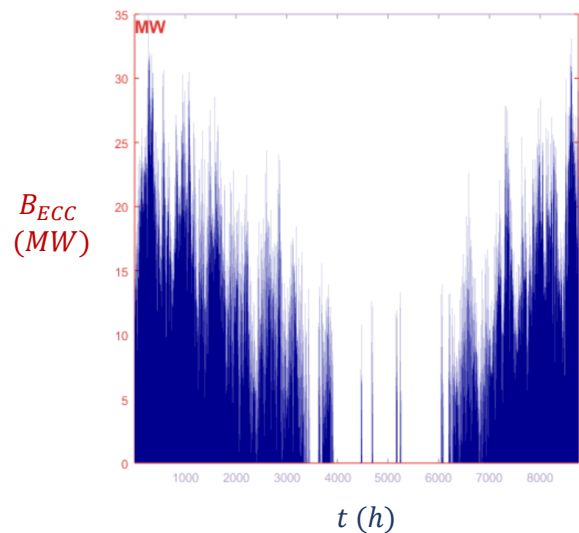


Fig. 2. Dynamique des besoins en chauffage du quartier Belvédère pendant une année

La **Figure 2** montre la dynamique des besoins en chauffage du quartier au cours d'une année. Il s'agit à présent de déterminer les besoins d'eau chaude sanitaire.

2.2 Dynamique de la production d'eau chaude sanitaire

Les besoins d'eau chaude sanitaire (ECS) d'un même logement peuvent différer fortement d'un jour à l'autre. Le temps de présence, les activités, le nombre d'occupant, tant de variables liées à la diversité des comportements individuels expliquent

ce phénomène (ADEME, 2016). Selon la **Figure 3**, cette variabilité est encore visible avec une agrégation de moins de 100 logements (variable n). Au-delà, l'allure de la demande d'eau chaude sanitaire est sensiblement la même et efface tous les effets induits par le caractère volatile des comportements individuels. Ainsi, la puissance appelée par un ensemble d'usagers est inférieure à la somme des puissances pouvant être appelée par chaque usager. C'est le phénomène de foisonnement.

Les quatre courbes présentées par la **Figure 3** résultent de simulations tenant compte de la durée d'utilisation, la puissance appelée et l'incertitude liées aux horaires de début et de fin d'utilisation de chaque appareil (douche, lave-linge, lavabo) (Annexe 3).

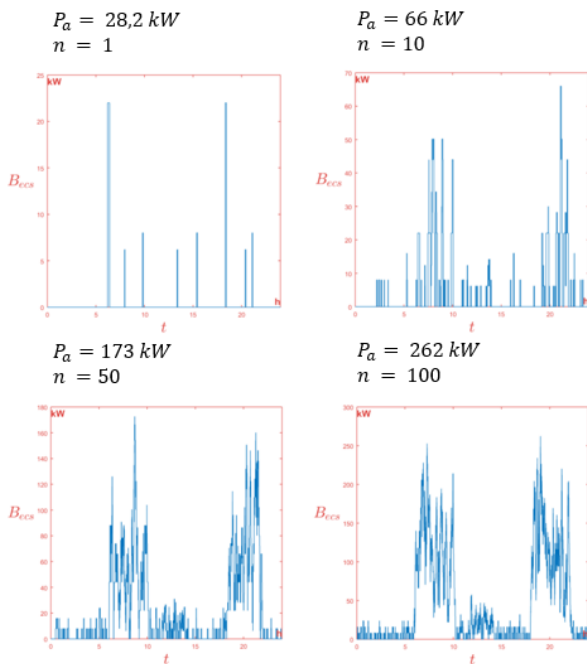


Fig. 3. Besoins journaliers en eau chaude sanitaire en fonction du nombre de logements raccordés au réseau

La mutualisation des besoins d'eau chaude sanitaire permet de diminuer de manière significative la puissance appelée par logement passant de 28,2 à 2,62 kW/log avec une centralisation de 100 logements. Néanmoins, ces deniers ne répondant qu'à trois usages spécifiques ayant des plages horaires limitées et des courtes durées d'utilisation, ils foisonnent peu (Fig. 3). Dans ce cas, l'étude considère que la production d'ECS est prioritaire par rapport au chauffage. Concrètement, cela revient à couper le chauffage du bâtiment lorsque la demande

en ECS devient trop importante. Cette considération est rendue possible à la fois par l'inertie thermique des bâtiments et par celle de l'eau circulant dans les surfaces de chauffe. La température à l'intérieur des locaux n'est donc pas affectée par la coupure du chauffage sur ces courtes durées. En limitant la puissance maximale appelée sur le réseau, cette hypothèse permet d'éviter un surdimensionnement de la chaufferie et de maximiser son temps de fonctionnement à puissance nominale. Cet aspect est étudié dans la Partie 4.

En revanche, la consommation énergétique liée à la production d'eau chaude sanitaire est significative et doit être déterminée. Les besoins d'un immeuble sont déterminés en fonction du nombre de logements standards qu'il compte selon le guide de l'ADEME de mai 2016. Par définition, le logement standard est :

- Un T3, le type d'appartement le plus rencontré,
- Dans le parc social, le type d'habitat pour lequel les données de suivis sont les plus nombreuses,
- Occupé par 2,1 personnes, correspondant aux taux moyens d'occupation d'après les statistiques USH-DEEH (INSEE, 2008)

Les besoins d'ECS du quartier sont déterminés selon la formule suivante :

$$C_{ECS} = Q_{eau} \times (T_s - T_e) \times V_{ecs} \times n$$

Avec,

Q_{eau} : Énergie nécessaire pour élever la température d'un litre d'eau d'un degré égale à 1,162 Wh

T_s : Température de sortie d'ECS fixée à 60 °C

T_e : Température d'entrée d'eau froide fixée à 16 °C

V_{ecs} : Besoins journaliers moyens d'un immeuble sur une année s'élevant à 70 L à 60 °C pour une température moyenne annuelle d'eau froide de 16 °C (ADEME, 2016)

n : Nombre de bâtiments présents le quartier, soit 772

Les besoins annuels d'eau chaude sanitaire de l'ensemble urbain s'élèvent à $C_{ECS} = 1,01 \text{ GWh}$. La production d'eau chaude sanitaire représente donc 1,12 % des besoins thermiques du quartier. Les

besoins en chaleur de l'ensemble urbain s'élèvent donc à $C_{tot} = 91,1 \text{ GWh}$.

