

Développement de modèles basés sur des schémas RC comme outil de cartographie pour les besoins en chaud à l'échelle du bâtiment

Antoine DUMONT^{1*}, Véronique FELDHEIM¹, Paul LYBAERT¹

¹ Service de Thermique et Combustion, Faculté Polytechnique de Mons (UMONS)

Rue de l'Épargne, 56 - 7000 Mons

*(auteur correspondant : antoine.dumont@umons.ac.be)

Résumé - Cet article explore le développement et l'utilisation de modèles "boîte grise" basés sur des schémas résistances-capacités (RC) pour estimer les besoins en chaud à l'échelle du bâtiment. L'utilisation de paramètres R et C , identifiés via des données générées par une simulation "boîte blanche" sur le logiciel TRNSYS, garantit une signification physique et permet de représenter le comportement thermique du bâtiment. Ces modèles sont comparés, entre-eux, par le biais des valeurs des paramètres R et C globaux et des taux de précision sur la température intérieure et sur les besoins en chaud. De cette manière, les modèles M1 (4R2C), M2 (4R3C) et M4 (5R4C) permettent de simuler les besoins en chaud avec un taux de précision moyen de 92,7 %.

Nomenclature

C	Capacité thermique, J/K	ext	extérieur
EQM	Erreur Quadratique Moyenne	f	fenêtre
h	Heure	$heat$	chaud
N	Nombre de pas de temps	in	intérieur
\dot{Q}	Flux de chaleur, W	inf	infiltration
R	Résistance thermique, K/W	k	état
$REQM$	Racine de l'EQM	n	nœud
T	Température, K	op	opaque
t	Temps, s	res	premières
		s	sol
<i>Indices et exposants :</i>		$vent$	ventilation
d	discret		

1. Introduction

Le secteur du bâtiment est aujourd'hui le plus grand consommateur d'énergie en Europe, représentant environ 40 % de la consommation d'énergie de l'Union Européenne (UE) et plus d'un tiers de ses émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie [1]. L'importance de ce secteur dans la réalisation des objectifs de l'UE en matière d'énergie et de climat ne peut être sous-estimée, surtout en considérant que 85 % des bâtiments de l'UE ont été construits avant 2000 et que 75 % d'entre eux présentent une mauvaise performance énergétique [1]. Améliorer l'efficacité énergétique devient donc nécessaire et nécessite une compréhension fine et localisée des besoins en énergie des bâtiments, étant donné que ces derniers varient considérablement selon les zones climatiques et les caractéristiques des bâtiments.

Dans cette volonté d'amélioration, ce travail se concentre sur le développement de modèles "boîte grise" basés sur des schémas résistances-capacités (RC) et fait partie du projet *Integrated Local Energy System* (ILES) [2] qui vise à développer des outils et solutions technologiques complètes pour des communautés énergétiques intégrées (chaleur, froid et électricité).

L'objectif final du travail au sein de ce projet est de proposer un outil de cartographie des besoins énergétiques en Wallonie, avec un accent particulier sur la région du Hainaut. Cela permettra d'estimer la consommation énergétique des quartiers wallons, de définir une typologie énergétique pour ces derniers et de contribuer à l'évaluation ainsi qu'à la planification de la production des besoins thermiques.

2. Les modèles “boîte grise”

Les modèles “boîte grise” représentent une approche intermédiaire entre les modèles “boîte blanche” et “boîte noire” pour la modélisation énergétique des bâtiments. Cette hybridation, combinant équations physiques et estimation basée sur les données, concilie interprétabilité physique, précision et efficacité de calcul [3, 4]. Ces modèles reposent sur plusieurs principes clés : une représentation physique simplifiée sous forme de schémas résistances-capacités (RC) capturant les dynamiques thermiques essentielles avec des besoins réduits en informations détaillées [3]; une estimation des paramètres à partir de données disponibles, mêlant connaissances physiques et méthodes statistiques pour adapter le modèle aux spécificités du bâtiment tout en conservant une base physique; un bilan énergétique prenant en compte le chauffage, les infiltrations, les irradiations solaires, ainsi que les températures intérieure et extérieure et enfin, l'utilisation de techniques de réduction d'ordre pour simplifier la physique complexe et accélérer les calculs tout en préservant les dynamiques thermiques essentielles [4]. Ces caractéristiques les rendent idéaux pour des applications comme le contrôle prédictif (*Model Predictive Control* (MPC)) ou l'étude de la flexibilité énergétique [5].

