

## **SigOpti : Développement d'un outil open source d'aide à la décision pour les réseaux de chaleur urbain à destination des collectivités.**

**Hugo VIOT<sup>1\*</sup>, Thierry BERNHARD<sup>2</sup>, Lesly HOUNDOLE<sup>2</sup>, Jérôme LAFRECHOUX<sup>1</sup>,  
Théophile MERTZ<sup>1,4</sup>, Aurélien HENON<sup>1</sup>, Guillaume PERRIN<sup>3</sup>, Sylvain SERRA<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> NOBATEK/INEF4, Esplanade des Arts et Métiers, 33400 Talence, France.

<sup>2</sup> CREM, Centre du Parc, Rue Marconi 19 - CP 256, CH-1920 Martigny, Suisse.

<sup>3</sup> FNCCR - Département Energie, 20 bd de Latour Maubourg, 75007 Paris, France.

<sup>4</sup> LATEP-ENSGTI, Université de Pau & Pays Adour, 64075 Pau, France

\*[hviot@nobatek.inef4.com](mailto:hviot@nobatek.inef4.com)

---

*RESUME. La loi prévoit une multiplication par cinq de la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée d'ici 2030. Il y a donc un besoin d'outils pour favoriser la prise de décision en faveur de l'implantation ou d'extension des réseaux de chaleur sur le territoire. Le développement de l'outil SigOpti repose sur le couplage d'approches innovantes d'aide à la décision pour l'approvisionnement thermique de quartiers en s'appuyant sur un système d'information géographique (SIG) d'une part et sur des algorithmes d'optimisation d'autre part (OPTI). SigOpti doit intervenir en amont d'une étude de faisabilité et est donc volontairement basé sur une modélisation très simple, permettant de guider le décideur à un moment où l'éventail des possibles est très large en utilisant la puissance des méthodes d'optimisation. L'outil est mis à disposition de façon open source sous forme d'un plugin téléchargeable gratuitement dans l'environnement QGIS. L'optimisation en approche coût global est réalisée à distance.*

*MOTS-CLÉS : réseaux de chaleur urbains, optimisation, open source*

---

*ABSTRACT. The law provides for a fivefold increase of the renewable or recovery heat and cold delivered by 2030. There is a need for decision-making tools to promote creation or extension of district heating networks. The development of the SigOpti tool is based on the coupling of innovative decision support approaches for the thermal supply of neighborhoods based on a geographic information system (GIS) on the one hand and on optimization algorithms on the other hand (OPTI). SigOpti must intervene upstream of the feasibility study step. It is voluntarily based on very simple modeling, allowing to guide the decision maker at a time when the range of possibilities is very wide. The tool is made available in an open source way as a plugin that can be downloaded for free in the QGIS environment. The optimization is carried out remotely in a global cost approach.*

*KEYWORDS : District heating, optimization, open source*

---

### **1. INTRODUCTION**

L'un des objectifs de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTEC) est de porter la part des énergies renouvelables à 23% de la consommation finale d'énergie en 2020 et à 32% en 2030. Dans cette optique, le projet SigOpti visait le développement d'une plateforme informatique open source d'aide à la décision pour le développement de réseaux de chaleur urbain (RCU) sur leur territoire. Elle est une réponse à l'appel à projets de recherche ADEME « Energie durable : production, gestion et utilisation efficaces 2017 ». La cible première de l'outil sont les collectivités pour les aider à intégrer les besoins thermiques ainsi que le potentiel de valorisation d'énergie renouvelable et de chaleur fatale de leur territoire, tout en les accompagnant dans la conception, la caractérisation (économique,

énergétique et environnementale) et la prise de décision concernant l'implantation ou l'extension de réseaux de chaleur sur ce territoire. Les collectivités et syndicats intervenant sur des territoires plus modestement peuplés disposent généralement en interne de ressources humaines, logicielles, matérielles, et expertes plus limitées que les grandes métropoles. Il est ainsi crucial de mettre à disposition de ces collectivités des outils facilement accessible, aussi bien du point de vue économique que technique. Les développements de SigOpti correspondent à une phase où un nombre limité d'informations sont disponibles et où certaines décisions stratégiques sont encore à prendre (Figure 1), notamment quant à la proposition du tracé, la position et l'approvisionnement de la centrale de production, ou encore les futurs consommateurs à raccorder.

