



HAL
open science

Optimisation de la configuration de réseau de chaleur : Cas d'étude

T. Mertz, Sylvain Serra, A. Hénon, Jean-Michel Reneaume

► To cite this version:

T. Mertz, Sylvain Serra, A. Hénon, Jean-Michel Reneaume. Optimisation de la configuration de réseau de chaleur : Cas d'étude. Congrès de la Société Française Thermique SFT, La Rochelle (France), 26-29 mai, 2015, La Rochelle, France. hal-02162954

HAL Id: hal-02162954

<https://univ-pau.hal.science/hal-02162954>

Submitted on 1 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Nomenclature

Indices

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

Abréviations en indice

P	concernant un nœud producteur
C	concernant un nœud consommateur
int	intérieur
ext	extérieur
in	entrant
out	sortant
tot	total
$heat$	chaleur
$unit$	unitaire
$insul$	isolation
$pipe$	canalisation
req	requis
tr	tranchée d'une canalisation
hx	échangeur de chaleur
$inst$	installé

Données d'entrée

C	coût, $k€$
x	abscisse d'un nœud, m
z	ordonnées d'un nœud, m
$Dist$	distance entre nœuds, m
S	surface, m^2

tk	épaisseur, m
D	diamètre, m
R	résistance thermique, $m^2.K/W$

Variables

L	distance d'une canalisation existante entre deux nœuds, m
M	débit, kg/s
T	température, $°C$
H	puissance, kW
E	énergie, kWh
A	aire d'échange, m^2

Acronymes (optimisation)

LP	Linear Programming
NLP	Non Linear Programming
$MILP$	Mixed Integer Linear Programming
$MINLP$	Mixed Integer non Linear Programming

Acronymes (thermique du bâtiment-réseau)

STD	Simulation Thermique dynamique
ECS	Eau Chaude Sanitaire
DHC	District Heating and cooling
PAC	Pompe A Chaleur
DES	Distributed Energy Systems

1. Introduction

Le secteur du bâtiment est le premier secteur consommateur d'énergie, aussi bien à l'échelle mondiale, qu'à l'échelle d'un pays. Dans le cadre européen du paquet Energie-Climat, la commission européenne s'impose l'objectif de 40% d'émissions en moins, 27% d'économie d'énergie et 27% d'énergie renouvelable à l'horizon 2030.

La thématique d'approvisionnement énergétique est la pierre angulaire du débat sur la transition énergétique. La solution d'approvisionnement par un réseau de chaleur est une solution globale, efficace et rentable. Elle apparaît comme une solution dans de nombreuses visions à long terme, notamment dans la vision de la plateforme technologique DHC [1]. Cette solution contribue à l'amélioration de l'efficacité énergétique car les réseaux de chaleur interviennent à différentes étapes de la chaîne énergétique et qui plus est à l'échelle collective. Malgré un investissement initial conséquent qui représente un des principaux freins, c'est une solution qui devient rentable économiquement sur le long terme. En effet, un système d'approvisionnement par réseau de chaleur est plus compétitif que le gaz à condensation collectif (son concurrent le plus proche) d'après l'enquête sur le prix de la chaleur AMORCE [2]. Une conception réfléchie en amont le rend d'autant plus rentable.

Notre travail porte sur l'optimisation simultanée de la configuration et du dimensionnement d'un réseau de chaleur. Cette thèse est incluse dans le projet THERMENERGY du programme R&D de l'ITE INEF4. La particularité de ce travail est d'autoriser différentes topologies de réseau : en étoile - chaque client est approvisionné directement par la chaufferie - ou de consommateur en cascade - approvisionnement d'un client basse température à partir d'un

client haute température (ancien bâtiment nécessitant un régime de température de distribution secondaire relativement élevé, un hôpital, un procédé industriel,...).

Nous présenterons dans un premier temps un état de l'art réalisé sur les travaux d'optimisation des réseaux de chaleur. Une attention particulière sera portée sur la caractérisation d'un problème d'optimisation en général, afin de choisir une méthode de résolution adaptée. Ensuite notre formulation du problème d'optimisation sera détaillée avant de présenter les résultats obtenus sur un cas d'étude mettant en avant l'originalité de ce travail.

