

Optimisation de la configuration et du dimensionnement de réseau de chaleur urbain : Cas académique d'intégration d'EnR&R

Théophile MERTZ^{12*}, Sylvain SERRA¹, Aurélien HENON², Jean-Michel RENEAUME¹

¹Laboratoire de Thermique, énergétique et procédé
Bâtiment d'Alembert, rue Jules Ferry – 64000 Pau

²NOBATEK-INEF4

Esplanade des arts et métiers, 33600 Talence

*(auteur correspondant : tmertz@nobatek.com)

Résumé - Ce travail, inclus dans le projet THERMENERGY de l'ITE INEF4, porte sur le développement d'un outil d'aide à la conception optimale de réseaux de chaleur. Cet outil optimise simultanément la configuration et le dimensionnement du réseau de chaleur pour une période caractéristique. L'étude détaillée d'un cas académique a permis d'illustrer l'intérêt de ce code pour l'aide à la conception optimale d'un réseau de chaleur grâce à une analyse de sensibilité sur le coût d'investissement et de la chaleur de l'EnR ainsi que sur le coût mètre linéaire de tranchée. Différentes configurations optimales du réseau sont obtenues en fonction de ces critères.

Mots clés - Réseau de chaleur urbain, aide à la conception, optimisation combinatoire non linéaire, MINLP, intégration d'EnR&R

Nomenclature

Indices

i indice des nœuds producteurs
 j, o indices des nœuds consommateurs

Abréviations en indice

P_i concernant un nœud producteur
 C_j concernant un nœud consommateur
 ext extérieur
 in entrant
 out sortant
 tot total
 $line$ canalisation
 hx échangeur de chaleur
 $inst$ installé

Données d'entrée

C_{unit} coût unitaire, €

$Dist$ distance entre nœuds, m

Variables

Y variable d'existence, [-]
 L distance d'une canalisation existante entre deux nœuds, m
 M débit, $kg.s^{-1}$
 V vitesse, $m.s^{-1}$
 T température, °C
 P puissance, W
 DP perte de charge, Pa
 D diamètre, m
 R résistance thermique surfacique, $m^2.K.W^{-1}$
 C coût, €

Acronyme

MINLP Mixed Integer non Linear Programming

1. Introduction

La nécessaire réduction des besoins de chaleur dans les bâtiments, qui passe par le niveau « basse consommation » dans toutes les constructions neuves à partir de 2013 et par la rénovation thermique de 400 000 logements par an jusqu'en 2020, ne permettra pas seule de répondre aux objectifs fixés par la France. En effet, tous les bâtiments ne pourront pas être rénovés (contraintes techniques ou économiques) et en 2010 la ville de 2050 était déjà construite à plus de 70 %. On estime qu'il restera en 2050 entre 30 % et 40 % de logements antérieurs à

1975 [1] ! Il faut donc trouver des solutions permettant de satisfaire les besoins des bâtiments qui continueront à consommer des quantités significatives d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.

La généralisation des systèmes décentralisés (un par logement ou par immeuble) de production de chaleur renouvelable (géothermie superficielle, chaudière bois, chauffe-eau solaire, pompe à chaleur...) est une solution intéressante dans le secteur résidentiel pavillonnaire. Ces dispositifs deviennent plus difficiles à mettre en œuvre dans le collectif (où réside 43 % de la population) ou le tertiaire en zone dense, car ils sont consommateurs de surface au sol ou sur les bâtiments (géothermie, solaire, pompes à chaleur) ou nécessitent de volumineux espaces de stockage du combustible (bois).

Le réseau de chaleur permet de « centraliser » ces besoins pour mieux les traiter, de mutualiser les coûts d'investissement, et finalement d'accéder à des gisements d'énergies qui ne pourraient pas être exploités par des systèmes individuels. Un des principaux obstacles au développement des réseaux de chaleur reste l'investissement initial important qu'ils représentent, notamment pour ce qui concerne le réseau de distribution : canalisations, génie civil, sous-stations ; ce poste représente 20 à 30 % du coût de la chaleur [2] (aides déduites). Cet investissement oblige le porteur de projet à adopter une vision de long terme.