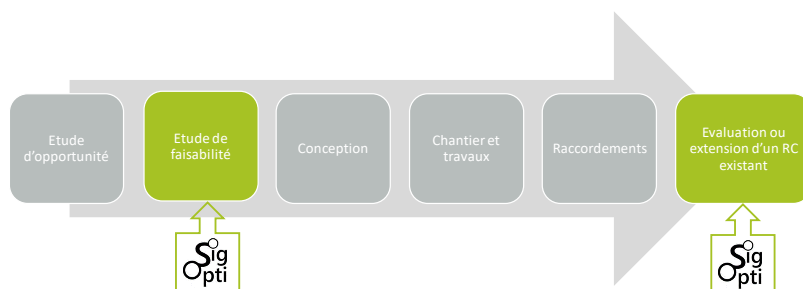


Figure 1: Positionnement de l'outil

Un certain nombre de travaux ont déjà été menés pour concevoir des outils dédiés à la simulation, conception, ou aide à la décision pour le développement de réseaux de chaleur et de froid. Des outils commerciaux et des travaux académiques connexes sont listés dans le Tableau 1.

Référence	Outil	Open source	Description
Rathi et Santiago 1990	NETSIM	Non	Outil commercial de simulation de RCU, import de données basées sur les données de consommation issu d'un système de facturation. Une fois que cela est fait, l'utilisateur peut créer n'importe quelle simulation statique ou dynamique.
Thevenard et al. 2000	RETSscreen	Non	RETSscreen est un système logiciel de gestion d'énergies propres pour l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération ainsi que pour l'analyse de la performance énergétique en continu. Téléchargeable gratuitement.
Litchi et al. 2012	WebOpt	Non	Issu de l'Université de Berkeley. La version ergonomique de DER-CAM, outil de simulation de RCU, fonctionnalité très intéressante, mais pas d'échange de code possible.
Wiese et al. 2018	Balmorel	Oui	Développé par l'Université d'Aalborg. Prend en charge la modélisation énergétique en mettant l'accent sur les secteurs de l'électricité et de la production combinée de chaleur et d'électricité. Nécessite une licence GAMS.
Rossman 1999	Epanet	Oui	Outil opensource de simulation de réseau d'eau (uniquement). Développé par l'US Environmental Protection Agency.
Gabrielaitiene et al. 2007	TERMIS	Non	Outil commercial de simulation de RCU. Considéré comme l'un des outils les plus avancés et les plus

Zoughaib et al. 2014	CERES	Non	puissants, 30 ans expérience, plus de 500 réseaux instrumentés au monde. Outil d'intégration énergétique et d'optimisation des systèmes, procédés et territoires. Issu du projet ANR du même nom.
Giraud 2016	Thèse	Non	Outil développé dans le cadre d'une thèse au département LITEN du CEA intitulée « Modélisation dynamique et gestion avancée de réseaux de chaleur. Permet de modéliser un réseau de chaleur tout en intégrant une partie optimisation pour le pilotage du réseau (gestion de la demande). L'idée est de flexibiliser la demande en jouant sur l'inertie des bâtiments comme capacité de stockage afin de réduire les appels de puissance au niveau de la production.
Zhang et al. 2019 Kuriyan et Shah 2019	THERMOS	Oui	Le logiciel issu du projet UE THERMOS a pour objectif d'aider les planificateurs à identifier avec précision, rapidité et coût les options de réseaux d'énergie thermique dans une zone donnée. Partenariat avec des villes pilotes. L'outil est accessible par le web en version de test et permet de définir un périmètre sur le territoire et d'importer des données des potentiels bâtiments raccordés (sur la base d'estimation). L'outil propose ensuite un tracé de réseau optimisé et les coûts associés.

Tableau 1: Etat de l'art

## 2. METHODE D'OPTIMISATION ET MODELE ASSOCIE

La modélisation du réseau de chaleur est issue de travaux de recherches ayant précédé le développement de SigOpti dont ce dernier est une voie de valorisation. Le code initialement développé dans l'environnement GAMS a été basculé vers le langage Python au travers de la librairie PYOMO qui permet d'exposer à un éventail de solveurs, un problème dans un formalisme standardisée. Cette version Open Source du code est nommé pyODHeaN et qui, couplée avec QGIS, forme le plugin SigOpti (Figure 2).