2. Etat de l'art sur l'optimisation des réseaux de chaleur

Trois finalités des problèmes d'optimisation dans le domaine des réseaux de chaleur ont été identifiées. L'optimisation de la configuration (le tracé du réseau et le choix des technologies), l'optimisation du dimensionnement (puissance installée, température, débit,...) et enfin l'optimisation de la gestion des réseaux de chaleur. La dernière n'entre pas dans le cadre de notre étude. Les deux premières sont en fait liées. Elles sont séparées dans cet état de l'art pour bien les distinguer même si, lors de notre optimisation, le calcul est simultané. Il est très rare de voir des travaux portant à la fois sur ces deux finalités.

2.1. Optimisation de la configuration

L'optimisation de la configuration intervient dans les étapes de conception amont, pour la création de nouveau réseau ou pour l'extension d'un réseau existant, ceci afin d'aider aux choix des technologies et de la structure du réseau.

Le laboratoire des systèmes énergétique industriel de l'EPFL s'intéresse à la thématique de l'optimisation des réseaux de chaleur. La thèse de CURTI [3] prenait déjà en compte de l'exigence du niveau de température requis par l'utilisateur dans un outil de simulation sous fortran 77. Ce travail a été complexifié en l'optimisation multi-objectif dans les travaux de thèse de LEYLAND et MOLYNEAUX. Au détriment d'un temps de calcul important, ce travail permet de minimiser séparément les coûts de pollution du coût global du réseau. MOLYNEAUX et al [4] présentent une bonne synthèse de ces travaux. Ils étudient la superstructure en chaufferie (PAC, cogénération turbine à gaz ou chaudière gaz classique) et en sous-station (HX et/ou PAC sur le circuit aller et/ou retour) sans remettre en question le réseau de distribution. C'est-à-dire que les centrales, les sous-stations et les liaisons existent. Ils laissent « juste » dans celle-ci le choix des technologies différentes. Notre travail ne s'inscrit pas à ce niveau de détail, mais plus en amont dans la conception.

Toujours dans le même laboratoire et dans la continuité de ces travaux, la thèse de WEBER [5] insiste sur la dimension multi service en répondant à l'approvisionnement en chaleur, en froid et en électricité. Avant l'approvisionnement en froid n'était pas étudié simultanément. La dénomination polygénération est utilisée pour décrire la génération pour plus d'un service énergétique. De plus, elle ajoute la décomposition du problème d'optimisation en différenciant bien l'optimisation de la configuration du réseau, son design et sa stratégie de gestion. Ce travail permet d'exploiter la structure mathématique du problème. Habituellement un problème MINLP est résolu, par un algorithme Branch and Bound, Outer Approximation ou Generalized Benders decomposition [6]. WEBER a choisi de décomposer le problème, non pas selon le type de variable, mais selon le fait qu'il soit linéaire ou non. Une méthode hybride a été développée avec l'ajout d'un algorithme évolutionnaire. Parmi les derniers travaux de ce laboratoire, FAZLOLLAHI et al. [7] testent une résolution combinant l' ϵ -contrainte et MILP cutting plane pour résoudre le problème multi-objectif. De plus ils complètent par des études sur le besoin de chaleur sur un nombre limité mais représentatif de jours typiques avec un pas de temps heure par heure [8].

Dans un autre laboratoire de l'université d'Abo en Finlande, SODERMAN dans sa thèse travaille sur l'optimisation des réseaux de distribution d'énergie (Distributed Energy Systems DES). Il travaille sur l'approvisionnement de chaleur, de froid et d'électricité, ainsi que sur les réseaux d'échangeur de chaleur. Sa thèse est un assemblage de 6 publications, dont notamment une [9] axée sur les DES qui aboutit à une formulation d'un problème MILP. Ce dernier est résolu de manière déterministe avec un algorithme Branch and Bound.

2.2. Optimisation du design

Lorsque l'on aborde l'optimisation du dimensionnement d'un réseau de chaleur, plusieurs grandes tendances sont observées :

- Passage aux réseaux basses températures : Un besoin d'optimisation est ressenti pour trouver l'optimum entre la minimisation des pertes thermiques et la minimisation du coût de pompage [10].
- Diminution du diamètre des canalisations : Il existe des travaux entièrement focalisés sur cet aspect, comme par exemple dans le logiciel allemand STEFaN, basé sur un System d'Information Géographique (SIG) [11].
- Réduction de la puissance installée : désormais la mixité d'usage est valorisée et l'effet de foisonnement est pris en compte dans le dimensionnement des réseaux de chaleur.

