



**POLYTECH<sup>®</sup>**  
**TOURS**

Département  
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs  
polytechnique  
de l'université de Tours

**CITERES**  
UMR 6173  
Cités, Territoires,  
Environnement et Sociétés

**Equipe IPA-PE**  
Ingénierie du Projet  
d'Aménagement, Paysage,  
Environnement

**Projet de Fin d'Etudes**

## **Systèmes urbains : récupération de la chaleur des équipements de restauration à l'échelle urbaine**



**Jan Thibault**

**2016-2017**

**S9**

**Directeur de recherche**  
**MAIZIA Mindjid**



# **Systèmes urbains : récupération de la chaleur des équipements de restauration à l'échelle urbaine**

**Directeur de recherche  
Maizia Mindjid**

**Auteur  
Jan Thibault**

**2016-2017**

# Avertissement

---

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

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

# Formation par la recherche et projet de fin d'études en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, 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 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 Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

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

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

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

# Remerciements

---

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon tuteur, Mr Mindjid Maizia qui m'a beaucoup aidé dans mes recherches. Son écoute et ses conseils m'ont permis d'avancer dans mon projet lorsque j'ai eu des difficultés.

Je tiens à remercier également Mr Serrhini Kamal et Mr Baptiste Hervé pour m'avoir conseillé sur certains sujets.

Je remercie également Pascale Le Halper et Marie-Madeleine Talon, bibliothécaires au Département Aménagement et Environnement pour leur disponibilité.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé et aidé lors de la réalisation de ce projet, notamment Kévin P., Arnaud L. et Pauline D., camarades de promotion.

# Sommaire

---

Avertissement.....	4
Remerciements .....	6
1. Introduction .....	8
2. Fonctionnement des réseaux de chaleur.....	8
3. Détermination des charges de production .....	11
3.1 Charge thermique des boulangeries.....	11
3.2 Charge thermique des restaurants.....	13
4. Détermination des besoins de chauffage .....	15
4.1 Besoins thermiques des bâtiments.....	15
4.2 Charge thermique des besoins .....	16
5. Mise en relation du réseau.....	17
5.1 Affectation des lieux de consommation à un lieu de production .....	17
5.2 Dimensionnement du réseau de chaleur .....	19
6. Conclusion et limites .....	23
References .....	24
Annexes .....	25

## 1. Introduction

L'économie d'énergie est un sujet courant au sein de la société actuelle. Les recherches pour développer les énergies renouvelables et utiliser des énergies propres sont essentielles dans le but de réduire les pollutions. En parallèle il est aussi possible de chercher à limiter les pertes d'énergie et notamment les pertes de chaleur. Le milieu urbain est un lieu privilégié pour ce type de recherches car c'est à la fois un lieu de production et de consommation où l'on observe une énergie fatale (c'est-à-dire perdue) induite par les activités urbaines telles que les services et autres équipements. Ici on cherche donc à profiter de cette énergie en récupérant la chaleur émise par les équipements de restauration. On cherchera à la réutiliser en chauffant les bâtiments alentours qui en ont besoin.

En effet, les équipements de restauration produisent une quantité de chaleur nécessaire pour la production alimentaire mais supérieure aux besoins de chauffage du seul bâtiment. Cette chaleur est alors rejetée à l'extérieur et appelée "chaleur fatale". Les équipements de restauration choisis pour cette recherche sont les restaurants et les boulangeries qui possèdent le matériel produisant le plus d'énergie thermique. D'après la Chambre des Métiers et de l'Artisanat de la région Rhône-Alpes, 53% de la facture énergétique des boulangeries est due seulement à la cuisson, ce qui témoigne de la puissance nécessaire à son fonctionnement et de la chaleur dégagée.

Pour récupérer cette chaleur, il existe un système urbain en pleine expansion aujourd'hui qui est le réseau de chaleur urbain. On commence donc par un état de l'art de ce qui existe aujourd'hui comme réseaux de chaleur et le lien qui est fait entre production et consommation. Malheureusement on se rend rapidement compte que cette relation est presque toujours faite en énergie Refs [1-2]. Il semblerait pourtant intéressant et bientôt indispensable de faire cette analyse en puissance, soit en dynamique. En effet, les activités fluctuent au cours du temps et même si les bilans de production et consommation correspondent il peut toujours y avoir des écarts entre la demande et la production à un temps donné. Par ailleurs on s'aperçoit également que ces analyses en dynamique se font dans le domaine de l'électricité.

L'objet de la recherche est de quantifier et modéliser le niveau de récupération de chaleur envisageable de ces équipements de restauration sur la ville de Lyon. Réaliser un modèle de récupération de la chaleur produite par les boulangeries et restaurants est-il possible ? On pose l'hypothèse que oui on peut mettre en place un système permettant de réutiliser cette énergie thermique et que la quantité de chaleur produite par les équipements de restauration sur la ville de Lyon est suffisante pour répondre aux besoins de chauffage d'autres bâtiments.

La première partie du rapport est consacrée à la description et au fonctionnement du réseau de chaleur urbain qui permet la circulation de la chaleur entre le lieu de production et celui de consommation. La seconde partie est une application qui permet de quantifier l'énergie produite par les équipements de restauration, les besoins en chauffage des bâtiments appelés par les consommateurs et la mise en place du réseau sur la ville de Lyon.

## 2. Fonctionnement des réseaux de chaleur

Le réseau de chaleur urbain, sous la forme d'une boucle fluide, est l'installation urbaine qui nous permet d'exploiter la chaleur produite par les équipements de restauration. Un réseau de chaleur est un système chargé de la distribution de chaleur à partir d'un ou plusieurs lieux de production vers différents lieux de consommation (bureaux, logements, services publics). Le réseau de chaleur urbain utilisé est composé de quatre parties principales [3] :

- Les unités de production de chaleur,
- Le circuit primaire,
- La sous-station,
- Le circuit secondaire.



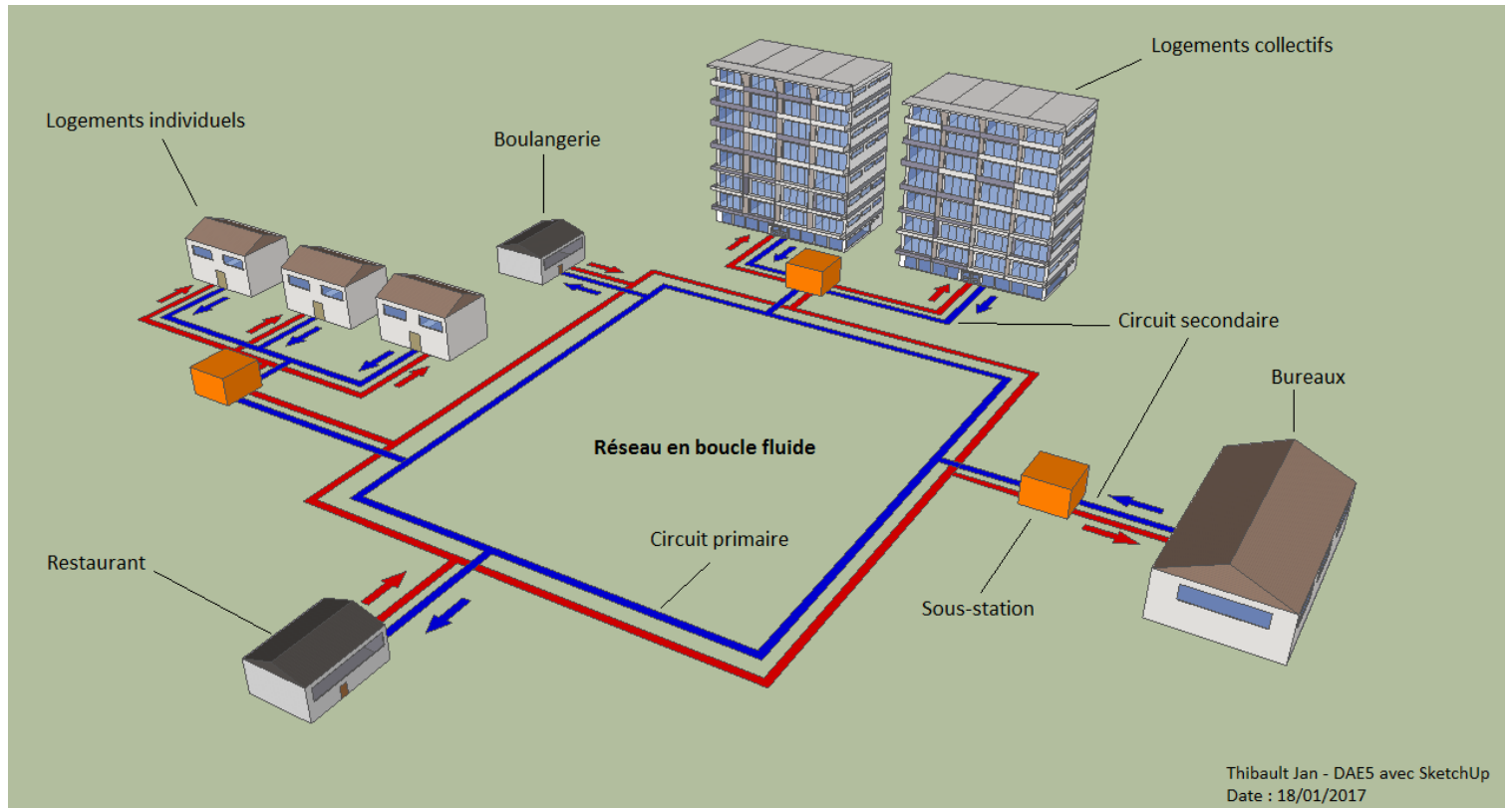


Figure 1: Schéma du réseau de chaleur en boucle fluide

### Les unités de production

Elles peuvent être considérées comme le point de départ du réseau de chaleur. Il en existe de différents types en fonction de la puissance nécessaire au réseau et de l'énergie qui est utilisée : gaz, fioul, biomasse, géothermie ou encore chaleur de récupération comme c'est le cas pour notre projet. En effet ici elles correspondent aux restaurants et boulangeries qui fournissent en chaleur le réseau. Les canalisations d'eau qui passent au-dessus des fours récupèrent la chaleur produite avant de se diriger vers le circuit primaire souterrain.

