



HAL
open science

Modélisation dynamique d'un réseau de chaleur à débits variables

M.-A. Jaafar, Sylvain Serra, Sabine Sochard, Jean-Michel Reneaume

► **To cite this version:**

M.-A. Jaafar, Sylvain Serra, Sabine Sochard, Jean-Michel Reneaume. Modélisation dynamique d'un réseau de chaleur à débits variables. Congrès de la Société Française Thermique SFT, 29/05 - 01/06, 2018, Pau, France. <hal-02156893>

HAL Id: hal-02156893

<https://univ-pau.hal.science/hal-02156893v1>

Submitted on 2 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.



HAL Authorization

Modélisation dynamique d'un réseau de chaleur à débits variables

Mohamad Ali JAAFAR^{1*}, Sylvain SERRA¹, Sabine SOCHARD¹, Jean-Michel RENEAUME¹

¹ UNIV PAU & PAYS ADOUR, LABORATOIRE DE THERMIQUE, ÉNERGETIQUE ET PROCÉDÉS-IPRA, EA1932, 64000, PAU, FRANCE

* (auteur correspondant : mohamadali.jaafar@univ-pau.fr, jaafar.mohamadali@gmail.com)

Résumé - Un outil numérique, simulant le fonctionnement dynamique des réseaux de chaleur, a été développé. Il se base sur une approche quasi-dynamique, c.à.d. un enchainement d'états stationnaires pour la résolution des propriétés hydrauliques alors que les propriétés thermiques sont calculées en couplant les méthodes volumes finis (spatial) et Runge-Kutta-Merson (temporel). Les résultats obtenus démontrent que la gestion des débits massiques proposée est performante car elle permet de respecter les appels de puissance des consommateurs. En effet, dans notre cas d'étude, elle permet de réduire le retard d'environ 10 minutes pour le consommateur le plus éloigné par rapport à un cas sans gestion.

Nomenclature

A	surface d'échange thermique, m ²	<i>Symboles grecs</i>	
C_p	capacité calorifique, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	ρ	masse volumique, kg.m ⁻³
r	rayon de canalisation, m	<i>Indices et exposants</i>	
h	coeff. convection thermique, W.m ⁻² .K ⁻¹	ex	échangeur thermique
\dot{m}	débit massique, kg.s ⁻¹	g	sol
\dot{Q}	puissance thermique, W	in	entrée
t	temps, s	out	sortie
T	température, K	p	canalisation
U	coefficient d'échange global, W.m ⁻² .K ⁻¹	w	eau
x	variable d'espace, m	1	interne
		2	externe

1. Introduction

La pollution environnementale et l'augmentation de la demande énergétique sont deux problèmes majeurs d'actualité. C'est dans ce cadre que le projet AMI FONGEOSEC a vu le jour. En effet, son objectif est de concevoir et réaliser un démonstrateur de centrale géothermique haute enthalpie innovante à cogénération de chaleur et d'électricité. Il est porté par FONROCHE Géothermie. La ressource géothermique étant une énergie renouvelable, elle constitue donc une alternative aux énergies fossiles grâce à sa durabilité, simplicité, et propreté [1].

Le projet FONGEOSEC vise à développer un système de cogénération électricité/chaleur couplant un cycle ORC pour la production d'électricité et un réseau de chaleur pour la valorisation thermique. Ce réseau va distribuer la chaleur produite vers des consommateurs pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. En effet, cette technologie améliore l'efficacité énergétique, favorise l'utilisation des énergies renouvelables, diminue le coût de la chaleur et, est plus sécurisante en évitant l'utilisation des chaudières individuelles [2].

Une des actions du LaTEP dans ce projet est de développer un outil de simulation dynamique du réseau de chaleur. Un tel outil, objectif du présent papier, permettra d'étudier l'impact de perturbations externes sur le comportement global du réseau et de proposer une méthodologie de gestion des débits dans les différentes branches du réseau.