Notre travail, inclus dans le projet THERMENERGY de l'ITE INEF4, porte sur la création d'un outil d'optimisation de réseaux de chaleur en phase de conception ou d'extension (développé dans GAMS [1]). Cet outil optimise simultanément la configuration (localisation des chaufferies, type de technologie, maillage du réseau...) et le dimensionnement (températures, débits, aire d'échangeur...) du réseau de chaleur pour une période caractéristique. Il a comme particularité [2] d'autoriser différents types de connexion entre les consommateurs (voir figure 1) : en parallèle - chaque consommateur est approvisionné directement par la chaufferie - ou en cascade - approvisionnement d'un consommateur basse température à partir d'un autre haute température (ancien bâtiment nécessitant un régime de température de distribution secondaire relativement élevé, un hôpital ou un procédé industriel). Il permet aussi d'optimiser des réseaux de chaleur ayant une production centralisée ou décentralisée (plusieurs unités de productions de chaleur).

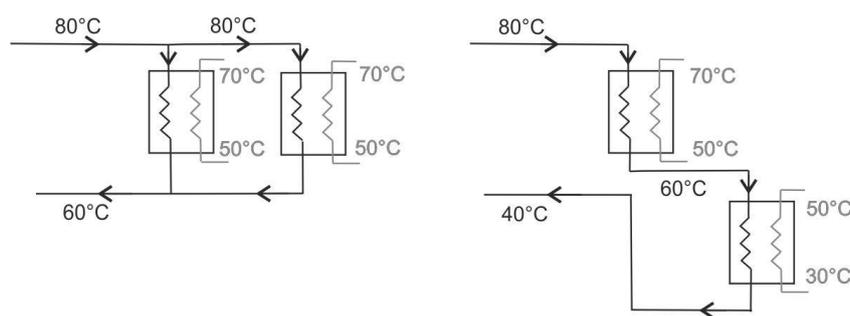


Figure 1 : Connexions possibles entre consommateurs : classiquement en parallèle (à gauche) ou plus innovant en cascade (à droite).

Dans un premier temps, le code d'optimisation développé sera présenté en détail puis un cas académique démontrant l'intérêt du code pour l'étude de la conception optimale d'un réseau de chaleur sera détaillé.

2. Optimisation

Plusieurs types d'optimisation peuvent être réalisés sur un réseau de chaleur (ou autre) :

- en variable continue, optimisation non linéaire, par exemple [3]. Le cas de l'optimisation linéaire en variable continue n'a pas lieu d'être par sa simplicité. Autant tenir compte des non-linéarités en incluant notamment les pertes thermiques et les pertes de charge.
- en variable mixte (continue et entière), optimisation linéaire [3] [4] [5] ou non linéaire [6]
- optimisation mono-objectif [3] [4] [5] ou multi-objectif [6],
- optimisation mono-période [3], multi-période [4], [5], [6] ou dynamique [7]

Chacune de ces possibilités présente des avantages et des inconvénients. Le parti pris de notre modèle est de représenter au mieux la physique des différents transferts rencontrés dans un réseau de chaleur (thermique et quantité de mouvement). Pour se faire, il est nécessaire d'utiliser des contraintes non linéaires afin de calculer tous les transferts thermiques, avec par exemple les pertes thermiques sur la canalisation PC - reliant un producteur P à un consommateur C – (voir équation 1), ainsi que les pertes de charge, toujours sur la canalisation PC (voir équation 2), etc.

$$T_{linePC_{outij}} = T_{ext} + (T_{linePC_{inij}} - T_{ext}) \cdot \exp\left(-\frac{\pi \cdot D_{outPC_{ij}} \cdot L_{linePC_{ij}}}{R_{totPC_{ij}} \cdot M_{linePC_{ij}} \cdot c_p}\right) \quad (1)$$

$$DP_{PC_{ij}} = \gamma \cdot \frac{L_{PC_{ij}} \cdot V_{PC_{ij}}^\alpha}{D_{PC_{ij}}^\beta} \quad (2)$$

Le code réalisé permet également et simultanément de choisir la topologie du réseau, le type de technologies de production de chaleur ainsi que leur localisation. Il optimise aussi le fait d'alimenter ou non toutes les sous-stations. Pour se faire, il a fallu ajouter des variables binaires afin de laisser la possibilité de prendre en compte l'existence de ces utilités. Par exemple, le débit dans la canalisation PC existe, si et seulement si la variable binaire d'existence Y_{linePC} n'est pas nulle (voir équation 3). Ou encore, la variable L est la distance entre deux nœuds lorsque la connexion entre ces 2 nœuds existe, c'est-à-dire lorsque Y_L n'est pas nulle (voir équation 4).

$$\forall \{i, j\}, 0 \leq M_{linePC_{ij}} \leq Y_{linePC_{ij}} \cdot M_{max} \quad (3)$$

$$L_{PC_{ij}} = Y_{linePC_{ij}} \cdot Dist_{PC_{ij}} \quad (4)$$

De ce fait, le problème à résoudre est de type MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming), dont la résolution sera réalisée dans l'environnement GAMS. Ce genre d'optimisation étant très complexe à faire converger, il n'est plus possible de réaliser une optimisation dynamique. Une période caractéristique des consommations est donc étudiée (dans cette étude : une année). Sur la durée de l'analyse économique réalisée (30 ans), l'évolution supposée du prix de la chaleur en fonction du type de technologie de production a été prise en compte.