### Le circuit primaire

C'est un réseau souterrain composé de deux canalisations : la première permet la circulation de l'eau chaude ou vapeur d'eau des unités de production jusqu'aux sous-stations. La seconde assure le chemin inverse de l'eau froide vers les unités de production où elle sera de nouveau chauffée. C'est ce circuit qui donne le nom de "boucle fluide" au système. Il n'y a aucune transformation énergétique au cours de ce circuit. En fonction du lieu de consommation, l'eau circule à une température comprise entre 60°C et 300°C (usage industriel). Dans notre cas l'eau sera plus proche de 60°C. Cette température dépend également de la température extérieure. Une isolation thermique au niveau des canalisations est nécessaire afin de limiter la perte de chaleur.

### Les sous-stations

Elles sont situées proches de chacun des immeubles ou d'un ensemble de logements. Elles reçoivent l'eau chaude apportée par le réseau du circuit primaire et la redistribue par celui du circuit secondaire aux logements qui sont raccordés et qui en ont besoin. Il faut souligner que cette sous-station joue le même rôle qu'une station collective d'immeuble mais comporte moins d'inconvénients puisqu'elle n'est pas polluante. En effet, avec ce principe il n'y a pas de combustion dans l'enceinte de l'immeuble.

## Le circuit secondaire

Il est chargé de transporter l'eau chaude à partir de la sous-station vers les chauffages individuels des bâtiments qu'il dessert puis de l'y ramener une fois la chaleur dissipée. Cette partie du circuit n'est pas toujours incluse dans le réseau de chaleur à proprement parler.

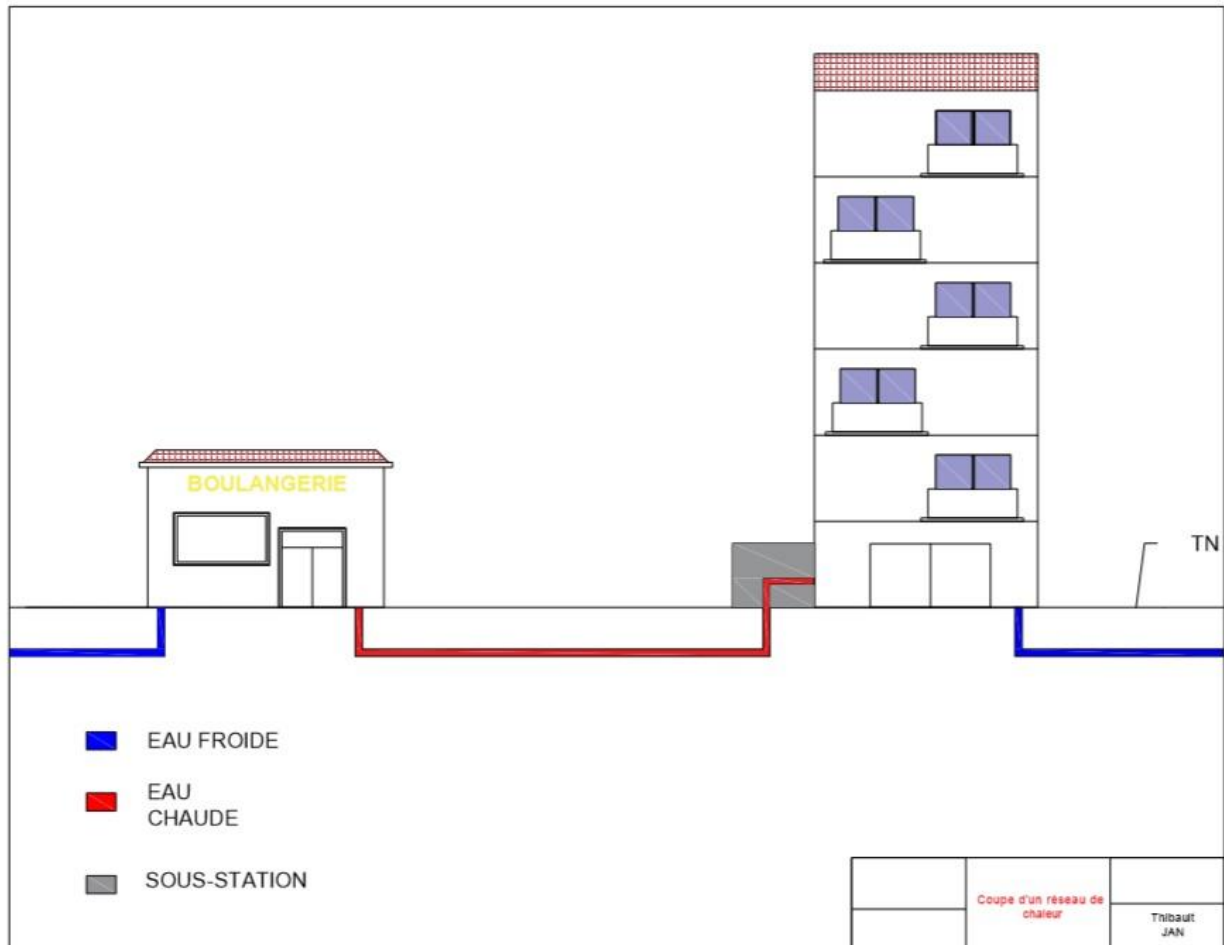


Figure 2: Coupe du circuit d'eau entre la source de production et la destination

Le chauffage urbain possède divers avantages. C'est tout d'abord et principalement une économie d'énergie à long terme. Pour la récupération de la chaleur par exemple, une fois que les installations sont mises en place, on ne fait que récupérer une énergie thermique qui aurait été définitivement perdue. La mise en place de réseaux de chaleur urbains permet également d'atteindre une indépendance énergétique de la ville et d'éviter une indépendance aux ressources polluantes comme le nucléaire. Ils sont aussi plus discrets que les chaufferies classiques concernant les nuisances (bruit, stockage des combustibles, énergies peu ou pas polluantes et donc meilleure qualité de l'air). D'une manière générale la mutualisation du chauffage permet de mieux maîtriser les contraintes liées à la production de chaleur. Les installations sont gérées à l'année par des professionnels qui s'occupent de l'efficacité énergétique du système.

Si le nombre de réseaux de chaleur urbains s'accroît si faiblement (1% par an [4]), c'est parce qu'il existe aussi des freins importants à l'installation de ces réseaux de chaleur. En effet leur installation est perturbée par l'organisation spatiale du territoire. L'installation de nouvelles unités de production demande de l'espace mais a aussi un coût de travaux important. En ce qui concerne l'installation du réseau de chaleur qui nous concerne, les unités de production et de consommation existent déjà et que les travaux consisteraient à raccorder les équipements de restauration par un réseau d'eau. On pourrait éventuellement envisager également de se raccorder au réseau déjà existant sur Lyon.

Le réseau de chaleur du Grand Lyon qui existe aujourd'hui, appelé réseau Lyon-Villeurbanne alimente l'équivalent de 45 000 logements. Il est composé de 390 sous-stations, 118km de canalisations et s'étend sur quatre arrondissements de Lyon et deux quartiers de Villeurbanne (source Energie Lyon Villeurbanne Avenir – ELVYA). C'est le troisième réseau de France par sa taille après les réseaux de Paris et de Grenoble. Il est composé d'une chaufferie fonctionnant à la cogénération, au gaz et au fioul capable de délivrer 196MW, d'une Unité d'Incineration des Ordures Ménagères dont la puissance peut atteindre 37MW, d'une unité de cogénération délivrant 30MW et d'une sous-station principale qui peut atteindre à elle seule une puissance de 20MW (voir carte ci-dessous).