Dans un réseau, le transport de la chaleur vers les consommateurs dépend à la fois des variations dynamiques des débits et des températures dans les différentes canalisations. La variation des débits est liée à la propagation de la pression à travers les canalisations, tandis que la propagation thermique dépend de la vitesse du fluide circulant dans le réseau. Ce second phénomène est beaucoup moins rapide que la propagation de la pression [3]. Par conséquent, une approche quasi-dynamique est souvent employée dans laquelle les propriétés hydrauliques (débits et pressions) sont résolues comme succession d'états stationnaires, alors que l'évolution des températures est réellement intégrée dans le temps.

En se basant sur cette approche, différents modèles ont été développés dans la littérature. Le modèle dynamique agrégé [4], présenté par Larsen et al., qui consiste à simplifier la forme topologique complexe des réseaux en diminuant le nombre de canalisations. Le modèle des nœuds [5] dont le principe est de calculer les températures à l'entrée et à la sortie des canalisations en se basant sur l'historique des températures des différents nœuds. Bien que ces modèles ne nécessitent pas une grande capacité de calculs, ils ne sont pas capables de décrire la variation temporelle de température le long des canalisations. Dans ce but, d'autres modèles « plus physiques » ont été proposés [3,6]. Ils consistent en la résolution directe de l'équation de bilan d'énergie dans les canalisations.

Dans une démarche globale visant à proposer une gestion dynamique performante des réseaux de chaleur, cette communication met en évidence l'intérêt de la politique de gestion basée sur un débit initial maximal. La modélisation dynamique de l'écoulement permettant d'étudier les propriétés hydrauliques et thermiques d'un réseau de chaleur à débits variables est d'abord présentée. Ensuite, en se basant sur une approche quasi-dynamique, la résolution numérique, couplant la méthode des volumes finis pour la discrétisation de l'espace et la méthode de Runge-Kutta-Merson pour l'intégration en temps, est brièvement décrite. Enfin, les résultats obtenus pour un cas d'étude comprenant différents types de consommateurs sont analysés afin de démontrer que la loi utilisée pour la gestion des débits permet de respecter les appels de puissance des consommateurs.

2. Modélisation

Le système est constitué d'une centrale géothermique de production de chaleur représentée par une température de production constante (donnée d'entrée) et un débit variable (calculé), d'un réseau de canalisations d'eau enterrées distribuant la chaleur et de consommateurs.

Le réseau, alimenté par la source géothermique renouvelable, est considéré comme moderne car l'eau liquide qui circule dans les différentes canalisations peut être à basse température et les débits dans les différentes branches sont variables [7]. Les canalisations peuvent être divisées en deux parties : la partie d'alimentation dans laquelle l'eau « chaude » circule de la centrale géothermique vers les consommateurs ; une fois que les consommateurs ont été alimentés, l'eau « refroidie » circule dans la partie retour vers la centrale géothermique pour former une boucle d'écoulement fermée. Les canalisations d'eau sont constituées de trois couches : le matériau des canalisations même, l'isolation, et le *casing*.

Le modèle est basé sur les hypothèses principales suivantes : fluide (eau) incompressible à propriétés thermophysiques constantes, écoulement piston, inerties thermiques de l'isolation et du *casing* négligées, flux conductifs dans la direction de l'écoulement négligés. Les appels de puissance des différents consommateurs sont supposés connus (c'est-à-dire que le profil $\dot{Q}_{cons}(t)$ est connu pour chaque consommateur).

2.1. Modèle hydraulique

Les débits massiques dans les canalisations du réseau sont contrôlés directement par les appels de puissance thermique des différents consommateurs. Ils sont calculés en deux étapes. La première étape consiste à déterminer les débits des canalisations alimentant directement les consommateurs qui sont représentés par des échangeurs thermiques à contre-courant pour lesquels l'inertie ainsi que l'accumulation sont négligées. En ce qui concerne l'inertie, la masse de métal du plus grand échangeur représente environ 0,2% de la masse totale de canalisations ce qui justifie pleinement que l'on puisse négliger l'inertie des échangeurs. Dans la mesure où l'on a des débits variables, les températures d'entrée et de sortie des échangeurs sont relativement stables, ce qui permet de négliger l'accumulation. Ils sont représentés par les équations suivantes [8] :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{rés} \cdot Cp_{rés} \cdot (T_{rés}^{in} - T_{rés}^{out}) \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{cons} \cdot Cp_{cons} \cdot (T_{cons}^{out} - T_{cons}^{in}) \quad (2)$$

