Choix parcimonieux de modélisation pour la simulation des réseaux de chaleur

Enora Garreau, Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Vincent Partenay, Dominique Marchio

▶ **To cite this version:**

Enora Garreau, Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Vincent Partenay, Dominique Marchio. Choix parcimonieux de modélisation pour la simulation des réseaux de chaleur. IBPSA France 2020, Nov 2020, Reims (en ligne), France. hal-03202687

HAL Id: hal-03202687
https://hal.science/hal-03202687

Submitted on 20 Apr 2021

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.

Choix parcimonieux de modélisation pour la simulation des réseaux de chaleur

Enora Garreau*[1,2], Thomas Berthou[2], Bruno Duplessis[2], Vincent Partenay[1], Dominique Marchio[2]

[1] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Sophia Antipolis, France
[2] Mines ParisTech, Université PSL, Centre Efficacité énergétique des Systèmes, Paris, France
**enora.garreau@cstb.fr*

RESUME. De nouveaux modèles sont développés pour répondre aux problématiques que soulève la modélisation énergétique à l'échelle du quartier par rapport à celle d'un unique bâtiment. La complexité de ces modèles influence la précision du résultat mais aussi le temps de calcul. Une méthodologie d'analyse de la parcimonie de ces modèles est proposée pour en connaître l'influence et la nécessité au vu de la problématique étudiée. Cette méthodologie est ici appliquée au cas des réseaux de chaleur, un des systèmes clés à l'échelle quartier. Pour cela le réseau est divisé en plusieurs sous-modèles pour lesquels différents niveaux de détail sont proposés. Les effets individuels et les inter-effets des sous-modèles sur différentes sorties de simulation sont étudiés, montrant des écarts variables suivant les types et caractéristiques de quartiers. Des choix parcimonieux de combinaisons de modèles par type de quartiers peuvent alors être déterminés suivant le nombre de paramètres utilisés, le temps de simulation ou la complexité des modèles.

MOTS-CLÉS : quartier, parcimonie, réseau de chaleur.

ABSTRACT. In district energy simulation, new models are developed to address the issues arising in the urban-scale. These models can be at different levels of detail, which can influence the simulation time but also the multiple outputs in different ways. A new methodology that can tackle the issues of parsimonious modelling is then useful to know the influence and the necessity of such model complexity. This methodology is here applied to district heating networks. The global network model is divided in several sub-models for which several level of details are used. The individual and inter-effects of these sub-models are studied on several outputs, showing variable deviations following different district characteristics. It is then possible to choose parsimonious combinations of models complexity, taking into account the number of necessary parameters, simulation time and model complexity.

KEYWORDS : district, parsimony, heating network

1. INTRODUCTION

Ces dernières années ont vu l'émergence d'un fort intérêt pour la simulation énergétique à l'échelle du quartier et de la ville. Cette simulation à grande échelle est un des outils permettant de répondre aux nouvelles problématiques environnementales et urbaines grâce à l'évaluation des performances et des impacts de mesures concrètes. Cependant modéliser un quartier ou une ville multiplie les incertitudes, augmente la complexité de récupération des données d'entrée et demande des puissances de calcul importantes dès que les modèles utilisés deviennent très détaillés. L'objectif du modélisateur est donc de trouver un équilibre entre la disponibilité et la qualité des données d'entrée, le niveau de détail des modèles utilisés et le temps de calcul, le tout au regard des sorties de simulation recherchées : c'est ce que l'on peut appeler une *modélisation parcimonieuse*. En effet, on peut avoir recours aux modèles les plus détaillés sans vérifier la cohérence d'ensemble et l'impact effectif de ce choix sur la précision des résultats. Plusieurs études ont comparé différents modèles mais souvent appliqués à des quartiers aux

données d'entrée bien connues, ce qui limite le spectre des conclusions. On peut citer (Han, Taylor, et Pisello 2017) qui ont étudié les effets inter-bâtiments pour différentes villes, tirant des conclusions sur les effets du climat mais pas sur la morphologie du quartier. (Frayssinet et al. 2017) ont comparé différents modèles d'enveloppe thermique mais à l'échelle d'un unique bâtiment.

