

Modélisation thermique des bâtiments intégrant le BIM et la méthode des graphes.

Building thermal modelling integrating BIM and the Graph Method.

Mustapha OUHIMD^{123*}, Hassan BOUIA¹³, Christian OBRECHT¹², Frédéric KUZNIK¹² et Mathias BOUQUEREL¹³

¹BHEE Bâtiment Haute Efficacité Energétique, Laboratoire en commun entre EDF R&D TREE et le CETHIL

²CETHIL UMR5008, Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon
9 Rue de la Physique, 69621 Villeurbanne, France

³EDF R&D Site des Renardières, Département TREE
Avenue des Renardières, 77250 Ecuellen - Moret-sur-Loing cedex, France

*(auteur correspondant : mustapha.ouhimd@insa-lyon.fr)

Résumé – Une nouvelle méthodologie est utilisée pour générer et simuler de façon générique un modèle de comportement thermique du bâtiment. Il s'agit de créer un modèle de graphe en langage Python (module NetworkX) en se basant sur les données géométriques et physiques disponibles (maquette BIM, ...), ce graphe permet de générer le jeu de matrices du système linéaire invariant pour la simulation numérique. Cette méthodologie est appliquée à un cas simple du bâtiment monozone et validée par comparaison avec un modèle de référence généré avec une chaîne d'outils déjà validée.

Mots-clés : thermique du bâtiment ; maquette BIM ; graphe NetworkX ; simulation numérique.

Abstract – A new methodology is used to translate and simulate in a generic way the building thermal models. It consists in creating a graph model in Python language (NetworkX module) based on available geometric and physical data (BIM mock-up...), this graph can generate the invariant linear system for numerical simulation. This methodology is applied to a simple case of a single zone building, and validated by comparison with a reference model generated by an already validated tool chain.

Keywords: building thermal models; BIM mock-up; Networkx graph; numerical simulation.

Nomenclature

c chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
 e épaisseur, m
 h coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$
 t temps, s
 x coordonnée spatiale, m
 A matrice associée au vecteur T , s^{-1}
 A' matrice associée au vecteur T , $W.K^{-1}$
 B matrice associée au vecteur U , s^{-1}
 B' matrice associée au vecteur U , $W.K^{-1}$
BIM Building Information Model
BEM Building Energy Model
 C' matrice des capacitances, $J.K^{-1}$

S surface d'échange, m^2
 T vecteur des températures, K
 U vecteur des sollicitations, K

Symboles grecs

α diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
 λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
 ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices et exposants

p pression, Pa

1. Introduction

La modélisation en thermique du bâtiment intégrant les maquettes numériques BIM est une nouvelle voie de création de modèles traduisant la thermique des bâtiments. Elle permet de

transformer une maquette BIM et les informations utiles qu'elle peut fournir, en un modèle thermique BEM à l'aide de chaînes d'outils spécifiques. La chaîne d'outils MyBEM anciennement appelée Merrubi en référence au projet ANR MERRUBI (Schumann et al., 2017) [1] permet entre autres de générer à partir du BIM, et de façon générique, un modèle BEM en langage Modelica [2] en utilisant la bibliothèque *BuildSysPro* [3] validée expérimentalement [4] et numériquement [5]. Des résultats de simulation peuvent être générés à l'aide d'un compilateur de code modelica (Dymola [6]). Cette chaîne a été utilisée dans le cadre des travaux appliqués à la modélisation énergétique des bâtiments à partir du BIM à l'échelle du quartier (Bouquerel et al., 2019) [7].

Dans ce contexte, cet article permet de présenter une nouvelle méthodologie de modélisation thermique du bâtiment en intégrant, d'une part, le BIM, et d'autre part, le module gratuit de Python nommé NetworkX [8] contenant les méthodes appliquées de la théorie des graphes.

Cette méthodologie consiste en la transformation de maquette BIM sous format gbXML [9] à l'aide de l'outil Héliobim de la chaîne MyBEM, en un modèle thermique générique sous forme de graphe. Ce graphe est constitué de sommets représentant les points d'intérêt pour le calcul des températures (volume d'air, surface de paroi, interface entre les couches de matériaux...). Ces sommets sont interconnectés par des arcs caractérisant les flux thermiques entre eux (conduction, convection, renouvellement d'air, ponts thermiques, ...). Cela permet ensuite de construire le système linéaire invariant représentatif de l'état du bâtiment très facilement dans le cas d'échange radiatif linéarisé en grandes longueurs d'onde.