$$\dot{Q} = U_{ex} \cdot A_{ex} \cdot \left(\frac{(T_{rés}^{in} - T_{cons}^{out}) - (T_{rés}^{out} - T_{cons}^{in})}{\ln \left(\frac{(T_{rés}^{in} - T_{cons}^{out})}{(T_{rés}^{out} - T_{cons}^{in})} \right)} \right) \quad (3)$$

Où U_{ex} est calculé en négligeant la conduction à travers les parois des canalisations de l'échangeur (corrélations adaptées fonctions des débits) ; A_{ex} est fixée (dimensionnée préalablement en fonction des puissances maximales des consommateurs) ; $T_{rés}^{in}$ est connue au moment de la résolution de ces équations (résultat de la propagation thermique dans les canalisations du réseau) ; T_{cons}^{in} est supposée constante et égale à 20 °C et \dot{m}_{cons} est déduit de \dot{Q}_{cons} en imposant une température de consigne pour la sortie du fluide côté consommateur égale à 60°C dans le cadre de cette étude.

Pour résoudre ce système deux cas de fonctionnement sont distingués :

- $T_{rés}^{in}$ n'est pas suffisamment chaude ($< 60^\circ\text{C} + \Delta T_{pinch}$), alors $\dot{m}_{rés}$ est imposé selon une loi variant progressivement de zéro à une valeur maximale (déterminée par la vitesse maximale possible dans la canalisation). Ensuite, le système est résolu pour en déduire $T_{rés}^{out}$, T_{cons}^{out} et \dot{Q} . Dans ce cas on a $\dot{Q} < \dot{Q}_{cons}$ et $T_{cons}^{out} < 60^\circ\text{C}$.
- $T_{rés}^{in}$ est suffisamment chaude ($> 60^\circ\text{C} + \Delta T_{pinch}$) et $\dot{Q} > \dot{Q}_{cons}$, alors $\dot{m}_{rés}$ n'est plus imposé, mais on impose $\dot{Q} = \dot{Q}_{cons}$. L'équation (2) conduit à $T_{cons}^{out} = 60^\circ\text{C}$ et les équations (1) et (3) permettent de déduire $\dot{m}_{rés}$ et $T_{rés}^{out}$.

Un troisième cas particulier existe où le consommateur ne demande aucune puissance thermique. Dans ce cas-là, $\dot{m}_{rés}$ est imposé à zéro et le système n'est pas résolu.

En pratique, les débits pourraient être asservis à la mesure de température T_{cons}^{out} .

Une fois que les débits de toutes les canalisations directement connectées aux consommateurs sont déterminés, la deuxième étape consiste à calculer les débits des autres canalisations du réseau. Ceci en résolvant le système d'équations algébriques des bilans de matière sur les nœuds du réseau. Pour le nœud Y :

$$\sum_{\substack{X \text{ connecté à } Y \\ \text{en amont}}} \dot{m}_{XY} = \sum_{\substack{Z \text{ connecté à } Y \\ \text{en aval}}} \dot{m}_{YZ} \quad (4)$$

X, Y, et Z peuvent être des sources de chaleur (S), des nœuds (N), ou des consommateurs (C).

2.2. Modèle thermique

Les températures de l'eau circulant dans les canalisations et celles des canalisations mêmes sont décrites, respectivement, par les équations de bilan d'énergie suivantes :

$$\rho_w \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot \frac{\partial T_w}{\partial t} = - \frac{h_{wp} \cdot \pi \cdot r_1}{Cp_w} \cdot (T_w - T_p) - \dot{m} \cdot \frac{\partial T_w}{\partial x} \quad (5)$$

$$\rho_p \cdot \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot Cp_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_{wp} \cdot \pi \cdot r_1 \cdot (T_w - T_p) - U_{pg} \cdot \pi \cdot r_2 \cdot (T_p - T_g) \quad (6)$$

U_{pg} est calculé à travers la couche d'isolation et la couche de *casing*.