Les optimisations utilisant des méthodes stochastiques sont connues pour augmenter la probabilité de converger vers l'optimum global d'un problème, mais sont généralement très coûteuses en temps de calcul. Même si, ce type d'approche aurait pu être utilisé pour cette

étude, sur un cas réel beaucoup plus complexe le temps d'obtention des résultats serait beaucoup trop important pour les utilisateurs finaux de ce code (Bureau d'étude...). Une méthode déterministe a donc été préférée, car beaucoup moins coûteuse en temps de calcul. Afin de contrecarrer le problème des minimums locaux, une procédure d'initialisation systématique a été mise au point.

La fonction objectif de notre problème d'optimisation est le coût global du projet sur 30 ans (voir équation 5). Il inclut des coûts opérationnels (chaleur, dont perte thermique, et coût de pompage) ainsi que les investissements (puissance à installer, échangeur de chaleur en sous-station et canalisation). Le coût de la canalisation inclut le coût de la tranchée ainsi que de la matière première (acier et isolant). Ces coûts sont pondérés par des facteurs calculés en fonction du taux d'actualisation et des inflations du prix des énergies.

$$C_{total} = (C_{pompage} + C_{chaleur}) \cdot f_{opex} + (C_{P_{inst}} + C_{HX} + C_{canalisation}) \cdot f_{capex} \quad (5)$$

Le choix d'un seul objectif est aussi lié à la complexité du problème à résoudre. De plus, au lieu de raisonner avec d'autres fonctions objectif (comme la maximisation d'EnR&R), il a été choisi de les placer en contrainte (taux minimum d'EnR&R).

En résumé, l'originalité de notre formulation, en plus d'optimiser simultanément la configuration et le dimensionnement du réseau, est de permettre de concevoir un réseau de chaleur dit de « 4^{ème} génération », c'est-à-dire -1- un réseau ayant plusieurs unités de production de différents types -2- prendre en compte des consommateurs ayant des besoins différents -3- permettre des connexions entre consommateurs en parallèle ou en cascade (un consommateur « haute température » alimente un autre « basse température »). Cette formulation permet aussi de laisser le choix d'alimenter ou non certains consommateurs.

Le cas d'étude présenté dans la prochaine partie permet d'illustrer l'intérêt de cette formulation pour l'aide à la conception d'un réseau de chaleur.

3. Etude académique

Pour réaliser une optimisation, le modèle a besoin de connaître les données caractéristiques du réseau envisagé. Il est nécessaire de renseigner la localisation des nœuds consommateurs (C) qui dans notre cas d'étude (voir figure 2), sont limités à quatre afin de rendre plus compressibles les résultats. Chaque consommateur a besoin de 80 kW de puissance nominale. Les températures de distribution dans le réseau secondaire (distribution dans le bâtiment) sont fixées à 70 °C - départ de l'échangeur et 50 °C - retour à l'échangeur.

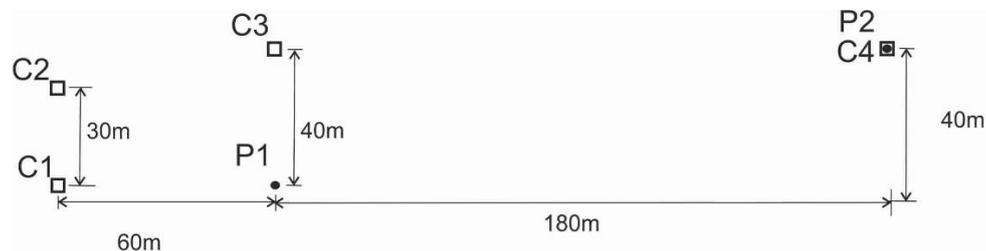


Figure 2 : Localisations des nœuds consommateurs (C) et des potentiels lieux de production (P).