3. Récupération de la chaleur fatale générée par un data center

Le data center, en émettant une quantité de chaleur due à son fonctionnement, satisfait une part des besoins énergétiques du quartier. Il convient dans un temps d'évaluer le gisement thermique récupérable.

3.1 Évaluation du potentiel thermique récupérable

Le premier poste de consommation d'un data center est le stockage et le traitement des données. Toute l'énergie utile à leur fonctionnement est rejetée dans la salle IT (ou salle serveur) sous forme d'apport thermique qui peut être récupérée. Cette quantité d'énergie valorisable est intimement liée à la température des rejets et au système de refroidissement.

Nous considérons que le réseau étudié est « basse température », qu'il accepte des températures inférieures à 60 °C et par conséquent, ne nécessite pas de solution technique permettant de relever cette température.

Le système de refroidissement retenu est un groupe froid eau-eau. Son fonctionnement peut se représenter par celui d'un système thermodynamique selon la **Figure 4**.

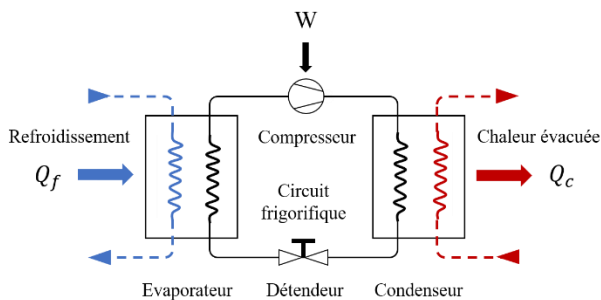


Fig. 4. Schéma du circuit frigorifique d'un groupe froid

Le fluide frigorigène circulant dans le circuit frigorifique possède des caractéristiques lui permettant de changer d'état pour céder de la chaleur, côté condenseur (C), et céder du froid, côté

évaporateur (E). C'est le compresseur (W) alimenté par le réseau électrique qui lui fournit le travail nécessaire pour réaliser ses changements d'états. L'efficacité frigorifique (EFF) d'un groupe froid se traduit par le rapport entre l'énergie cédée à l'évaporateur Q_f sur le travail du compresseur W . Ce coefficient est fixé à 4, valeur courante pour des groupes froids eau-eau de grosses puissances (De Carlan et al., 2017).

L'énergie évacuée au condenseur Q_c représentant la chaleur valorisable est obtenue selon le calcul suivant :

$$Q_c = Q_f \times \left(1 + \frac{1}{EFF}\right)$$

Avec :

Q_c : Quantité d'énergie calorifique valorisable en GWh

Q_f : Quantité d'énergie frigorifique nécessaire pour refroidir les serveurs informatiques en GWh

EFF : Efficacité frigorifique fixée à 4 (De Carlan et al., 2017)

La puissance appelée par les serveurs informatiques conditionne les besoins en refroidissement. L'étude considère un ratio de puissance installée $\alpha = 580 \text{ W/m}^2$, le ratio moyen s'élevant à 500 W/m² selon une menée par De Carlan et al. En 2017. En ce qui concerne le fonctionnement du data center, il a pour particularité d'être quasi constant sur l'année. De faibles variations existent à la journée mais sont considérées comme nulles à l'année (Fig. 5).

En tenant compte des paramètres précédemment cités, la consommation des groupes froids est obtenue selon le calcul suivant :

Soit,

$$Q_f = S_{IT} \times \alpha \times t$$

Avec,

S_{IT} : Surface IT (ou salle serveur) du data center

α : Ratio de puissance installée

t : Nombre d'heures de fonctionnement des serveurs informatiques à puissance nominale égal à 8760 (constant à l'année)

En considérant une surface IT de 1000 m², le potentiel thermique récupérable auprès du data center s'élève à $C_{DC} = 6,35 \text{ GWh}$ soit 529 équivalents-logements¹.

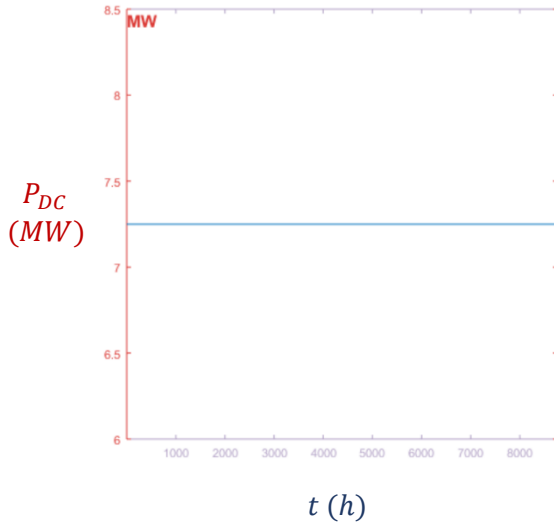


Fig. 5. Dynamique de la puissance appelée par le data center pendant une année

La **Figure 5** montre l'évolution de la chaleur émise par le data center au cours d'une année. Au vu des besoins thermiques du quartier qui varient au fil des saisons, la valorisation de cette chaleur s'avère problématique. C'est l'objet de la partie suivante.