La température à la limite pour résoudre l'équation (5) est celle du nœud d'entrée dans la canalisation. Elle est calculée en appliquant le bilan d'énergie sur ce nœud. Pour le nœud N_i :

$$\sum_{\substack{X \text{ connecté à } N_i \\ \text{en amont}}} \dot{m}_{XN_i} \cdot T_{XN_i}^{out} = \sum_{\substack{Y \text{ connecté à } N_i \\ \text{en aval}}} \dot{m}_{N_i Y} \cdot T_{N_i} \quad (7)$$

$T_{XN_i}^{out}$ est la température de sortie de canalisation XN_i .

3. Résolution numérique

Les canalisations du réseau sont maillées dans le sens de l'écoulement afin d'utiliser la méthode des volumes finis pour transformer les équations (5) et (6) aux dérivées partielles en systèmes d'équations différentielles ordinaires où l'unique variable d'intégration est le temps.

La résolution numérique, programmée en FORTRAN, se base sur l'approche quasi-dynamique. À chaque itération de temps, les débits massiques du réseau sont calculés de manière à satisfaire les appels de puissance (section 2.1). Ensuite, en fonction de ces débits et après avoir déterminé les températures des nœuds, les températures des volumes finis de l'eau et des canalisations sont intégrées en temps en employant une méthode de Runge-Kutta-Merson d'ordre 4. Cette méthode permet, en évaluant l'erreur de troncature à l'ordre 5, d'adapter le pas de temps afin de respecter une précision souhaitée.

4. Résultats

4.1. Description du cas étudié

Le réseau de chaleur étudié ici est alimenté par une source unique de chaleur et distribue l'eau chaude vers cinq consommateurs (voir figure 1). Le consommateur 2 représente des immeubles de bureaux (nommé ici Bureaux), tandis que les autres représentent des immeubles d'habitation (nommés ici Habitations). La simulation numérique couvre deux jours pour lesquels les besoins sont très différents (par exemple vendredi et samedi). Les longueurs des canalisations d'alimentation du réseau sont représentées dans le tableau 1. Les tranchées du réseau comprennent les canalisations allers et retours.

Les puissances thermiques demandées par les consommateurs C_2 et C_5 sont représentées dans la figure 2. Le vendredi, les Habitations (C_5) ne demandent de la chaleur que tôt le

matin, à midi, et durant le soir, tandis que les Bureaux (C_2) demandent de la chaleur toute la journée avec une diminution légère après-midi. Le samedi, aucune puissance n'est demandée par C_2 , et une puissance est demandée en continu par C_5 . Les puissances demandées par les Habitations C_1 , C_3 , et C_4 , non présentées dans la figure 2, varient en temps de la même façon que C_5 mais avec des puissances différentes. Les puissances maximales, demandées entre 7 h et 8 h selon les consommateurs, sont représentées dans le tableau 2. La puissance demandée en C_2 s'apparente à la puissance demandée par une université de taille moyenne comme celle de Pau. Les autres puissances importantes pour des habitations représentent en fait un agglomérat de sous-stations pour les quartiers avoisinants cette université par exemple.