Une des difficultés de ces études est l'introduction d'une dimension dynamique. L'hypothèse régime permanent permet de s'intéresser à des réseaux beaucoup plus complexes : tailles plus importantes, nombre de sous-stations plus important, et surtout introduction de plusieurs chaufferies dans le réseau.

Idéalement il faudrait tenir compte des variations de charge (journalière et saisonnière). La tendance va à l'étude multi période ou dynamique. Mais la limite de tels travaux est le raisonnement à une configuration fixée. Or ce n'est pas notre positionnement. Concernant l'optimisation du dimensionnement à configuration fixée, de nombreux travaux sont menés. Entre autre, l'IEA a lancé un groupe de travail sur cette thématique [12], un problème NLP avait été résolu avec le solveur MINOS de GAMS.

3. Caractérisation du problème d'optimisation

Pour une vision complète de la caractérisation des problèmes d'optimisation il est intéressant de se référer à la rétrospective sur l'optimisation de BIEGLER et GROSSMANN [13]. Suite à cet état de l'art, nous pouvons remarquer que les méthodes d'optimisation dépendent de la finalité visée :

- Si on optimise la configuration du réseau, il y a forcément des variables discrètes permettant de laisser le choix « telle technologie existe » ou non, « telles canalisations relient ces deux sites »,... Ainsi on se place forcément dans le cadre de problème MIP. Ensuite c'est suivant le niveau de détail souhaité. Si on modélise rigoureusement les pertes thermiques, le problème sera forcément non linéaire, soit un problème de type MINLP à résoudre.
- Si le dimensionnement ou la gestion du réseau est visé, le réseau ayant une structure fixée, il n'y a aucune raison d'avoir des variables discrètes. Les problèmes MIP sont écartés. Suivant le niveau de détail, le problème est soit LP soit NLP.

4. Formulation du problème d'optimisation

Suite à une réflexion sur notre positionnement, il a fallu définir le périmètre d'optimisation. Succinctement la superstructure autorisée est visible Figure 1. Il a été clairement différencié les paramètres d'entrées (en haut) ainsi que les variables d'optimisation. Il est à noter que même dans le cas d'étude comportant qu'un nœud producteur et trois nœuds consommateurs, 109 variables sont recensées, dont 15 variables binaires.