Malgré leurs avantages, les modèles “boîte grise” présentent certaines limites. Leur simplicité se traduit par une précision moindre par rapport aux modèles “boîte blanche” [4] et leur calibration dépend de données historiques souvent indisponibles, en particulier pour les bâtiments neufs [6]. De plus, leur adoption est freinée par un manque de standardisation et de solutions logicielles dédiées [3]. Néanmoins, leur équilibre entre précision et rapidité en fait un outil précieux, particulièrement adapté aux applications nécessitant des calculs rapides.

3. Les modèles “boîte grise” basés sur les schémas RC

Dans le but de réaliser la cartographie des besoins thermiques, cette étude utilise des modèles “boîte grise” basés sur les schémas RC pour simuler le comportement thermique d'un bâtiment mono-zone illustré à la Figure 1. L'étude a utilisé 4 modèles¹ (repris à la Figure 2) allant d'une configuration comprenant 4 résistances et 2 capacités (modèle M1) à une configuration plus complexe comprenant 5 résistances et 4 capacités (modèle M4). Un bâtiment est donc représenté sous forme d'un réseau de nœuds qui correspondent à un état thermique (température intérieure, température des parois, ...) et ayant, ou non, une capacité thermique C . Chaque nœud est connecté par des résistances thermiques R pour refléter aussi précisément que possible les propriétés thermiques du bâtiment.

Les conditions aux limites des modèles incluent la température extérieure (T_{ext}) et celle du sol (T_s). Il est supposé que les charges liées au chauffage (\dot{Q}_{heat}), à la ventilation (\dot{Q}_{vent}) et aux infiltrations (\dot{Q}_{inf}) sont directement appliquées au nœud correspondant à la température intérieure (T_{in}). Les apports incluent également le rayonnement solaire sur les parties opaques de l'enveloppe (\dot{Q}_{op}) et à travers les fenêtres (\dot{Q}_f). Les coefficients d'absorption solaire des parois opaques et de transmission solaire des fenêtres sont intégrés dans les calculs de \dot{Q}_{op} et \dot{Q}_f .

1. Ces modèles sont issus du travail de Bagheri A. (conditions de simulation similaires : apports internes, horaires, ...) [7].



Figure 1 : Bâtiment administratif mono-zone fictif.