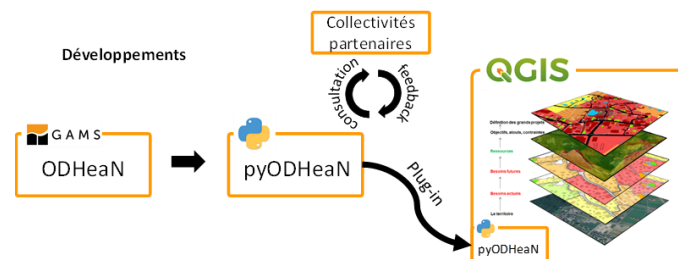


Figure 2: Interfaçage de pyODHeaN et QGIS

La configuration du réseau de chaleur est fixée par l'utilisateur donc le problème posé ne fait pas intervenir de variables binaires d'existence ce qui permet d'utiliser un solveur de type NLP (Non Linear Programming) puisqu'il fait néanmoins intervenir des équations de degré supérieur ou égale à deux. La méthode des points intérieurs est utilisée via le solveur open source IPOPT, elle a été inventée par Frisch 1955 pour résoudre des problèmes non linéaires puis a été appliquée à la programmation linéaire en par Khachiyan 1979. Le problème posé est de la forme suivante (1) :

$$\begin{cases} \min c(x) \\ Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{objectif à minimiser} \\ \text{contraintes d'égalité} \\ \text{contraintes d'inégalités} \end{array} \quad (1)$$

Les différentes composantes du réseau de chaleur sont décrites par des modèles physiques permettant de retranscrire sous forme d'équation les bilans de masse et d'énergie (Figure 3). Pour plus de détail, le lecteur pourra se référer aux travaux de Mertz et al.2015 ainsi qu'à sa thèse (Mertz 2016).

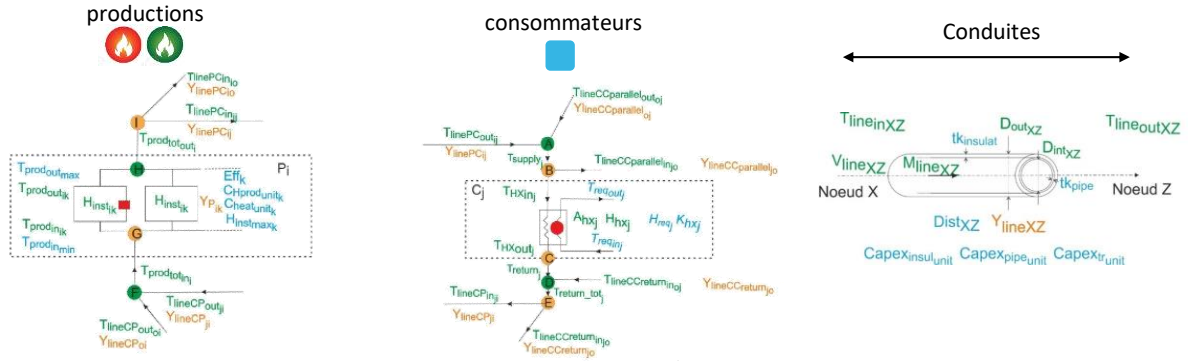


Figure 3: Modèles des nœuds constituant un RCU

La résolution du modèle se fait en régime statique en se plaçant dans des conditions de dimensionnement où la puissance nominale est appelée à chaque point de consommation en tenant compte d'un coefficient de foisonnement global défini par l'utilisateur. L'algorithme recherche la solution qui permet de minimiser la fonction coût global du réseau à N années (N défini par l'utilisateur). La formulation du coût global correspondant à la somme des coûts opérationnels (opex) et d'investissements (capex) et est formulé selon les équations (2-8). Le choix d'utiliser un coût global (2) comme fonction objectif à minimiser est justifié par l'utilisation de l'outil pour des études d'opportunités où il n'est pas encore utile d'optimiser le volet technique qui sera traité dans les phases suivantes par un bureau d'étude spécialisé. Des contraintes sont cependant appliquées sur les températures, les vitesses et les sections pour que le réseau optimisé soit réaliste.