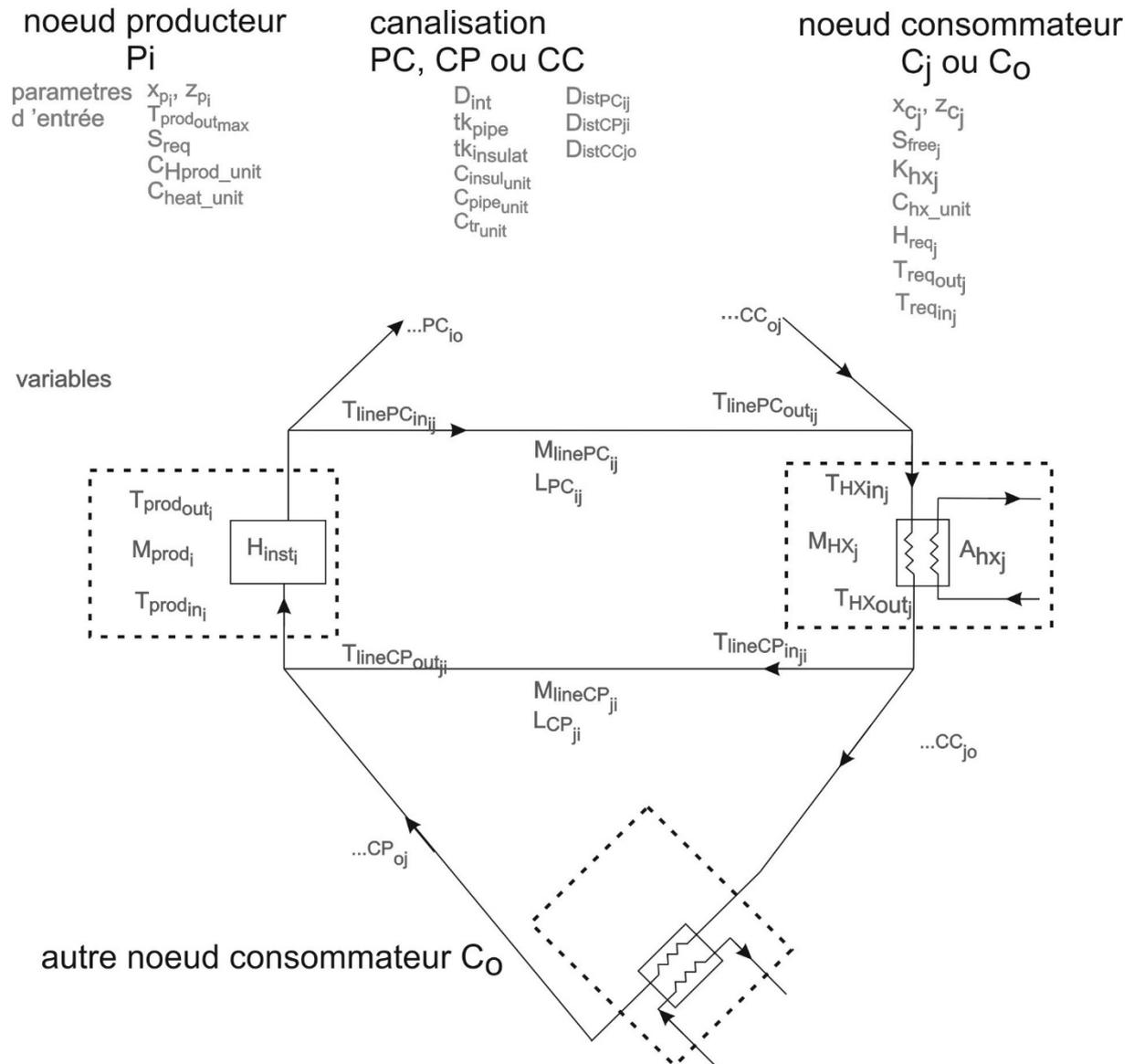


Figure 1 Schéma de la superstructure

Cette superstructure a la particularité de tenir compte du sens d'approvisionnement et d'autoriser la liaison de consommateurs en cascade, c'est à dire un client « haute température » alimentant directement sans bifurcation un client « basse température ». C'est pourquoi deux indices sont introduits pour les consommateurs. Un autre positionnement original, permettant d'optimiser la topologie du réseau, est de ne pas ajouter une contrainte logique forçant les canalisations à être aller-retour, ceci afin d'autoriser les structures en étoile et les consommateurs en cascade. Par contre, plusieurs contraintes logiques sont ajoutées à notre modèle. L'équation (1) interdit l'existence d'une canalisation d'un consommateur à lui-même. L'équation (2) définit la longueur de canalisation uniquement si celle-ci existe. L'équation (3) permet de gérer l'existence ou non d'un débit suivant l'existence de la canalisation. Dans notre

formulation, environ un tiers des équations sont des contraintes logiques (cf. éq. (1), (2) et (3)) Pour information, les inégalités représentent environ 15% de l'ensemble des contraintes.

$$\forall j, Y_{\text{lineCC}jj} = 0 \quad (1)$$

$$L_{PCij} = Y_{\text{linePC}ij} \cdot \text{Dist}_{PCij} \quad (2)$$

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

Il est intéressant de réfléchir à trouver l'optimum entre minimiser les pertes thermiques et minimiser les pertes de charge. Ainsi en tenant compte des pertes thermiques et des pertes de charge, le problème d'optimisation à résoudre est un problème MINLP. Certaines équations non linéaires (cf. éq (4) et (5)) sont détaillées ci-dessous. Elles représentent environ un autre tiers des équations.