Ainsi notre objectif est de fournir des critères de comparaison pour qualifier une modélisation parcimonieuse en prenant en compte la diversité des sorties étudiées mais aussi les types d'étude (conception ou rénovation de bâtiment, étude de sensibilité…). Le développement d'une telle méthodologie d'analyse ne vise pas à identifier le « meilleur » niveau de modélisation à l'échelle urbaine mais à choisir le plus adapté au regard du contexte et pour un niveau de précision recherché. Une première méthode a été proposée (Garreau et al. 2019) et appliquée au cas des modèles de masque atténuant le rayonnement solaire grâce à la plateforme de simulation DIMOSIM développée par le CSTB (Riederer et al. 2015). Une extension de la méthode est appliquée ici au cas des réseaux de chaleur non maillés. Cette extension tient au fait que les modèles de réseaux sont composés de nombreux sous-modèles aux impacts imbriqués. Dans une première partie, nous présentons la méthode, dans la seconde nous détaillons les modèles de réseaux comparés, et enfin nous présentons quelques résultats en introduisant un indice de parcimonie en complément de l'information sur le temps de calcul.

2. METHODE

Afin de comparer les modèles de manière intrinsèque (ou unitaire) sans avoir l'influence des autres, les différents composants ou éléments nécessaires à la modélisation sont répartis au sein de familles « thématiques ». Pour chaque famille on compare les différents modèles à une « référence », qui est le modèle le plus détaillé disponible. Pour une famille donnée, plusieurs étapes sont suivies :

1) Sélection des modèles parmi la littérature et choix d'une référence.

2) Définition d'indicateurs de comparaison des modèles (lié à l'énergie, le confort…).

3) Sélection de quartiers dont les caractéristiques sont adaptées au contexte de la famille étudiée. Ces quartiers sont créés de manière virtuelle, mais basés sur des morphologies existantes.

4) Définition de critères de sélection de modèles basés sur les caractéristiques intrinsèques du quartier, permettant de conclure sur le type de modèle à utiliser avant toute simulation du quartier.

5) Simulations et analyse des sous-modèles à différentes échelles temporelles et spatiales sur un jeu de quartiers réduit afin de ne sélectionner que ceux ayant des effets ou interactions sur les sorties étudiées et ainsi réduire le nombre de simulations à réaliser pour l'étape suivante. Cette inter-comparaison des sous-modèles est réalisée à partir de la méthode des plans factoriels fractionnaires, expliquée notamment par (Saltelli et al. 2007). Cette méthode permet de voir l'influence relative du changement de niveau de détail de chacun des sous-modèles sur la sortie étudiée ainsi que l'interaction entre sous-modèles. Ici uniquement 2 niveaux de complexité des sous-modèles sont choisis.

6) Simulation et analyse à différentes échelles temporelles et spatiales sur un ensemble de quartiers et cas d'étude diversifiés. Cette analyse se fait sur des sorties de simulation et non vis-à-vis de cas d'usage afin de pouvoir tirer des conclusions plus générales.

La parcimonie en matière de modélisation peut être appréhendée au regard de nombreux facteurs : du nombre de paramètres à la complexité de leur détermination, du temps de développement des modèles

au temps nécessaire à leur paramétrage, de la précision des modèles au nombre d'hypothèses simplificatrices et enfin de l'échelle de simulation considérée à la précision recherchée. Ainsi, on propose d'évaluer numériquement un critère de parcimonie qui englobe ces différents caractéristiques listées dans le Tableau 1. On propose ainsi ici un critère de parcimonie P(M) pour un modèle donné M prenant en compte les caractéristiques précédentes par l'équation 1 suivante :

$$P_{ref} = b * \sum_{i=0}^{Nb\ paramètres} w_i$$

$$P(M) = \left(a * CA + b * \sum_{i=0}^{Nb\ paramètres de\ M} w_i + c * H(M)\right) / P_{ref} \quad (1)$$