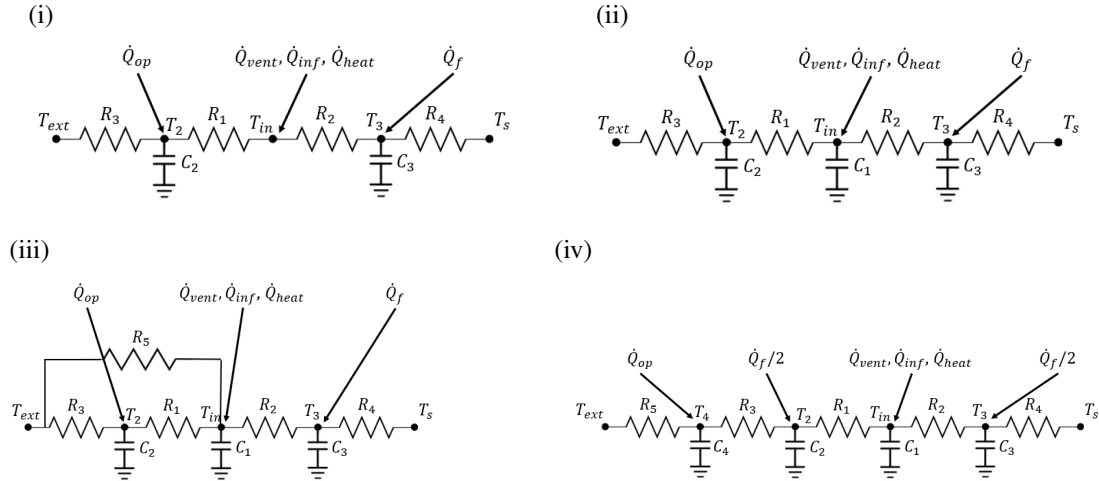


Figure 2 : Modélisation d'un bâtiment basée sur les schémas RC pour simuler le comportement thermique de celui-ci : M1 (4R2C) (i) ; M2 (4R3C) (ii) ; M3 (5R3C) (iii) et M4 (5R4C) (iv).

Le **modèle M1** (Figure 2(i)) est conçu pour simplifier la modélisation thermique en supposant que la masse thermique de l'air intérieur et des parois internes est négligeable par rapport à celle de l'enveloppe (caractérisée par C_2) et celle du plancher (caractérisée par C_3). Ce modèle représente l'enveloppe et le plancher avec des branches 2R1C. R_1 et R_3 caractérisent respectivement la résistance thermique entre l'intérieur et l'enveloppe et entre l'enveloppe et l'extérieur. Quant à R_2 et R_4 , elles représentent respectivement la résistance thermique entre l'intérieur et le plancher et entre le plancher et le sol. \dot{Q}_{op} et \dot{Q}_f sont respectivement appliqués au nœud T_2 et au nœud T_3 . Grâce aux capacités C_2 , C_3 et aux résistances R_1 , R_2 , les phénomènes transitoires associés aux impacts de ces flux sont pris en compte, ce qui introduit un délai avant d'affecter la température intérieure comme cela se produit dans la réalité.

Le **modèle M2** (Figure 2(ii)) conserve les principales caractéristiques du modèle M1 mais améliore sa structure en ajoutant une capacité C_1 permettant de prendre en compte la masse thermique de l'air intérieur et des parois internes.

Le **modèle M3** (Figure 2(iii)) reprend les caractéristiques du modèle M2 tout en ajoutant une résistance thermique supplémentaire (R_5) entre l'air intérieur et l'air extérieur. Cette résistance représente les éléments d'enveloppe sans masse, tels que les fenêtres.

Le **modèle M4** (Figure 2(iv)) affine le modèle M2 au niveau de la structure de l'enveloppe via l'ajout d'une résistance et d'une capacité. Le transfert de chaleur de l'enveloppe est ainsi divisé en trois parties : entre l'extérieur et la surface externe de l'enveloppe via R_5 et C_4 (partie

exposée au rayonnement solaire et à la température ambiante), au sein de l'enveloppe via R_3 et entre la surface interne de l'enveloppe et l'intérieur via R_1 et C_2 . Le flux solaire à travers les fenêtres est, quant à lui, réparti entre les nœuds T_4 et T_3 .

Chaque modèle fournit ainsi une approche détaillée pour simuler le comportement thermique des bâtiments dans des conditions limites spécifiées. Les différents niveaux de complexité permettent un meilleur équilibre entre efficacité des calculs et précision de la représentation des propriétés thermiques des bâtiments.