Les pertes thermiques sont prises en compte en contraignant la température de sortie de canalisation à respecter l'équation (4). Cette contrainte a été écrite pour les 3 canalisation : producteur - consommateur (PC), consommateur - producteur (CP) et entre deux consommateurs (CC).

$$T_{\text{linePC}out(i,j)} = T_{ext} + (T_{\text{linePC}in(i,j)} - T_{ext}) \cdot \exp^{-\frac{\pi \cdot D_{extPC} \cdot L_{PC}(i,j)}{R_{PCtot} \cdot m_{\text{linePC}}(i,j) \cdot c_p}} \quad (4)$$

L'expression de la puissance de pompage s'exprime, comme dans le travail [14], en fonction principalement de la longueur de la canalisation, du débit et du diamètre d'après l'équation (5). On note que cette puissance est bien nulle lorsque le débit nul.

$$H_{pumpij} = \gamma \cdot \frac{L_{ij} \cdot M_{ij}^\alpha}{D_{ij}^\beta} \quad (5)$$

En considérant un rendement de 70% pour les pompes centrifuges, le coût de l'énergie électrique à fournir pour pomper l'eau chaude dans tout le réseau primaire s'exprime donc par l'équation (6).

$$C_{pump} = C_{pumpunit} \cdot \sum_{i \neq j} H_{pumpij} \cdot \frac{period}{\eta} \quad (6)$$

La fonction objectif actuellement considérée dans l'équation (7) est le coût global du réseau à N années, 30 ans par exemple. Il correspond à la somme des coûts opérationnels (coût de pompage et de la chaleur) et des coûts d'investissement (puissance à installer, échangeur de chaleur et canalisation)

$$C_{total} = C_{pump} + C_{heat} + C_{Hinst} + C_{HX} + C_{line} \quad (7)$$

5. Cas d'étude

Le cas d'étude considéré permet de tester la possibilité d'obtenir une structure en étoile ou la connexion en cascade des consommateurs. Les données d'entrée qui diffèrent entre les 3 cas étudiés sont renseignées dans le Tableau 1. Tous les clients ont un besoin imposé à 80kW sur la période considérée. Les clients C1 et C3 sont des clients « haute température ». Le modèle du cas 2 permet de tenir compte du niveau de température requise dans le circuit secondaire de distribution. Enfin le modèle du cas 3 autorise les liaisons entre consommateurs.

Après optimisation sous GAMS avec le solveur DICOPT, les structures optimisées du réseau sur ce quartier sont visibles Figure 2. Les paramètres de fonctionnement (températures, débits, aire d'échange, puissance installée en chaufferie,...) ne sont pas détaillés, mais sont optimisés en même temps. La structure optimisée du cas 3 illustre bien notre positionnement. Une topologie différente du réseau a été trouvée : la chaleur résiduelle du consommateur C3

alimente directement le consommateur C2. Cette structure différente permet de réduire le coût global du réseau à 30 ans de 6%, la longueur totale du réseau (L_{tot}) est réduite de 21% et la densité thermique (D_{th}) du réseau augmente quant à elle de 20% Cf. Tableau 2.

	Cas 1 (référence)		Cas 2		Cas 3	
	T_{req_in}	T_{req_out}	T_{req_in}	T_{req_out}	T_{req_in}	T_{req_out}
C1	70	50	70	50	70	50
C2			50	30		
C3			70	50		
liaison CC	non		non		oui	

Tableau 1 Données d'entrée pour les 3 cas testés

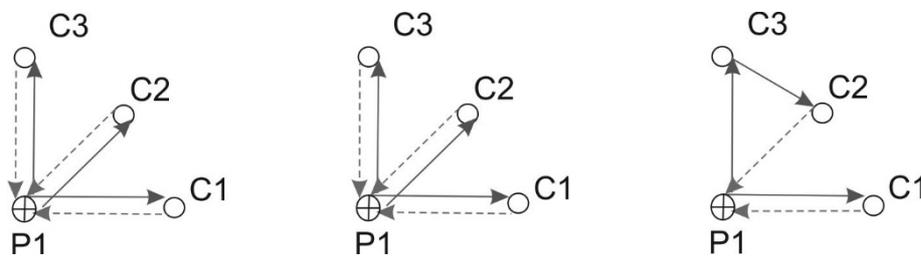


Figure 2 Schéma de la superstructure optimisée

			Cas 1	Cas 2		Cas 3	
			référence	C2 : 50-30°C		liaison CC possible	
C_{tot}	(k€)	(%)	5 706	5 560	-3%	5 337	-6%
E_{tot}	(MWh)	(%)	2 502	2 481	-1%	2 400	-4%
L_{tot}	(m)	(%)	353	353	-	280	-21%
D_{th}	(MWh/m)	(%)	7,1	7,0	-1%	8,5	20%