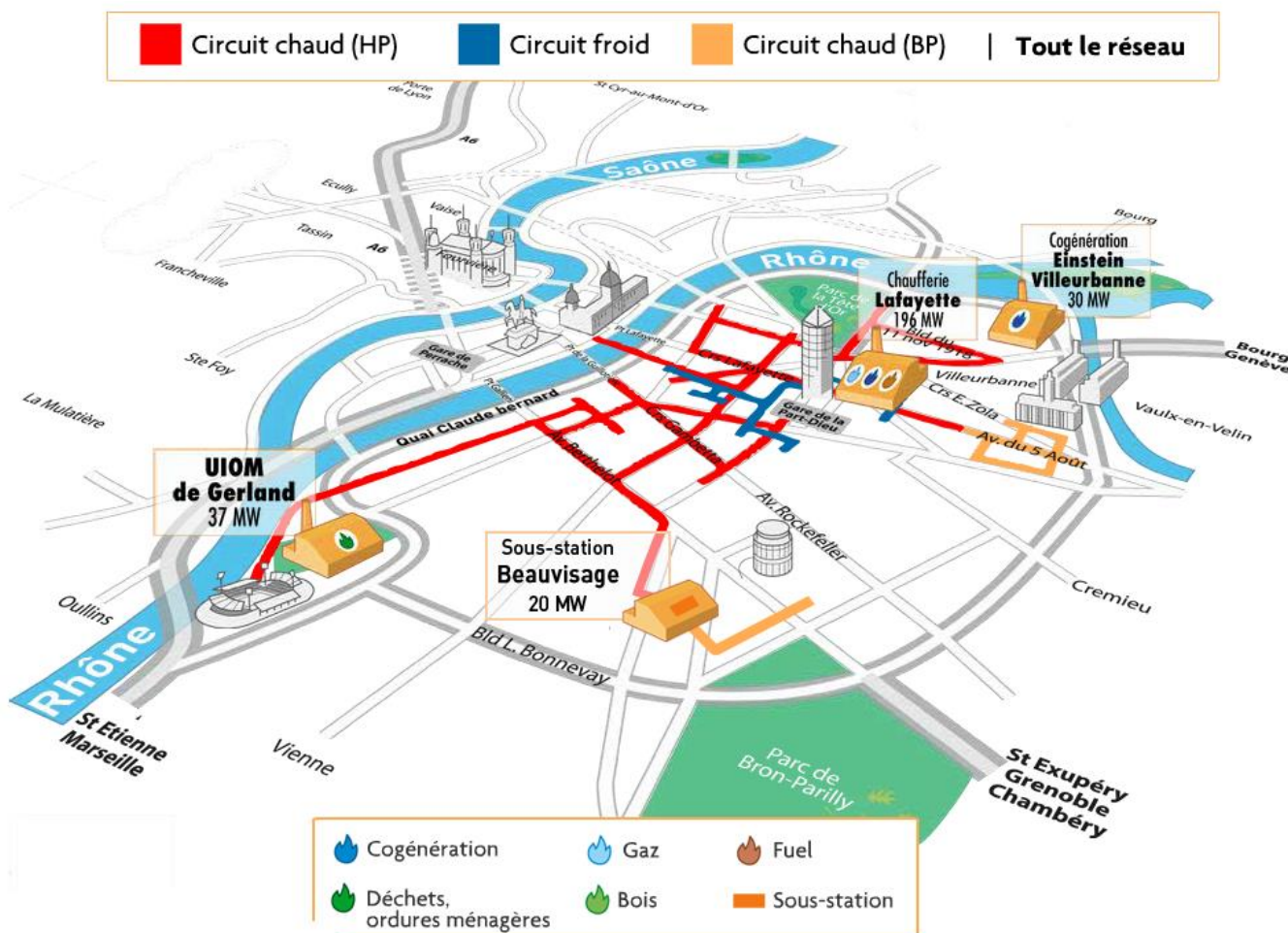


Figure 3 : Réseau de chaleur Lyon Villeurbanne Avenir - Source : ELVYA

### 3. Détermination des charges de production

Pour évaluer la quantité de chaleur dégagée par les équipements de restauration, la première étape consiste à créer un modèle qui permet de calculer cette valeur à partir de différents paramètres. On sait que la quantité de chaleur dégagée par ces équipements n'est pas la même à tous les moments de la journée : on aura donc un résultat final qui dépend du temps  $t$ . On pose l'hypothèse que la production est la même tous les jours au cours de l'année. Notre variable et résultat final qu'on appellera  $O_{jt}$  représentera donc l'offre de l'ensemble des équipements de restaurations  $j$  au cours du temps  $t$  sur une journée type. On essaye ensuite de déterminer la charge thermique des boulangeries avant de rajouter celle des restaurants.

#### 3.1 Charge thermique des boulangeries

On pose l'hypothèse que chacune de nos boulangeries produit la même quantité de chaleur. La variable  $O_{jt}$  dépend donc :

- de l'offre d'une seule boulangerie au cours du temps :  $O_{bt}$ ,
- du nombre de boulangeries :  $nb$ ,

Telle que  $O_{jt} = nb * O_{bt}$ .

Le nombre de boulangeries est une donnée physique qui ne dépend d'aucun autre paramètre. En revanche on peut chercher à savoir de quoi dépend  $O_{bt}$ . La principale source de chaleur de la boulangerie est bien entendu le four. Pour déterminer l'offre d'une boulangerie  $O_{bt}$  on cherche donc à connaître les éléments suivants :

- le nombre de fours moyen dans une boulangerie,
- la courbe de charge d'un four au cours d'une journée type :  $four\_b$ .

Dans un premier temps le nombre de fours moyens dans une boulangerie a été arbitrairement fixé à 2, et donc ainsi :  $O_{bt} = 2 * four\_b$ . La courbe de charges  $four\_b$  d'un four de boulangerie est réalisée selon l'hypothèse qu'un four fonctionne de 4h à 10h le matin à une puissance constante de 38kW. C'est la puissance moyenne d'un four électrique selon la Chambre des Métiers et de l'Artisanat en région Rhône-Alpes [5]. Le four électrique est utilisé par la majorité des boulangeries et possède aussi la puissance la plus basse (73kW pour un four à gaz et 81kW pour un four à fioul). Les données de la courbe sont rentrées sous la forme d'une matrice  $four\_b$  de 1x96 valeurs, soit une valeur de puissance toutes les 15min sur une journée type.

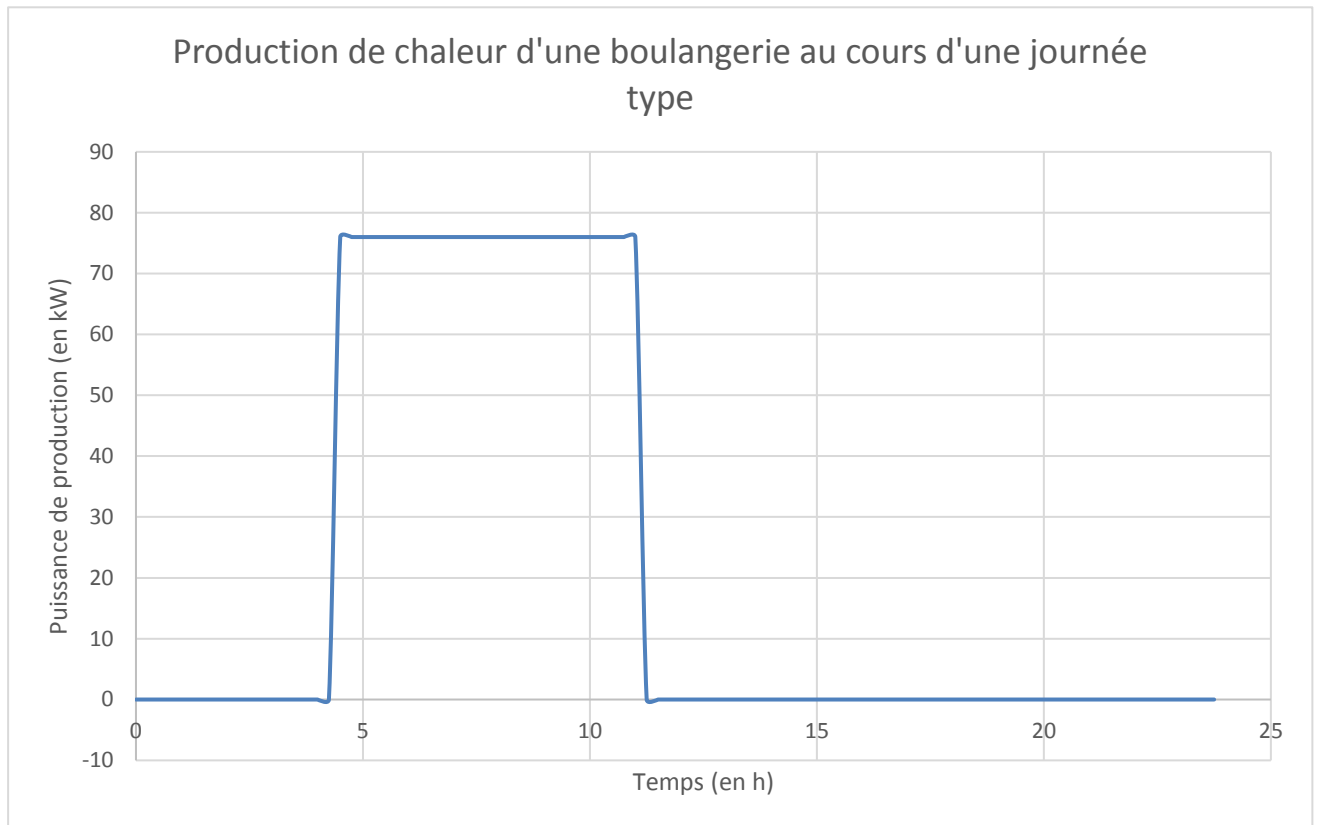
Après avoir réalisé les premiers calculs avec ces données, on choisit de vérifier les données de base de notre système en effectuant une étude rapide auprès des boulangeries de la ville de Tours. Le but est de savoir si le nombre de fours choisi est réaliste tout comme la durée sur laquelle ces fours fonctionnent et leur puissance de performance. Après avoir contacté plusieurs boulangeries, on finit par obtenir deux rendez-vous.

Pour la première boulangerie, on note la présence de deux fours. Le premier est un grand four à pain de 2m x 3m à une seule bouche et le second un peu plus grand et sur trois étages (six bouches). Le boulanger nous confirme que ces deux fours tournent en permanence entre 4h le matin et 12h, une plage horaire un peu plus large que celle imaginée à la base. Aucune information précise n'a pu être déterminée concernant la puissance des fours. La seconde boulangerie est également équipée de deux fours. Le premier est un four à pain de 36kW et le second un four électrique à pâtisserie sur 2 niveaux dont on ne connaît pas la puissance. En comparant ces caractéristiques à ceux que l'on retrouve auprès des vendeurs de matériel (CHR-restauration), on peut estimer sa puissance à environ 12kW. Concernant la durée de fonctionnement des fours, ils tournent cette fois en continu sur une plage horaire de 5h à 10h. Les informations complémentaires que l'on a pu retirer de ces entretiens sont que les boulangeries que l'on a pu visiter sont assez petites, typiques des centres-villes, et que certaines boulangeries où les personnes rencontrées ont travaillé précédemment sont parfois plus équipées.

En prenant en compte les différentes informations obtenues, on choisit de produire une courbe de charges à partir des éléments suivants :

- 2 fours par boulangerie
- 38Kw de moyenne pour les fours électriques comme précédemment
- Sur une plage horaire entre 4h30 à 11h

Les données ne changent finalement que très peu comparées aux précédentes et on peut donc confirmer la courbe de charges sur une journée type  $O_{bt}$  suivante comme réaliste :



Enfin, le nombre de boulangeries est obtenu à partir de la base de données de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). On en décompte **nb = 158** sur la ville de Lyon.

### 3.2 Charge thermique des restaurants

Pour les restaurants on procède exactement de la même manière afin de compléter notre calcul de  $O_{jt}$ . Ainsi on peut rajouter par simple addition

- l'offre d'un seul restaurant :  $O_{rt}$ ,
- le nombre de restaurants :  $nr$ ,

de telle manière que  $O_{jt} = nb * O_{bt} + nr * O_{rt}$ .