3.2 Intégration de la chaleur fatale dans l'approvisionnement thermique du réseau

La chaleur fatale désigne de l'énergie sous forme thermique, issue de procédés dont l'objet initial n'est pas la production d'énergie, et qui est rejetée dans l'atmosphère (Chiche, 2020). En l'absence de dispositif de stockage, le potentiel thermique récupérable dépend de la dynamique des besoins en chauffage de l'ensemble urbain. Si un data center fonctionne en continu 24h/24, les besoins énergétiques, eux, varient au cours de la journée et des saisons. Afin de pallier cet effet, lorsque que les besoins en chauffage seront nuls, typiquement en été, la chaleur émise par le centre de données sera valorisée à travers la production d'eau chaude sanitaire. Il s'agit alors de préchauffer l'eau froide arrivant les systèmes de production d'ECS. Ce

procédé peut être assimilé à un moyen de stockage car le principe est de chauffer une masse d'eau lorsque que la demande en chauffage est nulle.

Cette pratique permet de valoriser 76,4 % de la chaleur issue du data center contre 71,9 % en se concentrant uniquement sur le chauffage. Cet écart représente un gain énergétique de 282 MWh. Les besoins thermiques du quartiers quant à eux, sont réduits à hauteur de 5,3 %. La récupération de chaleur auprès du data center engendre un gain énergétique s'élevant à 4,85 GWh et évite l'émission de 519 t_{eq}CO₂, en considérant un contenu moyen de CO₂ du réseau de 107 g/kWh (moyenne française selon l'enquête des réseaux de chaleur et de froid menée en 2020 par la SNCU).

Cette première partie de l'étude s'est concentrée sur les effets de la récupération de chaleur fatale sur les besoins du quartier. Il est pertinent de s'intéresser à présent aux effets de la dynamique de ces besoins sur la consommation énergétique du réseau de chaleur.

4. Effets de la dégradation des rendements d'une installation sur sa consommation énergétique

Les moyens de production de chaleur doivent, au maximum, être utilisés au voisinage de la puissance correspondant à leur rendement optimal et le moins possible à puissance réduite où leurs rendements sont inférieurs. Il est donc pertinent d'analyser dans quelle proportion la dégradation des rendements affecte la consommation énergétique du réseau.

4.1 Définitions des rendements

Le rendement moyen annuel du réseau de chaleur est obtenu en divisant les besoins annuels en chauffage du quartier par la consommation globale du dispositif :

$$\rho = \frac{\sum B_t}{\sum C_t}$$

¹ L'équivalent-logement représente la consommation d'un logement d'environ 70 m² pour une rigueur climatique de 2500 DJU. Selon le guide de création d'un réseau de chaleur (AMORCE, 2017), un logement type consomme 12 MWh de chaleur (40 % d'ECS et 60 % de chauffage).

Avec :

C_t : Consommation réelle du réseau en MWh

B_t : Besoins thermiques du quartier en MWh

Ce dernier est inférieur au rendement instantané à la puissance maximal.

La consommation réelle du réseau dépend directement du rendement instantané η_t .

$$C_t = \frac{B_t}{\eta_t}$$

Avec :

η_t : Rendement instantané du réseau

On appelle rendement instantané η_t , à un instant donné, le rapport de la puissance fournie aux usagers à celle fournie au réseau :

$$\eta_t = rm + (rx - rm) \times \frac{r - \min(r)}{\max(r) - \min(r)}$$

Avec :

rm : Rendement minimal de l'installation

rx : Rendement optimal de l'installation

r : Rendement de référence

Il varie fortement selon la puissance demandée sur le réseau à un instant. À la pointe de puissance, η_t peut être de l'ordre de 95 %. À la puissance minimale, il se dégrade fortement et peut passer à 60 % ou même plus bas (Dumitrescu, Minciuc, 2015).

Généralement, le rendement d'une chaufferie varie de façon logarithmique en fonction de la charge qui lui est soumise. La définition du rendement de référence r traduit cette hypothèse et se calcule comme suit :

$$r = \log(\sigma + e)$$

Avec :

σ : Normalisation du rendement

Soit,

$$\sigma = \frac{B_t - \min(B_t)}{\max(B_t) - \min(B_t)} \times P_{nom}$$

Avec :

P_{nom} : Puissance nominale de la chaudière et la puissance maximale appelée sur le réseau

Cette étape consiste à normaliser le rendement afin d'amener les données sur une échelle de 0 à P_{nom} en soustrayant le minimum, en divisant par le maximum de toutes les observations et en multipliant par la puissance nominale. La puissance nominale P_{nom} de l'installation est basée sur la puissance maximale appelée sur le réseau.

4.1 Application au quartier Belvédère à Talant

Le modèle utilisé permet de déterminer le rendement global d'une chaufferie en tenant compte de la dynamique des besoins annuels (Fig. 2). Afin de simplifier les calculs, l'étude ne tient pas compte de la topologie du réseau.

Dans le scénario où une installation répond à elle seule à la demande du quartier, le rendement global du réseau est de 0,91. En d'autres termes, la volatilité de la courbe de charge des besoins du quartier engendre au maximum, 7,8 GWh de pertes énergétiques annuelles. En ce qui concerne le rendement instantané de la chaufferie, il varie de 80 à 95 % (Annexe 4).