4. Méthodologie

4.1. Simulation du bâtiment avec TRNSYS

Le logiciel TRNSYS, logiciel de référence pour la simulation thermique des bâtiments [8], est utilisé pour générer des jeux de données pour le développement et la comparaison des modèles simplifiés. Un bâtiment administratif fictif de type lourd est simulé avec une surface au sol de 50 m^2 , une hauteur de 3 m et une surface de fenêtre de $2,5 \text{ m}^2$. Les caractéristiques de ce bâtiment sont tirées du travail d'A. Bagheri [9]. Les données météorologiques utilisées proviennent de la base de données de Uccle, fournissant la température extérieure et le rayonnement solaire. La température du sol est supposée constante à 10°C . La simulation sous TRNSYS repose sur une température de consigne imposée, définie à 15°C en période d'inoccupation et 22°C lorsque le bâtiment est occupé. Cette consigne pilote la température intérieure. La puissance de chauffage est considérée comme illimitée afin de pouvoir estimer les besoins réels. Quant aux besoins en refroidissement, ceux-ci ne sont pas pris en compte. Les infiltrations sont fixées à $0,24 \text{ h}^{-1}$ (sous $\Delta p = 2 \text{ Pa}$), tandis que la ventilation mécanique varie selon l'occupation : $0,25 \text{ h}^{-1}$ en l'absence d'occupants et 3 h^{-1} lorsque le bâtiment est occupé. Ainsi, les débits de ventilation et d'infiltrations et la température intérieure sont fixés. Cette simulation génère des résultats servant à la détermination des paramètres des modèles décrits précédemment.

4.2. Principe et développement des schémas RC

Les modèles basés sur les précédents schémas RC sont programmés dans Matlab. En utilisant la loi de Kirchhoff, un bilan énergétique est établi à chaque nœud (équation 1), conduisant à un système d'équations décrivant les transferts et le stockage de chaleur.

$$C_n \frac{dT_n}{dt} = \sum_{n'} \frac{T_{n'} - T_n}{R_{nn'}} + \sum_i \dot{Q}_{n,i} \quad (1)$$

En utilisant les bilans énergétiques, les modèles sont formulés sous forme d'équations d'état. Les états thermiques $\mathbf{x} = [T_{\text{in}}, T_2, T_3, \dots]^T$ sont exprimés sous forme d'équations différentielles linéaires du premier ordre (équations 2 et 3). Dans le cadre du développement de ces modèles sur Matlab, la forme discrète de ces équations est utilisée.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (3)$$

Où :

- \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} et \mathbf{D} sont des matrices dérivées des résistances et capacités thermiques du réseau,
- \mathbf{u} représente les entrées du système : T_{ext} , T_s , \dot{Q}_{op} , \dot{Q}_f , \dot{Q}_{vent} , \dot{Q}_{inf} et \dot{Q}_{heat} ,
- \mathbf{y} est la sortie du système qui correspond à T_{in} .

4.3. Identification des paramètres

Une fois les modèles programmés, les valeurs numériques des résistances et capacités thermiques sont estimées à l'aide d'un processus d'identification des paramètres sur Matlab [10]. Les informations issues de TRNSYS (données et résultats) sont utilisées comme signaux d'entrée et de sortie. Les valeurs des paramètres R et C sont optimisées en minimisant l'erreur entre la température intérieure simulée ($T_{in, RC \text{ simulé}}$) via le modèle RC et celle provenant de TRNSYS, à l'aide de la fonction de coût d'erreur quadratique moyenne (EQM) (voir équation 4). Les valeurs sont ajustées de manière itérative jusqu'à ce que la différence minimale (en %) entre la valeur actuelle de la fonction de perte et son amélioration attendue après l'itération suivante soit inférieure à 10^{-4} ou que le nombre d'itérations maximal, 500 dans ce cas, soit atteint. Cela garantit que les modèles RC reproduisent fidèlement le comportement thermique représenté avec les données TRNSYS. Les valeurs de ces paramètres sont obtenues en même temps qu'un taux de précision sur la température intérieure calculé selon l'équation 5.