Concernant les restaurants, il est plus délicat de savoir quel matériel dégage le plus de chaleur, quelle est la quantité moyenne de ce matériel par restaurant et à quelle fréquence il est utilisé. Pour définir un matériel type on a donc choisi les éléments qualifiés de typiques d'une cuisine de restaurant selon l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME) et dont la courbe de charge est fournie [6]. Le matériel type d'un restaurant choisi est donc le suivant :

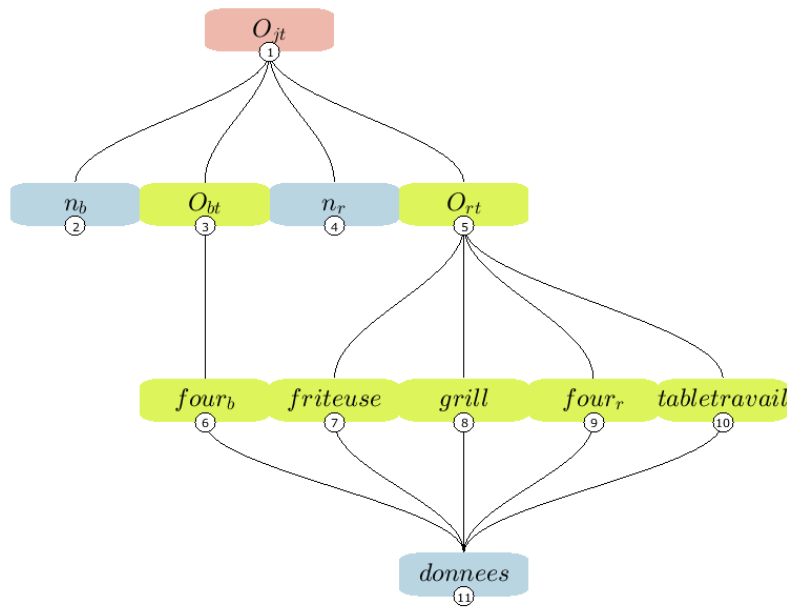
- 2 fours de restaurants :  $four\_r$ ,
- 2 tables de travail,
- 1 grill,
- 1 friteuse.

Ainsi on a  $O_{rt} = 2 * four\_r + 2 * tabletravail + friteuse + grill$ .

Les courbes de charges  **$four\_r$** , **friteuse**, **grill** et **tabletravail** sont obtenues à partir des données de l'ADEME. Le format des données de la courbe est le même que pour la boulangerie (1x96).

Le nombre de restaurants est obtenu à parti de la base de données d'Open Street Map (OSM) et on en compte **nr = 747** à Lyon.

Voici donc le système final réalisé qui permet de déterminer la quantité de chaleur dégagée par l'ensemble des équipements de restauration :



$O_{jt}$ : Puissance produite par l'ensemble des boulangeries et restaurants en W
1 $O_{jt} = n_b \cdot O_{bt} + n_r \cdot O_{rt}$
$n_b$ : Nombre de boulangeries
2 $n_b = 158$
$O_{bt}$ : Puissance produite par une boulangerie en W
3 $O_{bt} = four_b$
$n_r$ : Nombre de restaurants
4 $n_r = 747$
$O_{rt}$ : Puissance produite par un restaurant en W
5 $O_{rt} = friteuse + tabletravail + four_r + grill$
$four_b$ : Courbe de charge d'un four de boulangerie au cours d'une journée type en W
6 $four_b = \text{appartient}(\text{donnees})$
$friteuse$ : Courbe de charge d'une friteuse au cours d'une journée type en W
7 $friteuse = \text{appartient}(\text{donnees})$
$grill$ : Courbe de charge d'un grill au cours d'une journée type en W
8 $grill = \text{appartient}(\text{donnees})$
$four_r$ : Courbe de charge d'un four de restaurant au cours d'une journée type en W
9 $four_r = \text{appartient}(\text{donnees})$

## production

Définition de la fonction Nouveau

Figure 4 : modèle toaster production - Thibault Jan DAE5

Le résultat  $O_{jt}$  est une matrice de format « j lignes x t colonnes ». Et voici une comparaison de la courbe  $O_{rt}$  avec celle d' $O_{bt}$  obtenue précédemment :

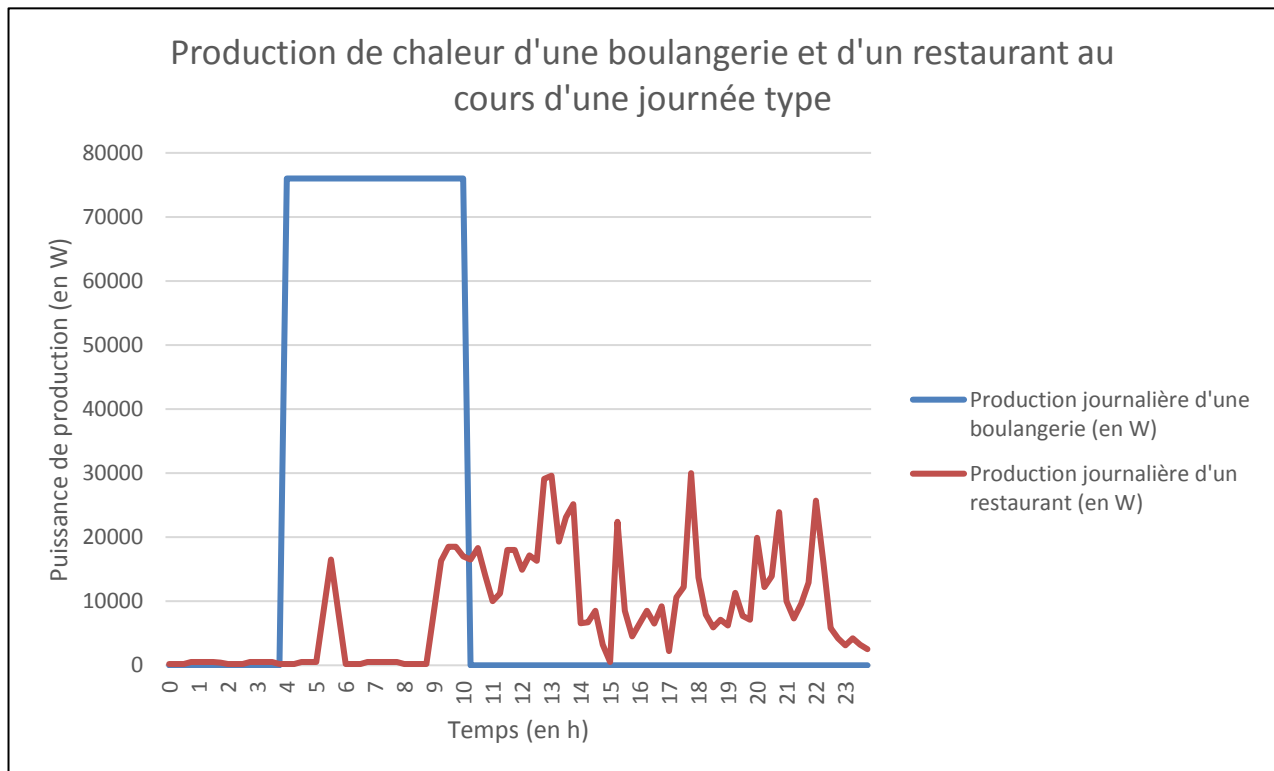


Figure 5 : Production de chaleur d'une boulangerie et d'un restaurant - Thibault Jan DAE5



La puissance thermique dégagée par une boulangerie est beaucoup plus importante que pour un restaurant. Par contre, on compte 747 restaurants sur Lyon et « seulement » 158 boulangeries, ce qui rend leur efficacité dans notre réseau de chaleur, s'ils les incluent tous, plus ou moins équivalente :