La faisabilité de cette méthodologie est vérifiée pour un cas d'usage simple par comparaison entre le modèle de graphe et le modèle de référence BuildSysPro. Cette comparaison est faite en deux temps, au niveau des matrices d'état et des résultats de simulation.

2. Outils et Méthodes

2.1. Modélisation thermique du bâtiment

2.1.1. Cas d'une paroi plane

L'échange thermique conductif est supposé monodimensionnel au sein de la paroi selon son épaisseur dans le sens des abscisses x . La paroi est caractérisée par des propriétés thermophysiques supposées invariantes : sa conductivité thermique λ , sa masse volumique ρ , sa capacité calorifique C_p (et donc sa diffusivité thermique $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$). Les coefficients d'échange convectif sont supposés constants et linéarisés.

A l'instant $t=0s$: les ambiances de part et d'autre de la paroi à la température uniforme ($T_{ext,1} = T_{ext,2} = T_0$) sont soumises à des conditions de Fourier ou de 3ème espèce à flux convectif imposé. A instant $t>0s$: l'ambiance côté $x=e$ est à la température $T_{ext2} = T_1 \neq T_0$. Leurs coefficients d'échange convectifs sont h_1 et h_2 .

Le système d'équations à résoudre pour ce type de problème :

$$\begin{cases} T(x, t = 0) = T_0 \\ -\lambda \frac{\partial T(x = 0, t)}{\partial x} = h_1 (T_{ext1} - T(x = 0, t)) \\ \lambda \frac{\partial T(x = e, t)}{\partial x} = h_2 (T_{ext2} - T(x = e, t)) \\ \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \end{cases} \quad (1)$$

Une couche de paroi d'épaisseur e est discrétisée spatialement en n mailles juxtaposables. Le traitement de la conduction thermique est simplifié à l'aide d'un modèle thermique constitué d'une capacité et deux résistances (R2C1) représentant chaque maille d'une épaisseur $\Delta x = e/n$.

2.1.2. Cas d'un local monozone

Le bilan sensible d'un local monozone est modélisé par des échanges thermiques qui se produisent à travers son enveloppe par conduction, convection, rayonnement (parois opaques et vitrages), ponts thermiques, renouvellement d'air, apports de chaleur dues aux charges internes (occupation, équipement, éclairage) et production de chauffage/climatisation.

Dans cet article, le bilan du local étudié (schématisé fig. 4 en bas) sera limité au transfert de chaleur linéarisé en grandes longueurs selon le modèle de paroi défini dans le paragraphe 2.1.1.

Une fois le problème défini (linéarisé et discrétisé), un graphe composé de sommets et d'arcs peut être créé, où les sommets correspondent aux nœuds capacitifs de mailles et de zones thermiques ambiantes, et les arcs caractérisent l'échange thermique entre deux nœuds adjacents (entre mailles courantes ou entre une maille superficielle et sa zone adjacente) comme le montre les figures 3 et 4. On peut attribuer les températures (K) aux sommets et les conductances thermiques (W/K) aux arcs.

Le nombre de sommets est égal à la somme de nœuds de mailles et de zones. La numérotation de graphe se fait de manière croissante, en commençant par les nœuds de zones puis les nœuds de mailles des parois par incrémentation de l'extérieur vers l'intérieur.

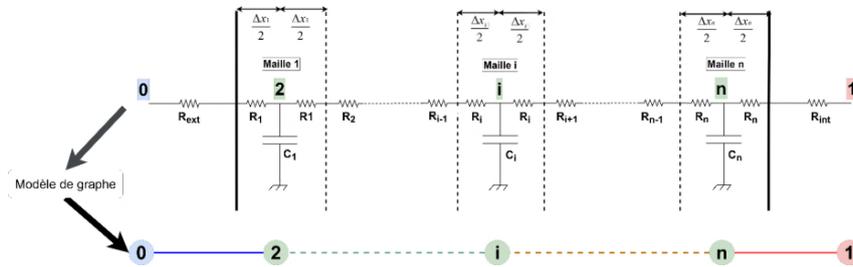


Figure 3 : Graphe représentatif de la discrétisation du système d'équation (1) d'une paroi