Avec CA le critère d'ajustement, w_i les poids associés aux paramètres du modèle, H(M) le nombre d'hypothèses simplificatrices et a, b, c des facteurs de pondération choisis par l'utilisateur. Les poids associés aux paramètres traduisent la complexité et les incertitudes liées à la récupération de données et sont déterminés grâce à une grille (non présentée ici, mais basée en partie sur le classement du (CEREMA 2018)) permettant d'en limiter la subjectivité. Le nombre d'hypothèses simplificatrices est évalué par rapport à la référence. La normalisation du critère permet de situer l'indice de parcimonie du modèle relativement à l'indice de parcimonie de la référence. L'analyse sera complétée par le temps de calcul, pris uniquement comme information complémentaire de par sa forte dépendance aux ressources informatiques disponibles. Enfin le critère d'ajustement représente la précision recherchée lors la simulation. Certaines caractéristiques du Tableau 1 ne sont pas prises en compte car elles sont déjà comptabilisées en partie dans certaines caractéristiques : le temps de paramétrage est pris en compte dans les poids associés aux paramètres (lié fortement au temps de récupération des données) et l'échelle de simulation est comprise dans le critère d'ajustement choisi. Le temps de développement du modèle est mis de côté car difficilement quantifiable.

Facteurs de parcimonie	Paramètres	Description
Paramètres de modélisation	Nombre de paramètres	Fonction des différents modèles
	Complexité de récupération des données	Fonction des bases de données disponibles
	Incertitude	Fonction des enrichisseurs[1]
Temps	Temps de développement	Fonction de la complexité d'implémentation
	Temps de paramétrage	Fonction du nombre de paramètres et de la récupération des données
	Temps de calcul	Fonction du type de simulation
Modèle	Précision	Critère d'ajustement (NRMSE[2], MAPE,…) à choisir
	Hypothèses de simplification	Nombre de phénomènes négligés / d'hypothèses simplificatrices pour représenter le système étudié
Simulation	Echelle de simulation	Spatiale et temporelle
	Sortie étudiée	Détermine l'ordre de précision à obtenir
	Type de simulation	Détermine l'ordre du temps de calcul limite suivant le type de simulation (étude de sensibilité, étude particulière…)

Tableau 1 : Caractéristiques entrant dans le critère de parcimonie

3. RESEAU DE CHALEUR : CHOIX DE MODELISATION

De nombreux outils de simulation permettent de modéliser les réseaux de chaleur, soit au sein d'une modélisation globale du quartier ou indépendamment de celui-ci. Dans cette étude DIMOSIM permet de modéliser le réseau et son couplage avec chacun des bâtiments du quartier à chaque pas de temps

[1] Méthode/Outils permettant de combler les données manquantes
[2] NRMSE : Normalized Root Mean Squared Error, MAPE: Mean Absolute Percentage Error

avec une approche dite physique. La méthode de résolution des températures et débits est notamment explicitée dans (Riederer et al. 2015) et est ici légèrement modifiée en remplaçant l'équilibrage de pression par celui de la conservation de l'énergie. Un réseau de chaleur peut être divisé en plusieurs composants qui ont chacun des modèles propres. Le choix des sous-modèles est le suivant :

1) La production : ces modèles ne sont pas comparés ici. Une pompe à chaleur (PAC) est utilisée.

2) La distribution hydraulique et la régulation du réseau : on retient uniquement un modèle de distribution détaillé, l'agrégation de sous-stations (Pálsson et al. 1999; Larsen, Bøhm, et Wigbels 2004) n'est pas envisagée. Au niveau de la régulation, on opte pour une régulation centrale à température variable et débit fixe. Une loi d'eau est fixée au générateur, basée sur des règles expertes.