$$C_{global} = C_{pump} + C_{heat} + C_{Hinst} + C_{hx} + C_{pipe} + C_{line} \quad (2)$$

Le calcul des termes composant la fonction objectif est volontairement simplifié toujours en accord l'approche macroscopique qui est suffisante pour une étude de pré faisabilité. Le terme  $C_{pump}$  (3) représente les coûts de pompages liés aux pertes de charges et est forfaitairement égal à 1% du coût global (Mertz 2016).

$$C_{pump} = 0,01 \times C_{heat} \quad (3)$$

$C_{heat}$  (4) est le coût de la chaleur à produire selon la nature de la source d'énergie à la production et le coût unitaire associé ( $C_{heat\_unit}$ ) en prenant un compte les pertes thermiques et un taux de foisonnement fixé par l'utilisateur.

$$C_{heat} = f_{opex} \times \text{periode} \times \tau_{foisonnement} \times (1 + \tau_{pertesth}) \times C_{heat\_unit} \times H_{installée} \quad (4)$$

Le terme  $C_{Hinst}$  (5) représente le coût de l'unité de production également fonction d'un coût unitaire associé  $C_{Hprod\_unit}$ .

$$C_{Hinst} = f_{capex} \times \sum C_{Hprod\_unit} \times H_{inst} \quad (5)$$

Le coût des échangeurs  $C_{hx}$  (6) est décrit par une fonction affine de la puissance à installer de même que le coût des tuyaux pré-isolés  $C_{pipe}$  (7) selon leur diamètre.

$$C_{hx} = f_{capex} \times \Sigma 5,3 \times H_{hx} + 5045 \quad (6)$$

$$C_{pipe} = f_{capex} \times \Sigma (0,3722 \times D_{interieur} + 12,48) \times L \quad (7)$$

Le coût de tranchée  $C_{line}$  (8) est la multiplication de la longueur du réseau par le coût de tranchée moyen entré par l'utilisateur.

$$C_{line} = f_{capex} \times \Sigma C_{line\_unit} \times \frac{L_{tot}}{2} \quad (8)$$

Les coûts opex et capex tiennent respectivement compte du taux d'actualisation et d'un taux d'inflation pour le premier ( $f_{opex}$ ) et du taux d'actualisation uniquement pour le second ( $f_{capex}$ ). Le réseau optimisé, la décomposition des coûts et les éléments de dimensionnement sont ensuite affichés dans l'interface QGIS.

### 3. ARCHITECTURE GENERALE ET PARCOURS UTILISATEUR

Le cœur de l'outil est basé sur des travaux antérieurs comme précisé à la section 2. L'originalité et aussi la principale difficulté de ces travaux est la mise en place d'une architecture logicielle permettant une solution totalement open-source de la saisie aux résultats en passant par l'optimisation.

Avant de pouvoir utiliser le plugin SigOpti, l'utilisateur doit au préalable installer une version de QGIS sur son ordinateur et installer le plugin depuis le menu « Installer/Gérer les extensions ». C'est à partir de cet outil que l'utilisateur va pouvoir installer le plugin SigOpti. L'architecture est présentée sous forme schématique sur la Figure 4. L'utilisateur réalise la saisie de toutes les informations nécessaires à la description du réseau de chaleur dans QGIS en se laissant guider par les menus du plugin SigOpti.