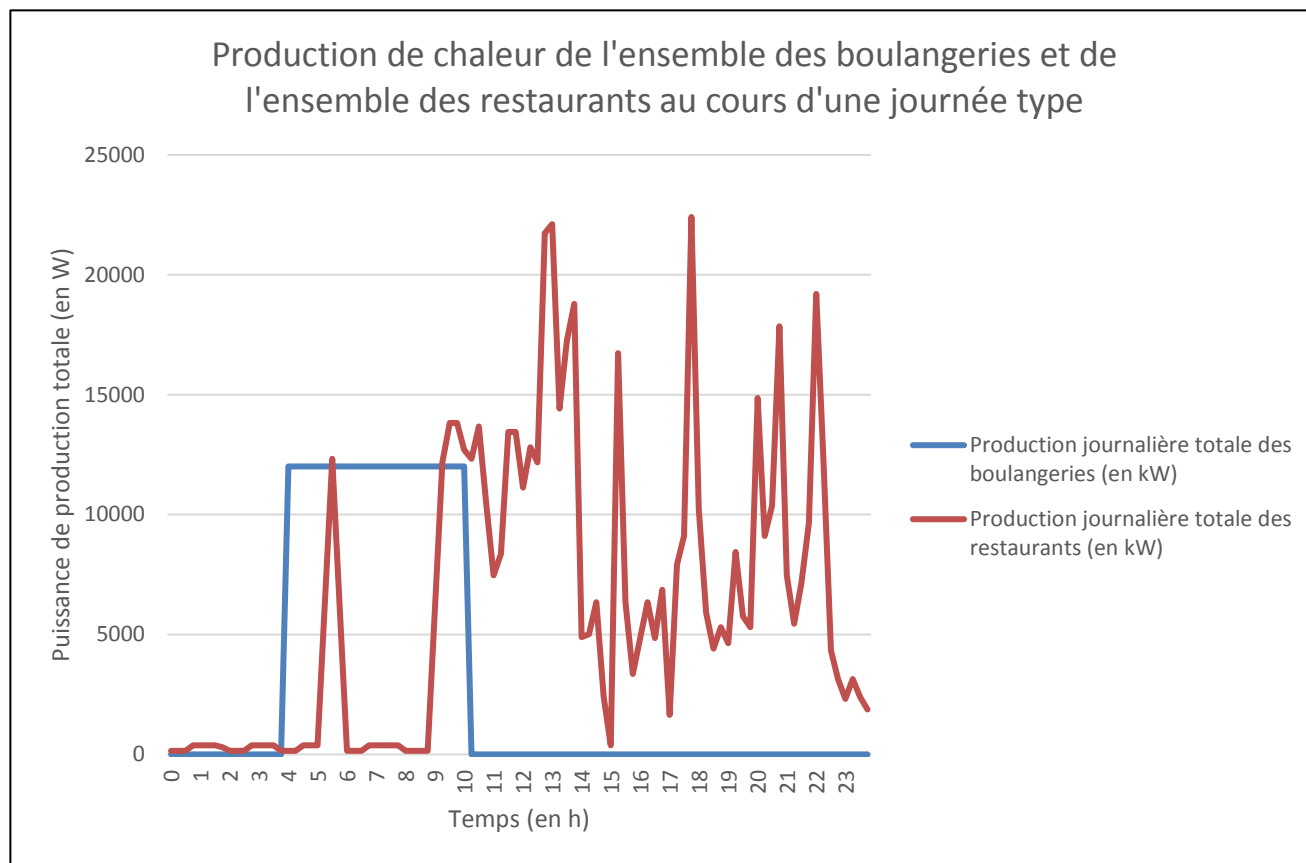


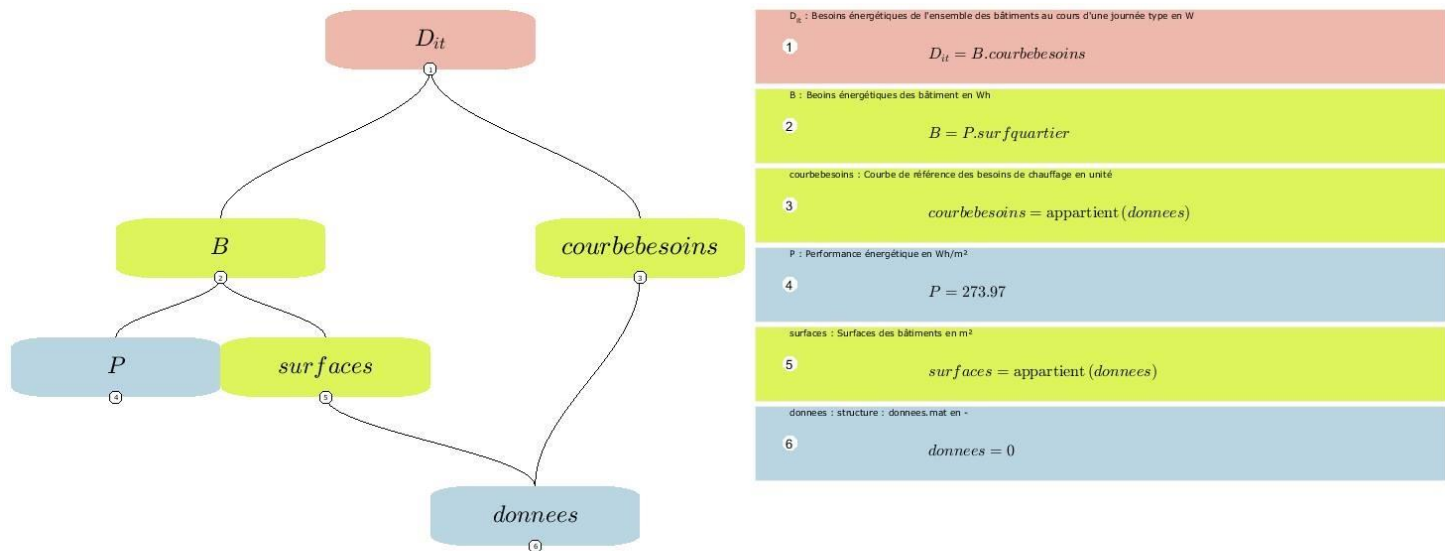
Figure 4 : Production de chaleur des équipements de restauration à Lyon - Thibault Jan

## 4. Détermination des besoins de chauffage

On procède de la même manière que précédemment en concevant d'abord un modèle de calcul qui va nous permettre de déterminer les besoins de chauffage des bâtiments au cours d'une journée type. Ces besoins sont appelés **Dit**, soit la demande de chacun des bâtiments  $i$  au cours du temps  $t$ , toujours au cours d'une seule journée. Cette demande **Dit** dépend des besoins **B** par jour de chacun des bâtiments et d'une courbe de référence courbebesoins qui permet de répartir les consommations au cours d'une journée. On commencera par déterminer les besoins **B** avant de lisser notre résultat grâce à la courbe.

### 4.1 Besoins thermiques des bâtiments

On a ainsi **Dit** = **B**\*courbebesoins. Les besoins **B** par jour d'un bâtiment dépendent de sa performance énergétique journalière et de sa surface habitable de telle manière que **B** = **P**\***Surface**. Il faut souligner que le système est ici très simplifié en raison du très grand nombre de bâtiments à prendre en compte dans le système (volonté de l'appliquer sur une ville entière, Lyon). On travaillera donc sur une moyenne de la performance énergétique des bâtiments, exprimée en Wh/m<sup>2</sup>/jour. Il nous reste donc maintenant à obtenir les données nécessaires pour faire tourner notre système (voir ci-contre).



## consommation

Figure 5 : système toaster de besoins en chauffage

Avec ce système simplifié, nous avons 3 types de données à obtenir : la performance énergétique moyenne d'un bâtiment, la surface habitable de chacun des bâtiments de la ville de Lyon que l'on cherche à chauffer et l'allure de « courbebesoins » qui représente la variation des besoins d'un bâtiment moyen au cours de la journée.

La performance énergétique des bâtiments est déterminée de la manière suivante : on considère que la moyenne des besoins de chauffage en France est de 100kWh/m²/an. Si l'on pose également l'hypothèse que l'on se chauffe pendant 243 jours par an (2/3 de l'année), on obtient une performance énergétique de **P = 411Wh/m²/jour**. Pour obtenir les surfaces habitables de chacun des bâtiments de la ville de Lyon, on extrait les données du bâti de la Base de Données Topologiques 2013 mise à disposition par l'école. A l'aide du logiciel ArcMap, on effectue un tri des bâtiments pour récupérer ceux qui nous intéressent vraiment pour être les destinations de notre réseau de chaleur, puis on sélectionne nos bâtiments de la manière suivante. Ils se trouvent sur la couche du bati\_indifferencié de la BD Topo : on ne cherche pas à chauffer les bâtiments industriels (qui n'y figurent pas) mais seulement les logements et bureaux. La surface au sol est supérieure à 9m² et la hauteur supérieure à 2,20m : ce sont les normes minimales pour un logement selon la loi en vigueur et tout bâtiment qui ne suit pas ces critères n'est donc ni un logement, ni un bureau. En effectuant ce premier tri, on obtient 32 190 bâtiments sur la ville de Lyon. On multiplie leur surface au sol avec leur nombre d'étages pour ainsi obtenir la surface habitable de chacun des bâtiments de la ville de Lyon. Le résultat est une matrice **Surface** de format 32190x1.

### 4.2 Charge thermique des besoins

Pour obtenir la courbebesoins sur laquelle on va répartir la performance énergétique journalière, on s'est basé sur une courbe de consommation électrique fournie par le Réseau de Transport d'Electricité (RTE) [7]. On considère que l'allure de cette courbe est la même que celle de la consommation de chauffage car la production de chaleur est ce qui consomme le plus d'électricité. En prenant 96 valeurs sur cette courbe (toutes les 15minutes) que l'on divise par leur somme, on obtient les 96 valeurs comprises entre 0 et 1 de notre **courbebesoins**, dont la somme est égale à 1 (Règle de 3).

Une fois les données rentrées, notre résultat  $D_{it}$  est, à la manière de  $O_{jt}$ , une courbe de charge des besoins énergétiques de l'ensemble des bâtiments de Lyon sur une journée type. On compare les deux courbes obtenues grâce à nos matrices  $O_{jt}$  et  $D_{it}$  :



La production de chaleur totale des équipements de restauration représente ainsi **7,2%** des besoins énergétiques de l'ensemble des bâtiments sélectionnées de Lyon.

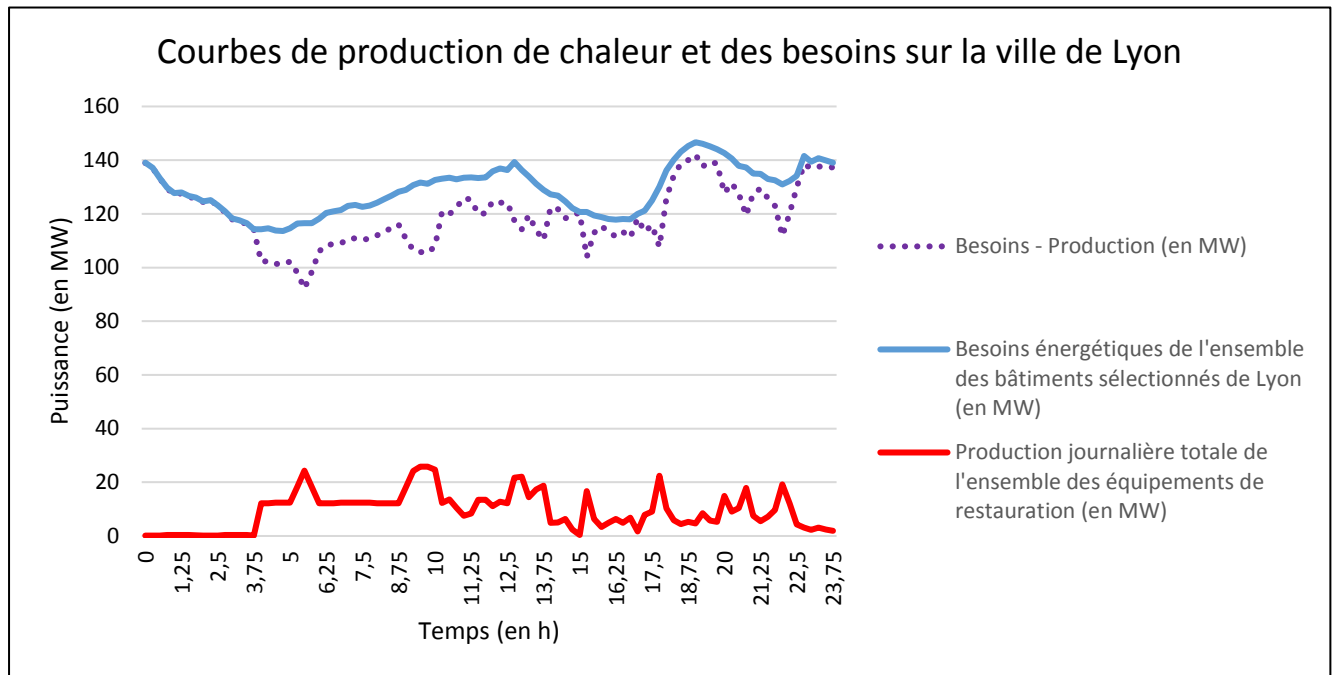
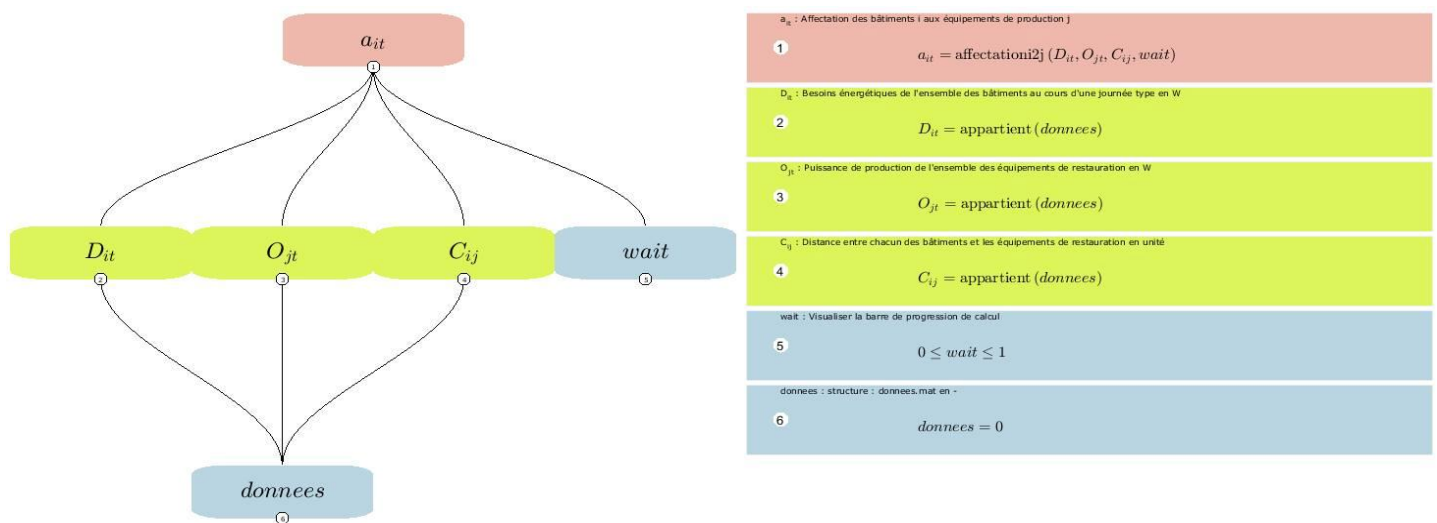