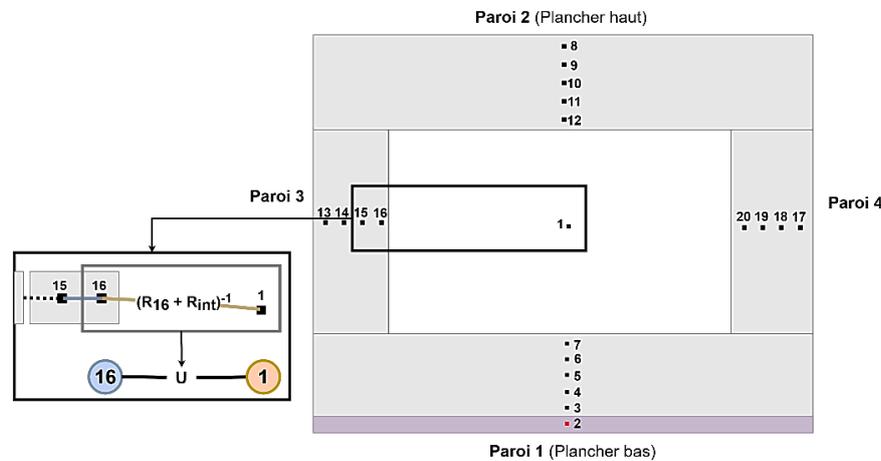


Figure 4 : Représentation d'un arc entre deux sommets dans le graphe (entre le nœud de la zone d'air intérieur et le nœud de la maille superficielle d'une paroi côté intérieur)

À partir d'un modèle de graphe, une représentation d'état du bâtiment sous forme d'un système linéaire invariant d'ordre n (nombre de nœuds capacitifs) peut être générée (voir équation 2).

$$\begin{cases} C' \frac{dT}{dt} = A'T + B'U \\ \frac{dT}{dt} = AT + BU \end{cases} \quad (2)$$

où T est le vecteur des températures, $A'=[a_{ij}]$ est une matrice d'état carrée (tri-diagonale dans le cas d'un mur) d'ordre n , $B'=[b_{ij}]$ est une matrice de commande, $C'=[c_i]$ est une matrice des capacitances diagonale carrée d'ordre n et U est le vecteur des sollicitations (température extérieure). La méthode de résolution numérique présentée dans le paragraphe 2.2.4 permet de

lancer la simulation numérique et générer les températures calculées des nœuds, qui seront attribuées directement aux sommets correspondants dans le graphe.

2.2. Modélisation informatique

2.2.1. Chaîne d'outils MyBEM

Dans ce travail, nous avons utilisé l'outil d'analyse de données Héliobim issu de la chaîne MyBEM. Les différentes étapes de cette chaîne sont illustrées dans la figure 5.

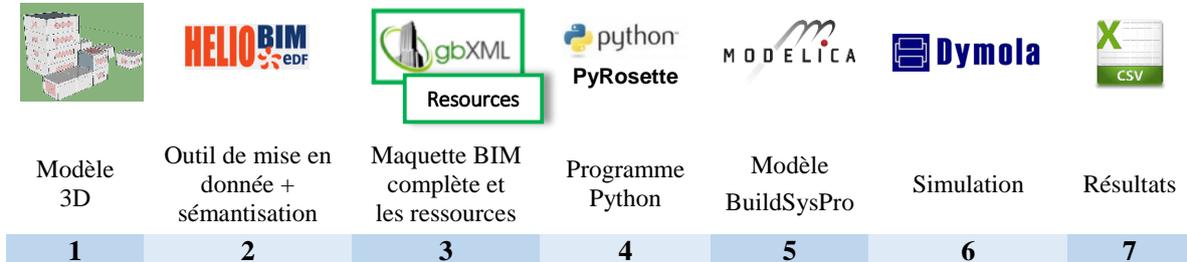


Figure 5 : Chaîne d'outils de modélisation énergétique MyBEM

2.2.2. Méthode des graphes appliquée à la thermique du bâtiment

À partir d'un ensemble de fichiers (maquette BIM complète + ressources) généré dans l'étape 3 de la chaîne MyBEM, la méthode des graphes, via le module NetworkX de Python, est utilisée pour créer un graphe permettant de générer les matrices d'état du système étudié comme le montre la figure 6.