Tableau 2 Comparaison des principaux indicateurs pour les 3 cas d'étude

On remarque que la production de chaleur (E_{tot}) diminue entre le cas 1 et 2, cela illustre le fait que le passage à basse température permet de diminuer les pertes thermiques. La diminution entre 2 et 3 vient du fait que la distance totale de canalisation est diminuée. Notre optimisation ne se contente pas de minimiser la distance des canalisations (cas du problème du voyageur de commerce), elle est plus globale et permet de valoriser la chaleur résiduelle ainsi que de trouver un équilibre entre les pertes thermiques et les pertes de charge.

6. Conclusion

Dans cette étude, nous cherchons à optimiser simultanément la configuration et le dimensionnement d'un réseau de chaleur. L'optimisation de la configuration d'un réseau de chaleur, étape souvent omise, permet une diminution importante du coût global. La fonction objectif que l'on cherche à minimiser dans cette étude est le coût global du réseau. La prise en

compte des pertes thermiques et des pertes de charge impose la résolution d'un problème non linéaire. L'optimisation combinatoire intervient dans le choix de la topologie du maillage du réseau. Ceci nous a amené à une formulation d'un problème de type MINLP.

Les premiers résultats présentés favorisent des structures de réseaux différentes d'un réseau classique en étoile. La possibilité d'approvisionner les clients à partir de la chaleur résiduelle d'autre client permet de réduire le coût global du réseau de chaleur.

En perspectives, il est envisagé d'étudier l'approvisionnement ou non d'un client éloigné, avec ou sans production individuelle autorisée. Une étude sur un réseau de chaleur existant est également en réflexion.

Références

- [1] DHC+ technology platform (2012) District heating and cooling - A vision towards 2020 - 2030 - 2050. http://www.dhcplus.eu/wp-content/uploads/2012/05/120529_Vision_DHC_final.pdf (2 septembre 2014).
- [2] AMORCE (2010) Le prix de vente de la chaleur 2009. série économique RCE10. <http://www.amorce.asso.fr/IMG/pdf/enquete-prix-chaleur2009-maj-dec2010.pdf> (7 août 2013).
- [3] Curti V. (1998) Modélisation et optimisation environnomicques de systèmes de chauffage urbain alimentés par pompes à chaleur, thèse de doctorat, n°1176, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [4] Molyneaux A., Leyland G., Favrat D. (2010) Environomic multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and decentralized heat pumps. *Energy* 35:751–8.
- [5] Weber C.I. (2008) Multi-objective design and optimization of district energy systems including polygeneration energy conversion technologies, thèse de doctorat, n°4018, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [6] Bussieck M.R., Vigerske S. (2014) MINLP solver software, GAMS development Corp.
- [7] Fazlollahi S., Mandel P., Becker G, Maréchal F. (2012) Methods for multi-objective investment and operating optimization of complex energy systems. *Energy* 45:12–22.
- [8] Fazlollahi S., Bungener S.L., Becker G., Marechal F. (2014) Multi-Objectives, Multi-Period Optimization of district energy systems: I-Selection of typical operating periods.
- [9] Soderman J., Pettersson F. (2006) Structural and operational optimisation of distributed energy systems. *Applied Thermal Engineering* 26:1400–8.
- [10] CETE de l'Ouest (2012) Réseau de chaleur très basse température. <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/reseau-de-chaleur-tres-basse-a874.html> (30 août 2013).
- [11] Gnuchtel S., Gross S. (2010) Free optimization tools for district heating systems. In: DHC12, The 12th International Symposium on District Heating and cooling, September 5th to September 7th, 2010, Tallinn, Estonia.
- [12] Benonysson A., Bohm B., Ravn H.F. (1995) Operational optimization in a district heating system. *Energy Conversion and Management* 36:297–314.
- [13] Biegler L.T., Grossmann I.EE (2004) Retrospective on optimization. *Computers & Chemical Engineering* 28:1169–92.
- [14] Ramos Bermudez M.B. (2007) Optimisation des systèmes de distribution de fluides et des réseaux de chauffage urbains à l'aide d'un algorithme génétique, thèse en doctorat, faculté des sciences et de génie mécanique, université de Laval.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ITE INEF4.