Figure 6 : Courbes de production de chaleur et des besoins en chauffage sur la ville de Lyon

## 5. Mise en relation du réseau

### 5.1 Affectation des lieux de consommation à un lieu de production

Une fois que l'on connaît la production de chaleur de nos équipements de restauration et la consommation de nos bâtiments, l'objectif est d'effectuer une représentation spatiale de ce à quoi ressemblerait notre réseau de chaleur urbain et son intégration à la ville de Lyon. La priorité est de savoir quels bâtiments seront affectés à quelle source de chaleur à chaque instant  $t$  de notre journée type. En effet, les besoins énergétiques des bâtiments et la production de chaleur variant, un bâtiment peut se retrouver affecté à deux équipements de restauration différents à deux moments de la journée. On utilise un programme (Annexe 1) qui va effectuer les opérations suivantes pour chaque instant  $t$  de la journée. Pour chacun des bâtiments  $i$ , tour à tour, il recherche l'équipement de restauration  $j$  pour lequel le coût  $C_{ij}$  est le moins élevé (dans notre cas le coût est une distance). Si l'équipement de restauration en question possède l'énergie thermique  $O_{jt}$  suffisante pour couvrir les besoins  $D_{it}$  du bâtiment, ce dernier est affecté à cet équipement. Sinon, l'algorithme recherche le second équipement pour lequel le coût  $C_{ij}$  est le moins élevé et ainsi de suite. Si aucun des équipements ne peut répondre aux besoins du bâtiment alors il est dit "non affecté".



affectationi2j

Pour la ville de Lyon, le résultat attendu **ait** est donc une matrice d'affectation de format 32190x96 qui indique à quel équipement de restauration j (de 1 à 905) est affecté chacun des 32190 bâtiments i, et ceci à chacun des 96 instants t. On doit choisir au préalable quels sont les bâtiments à affecter en priorité. Affecter en premier ceux qui ont la plus petite surface habitable semble être une bonne option puisqu'ainsi une source de chaleur pourra être capable d'alimenter plus de bâtiments et donc plus de foyers. La matrice D<sub>it</sub> sera donc triée avec les surfaces habitables dans l'ordre croissant. Pour appliquer cette affectation nous avons donc besoin des matrices O<sub>jt</sub>, D<sub>it</sub> et C<sub>ij</sub>. La matrice O<sub>jt</sub> qui représente l'offre de chaque équipement de restauration j à chaque instant t est la matrice déterminée grâce aux résultats précédents (Détermination des charges de production). La matrice D<sub>it</sub> qui représente les besoins de chaque bâtiment à chaque instant t est celle obtenue plus tôt également (Détermination des besoins de chauffage). On considère que nos canalisations du réseau de chaleur urbain suivent le réseau routier existant aujourd'hui sur la ville de Lyon. On choisit donc **C<sub>ij</sub>** comme étant la matrice des distances entre le centroïde de chacun des bâtiments i et le centroïde de chacun des équipements de restauration j, en passant par le réseau routier comme cela est fait habituellement. A partir de la Base de Données topologiques 2013, on extrait avec ArcGis le réseau routier de Lyon que l'on trie en gardant les voiries qui sont susceptibles de correspondre à notre réseau de chaleur (on enlève les sentiers, chemins, bretelles...). On utilise ensuite l'outil NetWork Analyst pour obtenir notre matrice Origine-Destination (OD) des distances entre nos Origines (bâtiments) et Destinations (équipements de restaurations).

Attention : cette opération n'a pas fonctionné pour la ville de Lyon en raison des  $(32190 \times 905) = 29\,131\,950$  distances à calculer ! Pour obtenir les distances entre les bâtiments et les équipements de restauration, on a donc effectué les calculs sur un quartier plus petit de Lyon, avec moins de données à traiter. Le résultat de l'affectation est ensuite reporté sur une carte.

Ci-dessous la carte d'affectation réalisée sur le quartier à 2 instants t :

### Carte d'affectation des bâtiments à un équipement de restauration à t=7h



Figure 8 : Carte d'affectation des bâtiments à un équipement de restauration à t = 7h

On remarque que la totalité des bâtiments du quartier est affectée à une source de chaleur. Ceci est dû au fait que le quartier choisi possède une grande densité de boulangeries et restaurants mais aussi que le temps  $t=7h$  est un moment où l'ensemble des boulangeries présentes sur le quartier produit de la chaleur. En effet le résultat n'est pas le même lorsque l'on prend les résultats de l'affectation à 23h :

### Carte d'affectation des bâtiments à un équipement de restauration à $t=23h$

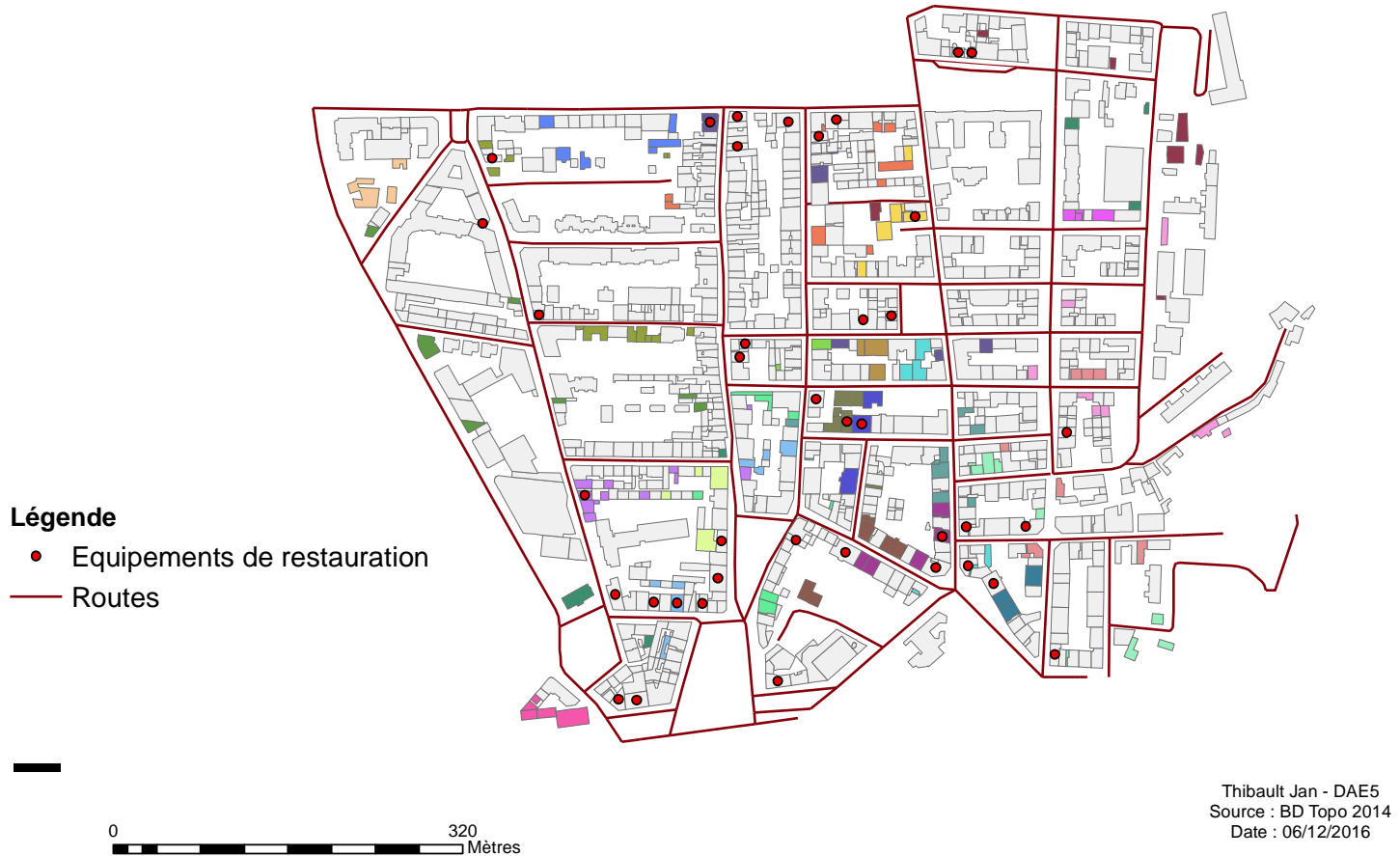


Figure 9 : Carte d'affectation des bâtiments à un équipement de restauration à  $t = 23h$

On remarque par la même occasion que les restaurants sont les seuls à être « actifs » et qu'ils sont moins « performants » que les boulangeries. Un autre essai d'affectation sur une zone plus grande a aussi été effectué, sur le premier arrondissement de Lyon (Annexe 2). C'est d'ailleurs sur le Premier arrondissement de Lyon que l'on a choisi de réaliser la phase suivante.