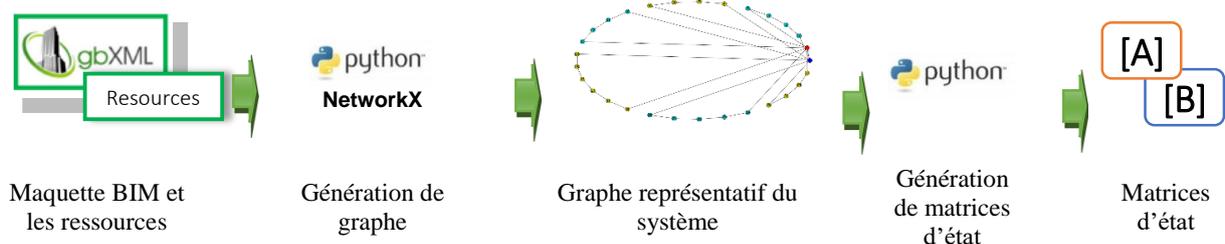


Figure 6 : Modélisation thermique intégrant la méthode des graphes en utilisant l'outil Héliobim

2.2.3. Génération des matrices d'état à partir d'un modèle BuildSysPro

À partir d'un modèle BuildSysPro généré dans l'étape 5 de la chaîne MyBEM, la fonction *Linearize* de Dymola permet de générer les matrices d'état correspondantes. Ces matrices sont exploitées par la suite pour une comparaison avec les matrices générées à partir de modèle de graphe comme le présente le processus décrit dans le paragraphe 2.2.2.

2.2.4. Génération des résultats de simulation à partir d'un système linéaire invariant

À partir de matrices d'état traduisant la thermique du système, de vecteur de sollicitations et de variable/es d'intérêt(e)s défini(s) (température de zone dans notre cas), la méthode *StateSpace* de Dymola permet de former le système linéaire invariant à résoudre et de générer les résultats de simulations.

2.2.5. Comparaison des matrices d'états des deux modèles thermiques étudiés

Afin de comparer deux matrices ($M_{(\text{graphe})}$, $M_{(\text{buildSysPro})}$) générées avec la bibliothèque *NumPy* de Python, nous avons utilisé les indicateurs présentés dans le tableau 1.

Ecart (E)	: $E = M_{(\text{buildSysPro})} - M_{(\text{graphe})}$
Ecart relatif (ER)	: $ER = E / M_{(\text{graphe})}$
Ecart absolu (EA)	: $EA = E $
Ecart relatif absolu (ERA)	: $ERA = ER $

Ecart absolu maximal (EAM)

$$: \mathbf{EAM} = \mathbf{maximum}(| \mathbf{E} |)$$

Ecart relatif maximal (ERM)

$$: \mathbf{ERM} = \mathbf{maximum}(| \mathbf{ER} |)$$

Tableau 1 : Expressions des indicateurs statistiques pour le calcul des écarts

2.2.6. Comparaison des résultats des deux modèles thermiques

Afin de comparer les résultats de simulation, les matrices d'état correspondantes aux deux modèles étudiés sont injectées dans le modèle Modelica illustré par la figure 7, et qui intègre la méthode décrite dans le paragraphe 2.2.4, ce qui permet d'éliminer l'erreur due au solveur. L'entrée des modèles est soumise à une sollicitation représentée par la température de l'air extérieur. En sortie, trois courbes sont générées représentant les résultats de simulation des deux modèles ($y_matPython$ et $y_matDymola$) et l'écart correspondant ($y_Dif_Dym_Pyth$).

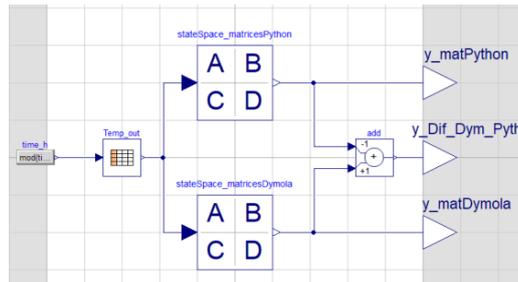


Figure 7 : Modèle Modelica pour la simulation numérique à partir des systèmes d'état des deux modèles étudiés (Graphe et BuildSysPro)

2.2.7. Programme informatique

Le programme s'exécute dans un environnement de codage Python, La figure 8 illustre le processus global du programme:

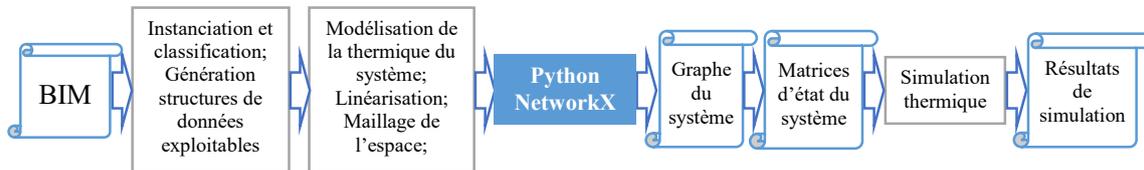


Figure 8 : Processus global du programme pour la génération des résultats de simulation thermique intégrant le BIM et la méthode des graphes.

3. Résultats

3.1. Cas d'usage : Zone d'air simple

3.1.1. Données géométriques et matériaux

Le cas d'usage traité dans le cadre de cet article est un local monozone en béton sous la forme d'un cube de 125m^3 ($5 \times 5 \times 5$), toutes les parois donnent sur l'extérieur. Le local ne possède pas de baies ni d'un système de chauffage.

Une isolation par l'extérieur (ITE) est appliquée au plancher bas, le matériau d'isolation utilisé est la laine de verre (LV). La construction des parois et les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés sont présentées dans les tableaux 2 et 3.

	Matériau	Epaisseur (cm)
Plancher bas	Béton	20
	LV (ITE)	6
Mur	Béton	15
Plancher haut	Béton	20

Tableau 2 : Construction des parois

	Béton	LV
Conductivité ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1,740	0,038
Densité ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2200	40
Chaleur massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1200	1030

Tableau 3 : Propriétés thermophysiques des matériaux

3.1.2. Données météorologiques

Le site météorologique choisi pour ce cas est paris Montsouris.

Le fichier météo du site utilisé contient des données typiques pour la période 1961-1990 (données historiques Meteonorm). Ce fichier est exploité par l'outil HélioBIM pour générer un fichier au format [.csv] exploitable de façon générique par le programme informatique.

La donnée climatique exploitée est la température de l'air extérieur, son évolution pour une année et un pas de temps horaire est illustré comme le montre la figure 9, et ses valeurs minimales, maximales et moyennes sont présentées dans le tableau 4.

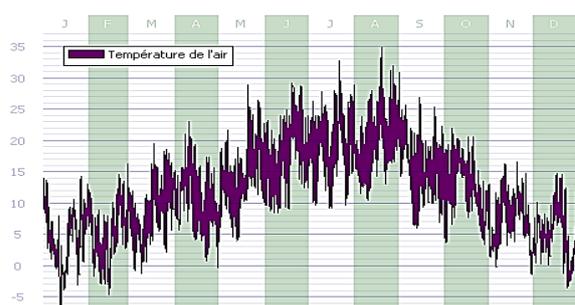


Figure 9 : Température de l'air extérieur (en °C) en fonction de temps (en heures)

Température de l'air extérieur (°C)	
minimum	-7,0
maximum	34,9
moyenne	11,9

Tableau 4 : Valeurs minimales, maximales et moyennes

3.1.3. Graphe du système

Le processus décrit précédemment dans le paragraphe 2.2.2 est appliqué à la zone étudiée, le graphe généré est illustré comme le montre la figure 10.

Le graphe représente les 29 nœuds du système. Le sommet '0' coloré en bleu et le sommet '1' coloré en rouge représentent respectivement la température des nœuds d'air extérieur et intérieur, et les sommets numérotés de '2' à '28' représentent les températures des nœuds associés aux mailles des parois avec une affectation de la même couleur aux mailles d'une même paroi.