Ces résultats sont issus d'une simulation prenant en compte les besoins thermiques obtenus dans la Partie 3.2 et considérant une chaufferie avec les caractéristiques suivantes :

$$r_m = 0,80$$

$$r_x = 0,95$$

$$P_{nom} = 34,9 \text{ MW}$$

Aujourd'hui, il existe une diversité de moyens de production de chaleur plus ou moins performant selon les situations. Par exemple, des chaudières gaz peuvent être équipées avec plusieurs brûleurs ou avec des brûleurs modulants. Cela permet le fonctionnement à des charges partielles (entre 10 et 100 %), sans une baisse substantielle du rendement, et l'utilisation de ces équipements comme installations de pointe (Dumitrescu, Minciuc, 2015). Une chaufferie fonctionnant au bois quant à elle, est un moyen inertiel qui doit fonctionner au minimum à

25 % de sa capacité nominale selon l'expérience du Groupe Coriance. Ainsi, son rendement annuel global sera d'autant plus sensible à la variabilité de la demande énergétique.

Le rendement moyen annuel du réseau a été obtenu en ne considérant qu'une seule source qui répond aux besoins, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Mais alors, qu'en est-il dans le cas où un réseau de chaleur est alimenté par plusieurs sources de chaleur répondant à différents pics ? C'est l'objet de la partie suivante.

5. Effets de la décentralisation des systèmes de production de chaleur sur la consommation du réseau

Il convient de distinguer deux scénarios : l'un sans tenir compte du foisonnement des besoins en chaleur des bâtiments et le second en tenant compte du phénomène.

5.1 Scénario n°1 : Abstraction du foisonnement

Ce premier scénario constitue une première approche des effets de la décentralisation des systèmes sur la consommation réelle du dispositif. Il s'agit de faire varier le nombre de chaudières de 772 (décentralisation totale) à 1 (mutualisation totale). Il est alors pertinent de définir un taux de décentralisation τ_d correspondant directement au nombre d'installations produisant de la chaleur.

Soit,

$$\tau_d = \frac{n_c}{n_b} \times 100$$

Avec,

n_c : Nombre de chaudières variant de 1 à 772

n_b : Nombre de bâtiments présents dans le quartier égal à 772

Concrètement, un taux de décentralisation de 100 % revient à équiper chaque bâtiment d'un moyen de production de chaleur.

La typologie des bâtiments n'étant pas prise en compte dans ce scénario, cette simplification implique que ces derniers sont identiques. Ainsi, la

courbe de charge de chacune des chaudières est la même. Cette simplification permet d'appréhender les effets de la décentralisation sur la consommation globale de l'installation.

La **Figure 6** montre l'évolution de la consommation du quartier liée à la production de chaleur en fonction de la centralisation des systèmes de production de chaleur (n_c varie de 772 à 1).

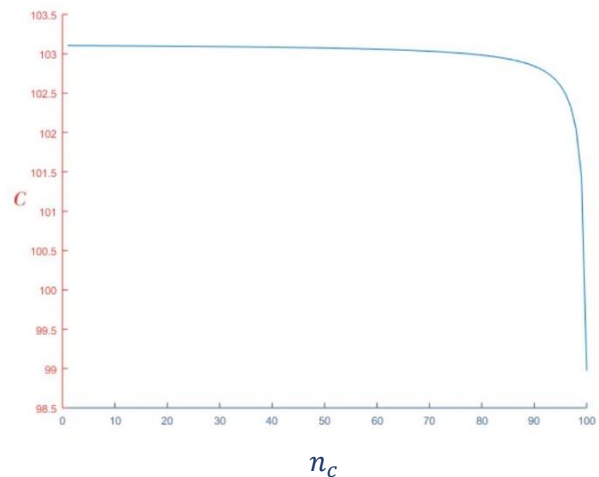


Fig. 6. Consommation énergétique du dispositif en fonction de la mutualisation des installations sans tenir compte du foisonnement

Lorsque que le nombre de chaudières passe de 772 à 69 la diminution en énergie consommée par le réseau est à peine perceptible, de l'ordre de 0,3 %. En dessous de 69 chaudières, en revanche, l'énergie consommée diminue de manière plus significative et chute de 3,7 %. Ainsi, favoriser l'indépendance énergétique des bâtiments lorsque que le taux de décentralisation τ_m est au moins de 8,9 % (soit 69 sources) n'a pas d'effet significatif sur la consommation globale réseau. A l'inverse, passer d'une chaufferie centralisée à quelques installations engendre des pertes non négligeables. Le gain énergétique apporté par la centralisation totale des installations s'élève à 4,1 GWh.

Ces constats s'appliquent de la même manière à la **Figure 7** qui représente l'évolution du rendement annuel global du dispositif en fonction de la décentralisation des moyens de production de chauffage.

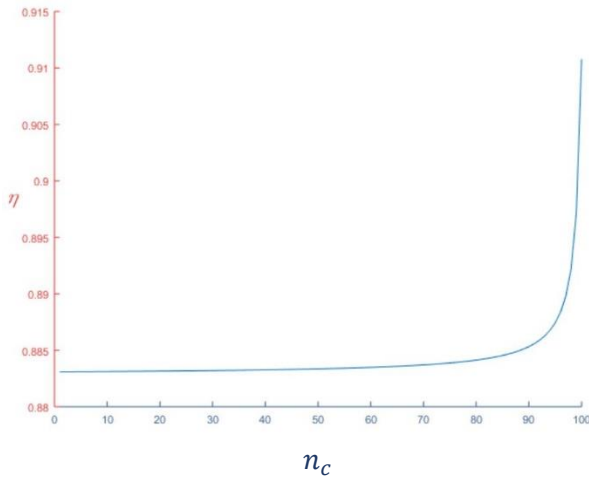


Fig. 7. Rendement moyen annuel du dispositif en fonction de la décentralisation des installations sans tenir compte du foisonnement

Le passage de 772 à 69 installations engendre une dégradation du rendement moyen annuel de 0,3 % tandis que celui de 69 à 1 l'affecte à hauteur de 2,8 %. Ainsi, η tend vers 0,91 soit une amélioration du rendement moyen annuel de 3,1 % par rapport à une décentralisation totale des sources de chaleur.