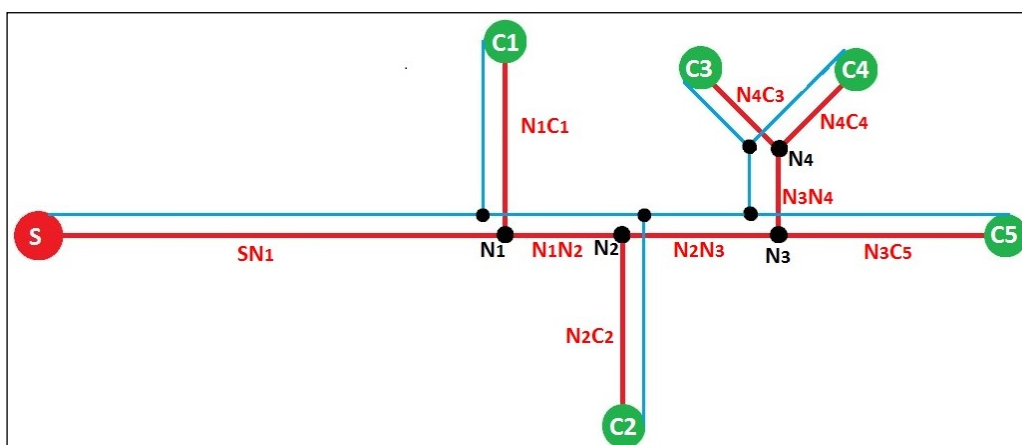


Figure 1 : Structure du réseau de chaleur. En rouge et en bleu sont représentées les canalisations allers et retours. S, C, et N désignent les Sources, les Consommateurs, et les Nœuds.

Canalisation	SN ₁	N ₁ C ₁	N ₁ N ₂	N ₂ C ₂	N ₂ N ₃	N ₃ N ₄	N ₄ C ₃	N ₄ C ₄	N ₃ C ₅
Longueur [m]	500	75	50	75	75	25	50	50	100

Tableau 1 : Longueurs des canalisations d'alimentation.

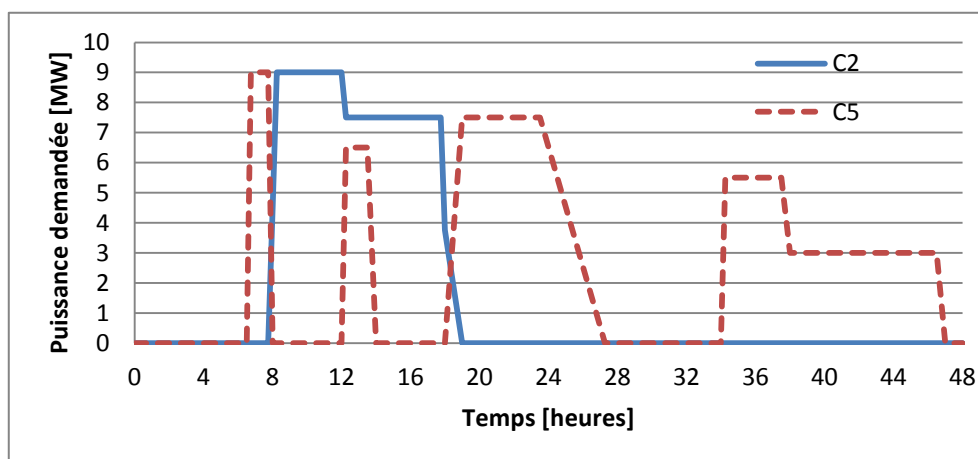


Figure 2 : Variations des puissances demandées par C_2 et C_5 sur 48 heures.

Consommateur	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Puissance maximale [MW]	13	9	5	5	9

Tableau 2 : Les puissances maximales des consommateurs.

Les températures de la source de chaleur et du sol sont supposées constantes et égales, respectivement, à 90 °C et 20 °C. La température initiale du système est supposée homogène et égale à la température du sol.

4.2. Résultats concernant les débits massiques

Dans le but de tester la gestion des débits proposée dans ce travail, seuls les débits massiques des canalisations qui alimentent directement les consommateurs sont discutés. Les bilans de matière sur tous les nœuds du système ont cependant été vérifiés.

Les évolutions temporelles des débits massiques des canalisations d'alimentation N_2C_2 et N_3C_5 sont représentées dans la figure 3. Globalement les allures de ces débits suivent les allures des puissances demandées par les consommateurs (figure 2). Cependant, conformément à la politique de gestion des débits que l'on a imposée, les débits massiques tendent vers des valeurs maximales après chaque longue période de consommation nulle :

- à 7 h (7h00 le vendredi) et à 34 h (10h00 le samedi) pour la canalisation N_3C_5 alimentant les Habitations C_5 ;
- à 8 h pour N_2C_2 alimentant les Bureaux C_2 .