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{in, RC \text{ simulé}}(i) - T_{in, TRNSYS}(i))^2 \quad (4)$$

$$FIT = 100 \times \left(1 - \frac{\|y_{TRNSYS} - y_{RC \text{ simulé}}\|}{\|y_{TRNSYS} - \text{moyenne}(y_{TRNSYS})\|} \right), \quad (5)$$

4.4. Calcul de \dot{Q}_{heat}

Une fois les paramètres identifiés, ils sont utilisés pour calculer \dot{Q}_{heat} à chaque pas de temps en résolvant les équations de bilan énergétique pour tous les nœuds des modèles. La température intérieure provenant de TRNSYS est fournie en entrée au même titre que les paramètres identifiés (R et C) et que T_{ext} , T_s , \dot{Q}_{op} , \dot{Q}_f , \dot{Q}_{vent} et \dot{Q}_{inf} . La dérivée temporelle $\frac{dT_n}{dt}$ est approximée à l'aide de la méthode des différences finies². \dot{Q}_{heat} obtenu est ensuite comparé à celui déterminé sur TRNSYS. Cela permet d'évaluer dans quelle mesure les besoins en chauffage sont correctement estimés.

5. Résultats

Pour rappel, l'objectif est d'utiliser des modèles basés sur des schémas RC et d'identifier celui (ou ceux) qui permet(tent) de prédire avec précision la température intérieure et la charge de chauffage tout en représentant les propriétés thermiques du bâtiment le plus fidèlement possible. Dans ce cadre, les résultats issus de la simulation sur le logiciel TRNSYS, servant de données de référence, sont présentés ainsi que les résultats de l'identification et du calcul de la charge de chauffage. Ces résultats ont été obtenus pour une simulation sur une année complète mais seules les 1000 premières heures de l'année sont représentées pour une question de clarté et de lisibilité.

5.1. Simulation TRNSYS

Les résultats obtenus lors de la simulation³ d'un bâtiment administratif fictif (repris à la Figure 1) sont repris à la Figure 3. Les courbes de température intérieure et de besoins en chauffage présentent logiquement une périodicité hebdomadaire liée aux activités administratives et

2. $\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$

3. D'autres simulations ont également été réalisées en faisant varier la surface au sol, la surface de fenêtre et l'orientation.

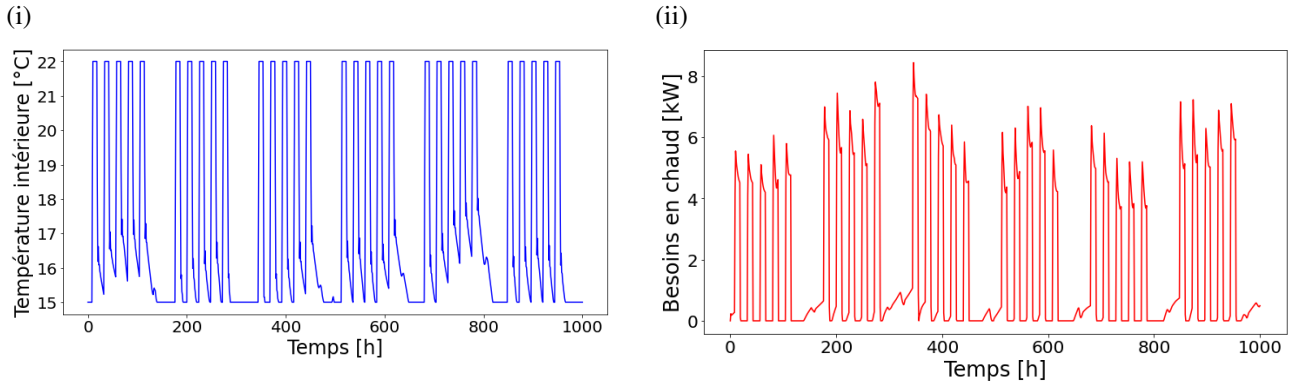


Figure 3 : Évolution de T_{in} (i) et de \dot{Q}_{heat} (ii) pour un bâtiment administratif non occupé le week-end.