#### 5.2 Dimensionnement du réseau de chaleur

Cette partie a pour objectif de continuer le travail de spatialisation du réseau réalisé dans la première partie. On cherche maintenant à dessiner le flux d'énergie thermique entre les équipements de restauration qui produisent la chaleur et les bâtiments qui en ont besoin. Toujours avec la même méthode on commence par concevoir un modèle applicable à plusieurs cas, avant d'expliquer l'obtention des données qui serviront à résoudre le problème. On se sert cette fois du premier arrondissement de la ville de Lyon pour l'application. Pour dessiner notre réseau optimal pour la mutualisation de la chaleur, on va devoir connaître les charges qui sont affectées à chaque arc de notre réseau au moment où les flux seront les plus conséquents. Pour connaître ces charges, il va falloir connaître trois types de données :

- Les coordonnées **xy** des nœuds entre lesquels auront lieu les flux d'énergie,
- La capacité **C** de départ que peut supporter chaque arc du réseau situé entre deux nœuds,
- Les flux **F<sub>ji</sub>** qui ont lieu entre les équipements de restauration j et les bâtiments i qui leur sont affectés.

Le programme dont on se sert utilise ces données pour déterminer quels seront les chemins les plus courts (Dijkstra) pour les flux **F<sub>ji</sub>** en empruntant le réseau dessiné par les nœuds **xy** et les arcs donnés la capacité **C**. Chaque fois qu'un flux empruntera un arc du réseau, le programme affectera une charge **Q** à cet arc et réduira d'autant sa capacité. Si la capacité est inférieure à la charge, alors le flux empruntera un autre chemin si cela est possible.

La matrice **xy** est de format « nombre de nœuds\*2 » telle que :

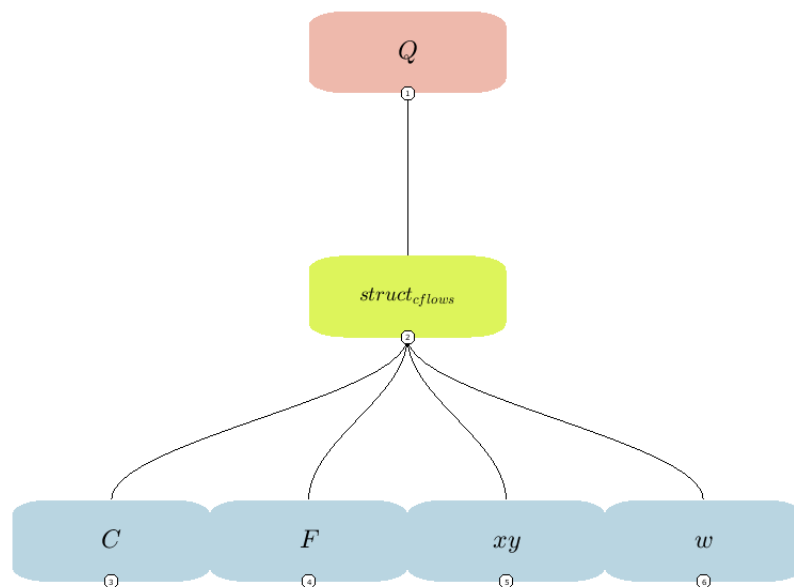
1 <sup>ère</sup> colonne	2 <sup>de</sup> colonne
Coordonnées x des nœuds du réseau	Coordonnées y des nœuds du réseau

La matrice **C** est de format « nombre d'arcs du réseau\*3 » telle que :

1 <sup>ère</sup> colonne	2 <sup>de</sup> colonne	3 <sup>ème</sup> colonne
N° du nœud de début d'arc	N° du nœud de fin d'arc	Capacité de l'arc

La matrice **F<sub>ji</sub>** est de format « nombre de flux\*3 » telle que :

1 <sup>ère</sup> colonne	2 <sup>de</sup> colonne	3 <sup>ème</sup> colonne
N° du nœud de départ du flux	N° du nœud d'arrivée du flux	Flux déplacé



Q : Puissance énergétique sur les arcs du réseau en W	
1	$Q = \text{appartient}(\text{struct\_cflows})$
struct_cflows : Définition en unité	
2	$\text{struct\_cflows} = \{Qt, pth, Cr, Fr\}   Qt, pth, Cr, Fr = \text{cflows}(C, F, xy, n, w)$
C : Capacité des arcs du réseau en W	
3	$C = \infty$
F : Flux entre origines et destinations en W	
4	$1 \leq F \leq 20000$
xy : Coordonnées en plan des nœuds du réseau en m	
5	$0 \leq xy \leq 1000$
w : Barre de progression en unité	
6	$-\infty \leq w \leq +\infty$

## capacite

Figure 10 : Système de calcul des charges sur les arcs du réseau

Ce que l'on doit obtenir comme résultat est une matrice **Q** de format « nombre de charges sur le réseau\*3 » telle que :

1 <sup>ère</sup> colonne	2 <sup>de</sup> colonne	3 <sup>ème</sup> colonne
N° du nœud de départ de la charge	N° du nœud d'arrivée de la charge	Charge sur l'arc du réseau



Pour appliquer la méthode, on souhaite travailler sur le premier arrondissement de Lyon mais pour des raisons de clarté et de traitement des données, nous allons réduire la zone de travail dans un premier temps à un quartier de l'arrondissement (en vert ci-dessous) :

### Carte du 1<sup>er</sup> arrondissement de Lyon avec son bâti et son réseau



Figure 11: Carte du 1<sup>er</sup> arrondissement de Lyon avec son bâti et son réseau

La première étape est de déterminer la matrice  $xy$  des nœuds. Nous avons précédemment déjà choisi d'affecter les bâtiments aux sources de chaleur en fonction de la distance qui les séparent en passant par le réseau routier. Il semble logique qu'une nouvelle fois on utilise le réseau routier existant comme réseau pour distribuer la chaleur. On va donc récupérer les coordonnées des nœuds du réseau ci-dessous et leur attribuer un numéro. Ce numéro servira à repérer les nœuds dans nos matrices.

### Carte du quartier d'étude du 1<sup>er</sup> arrondissement de Lyon avec numéros des nœuds du réseau

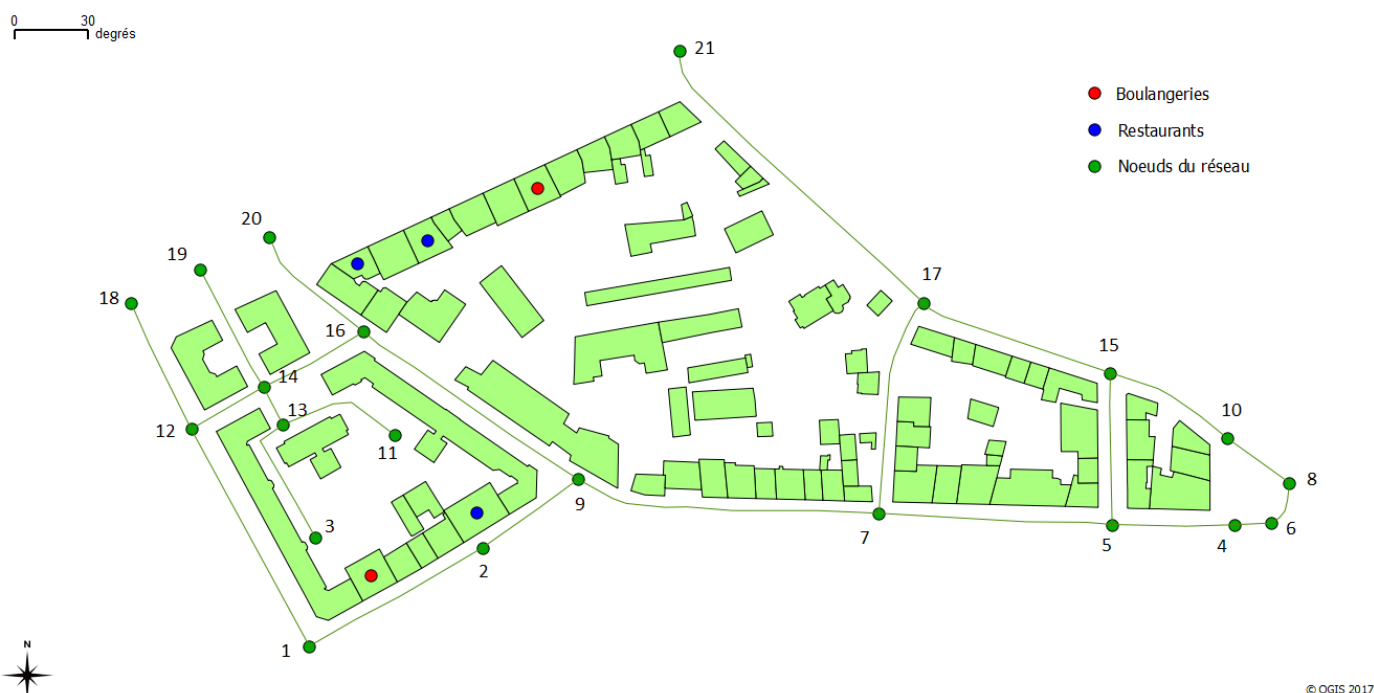


Figure 12: Carte du quartier d'étude du 1<sup>er</sup> arrondissement de Lyon

Dans un second temps, on doit aussi établir la matrice de capacité **C**. Nous ne sommes pas sur un cas de flux routier mais sur un cas de flux énergétique pour lequel les capacités sont moins limitées. En effet, le réseau est considéré comme enterré sous la voirie et les flux avec lesquels on travaille sont peu conséquents. Dans notre cas, on va fixer la capacité à un niveau très élevée, voire « infinie », pour permettre au flux de toujours choisir le chemin le plus court.