Ensuite, une fois que la température chaude est atteinte dans les canalisations d'alimentation du réseau, les débits diminuent pour retrouver les valeurs nominales correspondant aux puissances demandées.

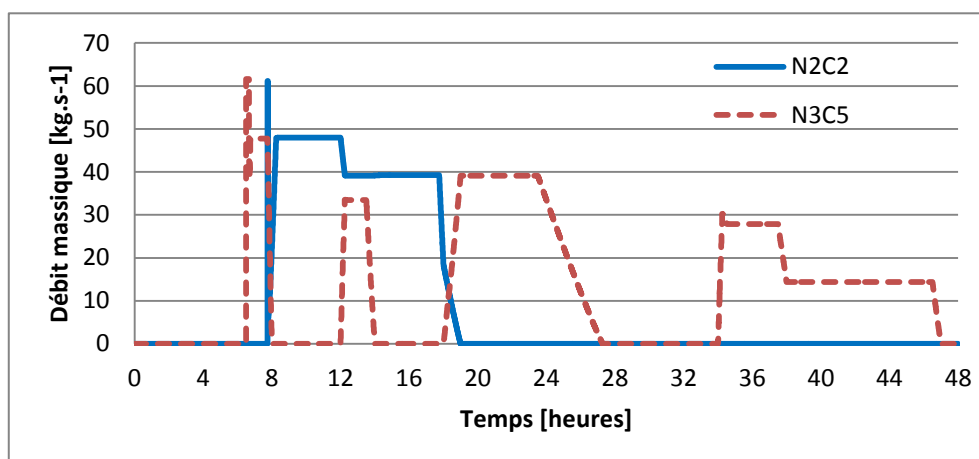


Figure 3 : Évolution temporelle des débits massiques des canalisations N_2C_2 et N_3C_5 .

Les évolutions temporelles des débits des canalisations (N_1C_1 , N_4C_3 , et N_4C_4), alimentant directement les autres Habitations, suivent la même allure que celle du débit de la canalisation N_3C_5 mais avec des amplitudes différentes liées aux puissances maximales demandées.

4.3. Résultats concernant les puissances thermiques délivrées

Les puissances délivrées aux consommateurs C_2 et C_5 sont superposées avec les puissances demandées, respectivement, dans les figures 4 et 5.

Ces figures montrent que les puissances délivrées correspondent très bien à celles demandées par les consommateurs. Malgré tout, un léger retard d'environ 7 minutes, peu visible sur la figure 5, existe entre la puissance demandée et celle délivrée au démarrage du système à 7 h pour C_5 . Ce phénomène, tout à fait normal, est lié à la distance entre l'unité de production et les consommateurs et au fait que l'eau dans les canalisations au démarrage est à la température du sol. La comparaison des puissances délivrées et demandées aux autres Habitations C_1 , C_3 et C_4 donnent les mêmes conclusions que celles de C_5 , mais avec un retard moins important. Le retard de C_5 est le plus important parce qu'il est le plus loin de la source de chaleur.

Concernant la puissance délivrée au C_2 (figure 4), correspondant aux Bureaux, il n'y a pas eu de retard par rapport à la puissance demandée, car à 8 h (l'instant de son appel de

puissance) le système avait déjà démarré depuis presque une heure et les canalisations principales étaient déjà réchauffées. Les résultats obtenus montrent que la gestion des débits massiques proposée est bonne.