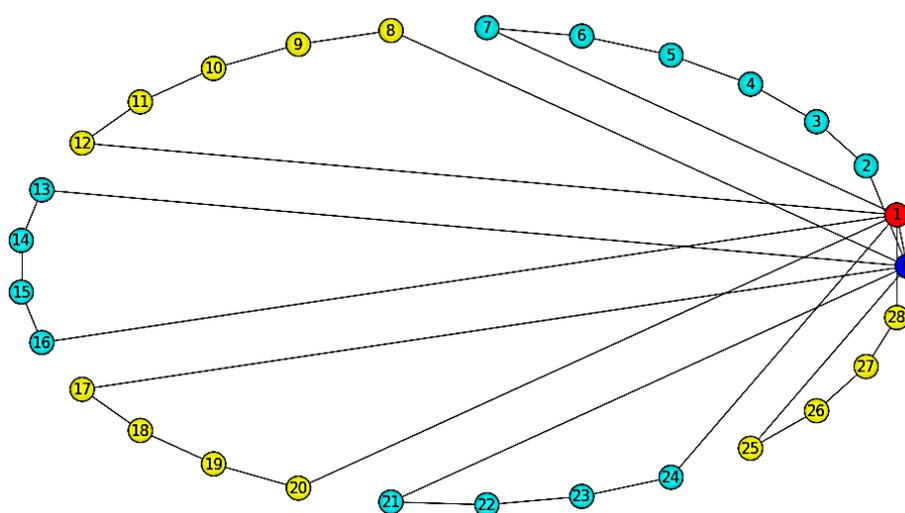


Figure 10 : Graphe représentatif de l'état thermique du système

3.1.4. Simulation et comparaison entre un graphe et un modèle BuildSysPro

Les données de simulation utilisées sont présentées dans le tableau 5.

Maillage	6 mailles pour le plancher bas, 5 pour la toiture et 4 pour les murs
Variable d'intérêt	Température de la zone d'air intérieur
Intervalle de simulation	Annuel
Pas de temps	horaire

Tableau 5 : Données de simulation utilisées pour la zone étudiée

A partir du système d'état (voir le système d'équation 2), les écarts présentés dans le tableau 6 sont générées en utilisant les indicateurs définis dans le paragraphe 2.2.5.

	Matrice A	Matrice B
Ecart absolu maximal (s⁻¹)	1.38 e-12	4.91 e-09
Ecart relatif maximal (%)	5.73 e-10	1.06 e-05

Tableau 6 : Ecart relatif maximal entre les matrices générées à partir des deux modèles

Ces écarts correspondent à la différence algébrique entre les matrices A et B générées avec les deux méthodes. Leurs très faibles valeurs sont dues à l'élimination de l'erreur de modélisation, en utilisant les mêmes données d'entrée (maillage spatial, coefficients d'échange, etc.), la seule erreur restante est due à la mémoire machine utilisée par l'environnement des deux outils (Python/Graphe et Dymola/BuildSysPro).

La température de la zone étudiée a été calculée à partir des matrices des deux modèles (graphe et BuildSysPro) en utilisant la méthode présentée dans le paragraphe 2.2.6, le résultat généré à partir du graphe est illustré par la figure 11 et l'écart de température entre les résultats des modèles est illustré par figure 12.

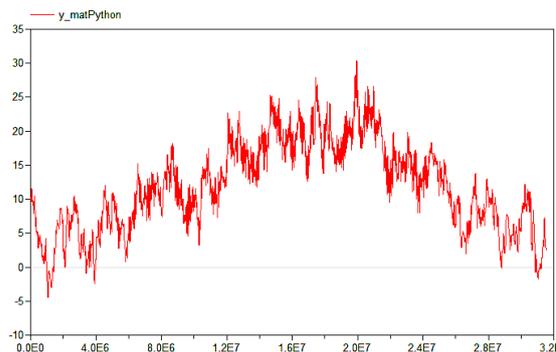


Figure 11 : Température de la zone (en °C) calculée à partir du graphe NetworkX en fonction de temps (en secondes)

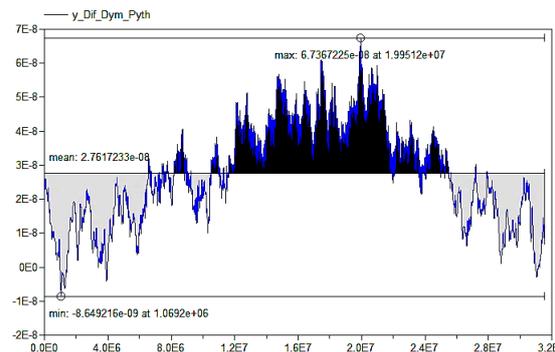


Figure 12 : Ecart de température entre les deux modèles (Graphe et BuildSysPro) en fonction de temps (en secondes)

Ecart moyen (K)	2.76e-08
Ecart maximal absolu (K)	6.74e-08

Tableau 7 : Ecart moyen et écart relatif maximal absolu entre les deux résultats obtenus

Les comparaisons aux niveaux des matrices d'état (tableau 6) et des résultats de simulation (tableau 7) permettent de valider le programme intégrant la maquette BIM et la méthode des graphes pour ce cas d'usage simple (cube monozone). Finalement, on obtient un graphe complet et validé où les conductances thermiques et les températures calculées sont attribuées respectivement aux arcs et aux sommets.