Ces deux courbes montrent l'existence d'un seuil, nombre d'unités de production à partir duquel l'effort fourni pour les mutualiser ou pour les décentraliser n'est pas récompensé. Par conséquent, agir sur ce levier est pertinent lorsque qu'il est question de centraliser l'ensemble des installations constituant le quartier.

Sans tenir compte du foisonnement des besoins thermiques des bâtiments, la consommation énergétique est minimale pour un système totalement centralisé et s'élève à 94 GWh.

5.2 Scénario n°2 : Prise en compte du foisonnement

Les besoins des usagers varient le long de l'année, mais également dans une même journée selon les paramètres cités en Partie 1. Le module Typologie Energie permet de déterminer la courbe de charge annuelle de chaque bâtiment selon leur typologie. Le modèle utilisé ne tient pas compte d'un ordonnancement particulier concernant le raccordement des bâtiments au réseau de chaleur. Les agrégats de bâtiments sont donc créés de manière

arbitraire. Comme pour le scénario n°1, le nombre de chaudières varie de 772 à 1.

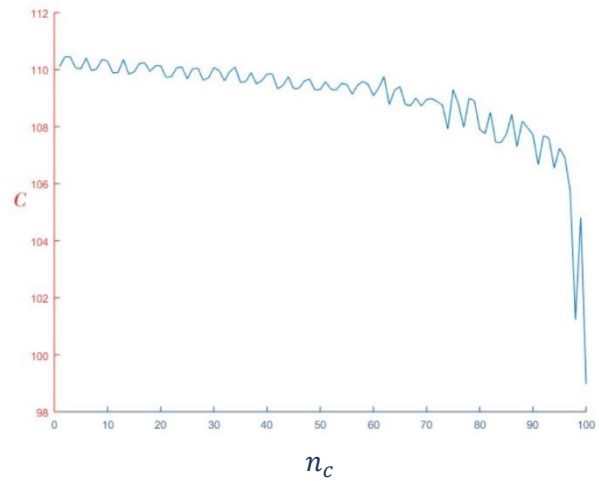


Fig. 8. Consommation énergétique du dispositif en fonction de la décentralisation des installations en tenant compte du foisonnement

La **Figure 8** résulte alors d'un empilement de courbes aux allures chaotiques. Elle montre les effets de la diversité des besoins sur la consommation globale du réseau. La demande en chaleur d'un établissement dépendant directement de sa surface habitable, parmi les consommateurs, certains seront plus gourmands en énergie que d'autres (Annexe 1). Ainsi, la formation d'agréats participe à la volatilité de la courbe. Si les allures des courbes obtenues sont similaires à celles du scénario n°1, les résultats obtenus diffèrent significativement.

Dans cette situation, les économies d'énergie moyennant une mutualisation totale des besoins thermiques du quartier s'élèvent à 11,5 GWh. Le gain est donc deux fois plus important en tenant compte du foisonnement des charges. Similairement à la **Figure 6**, la consommation globale du système est sensible au passage d'une chaufferie centralisée à quelques installations et peu affectée lorsque la décentralisation des installations est importante.

Le rendement moyen annuel du dispositif quant à lui semble évoluer de la même manière que le scénario précédent.

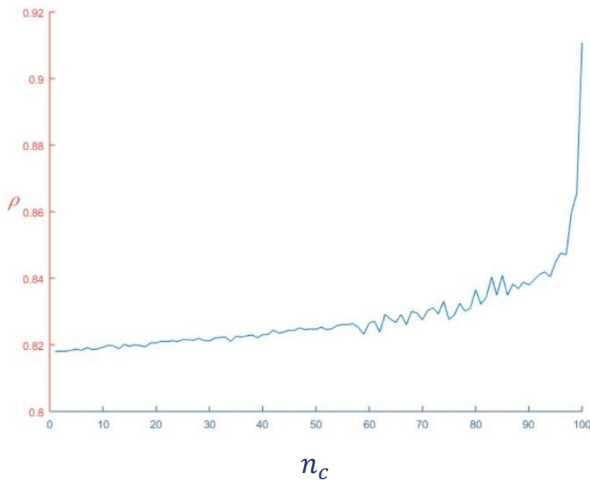


Fig. 8. Rendement moyen annuel du dispositif en fonction de la décentralisation des installations en tenant compte du foisonnement

La **Figure 8** indique que la décentralisation des moyens de production de chaleur dégrade fortement le rendement moyen annuel. Il en résulte que le passage à un système totalement centralisé engendre au maximum, une amélioration du rendement global de 10,2 % contre 3,1 % pour le scénario n°1. Ainsi, ce dernier est au plus bas lorsque le taux de décentralisation τ_m atteint 100 % et s'élève à 0,82. Contrairement au premier scénario, il est difficile de définir un nombre d'installations à partir duquel, il n'est plus efficace de mutualiser (ou décentraliser) les besoins.