Il est ensuite nécessaire de donner les localisations des deux nœuds producteurs potentiels (P) ainsi que les informations sur le type d'unité de production. On considère, pour toutes les

technologies de production, une inflation du coût sur 30 ans de 4 %, une température maximale en sortie de production à 100 °C et en entrée à 30 °C et un rendement de production à 90 %.

On note k1, la technologie « fossile classique » dont le coût d'investissement (capex) est fixé à 800 €/kW et un coût de la chaleur (opex) de 8c€/kWh. Cette technologie n'est autorisée que sur le site de production potentiel P1. On note k3, la technologie « fossile d'appoint » dont le capex est fixé à 1200 €/kW et opex de 8c€/kWh. Cette technologie, étant un appoint potentiel à l'EnR&R, coûte plus cher que la technologie fossile classique. Elle n'est autorisée que sur la localisation P2.

Enfin, on note k2, la technologie EnR&R qui n'est autorisée que sur la localisation P2. D'un point de vue technique d'intégration pour la gestion des pics d'appel de puissance, il n'est pas autorisé d'avoir 100 % d'EnR&R. P2k2 est borné à 70 kW ou 280 kW suivant la configuration. C'est sur cette technologie (ainsi que sur le coût du mètre linéaire de tranchée) que va porter notre étude de sensibilité. 8 valeurs de capex de k2 sont testées, comprises entre 0 €/kW - récupération de la chaleur fatale d'une industrie déjà existante et 2100 €/kW - coût d'une installation complète type centrale solaire. L'opex sera de 0, de 1 ou de 2 c€/kWh.

Concernant le coût de la tranchée, 8 valeurs sont testées, comprises entre 100 €/ml - rase campagne plus mutualisation des coûts avec les autres réseaux et 1500 €/ml - ville dense.

Ainsi pour cette analyse de sensibilité, 192 tests différents sont optimisés. Chaque test est étudié grâce à 15 initialisations différentes dont on ne retiendra que le meilleur résultat. Ces 15 initialisations viennent de l'analyse d'un expert sur 100 résultats, obtenus avec 100 données d'entrées tirées aléatoirement et avec une résolution à la suite (les résultats d'une optimisation servent d'initialisation à la suivante).

Ce problème est résolu en environs 40 minutes sur un ordinateur portable avec un processeur i5 double cœur de 2.60 GHz et 4 Go de RAM.

4. Résultats et discussions

L'ensemble des résultats de notre étude de sensibilité est représenté sur la figure 4. Cette figure est obtenue grâce un outil java xdat [8] permettant de suivre facilement et en direct un cas, ou une série de cas, en fonction de paramètres particuliers. Sont représentés sur cette figure :

- dans les 3 colonnes de gauche (légendes noires), les données d'entrée que l'on fait varier selon les différents tests étudiés,
- dans les 7 autres colonnes (légendes grises), les résultats principaux obtenus grâce aux optimisations : le coût total (C_total), la longueur du réseau (L_totale), les puissances installées selon le type de technologie (P_k1, P_k2 et P_k3), les pertes thermiques et les pertes de charge (pertes_T et DP).

On constate que le coût total du réseau varie entre 2 et 7,1 M€ et que seulement trois topologies du réseau de distribution sont obtenues : un réseau de 300 m (blanc), un de 556 m (gris) et un de 662 m (noir). Le tableau 1 récapitule les principaux résultats en fonction de ces trois longueurs de réseau.

- Longueur totale = 662 m :
Ces optima représentent les cas pour lesquels le coût de la tranchée est très faible et celui de l'EnR&R (Capex et Opex) important. Ici (voir figure 3), seule la technologie k1 alimente le réseau avec une puissance totale (pertes thermiques comprises) de 369 kW.



Figure 3 : Configuration du réseau de distribution de 662 m.