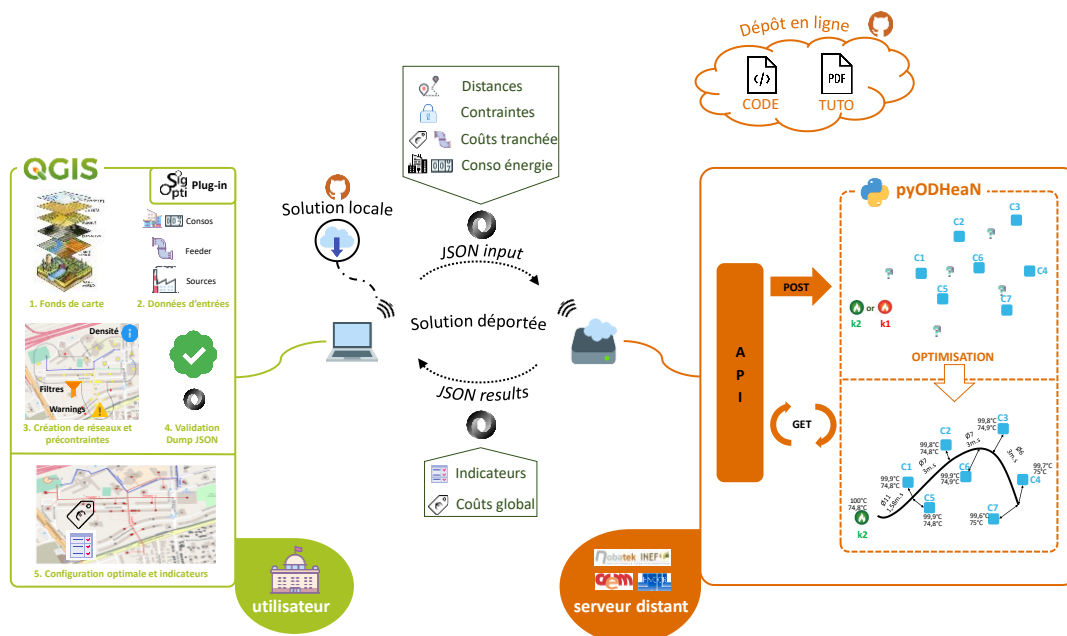


Figure 4: Architecture de l'outil SigOpti

1. Import de fonds de cartes (OpenStreetMap) permettant à l'utilisateur de contextualiser le territoire
2. Import de données d'entrée de trois types différents :

- Les consommations : il s'agit de points de consommation (sous-stations) géoréférencés, au format Shapefile, dont les attributs à renseigner sont le besoin annuel de chaleur du consommateur (en MWh), la puissance de l'échangeur en sous station (puissance maximale théorique appelée en kW) et les températures requises en entrée/sortie du secondaire ( $T_{in}/T_{out}$  en °C).
  - Le feeder : Il s'agit d'une géométrie Shapefile de type polyligne, tracée par l'utilisateur ou importée à partir d'un tracé existant. Cette géométrie constitue le réseau structurant à partir duquel les consommations vont être raccordées par la suite.
  - La source : il s'agit d'un point géoréférencé, au format Shapefile. Cette source permettra d'orienter le réseau à générer pour la distribution d'énergie
3. Raccordement automatique des points de consommations au feeder selon des filtres définis par l'utilisateur. Le réseau généré va créer le réseau au complet (Figure 6) en liant la source et les points de consommation au feeder, selon deux filtres saisis par l'utilisateur :
- La distance maximale au feeder
  - La consommation minimale des consommateurs que l'utilisateur souhaite raccorder
4. Le résultat est ensuite sauvegardé dans un format JSON qui sera par la suite utilisé pour l'interfaçage avec le module d'optimisation et servant d'initialisation de celui-ci. Au moment de lancer l'optimisation, un certain nombre de paramètres doivent être saisis dans une fenêtre dédiée (Figure 5). Il s'agit d'un même jeu de données concernant la production principale et la production d'appoint dont les valeurs par défaut (recouvrables) sont pré-remplis dans l'outil en fonction de la source de production (biomasse, PAC, fioul, gaz, IUOM). Une section « autres paramètres » permet également de modifier les bornes du problème (vitesses et diamètres maximums admissibles), le calcul en coût global (durée d'amortissement, taux d'actualisation, coût de tranchée moyen, ratio de coût de pompage) et le fonctionnement du RCU (durée de fonctionnement annuelle, foisonnement moyen, estimation des pertes thermiques).

**Configuration de réseau à optimiser**

Source production de chaleur principale : Chaudière à bois

Paramètres	Valeur	Unité
Température de départ maximale	80	°C
Température de retour minimale	40	°C
Coût unitaire de la chaudière	0.03	€/kw
Coût unitaire de l'énergie finale	800	€/kwh
Rendement de la chaudière	0.8	%
Taux d'inflation de l'énergie utilisée	0.015	%

Source production de chaleur d'appoint : Chaudière à fioul

Paramètres	Valeur	Unité
Température de départ maximale	80	°C
Température de retour minimale	40	°C
Coût unitaire de la chaudière	0.1	€/kw
Coût unitaire de l'énergie finale	1000	€/kwh
Rendement de la chaudière	0.9	%
Taux d'inflation de l'énergie utilisée	0.06	%