Ces deux scénarios permettent de vérifier si la consommation du système de production de chaleur évolue de la même manière en fonction de la mutualisation selon si les besoins de chaque bâtiment sont pris en compte ou non. Il apparaît clairement que les allures de la consommation énergétique selon les deux scénarios sont similaires et qu'elle atteint son minimum pour un réseau totalement centralisé. En revanche, en tenant compte du foisonnement des besoins, l'ampleur du gain énergétique est plus importante. Dans le scénario n°1, les économies d'énergie réalisées par la mutualisation totale des besoins s'élèvent à 4,1 GWh et le rendement est amélioré à hauteur de 3,1 % ($\eta_{min} = 0,88$). Tandis que pour le scénario n°2, le gain énergétique passe à 11,6 GWh et le rendement moyen bénéficie d'une amélioration de 10,2 % ($\eta_{min} = 0,82$).

D'une part, ces deux scénarios illustrent que la prise en compte du comportement de chaque bâtiment n'est pas nécessaire en première approche. Si l'objectif de la démarche est simplement de montrer que la mutualisation des moyens de production de chaleur induit des économies d'énergie, alors il est tout à fait possible de considérer les bâtiments identiques. En revanche, les économies d'énergie réalisées en mutualisant les chaudières sont plus que doublées lorsque le modèle tient compte des caractéristiques de chaque bâtiment. L'intérêt de développer les réseaux de chaleur est donc renforcé avec cette considération.

D'autre part, les deux situations montrent que la création de micro-réseaux à l'échelle de l'îlot n'est pas pertinente. En effet, lorsque que les agrégats de bâtiments se forment (partie gauche des courbes Fig. 6 et Fig. 8), le gain énergétique est minime par rapport à l'effort fourni pour y parvenir. La solution se dirige donc vers une mutualisation totale et non partielle des besoins de l'ensemble urbain.

6. Conclusion

L'approche de la récupération de chaleur fatale et de la mutualisation des besoins thermiques met en exergue l'importance des réseaux de chaleur dans la transition énergétique. Ces deux pratiques permettent d'agir à la fois sur les besoins et sur la consommation annuelle du quartier. En effet, les besoins thermiques sont réduits à hauteur de 5,3 % (soit 4,9 GWh) à travers la valorisation de la chaleur émise par le data center. La consommation annuelle du quartier quant à elle est abaissée de 11 % (soit 12,3 GWh) par la centralisation des installations. Ainsi, ces deux procédés engendrent un gain énergétique de 17 GWh par rapport à la situation actuelle. En considérant que les systèmes de production de chaleur présents dans le quartier sont alimentés par du gaz naturel, le dispositif évite l'émission de 3 900 teqCO₂ (facteur d'émission du gaz naturel : 234 gCO₂/kWh selon la SNCU) chaque année. Cette étude montre que la consommation énergétique globale du quartier est minimale pour un réseau totalement centralisé avec ou sans prise en compte du foisonnement. L'hypothèse que les bâtiments présents dans le quartier sont identiques constitue une première approche valable des effets de la mutualisation sur la

consommation globale du réseau. En revanche, en tenant compte des caractéristiques de chaque bâtiment, les économies d'énergie réalisées par la mutualisation des besoins en chauffage sont deux fois plus élevées.

Dans la perspective de proposer des solutions qui pourraient faire l'objet d'une recherche future, il est pertinent de définir quelques limites aux modèles utilisés. Il est également important de jauger dans quelle mesure les incertitudes ou les simplifications du modèle apportent un bémol à ses enseignements.

La première limite majeure est l'abstraction de la topologie du réseau. Cette étude considère que les emplacements des sources de chaleur sont situés à côté des consommateurs. Or les pertes en ligne dépendants directement de la longueur des canalisations peuvent être significatives. De plus, compte tenu des nuisances apportées (approvisionnement et stockage du combustible, bruits, fumées), la chaufferie se situe, le plus souvent, à la périphérie de la zone à desservir.

La deuxième limite majeure constitue les modalités d'ordonnancement concernant la mutualisation des bâtiments. Ces derniers sont agrégés par le modèle de façon arbitraire. Or, dans la réalité il existe des indicateurs décisifs quant à la création d'un réseau de chaleur. Parmi eux, il y a la densité énergétique linéaire se définissant comme le rapport entre la quantité de chaleur livrée à l'année sur la longueur du tronçon de réseau. Il serait alors intéressant de définir un ordonnancement de telle manière à intégrer ce paramètre. Cette seconde limite rejoint la première car il s'agit de prendre en compte la topologie du réseau mais ajoute un critère qui est le besoin énergétique de chaque bâtiment.

7. Bibliographie

SDES, 2020. Chiffres clés de l'énergie – édition 2020.
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-11/datalab_70_chiffres_cles_energie_edition_2020_septembre2020_1.pdf

SNCU, 2020. Enquête sur les réseaux de chaleur et de froid – édition 2020.

<https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2021/01/Rapport-Global-%C3%A9dition-2020-Restitution-enquete-r%C3%A9seaux.pdf>.

THE SHIFT PROJECT, 2020. Déployer la sobriété numérique.

https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/10/Deployer-la-sobriete-numerique_Rapport-complet_ShiftProject.pdf.

HUANG, Pei, COPERTARO, Benedetta, ZHANG, Xingxing, SHEN, Jingchun, LÖFGREN, Isabelle, RÖNNELID, Mats, FAHLEN, Jan, ANDERSSON, Dan et SVANFELDT, Mikael, 2020. A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating. Vol. 258, pp. 114109.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114109>

PANNIER, Marie-Lise, SCHALBART, Patrick et PEUPORTIER, Bruno, 2018. Comprehensive assessment of sensitivity analysis methods for the identification of influential factors in building life cycle assessment. In : Journal of Cleaner Production. octobre 2018. Vol. 199, pp. 466-480.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.070>

ADEME, 2016. Guide technique – Les besoins d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif.
<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/besoin-eau-chaude-sanitaire-habitat-individuel-et-collectif-8809.pdf>.