3) Modèles de tuyaux (TM) : plusieurs modélisations existent, notamment celle des éléments finis et celle des nœuds. Sous DIMOSIM, 3 modèles de tubes sont développés : un modèle dit statique avec propagation immédiate de la température d'un bout à l'autre du réseau, un modèle dynamique basé sur la méthode des nœuds et un modèle plug-flow basé sur une approche lagrangienne. Ce dernier étant très proche du modèle dynamique lorsque le nombre de nœuds est important et étant plus rapide (van der Heijde et al. 2017), il sera pris pour référence et le modèle dynamique écarté des comparaisons.

4) Modèles de sol (GT) : souvent il est retenu une température de sol constante ; ce sera le modèle simplifié. Le modèle détaillé suit quant à lui l'équation de (Kasuda et Archenbach 1965), faisant varier la température de sol suivant la période de l'année.

5) Modèles de sous-station (HxM) : ces points de livraison permettent de transférer la chaleur du réseau principal à un réseau secondaire connecté aux consommations des bâtiments. Ils sont constitués d'au moins un échangeur de chaleur modélisé avec plus ou moins de détail, notamment par (Giraud et al. 2015) sous Modelica. Lors d'une étude de conception, aucune donnée expérimentale n'est connue, on prendra donc des modèles d'échangeurs théoriques. Le modèle simple fixe un pincement nul afin de simuler un échangeur idéal. Le modèle détaillé utilise la méthode NUT et détermine les températures de sortie des réseaux primaires et secondaires à partir des débits et températures d'entrée.

6) Modèles de demande (CM) : on considèrera deux modèles. Le plus simple suppose les demandes (puissance et températures au secondaire) des consommateurs connues. Le modèle de réseau est alors découplé du modèle de bâtiment et on impose la température d'entrée des émetteurs du bâtiment comme étant la température nominale. Le modèle détaillé calcule à chaque pas de temps les températures du générateur jusqu'à l'émetteur et inversement.

7) Modèles d'émetteurs du réseau secondaire (ERM) : Le modèle détaillé reposera sur un modèle d'émetteur à efficacité variable, à contrario d'un modèle d'émetteur à efficacité constante.

On obtient ainsi les modèles suivants et étudions les différentes combinaisons possibles avec comme référence la combinaison de tous les modèles détaillés (Tableau 2). Le plan d'expériences fractionnaire de résolution V comporte 16 combinaisons de modèles grâce aux matrices de Hadamard, au lieu de 32 pour un plan factoriel complet (voir (Saltelli et al. 2007) pour la création du plan fractionnaire).

Modèle	GT	TM	HxM	CM	ERM
Simplifié	Température constante	Statique	Idéal	Fixe	Fixe
Détaillé	Température variable	Plug-flow	NUT	Couplage	Variable

Tableau 2: Ensemble des sous-modèles considérés

4. RESULTATS

Deux indicateurs sont étudiés : la température de retour au générateur qui conditionne notamment le recours possible à des ENR basse température, ainsi que la puissance fournie par le générateur, indicateur énergétique essentiel pour connaître la performance du réseau. Un ensemble de quartiers est d'abord créé avec un échantillonnage par latin hypercube en faisant varier le nombre de bâtiments, la densité bâtie du quartier, l'âge des bâtiments, la température de fourniture, le jeu de température des émetteurs (basse ou haute température) et leur répartition et le type d'usage des bâtiments (résidentiel ou bureau). Les simulations sont réalisées sur une année par pas de temps de 10 min pour un réseau délivrant uniquement du chauffage, avec la météo de Nice.

4.1. APPLICATION SUR UN QUARTIER DE 16 BATIMENTS

Afin de visualiser les effets principaux et interactions entre modèles, un quartier de 16 bâtiments datant des années 1990 est présenté ici. Sur la Figure 1, on présente l'influence du passage d'un modèle détaillé à un modèle simplifié sur la température de retour moyenne T_r (à gauche) et en janvier à chaque pas de temps (droite). Le quartier étant de faible étendue, les modèles de tuyaux TM ont peu d'influence sur T_r. A l'inverse les modèles d'émetteurs (ERM) et de sol (GT) ont des impacts importants. Si les modèles de demande CM ont un faible impact annuel, on visualise rapidement qu'à une échelle instantanée (application de la méthode de calcul des effets à chaque pas de temps) ceux-ci sont influents. Ces mêmes figures sont réalisées pour les effets d'interactions entre modèles (ex : L'utilisation des modèles GT et TM simplifiés en même temps).