Figure 5: Fenêtre de saisie des paramètres

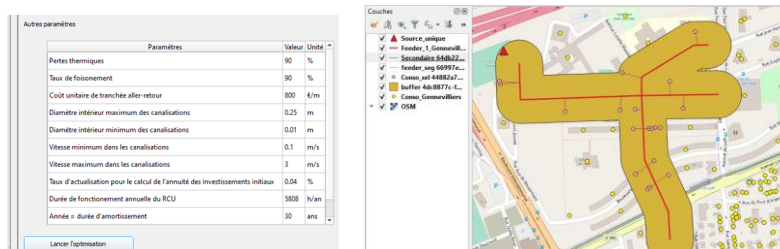


Figure 6: Configuration de réseau

L'optimisation est réalisée à distance via un webservice (solution déportée). Le retour d'information après l'optimisation se fait également par retour d'un fichier JSON contenant les informations de dimensionnement du réseau (diamètres, vitesses, débits), de la production (températures, puissance



installée) et de détail des coûts Capex et Opex. L’affichage des résultats se fait par retour d’informations directement dans QGIS de façon à ce que l’utilisateur n’ait à interagir qu’avec un outil unique. Des comparaisons de plusieurs configurations peuvent être faites par simulations successives.

L’aspect Open Source est également garanti par le dépôt du code sur une plateforme GitHub SigOpti permettant aussi une utilisation hors ligne (solution locale).

#### 4. COMPARAISON SUR UN CAS TEST

Un réseau de chaleur soumis par une des collectivités partenaires a servi de cas d’étude pour la confrontation des résultats de l’outil avec un étude existante présentant des résultats en termes de coûts et de dimensionnement. Le réseau principal (Feeder) est symbolisé par un trait épais alors que les ramifications secondaires sont représentées par des traits en pointillé. Un consommateur fictif de puissance requise nulle est créé à chaque ramification du feeder. Le cas d’étude comprend 23 sous-stations, 3 productions (P1 création, P2 existant, P3 existant), 2 technologies (gaz pour P2 et P3, biomasse pour P1) et 8 bifurcations (notées F sur le plan). La géométrie du réseau (anonymisé) est présentée Figure 7.

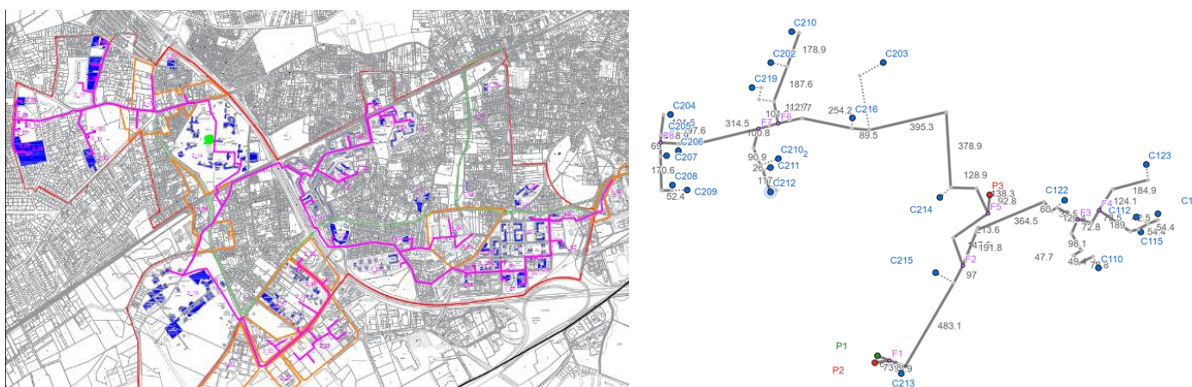


Figure 7: RCU en projet

La puissance à installer au niveau de la centrale biomasse à créer est du même ordre de grandeur que celle estimée dans le document de présentation du projet qui mentionne deux chaudières de 5000 kW et 2500 kW alors que le calcul dimensionne la puissance de production biomasse à 6 244 KW. De même le document mentionne un investissement estimé à 12,6 M€ et l’étude donne un Capex de 11,95 M€. Les diamètres de conduites semblent légèrement surestimés (10% en moyenne) par l’outil avec logiquement des vitesses de distribution plus faibles pour satisfaire la contrainte de débit et la puissance requise en sous-station. La comparaison a été menée sur deux autres réseaux de taille plus modeste avec les mêmes conclusions. Néanmoins les écarts semblent tout à fait satisfaisants (maximum  $\pm 20\%$  en coût global) au regard du niveau de précision requis pour répondre aux questionnements qui surviennent lors d’études d’opportunité dont le but premier est de conclure quant à l’intérêt de la réalisation d’un réseau de chaleur.