HAMPIKIAN, Zélia, 2017. Structuration urbaine d'un réseau de chaleur et énergie fatale : la proximité comme variable dynamique. In : Flux. 2017. Vol. 109-110, n° 3, pp. 9.
<https://doi.org/10.3917/flux1.109.0009>

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

AMORCE, 2017. Guide de création d'un réseau de chaleur.
<https://normandie.ademe.fr/sites/default/files/guide-creation-reseau-chaleur.pdf>.

DUMITRESCU, Ion-Sotir et MINCIUC, Eduard, 2015. Réseaux de chaleur - Transport. 2015. pp. 30.

8. Annexes



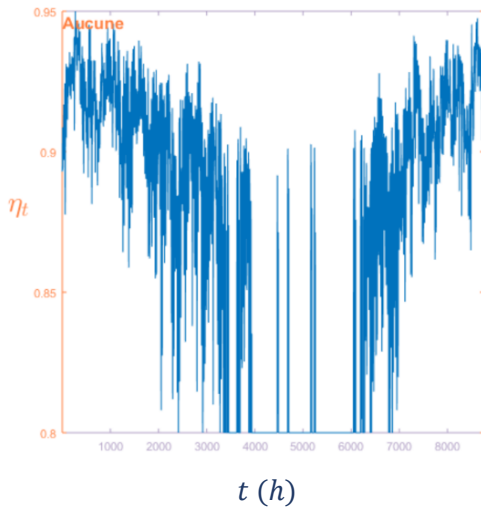
Annexe 1 : Zone d'étude – Quartier du Belvédère à Talant (21240)

	U_{mur}	$U_{vitrage}$	U_{toit}	F_{toit}	$Tx_{vitrage}$	$FS_{vitrage}$	Nv_{air}	$Inertie$	Ai
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

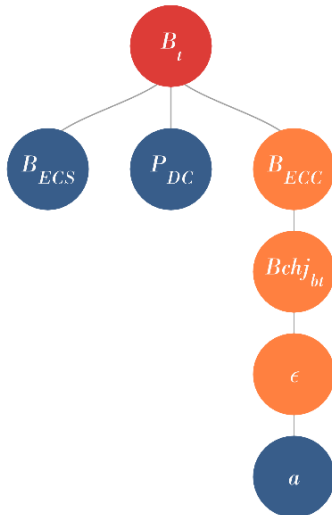
Annexe 2 : Valeurs des paramètres décrivant la performance thermique d'un bâtiment en fonction de sa période de construction

		Puissance appelée [kW]	Horaires de (...) à (...) [h]		Durées [h]	
Usages spécifiques à l'eau chaude sanitaire	Entretien (lave-linge, lave-vaisselle)	6,2	7	9	0,02	0,1
		6,2	11,5	14	0,02	0,1
		6,2	18	22	0,02	0,1
	Hygiène (douche, bain)	22	6	10	0,08	0,3
		22	18	22	0,08	0,3
	Autres (lavage des mains, du sol, cuisine)	8	0	24	0,02	0,1
		8	0	24	0,02	0,1
		8	0	24	0,02	0,1

Annexe 3 : Tableau des usages comprenant la puissance déclenchée à un instant donné et appelée pendant une certaine durée



Annexe 4 : Évolution du rendement instantané de la chaufferie au cours d'une année



```
function [B_t] = besoinsbelvedere
(B_E_C_S, P_D_C, a);

Input (variables exogènes) :

B_E_C_S : Besoins journaliers moyens d'eau
chaude sanitaire du quartier en MW
P_D_C : Puissance délivrée par le data
center en MW
a : Variable d'import permettant
d'exploiter les résultats obtenus par les
simulations sur le module Toaster Plus

Output (finalités) :

B_t : Dynamique des besoins thermique du
quartier en MW
epsilon : Variable d'import des besoins en
chauffage de chaque bâtiment
Bchj_b_t : Dynamique des besoins de chaque
bâtiment au cours d'une année en MW
```

B_E_C_C : Dynamique des besoins en chauffage du quartier au cours d'une année en MW

```
function epsilon = F886700762 ( a )
    epsilon = a.epsilon ;
end

function Bchj_b_t = F152366366 (
epsilon )
    Bchj_b_t = epsilon.Bchj_b_t ;
end

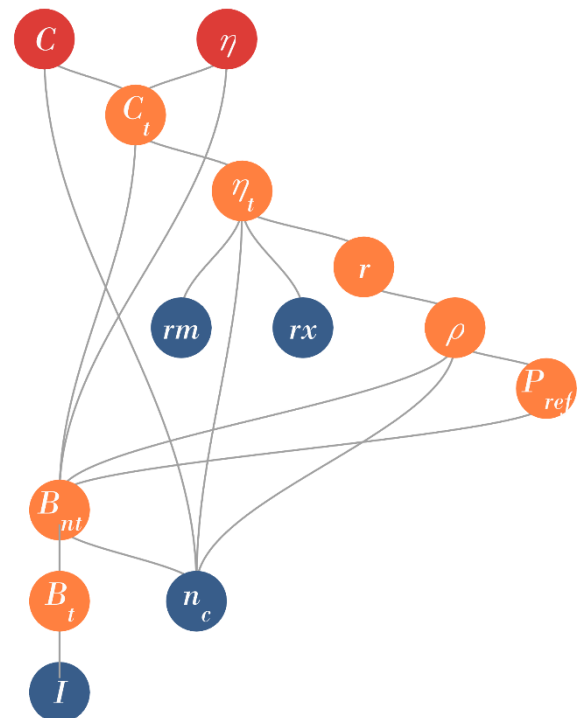
function B_E_C_C = F917424342 (
Bchj_b_t )
    Bchj_b_t(Bchj_b_t<0)=0;
    B_E_C_C=sum(Bchj_b_t)*10^(-3) ;
end

function B_t = F316428999 ( B_E_C_C ,
P_D_C , B_E_C_S )
    B_t=B_E_C_C+B_E_C_S-
transpose(P_D_C);
    B_t(B_t<0)=0;
end

end
```