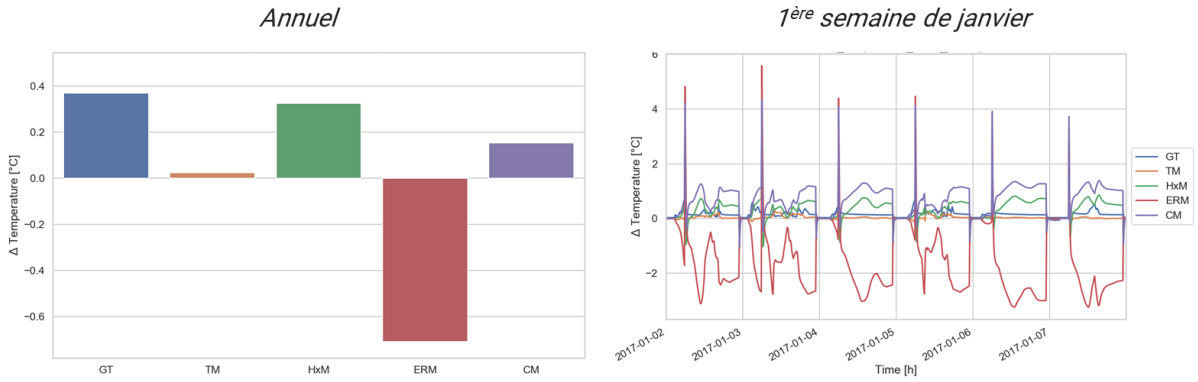

Figure 1: Impact des niveaux de détail des modèles sur la température de retour moyenne et sur la première semaine de janvier pour un quartier de 16 bâtiments des années 1990

Dans le cadre de l'analyse de la parcimonie de modélisation des réseaux de chaleur, plusieurs simulations ont été réalisées en modifiant les caractéristiques du quartier, en le dilatant ou en le dupliquant pour visualiser les effets sous différentes contraintes : l'objectif est de réduire le nombre de combinaisons de modèles à étudier par la suite en écartant les interactions de modèles non significatives. Les combinaisons mises de côté dépendent du type de sortie étudiée, ici on gardera celles impactant la température de retour (au moins 1°C d'écart en instantané et 0.1 °C en moyenné) et la puissance délivrée au quartier (au moins 5 % d'écart relatif) sur au moins un quartier. On ne mettra de côté que les interactions entre modèles telles que l'interaction entre le modèle de sol (GT) et le modèle d'échangeur (HxM), mais on gardera les interactions principales des modèles seuls. Ainsi 7 interactions sont mises de côté, permettant de réduire le nombre de simulations de 30%. Si le nombre d'interactions à écarter est trop faible, on préfèrera garder le plan factoriel fractionnaire comme plan de simulation.

4.2. APPLICATION A UN ENSEMBLE DE QUARTIERS

Une fois les combinaisons significatives de modèles choisies, les simulations sont réalisées sur l'ensemble des quartiers. Il n'est alors plus possible de visualiser sur un graphique lisible les variations instantanées au vu du nombre important de quartiers, le RMSE normalisé est donc utilisé.

4.2.1. Impact sur la température de retour

Sur la Figure 2 l'impact des changements de modèles (passage d'un modèle détaillé à un modèle simplifié) sur la température de retour moyenne annuelle est présenté pour l'ensemble des modèles et de leurs interactions. Si pour certains modèles cet impact est mineur pour l'ensemble des quartiers (ERM), il est important pour d'autres, notamment la combinaison des modèles simplifiés GT-CM, dont l'utilisation est alors à proscrire. D'autres interactions permettent de réduire l'écart à la référence. Par exemple, l'utilisation combinée des modèles simplifiés HxM et ERM permet de réduire l'impact du modèle HxM simplifié seul. Cette analyse permet de rapidement visualiser et mettre de côté les modèles trop imprécis pour le calcul de l'indicateur de parcimonie, et ainsi de simplifier son analyse.