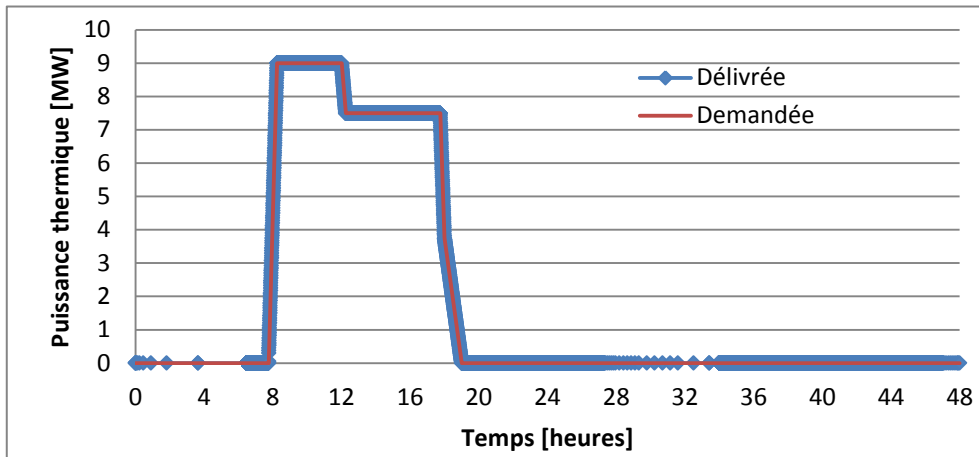


Figure 4 : Évolution temporelle de la puissance demandée et délivrée au C_2 .

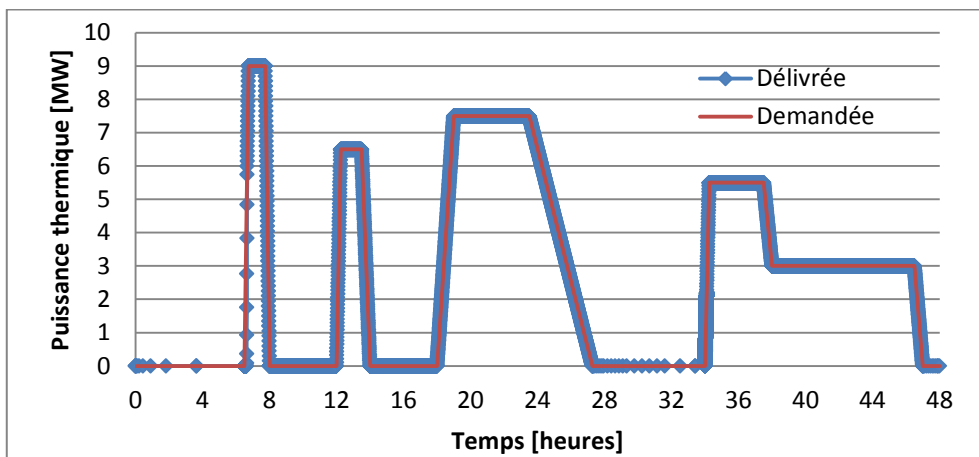


Figure 5 : Évolution temporelle de la puissance demandée et délivrée au C_5 .

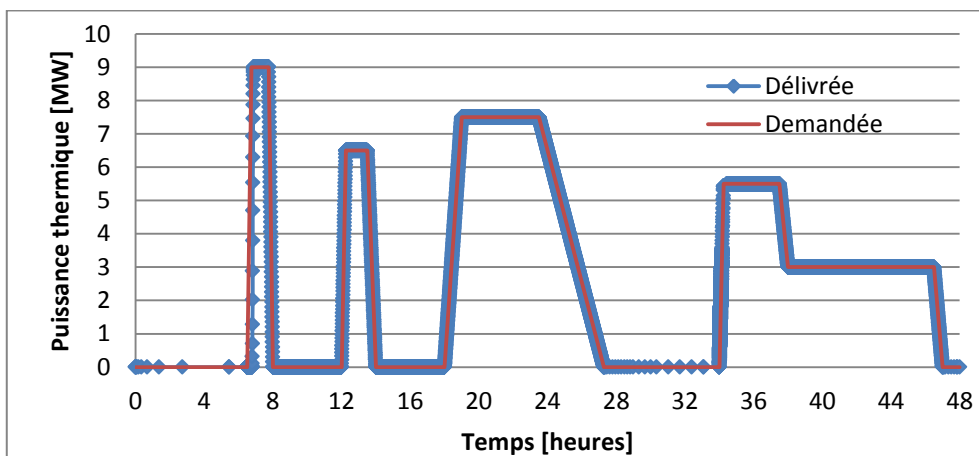


Figure 6 : Évolution temporelle de la puissance demandée et délivrée au C_5 .