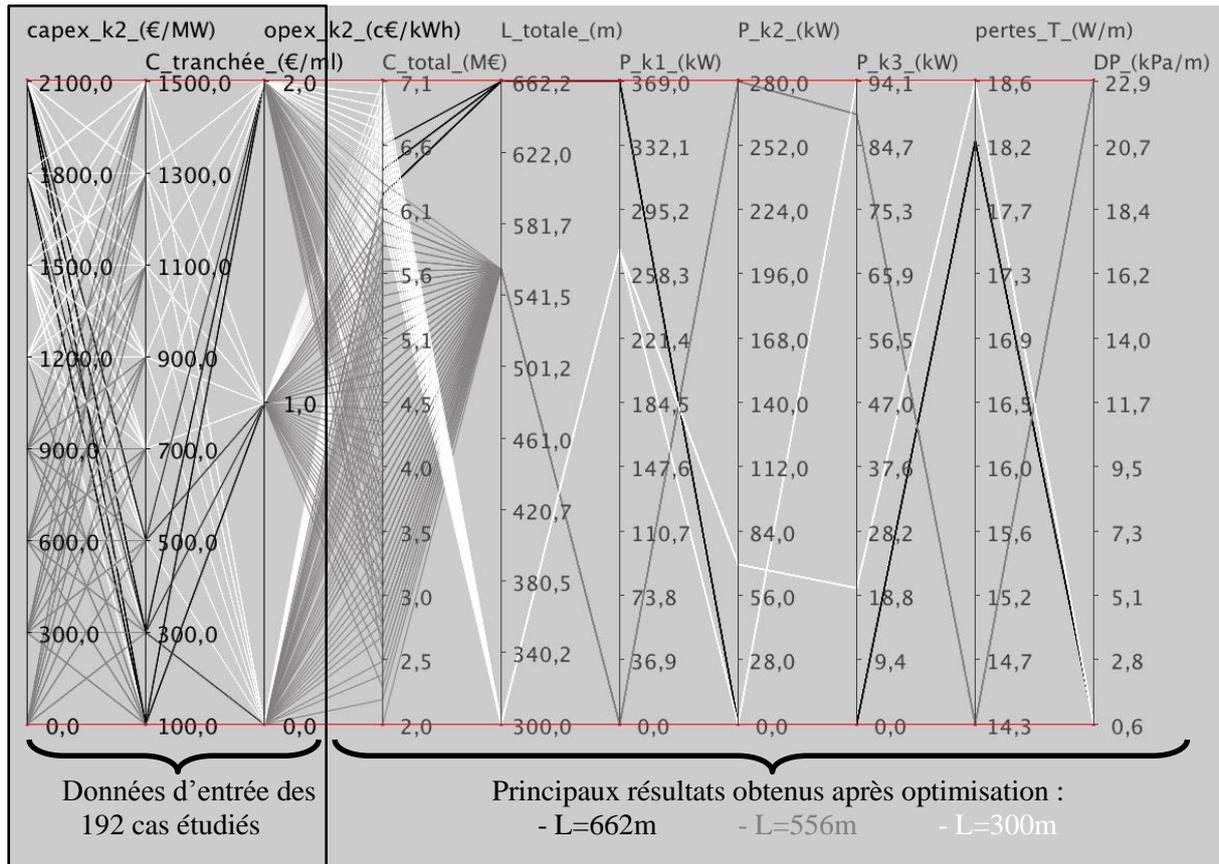


Figure 4 : Représentations des 192 résultats optimaux

- Longueur totale = 556 m :
Ces optima représentent les cas pour lesquels le coût de l'EnR&R est très faible et celui des tranchées faible. Ici (voir figure 5), la technologie k1 n'est plus utilisée. En P2 sont installées les technologies k2 (EnR&R) et k3 (appoint fossile). k2 fournit la puissance maximale autorisée pour cette technologie (280 kW) et k3 fournit le reste.



Figure 5 : Configuration du réseau de distribution de 556 m.

- Longueur totale = 300 m :
Cette configuration (voir figure 6) représente les autres cas. Ici, le coût de la tranchée est plutôt cher ce qui fait que le consommateur C4 n'est plus connecté au réseau principal. La technologie k1 alimente les consommateurs C1, C2 et C3. L'alimentation du consommateur C4 (éloigné) dépend du coût de l'EnR&R. Si le capex ou (exclusif) l'opex est faible, k2 en base et k3 en appoint sont installées. Sinon le capex et l'opex sont importants, k3 est la seule installée.



Figure 6 : Configuration du réseau de distribution de 300 m.

| Entrée | | | Résultats | | | | | | |
|---------------|--------------------------|----------------|---------------|------------------------|-----|----|------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Capex €/kW | Coût tranchée €/ml | Opex c€/kwh | L totale m | Puissance installée kW | | | Coût total M€ | Perte thermique W/m | Perte de charge kPa/m |
| | | | | k1 | k2 | K3 | | | |
| =2100 | <=300 | tous | 662 | 369 | 0 | 0 | 6,2 à 6,6 | 18 | 0,6 |
| | =500 | >0 | | | | | | | |
| =1800 | =100 | tous | 662 | 369 | 0 | 0 | 6,2 à 6,6 | 18 | 0,6 |
| | =300 | 2 | | | | | | | |
| =1200 | <=1100 | 0 | 556 | 0 | 280 | 89 | 2,2 à 6 | 14,3 | 22,9 |
| | <=500 | 1 | | | | | | | |
| | =100 | 2 | | | | | | | |
| <=900 | tous | tous | 300 | 272 | 70 | 20 | 6,4 à 7,1 | 18,6 | 0,6 |
| Autres cas | | | | | 0 | 94 | 6,8 à 7,1 | | |

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux résultats de l'étude de sensibilité.