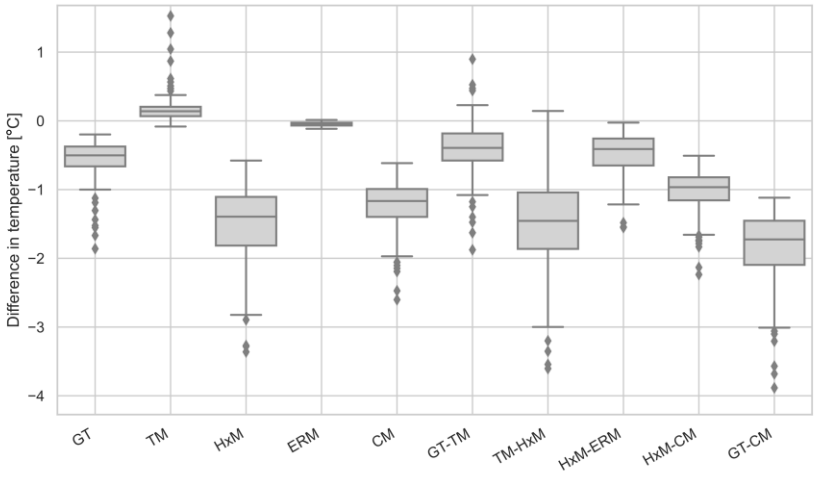

Figure 2: Impact des niveaux de détail des modèles sur la température de retour moyenne

4.2.2. Choix de modèles et parcimonie

Les écarts sur la température de retour vont impliquer des écarts dans la détermination de la production d'énergie et donc sur la dynamique de la puissance fournie. Afin de mesurer un écart relatif à la référence, on utilise le RMSE normalisé (NRMSE) de la puissance fournie par le générateur (P_{nom}) comme critère d'ajustement. On retient ici un poids de 3 pour le CA et de 1 pour les paramètres et hypothèses simplificatrices (Equation 1).

Sur la Figure 3 (droite), le critère de parcimonie lié aux modèles GT, CM et leur combinaison est calculé pour tous les quartiers simulés. Afin de pouvoir déterminer des modèles parcimonieux et respectant la limite d'écart (ici deux limites 5 et 10 % sont choisies), des lignes en pointillé représentant cette (ou ces) limite sont tracées pour chacun des modèles. Ainsi, les résultats doivent se situer en-dessous de ces lignes et de la limite de 1 pour être parcimonieux. S'ils sont situés entre les deux, le modèle reste utilisable (car sa précision est acceptable) mais non parcimonieux. Par exemple, le modèle CM a l'ensemble de ses critères en-dessous de 5 % d'écart à partir d'un P_{nom} 1200 kW. En deçà de cette valeur, quelques quartiers ont des écarts supérieurs, il est alors préférable d'utiliser un modèle détaillé. Si l'écart acceptable est de 10 %, le modèle simplifié peut être utilisé en toute circonstance, car suffisamment précis. Néanmoins, ce modèle n'atteint des valeurs très proches de la parcimonie qu'à des

valeurs de P_{nom} élevées, vers 17.5 MW. Le temps de calcul étant très réduit (Figure 3 gauche), son utilisation pourra cependant être favorisée. La prise en compte du temps de calcul est donc un paramètre clé lors de l'arbitrage, mais peut dépendre fortement des machines de calcul sur lesquelles les simulations sont réalisées. A l'inverse, quel que soit la valeur de P_{nom}, l'utilisation d'un modèle simplifié GT ainsi que son couplage avec CM simplifié, est à proscrire, les écarts étant trop importants. Ainsi, si un modèle GT détaillé est utilisé, il est parcimonieux d'utiliser un modèle CM lui aussi détaillé pour des quartiers de puissances inférieures à 17.5 MW. Si un modèle GT simple est utilisé, quel que soit le quartier l'utilisation d'un modèle CM simple n'améliorera pas la simulation.