Copyright : Mindjid MAIZIA 2016-2022 ,
PolyTech Tour

Annexe 5 : Modèle permettant de déterminer la dynamique des besoins thermiques du quartier Belvédère de Talant (21240) avec le code associé




```
function [C , eta] = rendement(rx , I ,
rm , n_c) ;

Input (variables exogènes) :
rx : Rendement thermique a la puissance
nominale de la chaudière en Aucune
I : Variable permettant d'importer la
dynamique des besoins thermiques du
quartier en Aucune
rm : Rendement minimal de la chaudière en
Aucune
n_c : Nombre de chaudières en Aucune

Output (finalités)
C : Consommation globale du réseau de
chaleur en GWh
eta : Rendement moyen annuel en Aucune
B_t : Dynamique des besoins thermiques du
quartier en MW
B_n_t : Dynamique des puissances appelées
par la ou les chaudières en MW
P_r_e_f : Puissance nominale de la
chaudière en MW
rho : Normalisation du rendement en Aucune
r : Rendement de référence en Aucune
eta_t : Rendement instantané en Aucune
C_t : Puissance appelée sur le réseau en
MW

function B_t = F642315234 ( I )
    B_t = I.B_t ;
end

function B_n_t = F905791937 ( n_c , B_t)

    B_n_t= repmat(B_t/n_c,round(n_c),1);
end

function P_r_e_f = F495066923 ( B_n_t )
    P_r_e_f=max(max(B_n_t)) ;
end

function rho = F42431137 ( B_n_t ,
P_r_e_f , n_c )
    rho=( (B_n_t-
repmat(min(B_n_t(:)),round(n_c),8760))./(r
epmat(max(B_n_t(:)),round(n_c),8760)-
repmat(min(B_n_t(:)),round(n_c),8760)))*P
_r_e_f;
end

function r = F658856481 ( rho )
    r=log(rho+exp(1));
end

function eta_t = F814723686 ( rm , rx ,
r , n_c )
    eta_t=rm+(rx-rm).*(r-
repmat(min(r(:)),round(n_c),8760))./(repma
t(max(r(:)),round(n_c),8760)-
repmat(min(r(:)),round(n_c),8760));
end

function C_t = F733873298 ( eta_t ,
B_n_t )
    C_t=B_n_t./eta_t;
end
```

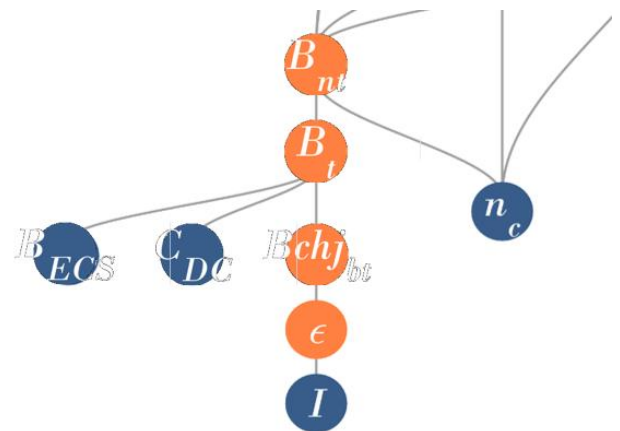
```
function eta = F874942721 (B_n_t , C_t)
    eta=sum(B_n_t)/sum(C_t);
end
```

```
function C = F375564946 ( C_t , n_c )
    C=sum(C_t(1,:))*n_c*10^(-3);
end
```

```
end
```

Copyright : Mindjid MAIZIA 2016-2022 ,
PolyTech Tour

Annexe 6 : Modèle permettant à la fois d'analyser les effets de la dynamique des besoins sur la dégradation du rendement moyen annuel de la chaufferie et les effets de la mutualisation des installations sur la consommation énergétique du réseau



```
function [ C , eta ] = consofoiso( rx ,
rm , n_c , I , B_E_C_S , C_D_C ) ;
% [ C , eta ] = consofoiso( rx , rm , n_c
, I , B_E_C_S , C_D_C ) ;

function epsilon = F695306808 ( I )
    epsilon = I.epsilon ;
end

function Bchj_b_t = F8295657 (epsilon)
    Bchj_b_t = epsilon.Bchj_b_t ;
end

function B_t = F623922644 (Bchj_b_t ,
C_D_C , B_E_C_S)

    B_t=Bchj_b_t+B_E_C_S./772-
C_D_C./772;

    B_t(B_t<0)=0;
end

function B_n_t = F905791937 ( n_c , B_t)
    B_t(B_t<0)=0;

    k=ceil(n_c*(1:size(B_t,1))/size(B_t,1));

    B_n_t=inf(round(n_c),size(B_t,2));
    for i=1:round(n_c)
        id=k==i;
```

```
B_n_t(i,:)=sum(B_t(id,:)*10^(-  
3),1);  
    end  
end  
end
```

Copyright : Mindjid MAIZIA 2016-2022 ,
PolyTech Tour

Annexe 7 : Partie modifiée du modèle précédent qui prend en compte le foisonnement des besoins thermiques de chaque bâtiment