#### 5. CONCLUSION

L’outil SigOpti est mis à disposition de façon open source (<https://github.com/SigOpti/>) sous forme d’un plugin téléchargeable gratuitement dans l’environnement QGIS, seul élément d’interaction avec l’utilisateur puisque l’optimisation se fait via un serveur distant. L’optimisation est réalisée avec une

approche en coût global sur une durée de fonctionnement définie par l'utilisateur. L'outil retourne la solution la moins onéreuse en termes de dimensionnement (coûts de pompage, sections de conduite) et de choix des technologies de productions (biomasse, géothermie, UIOM, gaz, etc.) auxquelles une palette de coûts intrinsèques sont associés. En revanche c'est à l'utilisateur de définir la configuration et le tracé du réseau. La formulation des modèles d'optimisation, basé sur le solveur IPOPT, est réalisée avec la librairie PYOMO. Ces développements posent les bases d'un outil d'aide à la décision qui peut être amené à évoluer dans le sens d'une plus grande flexibilité dans les variables à optimiser et les résultats à afficher. Un travail est également à mener pour améliorer la robustesse de l'optimiseur au travers de nouveaux cas tests.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Frisch K.R. 1955. « The logarithmic potential method of convex programming », *Technical Report*, University Institute of Economics, Oslo, Norway
- Gabrielaitiene I, Bøhm B, Sunden B. 2007. « Modelling temperature dynamics of a district heating system in Naestved, Denmark - A case study ». *Energy conversion and management*. 48(1), 78-86.
- Giraud, Loic. 2016. « Modélisation dynamique et gestion avancée de réseaux de chaleur ». Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes.
- Khachiyan L.G. 1979. « A polynomial algorithm in linear programming ». *Soviet Mathematics Doklady*.
- Kuriyan K et Shah N. 2019. « A combined spatial and technological model for the planning of district energy systems ». *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 21, pp.111-131.
- Litchy A.J, Young C, Pourmousavi S.A, Nehrir M.H. 2012. « Technology selection and unit sizing for a combined heat and power microgrid: Comparison of WebOpt and HOMER application programs ». In *2012 North American Power Symposium (NAPS)*. (pp. 1-6). IEEE.
- Mertz Theophile, Serra Sylvain, Henon Aurélien, Reneaume Jean-Michel. 2015. « A MINLP optimization of the configuration and the design of a district heating network: academic study case ». *Academic Study Cases. Energy*, 2016, 117, pp.450-464.
- Mertz, Théophile. 2016. « Optimisation simultanée de la configuration et du dimensionnement des réseaux de chaleur urbains ». Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Rathi A.K et Santiago A.J. 1990. « The new NETSIM simulation program ». *Traffic engineering & control*. 31(5).
- Rossman L. A. 1999. « The EPANET programmer's toolkit for analysis of water distribution systems ». In *WRPMD'99: Preparing for the 21st Century* (pp. 1-10).
- Thevenard D, Leng G, Martel S. 2000. « The RETScreen model for assessing potential PV projects ». In *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000* (Cat. No. 00CH37036) (pp. 1626-1629). IEEE.
- Wiese F, Bramstoft R, Koduvere H, Alonso A.P, Balyk O, Kirkerud J.G, Ravn H. 2018. « Balmorel open source energy system model ». *Energy strategy reviews*. 20, 26-34.
- Zhang X, Strbac G, Shah N, Teng F and Pudjianto D. 2019. « Whole-System Assessment of the Benefits of Integrated Electricity and Heat System ». *IEEE Transactions on Smart Grid*. vol. 10, no. 1, pp. 1132-1145.
- Zoughaib A, Feidt M, Pelloux-Prayer S, Thibault, F. 2014. « Chemins énergétiques pour la récupération d'énergies (CERES) ». *Congrès Français de Thermique*.