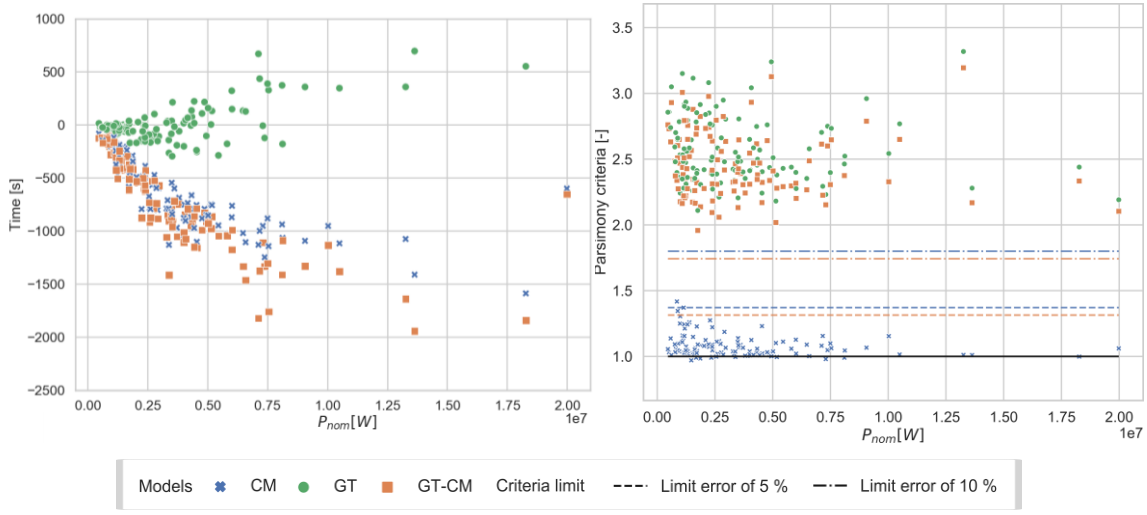

Figure 3: Différence en temps de simulation (gauche) et critère de parcimonie (droite) sur le NRMSE de la puissance fournie par le générateur, pour les modèles CM, GT et GT-CM

Cette analyse est réalisée pour l'ensemble des modèles et de leurs combinaisons, sur différentes sorties, telles que la production annuelle du générateur ou le taux ENR. Ainsi, lors d'une étude d'un réseau dont le tracé est fixé, le modélisateur calcule avant toute simulation le P_{nom} du quartier, le visualise sur le (ou les) graphique de la sortie de simulation voulue et détermine quels modèles utiliser suivant la précision (en fonction de l'étape de son projet) à atteindre. Des réseaux complémentaires devront être simulés afin de pouvoir prendre en compte des cas d'application plus variés, notamment suivant la performance de l'isolation thermique du réseau.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Après la proposition d'une première méthodologie de parcimonie appliquée aux masques solaires, une extension de celle-ci a été nécessaire lors de l'étude des réseaux de chaleur, de par la structure même de leur modélisation. En effet, ces derniers sont représentés en chaînant différents sous-modèles qui interagissent entre eux. L'utilisation de plans factoriels permet de prendre en compte ces effets d'interactions et de les visualiser de manière simple sur différentes échelles de simulation, temporelles ou spatiales. Leur application sur un panel de réseaux de chaleur aux paramètres variables a permis de montrer des différences non négligeables pour certains modèles et interactions suivant la sortie analysée. Des analyses complémentaires sont à réaliser, notamment une analyse de sensibilité et d'incertitude des modèles sur les sorties, pour voir l'influence de la non connaissance de certains paramètres sur la sortie. Cette étape vient compléter la méthode présentée en 2.