Pour terminer, on doit déterminer la matrice de flux **F<sub>ji</sub>** qui circulent entre deux nœuds du réseau à un moment *t*. On choisit *t* = 9h car c'est le moment de la journée où le flux est le plus élevé (le plus de production de chaleur par les boulangeries et restaurants).

Ensuite, on associe les bâtiments du quartier au nœud du réseau le plus proche, et par conséquent on y affecte une demande *D<sub>it</sub>*. De la même manière, on associe les équipements de restauration au nœud le plus proche pour y affecter une offre *O<sub>jt</sub>*.

### Carte d'exemple de bâtiments affectés à un nœud du réseau



Figure 13: Carte d'exemple de bâtiments affectés à un nœud du réseau

Grâce au système d'affectation utilisé dans la première partie du projet, on connaît les flux entre chaque équipement de restauration et chaque bâtiment à *t* = 9h. Maintenant que ces équipements de restauration et bâtiments sont associés à des nœuds, on obtient donc les flux **F<sub>ji</sub>** qui circulent d'un nœud à l'autre en passant par le réseau. On fait tourner notre système avec les données que l'on a récolté et on obtient ainsi la matrice **Q** des charges qui sont affectés à chaque arc du réseau (Annexe 3). La représentation graphique suivante donne les charges de chaleur supportées par le réseau au sein de ce quartier du premier arrondissement à *t* = 9h :



Figure 14 : Carte des charges appliquées au réseau à  $t=9h$

Après avoir effectué cette opération sur une partie du premier arrondissement de Lyon, on peut le reproduire tour à tour sur les autres quartiers et relier ces réseaux entre eux pour qu'ils puissent éventuellement échanger les surplus de chaleur qu'il pourrait y avoir dans un quartier à certains moments. On obtiendrait de cette manière un réseau ramifié au sein du premier arrondissement de Lyon, que l'on pourrait éventuellement étendre à l'échelle de la ville.

## 6. Conclusion et limites

Après avoir déterminé la quantité de chaleur produite par les équipements de restaurations sur Lyon et les besoins de chauffages totaux, on estime que récupérer cette chaleur permettrait de répondre à 7,2% des besoins de chauffage de la ville. Ce n'est bien entendu pas suffisant pour assurer une autonomie énergétique mais c'est en multipliant ce type de procédés (utilisation d'énergies renouvelables, limitation des pertes, ...) que la ville pourra prétendre à cette autonomie.

Avec la spatialisation du problème, on remarque également que certains quartiers seraient plus prolifiques que d'autre (notamment au centre-ville) quand la concentration de boulangeries et de restaurants est plus importante. On arrive même à avoir des périodes pendant lesquelles la production est plus importante que les besoins du quartier seul. Il serait alors envisageable de stocker pendant une courte durée cette eau chaude pour pouvoir la réutiliser plus tard dans la journée. D'autre part, le réseau de chaleur urbain de Lyon est déjà très développé, et un système récupérant la chaleur des équipements de restauration pour venir se brancher au reste du réseau semble plus qu'envisageable pour compléter la production de chaleur.

Il existe des limites aux systèmes utilisés, notamment pour l'affectation. On a commencé par attribuer les bâtiments avec la surface la plus petite, vers la source de chaleur la plus proche. En raison d'une production trop faible pour combler toutes les demandes, on se retrouve parfois avec des répartitions spatiales peu enviables dans une situation réelle, avec des bâtiments fournis loin de la source de production et des bâtiments proches qui ne le sont pas.

# References

---

- [1] Werner, S. (2017). *District heating and cooling in Sweden*. 1st ed. [ebook] Halmstad. Available at: [http://ac.els-cdn.com/S0360544217304140/1-s2.0-S0360544217304140-main.pdf?\\_tid=66248982-26d7-11e7-ad72-00000aachb35e&acdnt=1492809403\\_ba825fcc2f54dac062c8a6863c99fa65](http://ac.els-cdn.com/S0360544217304140/1-s2.0-S0360544217304140-main.pdf?_tid=66248982-26d7-11e7-ad72-00000aachb35e&acdnt=1492809403_ba825fcc2f54dac062c8a6863c99fa65) [Accessed 21 Apr. 2017].
- [2] Werner, S. (2017). *International review of district and cooling*. 1st ed. [ebook] Halmstad. Available at: [http://ac.els-cdn.com/S036054421730614X/1-s2.0-S036054421730614X-main.pdf?\\_tid=2f955b78-26ad-11e7-8252-00000aachb35e&acdnt=1492791272\\_101ae26f1d380f1e0ca21d5716b3fe3d](http://ac.els-cdn.com/S036054421730614X/1-s2.0-S036054421730614X-main.pdf?_tid=2f955b78-26ad-11e7-8252-00000aachb35e&acdnt=1492791272_101ae26f1d380f1e0ca21d5716b3fe3d) [Accessed 21 Apr. 2017].
- [3] Elyde.fr. (2016). *Les réseaux de chaleur, comment ça marche*. [online] Available at: <http://www.elyde.fr/reseau-de-chaleur/comment-ca-marche/> [Accessed 8 Dec. 2016].
- [4] Pratique des VRD et aménagement urbain – Voirie et réseaux durables (Régis Bourrier et Béchir Selmi)
- [5] Anon, (2016). 1st ed. [ebook] Available at: [http://www.crma-auvergnerhonealpes.fr/sites/default/files/plaquette\\_boulangier.pdf](http://www.crma-auvergnerhonealpes.fr/sites/default/files/plaquette_boulangier.pdf) [Accessed 8 Dec. 2016].
- [6] ADEME. (2016). *Usages professionnels - La cuisson professionnelle – ADEME*. [online] Available at: <http://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-l'action/elements-dequipement/dossier/usages-professionnels/cuisson-professionnelle> [Accessed 8 Dec. 2016].
- [7] Clients.rte-france.com. (2016). *RTE - Portail clients - Courbes journalières*. [online] Available at: <http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/courbes.jsp> [Accessed 8 Dec. 2016].
- Connaissance des Énergies. (2016). *Réseaux de chaleur*. [online] Available at: <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseaux-de-chaleur> [Accessed 8 Dec. 2016].
- Energieplus-lesite.be. (2016). *La puissance électrique dans les cuisines collectives*. [online] Available at: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11443> [Accessed 8 Dec. 2016].
- Reseaux-chaleur.cerema.fr. (2016). *aménagement énergétique urbain - Réseaux de chaleur et territoires*. [online] Available at: <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/tag/amenagement-energetique-urbain> [Accessed 8 Dec. 2016].



# Annexes

---

## Annexe 1 : Algorithme du modèle toaster de spatialisation :

```
if numel(Dit) == length(Dit)
    Dit = Dit(:);
end
if numel(Ojt) == length(Ojt)
    Ojt = Ojt(:);
end
dt = size(Dit,2);
ait = zeros(size(Dit));
dijini = Cij;
if wait == 1
    fwait = waitbar(0,'Starting');
end
for t = 1:dt;
    cij = dijini;
    di = Dit(:,t);
    oj = Ojt(:,t);
    a = zeros(numel(di),1);
    nm=numel(a);
    while sum(isinf(sum(Cij))) ~= length(oj) && sum(a == 0) ~= 0
        for b=1:numel(di);
            if wait==1;
                waitbar(sum(a~=0)/(nm), fwait, ...
                    ['Affectation en cours ' num2str(t) '/' num2str(dt)])
            end
            if a(b) == 0
                [dmin,c] = min(Cij(b,:));
                q=oj(c)-di(b);
                if q>0
                    oj(c)=q;
                    a(b)=c;
                else
                    Cij(:,c) = inf;
                end
            end
        end
    end
    ait(:,t)=a(:);
end
ait(ait==0)=inf;
if wait == 1;
    delete(fwait)
end
```

Source : Mindjid Maizia

## Annexe 2 : Carte d'affectation du premier arrondissement de Lyon



### Légende

- voirie\_1er
- ! boulangeries\_1er
- ! restaurants
- 1er\_arrondissement

### Bâtiments chauffés

- par les boulangeries
- par les restaurants

Thibault Jan - ArcGis

Source : BD Topo 2013, INSEE 2015, OpenStreet Map 2011

Date : 12/12/2016

Annexe 3 : Matrice des charges sur les arcs du réseau du quartier du 1<sup>er</sup> arrondissement de Lyon

N° du nœud de départ de la charge	N° du nœud d'arrivée de la charge	Charge sur l'arc du réseau (en W)
1	2	17831
13	3	401
5	4	1601
15	5	10365
9	7	7656
17	7	18843
2	9	20886
7	9	3337
15	10	1921
13	11	1880
1	12	5543
14	13	3841
12	14	5543
16	14	3756
17	15	20716
14	16	3663
20	16	14697
21	17	52968

CITERES

**UMR 6173**  
*Cités, Territoires,  
Environnement et  
Sociétés*

*Equipe IPA-PE*  
*Ingénierie du Projet*  
*d'Aménagement,*  
*Paysage,*  
*Environnement*



35 allée Ferdinand de Lesseps  
BP 30553  
37205 TOURS cedex 3

**Directeur de recherche :**  
**Maizia Mindjid**

**Jan Thibault**  
**Projet de Fin d'Etudes**  
**DA5**  
**2016-2017**

## **Systèmes urbains : récupération de la chaleur des équipements de restauration à l'échelle urbaine**

**Résumé :** Le but du Projet est de savoir dans quelle mesure les pertes de chaleur issues des équipements de restauration peuvent-elles être réutilisées. On cherche à montrer que la quantité de chaleur est suffisante pour couvrir une partie des besoins de chauffages des logements, bureaux, et plus généralement alentours. Une représentation du système de chaleur dans l'espace est également présentée tout comme son fonctionnement.

**Mots Clés : énergétique, réseaux de chaleur**