Dans le but de mettre en évidence l'intérêt de la politique de gestion des débits proposée dans cette étude, un calcul pour le même réseau, avec une gestion différente, est lancé. Dans ce calcul, les débits sont directement calculés en fonction des puissances demandées aux consommateurs et aucun débit maximum n'est imposé au début de l'appel de puissance. Une

comparaison entre la puissance demandée et celle délivrée pour le consommateur C_5 , toujours le plus loin, dans ce cas est représentée dans la figure 6.

Dans la figure 6, le retard existant au démarrage du système à 7 h, plus visible ici, est plus important que celui du cas précédent. En effet, il est ici d'environ 17 minutes. Cela met en évidence l'intérêt de la politique de gestion des débits, proposée dans cette étude pour satisfaire « au mieux » les consommateurs. En effet, ils reçoivent plus rapidement la chaleur demandée. Cependant un compromis doit toujours être effectué, parce que le fait d'imposer un débit maximum au début de l'appel de puissance nécessite des coûts de pompage plus importants.

5. Conclusion

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet AMI FONGEOSEC porté par FONROCHE Géothermie. L'objectif de ce travail est de simuler le fonctionnement dynamique d'un réseau de chaleur à débits variables.

Le modèle s'appuie sur une approche quasi-dynamique. Les débits massiques sont résolus par une succession d'états stationnaires. L'écoulement est supposé piston, la résolution numérique des bilans d'énergie de l'eau circulant dans les canalisations est basée sur la méthode des volumes finis pour la discrétisation spatiale et la méthode de Runge-Kutta-Merson pour l'intégration temporelle.

Les premiers résultats obtenus sur un cas d'étude montrent l'intérêt d'avoir des débits variables dans un réseau. Cela permet notamment d'imposer des débits importants au démarrage pour éviter des retards trop importants entre l'appel de puissance et la satisfaction de cet appel. Cependant, cela implique des coûts de pompage élevés. L'intégration de réservoirs de stockage d'eau chaude, au voisinage des consommateurs, devrait permettre de satisfaire leurs demandes sans avoir besoin d'augmenter les coûts de pompage. Cette étape est en cours de validation dans notre outil numérique.

Références

- [1] Olsthoorn, D., Haghighat, F., & Mirzaei, P. A. Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization. *Solar Energy*, 136, 49-64. (2016).
- [2] Talebi, B., Mirzaei, P. A., Bastani, A., & Haghighat, F. A review of district heating systems: modeling and optimization. *Frontiers in Built Environment*, 2, 22. (2016).
- [3] Zhou, S. J., Tian, M. C., Zhao, Y. E., & Guo, M. Dynamic modeling of thermal conditions for hot-water district-heating networks. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(4), 531-537. (2014).
- [4] Larsen, H. V., Pálsson, H., Bøhm, B., & Ravn, H. F. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. *Energy conversion and management*, 43(8), 995-1019. (2002).
- [5] Pálsson H. Methods for planning and operating decentralized combined heat and power plants. Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark and Systems Analysis Department, Risa National Laboratory, Report 1185, 2000.
- [6] Jie, P., Tian, Z., Yuan, S., & Zhu, N. Modeling the dynamic characteristics of a district heating network. *Energy*, 39(1), 126-134. (2012).
- [7] Yan, A., Zhao, J., An, Q., Zhao, Y., Li, H., & Huang, Y. J. Hydraulic performance of a new district heating systems with distributed variable speed pumps. *Applied energy*, 112, 876-885. (2013).
- [8] Haiyan, L., & Valdimarsson, P. District heating modelling and simulation. In *Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. (2009).