4. Discussion

L'objectif principal de la méthodologie proposée était de vérifier la faisabilité de la conversion d'un modèle 3D ou d'un modèle d'énergétique du bâtiment en un modèle de graphe dédié à la simulation thermique. Il semble que l'approche utilisée à cette fin permet d'atteindre cet objectif de manière automatique pour un cas d'usage simple.

L'utilisation de maquettes numériques BIM permet d'accroître cette automatisation, à laquelle s'ajoute l'importance des outils de sémantisation qui génèrent et réinitialisent ces maquettes.

Il apparaît donc que l'utilisation de la méthode des graphes représente une approche intéressante pour faciliter la modélisation de problèmes complexes, notamment celui de l'énergétique des bâtiments. En effet, cette approche, via le module NetworkX gratuit de Python, permet d'analyser des chemins entre les nœuds grâce à sa connexité, de générer des jeux de matrices traduisant la thermique du système et d'utiliser un mode d'affichage adapté (circulaire, aléatoire, arborescence, etc.).

De plus, le développement d'un programme informatique intégrant le processus complet offre une démarche automatisée permettant de simplifier considérablement le travail d'un modélisateur.

5. Conclusion

Dans cet article, l'utilisation de la théorie des graphes appliquée à la thermique des bâtiments a été présentée comme une solution à l'un des problèmes de la modélisation énergétique des bâtiments, qui est d'optimiser le processus de création de modèles allant d'une maquette BIM jusqu'aux résultats d'intérêt.

Actuellement, le programme développé est limité à un format gbXML spécifique à la thermique du bâtiment généré par l'outil HélioBIM, et il n'intègre pas les systèmes énergétiques.

Enfin, cette méthodologie peut être considérée comme une étape d'un nouveau concept général, qui consiste à mieux exploiter un graphe et l'appliquer à d'autres études, une analyse des nœuds critiques et l'influence réciproque des zones thermiques les unes sur les autres. L'application de cette méthode à des études plus complexes sera l'objet d'un prochain article.

Références

- [1] M. Schumann, T. Duforestel, H. Bouia, M. Bouquerel, M. Brun, A. Ribault, T. Leduc, N. Hoyet, M. De Fouquet, E. Dufresnes, J-M. Sonnet, R. Lécussan, G. Rusaouen, Interdisciplinary around design tools for new **buildings** and districts : the ANR MERRUBI project, *Proceeding of PLEA*, (Edinburgh, 2017), SCRIBD, pp 2148-2155.
- [2] <https://www.modelica.org/modelicalanguage> (site consulté le 18/01/2021)
- [3] <https://github.com/EDF-TREE/BuildSysPro> (site consulté le 18/01/2021)
- [4] Bontemps, S., Kaemmerlen; A., Blatman, G., Mora, L. (2013). Reliability of dynamic simulation models for building energy in the context of low-energy buildings. *Proceedings of the 13th IBPSA Conference*. (Chambery, France, 26th-28th August 2013). Building Simulation 2013, Springer, pp 1952-1959.
- [5] Plessis G., Kaemmerlen A., Lindsay A. (2014). BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems. *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*. (Lund, Sweden 10th-12th March 2014), pp 1161-1169.
- [6] <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia/produits/dymola/> (site consulté le 18/01/2021).
- [7] M. Bouquerel, S. Bermes, A. Brun, H. Bouia, R. Lécussan, B. Charrier, Building Energy Modeling at District Scale through BIM Based Automatic Model Generation – Towards Building Envelope Optimization, *Proceedings of the 16th IBPSA Conference*. (Rome, 2nd-4th September 2019). Building Simulation 2019. Springer, pp 3676-3683.
- [8] Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult and Pieter J. Swart, “Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX”, in Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008), Gael Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman (Eds), (Pasadena, CA USA), pp. 11–15, Aug 2008
- [9] Green building XML, www.gbxml.org (site consulté le 18/01/2021)