Une première définition d'un indice de parcimonie est présentée ici. Cet indice permet d'interpréter

les résultats précédents sous une forme de graphique généralisable prenant en compte non seulement l'erreur sur la sortie liée aux modèles, mais aussi d'autres caractéristiques de simulation à l'échelle quartier, notamment les incertitudes de paramètres. Cet indice de parcimonie est par construction subjectif, notamment au vu des poids accordés au critère d'ajustement, au paramétrage et aux hypothèses simplificatrices. Si ces critères doivent rester paramétrables pour laisser à l'utilisateur le choix dans cette analyse multicritère, il sera nécessaire d'étudier plus en détail la sensibilité de l'indice à ces poids.

Appliqué au cas des réseaux de chaleur, cet indice de parcimonie permet de choisir une combinaison de modèle avec leur complexité. Couplé aux critères de sélection (étape 4 de la méthode), il permet de plus de visualiser à partir de quelle caractéristique de quartier le basculement entre les niveaux de modélisation est à réaliser. Une fois la méthode appliquée à différentes familles thématiques du quartier, l'objectif est de les combiner afin de voir l'influence relative des différentes familles ainsi que leurs interactions. Cela permettra d'évaluer où concentrer les efforts de modélisation à réaliser suivant les typologies de quartier.

6. BIBLIOGRAPHIE

CEREMA. 2018. « Table des Fichiers Fonciers ». 2018. http://piece-jointe-carto.developpement-durable.gouv.fr/NAT004/DTerNP/html3/_ff_descriptif_tables_liste.html.

Frayssinet, L., F. Kuznik, J-L. Hubert, M. Milliez, et J-J. Roux. 2017. « Adaptation of building envelope models for energy simulation at district scale ». *Energy Procedia*, CISBAT 2017, 122 (septembre): 307‑12. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.327.

Garreau, E., T. Berthou, B. Duplessis, V. Partenay, et D. Marchio. 2019. « Urban-scale Energy Simulation: A Development Of A Novel Method For Parsimonious Modelling - The Example Of Solar Shading Model Calculation ». In *Proceedings of BS2019: 16th Conference of IBPSA*, 3258‑65. Rome, Italy. doi: 10.26868/25222708.2019.210344.

Giraud, L., R. Baviere, M. Vallée, et C. Paulus. 2015. « Presentation, Validation and Application of the DistrictHeating Modelica Library ». In *11th International Modelica Conference*, 79‑88. doi: 10.3384/ecp1511879.

Han, Y., J. E. Taylor, et A. L. Pisello. 2017. « Exploring mutual shading and mutual reflection inter-building effects on building energy performance ». *Applied Energy*, 185 (janvier): 1556‑64. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.170.

Heijde, B. van der, M. Fuchs, C. Ribas Tugores, G. Schweiger, K. Sartor, D. Basciotti, D. Müller, C. Nytsch-Geusen, M. Wetter, et L. Helsen. 2017. « Dynamic equation-based thermo-hydraulic pipe model for district heating and cooling systems ». *Energy Conversion and Management* 151 (novembre): 158‑69. doi: 10.1016/j.enconman.2017.08.072.

Kasuda, T., et P.R. Archenbach. 1965. *Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States*. Vol. 71. ASHRAE Transactions.

Larsen, H. V, B. Bøhm, et M. Wigbels. 2004. « A comparison of aggregated models for simulation and operational optimisation of district heating networks ». *Energy Conversion and Management* 45 (7): 1119‑39. doi: 10.1016/j.enconman.2003.08.006.

Pálsson, H., H. V. Larsen, B. Bohm, H. F. Ravn, et J. Zhou. 1999. « Equivalent Models of District Heating Systems ».

Riederer, P., V. Partenay, N. Perez, C. Nocito, R. Trigance, et T. Guiot. 2015. « Development Of A Simulation Platform For The Evaluation Of District Energy System Performances ». In *Proceedings of BS2015: 14th Conference of IBPSA*, 2499‑2506. Hyderabad, India.

Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, et S. Tarantola. 2007. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9780470725184.