Finalement, différentes configurations optimales du réseau de chaleur sont obtenues et sont toutes cohérentes entre elles en fonction des contraintes imposées. Vu la complexité du problème à résoudre (195 équations linéaires ou non linéaires et 131 variables), et l'ampleur qu'il prendrait sur un cas réel, un tel outil semble donc être indispensable.

5. Conclusion

Dans cet article, un outil d'optimisation de réseau de chaleur a été développé sous GAMS. Cet outil a déjà démontré son originalité en autorisant des configurations d'approvisionnement entre consommateurs (haute et basse température) s'adaptant parfaitement aux réseaux de chaleur du futur. Il permet aussi d'étudier des réseaux de chaleur potentiellement alimentés par plusieurs unités de production différentes. L'attention particulière portée sur la bonne prise en

compte de la physique n'est pas obligatoirement un point bloquant à l'obtention de résultats. Ceci à condition d'avoir une bonne méthodologie de résolution du problème MINLP.

Dans le but de démontrer les capacités et l'intérêt d'un tel outil, une étude de sensibilité a été réalisée sur le coût d'investissement d'une unité de production EnR&R, le coût de la chaleur produite par cette unité et le coût du mètre linéaire de tranchée sur un cas académique. Les résultats obtenus montrent bien que, même sur un cas académique, l'optimum économique de la configuration et du dimensionnement du réseau peut être très différent selon les données d'entrées que l'on impose au modèle et que pour l'étude d'un réseau de chaleur à dimension réelle, un tel outil semble indispensable.

Les perspectives de ce travail sont maintenant de compléter les bibliothèques d'utilités disponibles, d'ajouter des coûts variables selon les tranchées et de finir la validation sur des cas de plus grandes tailles. A plus long terme, il serait intéressant de passer le code en multipériodes (afin de pouvoir prendre en compte le stockage thermique) et/ou multiservice (synergie entre réseau froid-chaleur, réseau d'électricité-chaleur – PAC, cogénération, ou encore réseau de chaleur-gaz – méthanation).

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ITE INEF4 pour leur soutien au projet THERMENERGY.

References

- [1] ROSENTHAL, Richard, E. GAMS - A User's Guide. [March 29, 2016]; Available from: <http://www.gams.com/help/topic/gams.doc/userguides/GAMSUsersGuide.pdf>.
- [2] MERTZ T, SERRA S, HENON A, RENEAUME J. A MINLP optimization of the configuration and the design of a district heating network: academic study cases. In: The 28th international conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and environmental Impact of Energy Systems; 2015.
- [3] BOHM B, HA S, KIM W, KIM B, KOLJONEN T, LARSEN HV et al. Simple Models for Operational Optimisation: IEA District Heating and Cooling annexe XI, report S1. ISBN:90-5748-021-2; 2002.
- [4] SODERMAN J, PETTERSSON F. Structural and operational optimisation of distributed energy systems. Applied Thermal Engineering 2006;26(13):1400–1408. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.05.034.
- [5] SALAME S, ZOUGHAIB A. Conception d'un réseau de chaleur avec stockage en fonctionnement multi-période. In: SFT 2014 Congrès français de la thermique: Approches multi-échelles pour la thermique, l'énergétique et le génie des procédés; 2014.
- [6] WEBER CI, MARECHAL F, FAVRAT D. Design and optimization of district heating systems. In: DHC10, The 10th International Symposium on the District Heating and Cooling; 2006.
- [7] SANDOU G, DESSANTE P, Petit M, BORSENBERGER H. Technico-Economic Optimization of Energy Networks. In: ROBOAM X, editor. Integrated Design by Optimization of Electrical Energy Systems. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc; 2012, p. 247–285. doi:10.1002/9781118561812.ch6.
- [8] Enguerrand de Rochefort. Xdat - A free parallel coordinates software. [December 15, 2015]; Available from: <http://www.xdat.org>.