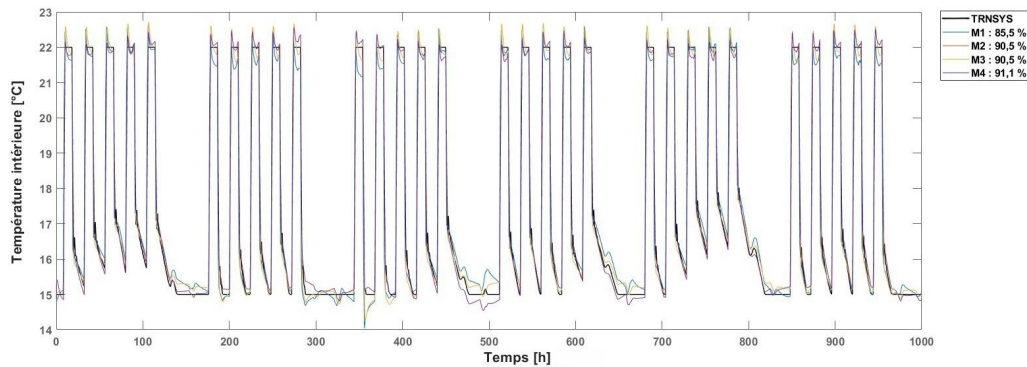


Figure 4 : Comparaison des résultats de l'identification pour les 4 modèles avec la valeur T_{in} issue de TRNSYS.

donc à la gestion du chauffage, activé uniquement en heures ouvrables et désactivé les week-ends.

5.2. Résultats issus de l'identification

La T_{in} obtenue pour les 4 modèles issus de l'identification avec un pas de temps de 15 minutes est reprise à la Figure 4 et la comparaison des modèles est reprise au tableau 1. Quant aux résultats des paramètres, seuls ceux du modèle M1 sont proposés au tableau 2.

Après analyse des résultats pour les différentes configurations⁴, il apparaît évident qu'avec un pas de temps d'un quart d'heure, les 4 modèles représentent fidèlement la température intérieure au sein du bâtiment et ce, sur une année complète.

Cependant, en analysant les résultats obtenus, on constate que le modèle M3 ne permet pas d'obtenir des paramètres ayant une signification physique comparable à la théorie. En effet, les résultats pour la résistance R_5 (représentant les fenêtres) sont largement supérieurs à la réalité avec des différences s'élevant à plus de 10⁶ %. Le calcul des besoins en chaud s'est donc uniquement concentré sur les modèles M1, M2 et M4.

4. Cela fait référence aux différentes configurations du bâtiment et à la variation des paramètres de simulation tels que le pas de temps (0,25 h, 0,5 h et 1 h) et la période de simulation (1000 h ou 8760 h).

Tableau 1 : Comparaison des 4 modèles après l'identification.

Modèle	FIT sur T_{in} [%]	EQM [$^{\circ}C^2$]
M1	85,5	0,1
M2	90,5	0,06
M3	90,5	0,06
M4	91,1	0,05

Tableau 2 : Paramètres du modèle M1 pour un pas de temps de 15 minutes.

Paramètre	Th.	Matlab	Diff.
$R_1 + R_3$ [K/W]	0,0285	0,0268	-5,8 %
$R_2 + R_4$ [K/W]	0,1333	0,0852	-36,04 %
C_2 [MJ/K]	15,6	49,7	218,7 %
C_3 [MJ/K]	33,3	40,3	21,1 %
R_{total} [K/W]	0,1617	0,1121	-30,7 %
C_{total} [MJ/K]	48,9	90	84,2 %

Tableau 3 : Comparaison des modèles M1, M2 et M4 pour le calcul des besoins en chaud.

Modèle	FIT sur \dot{Q}_{heat} [%]	REQM [W]
M1	90,5	166,1
M2	92,5	132,1
M4	95,1	85,5

5.3. Calcul du flux de chaleur \dot{Q}_{heat}

Les résultats de \dot{Q}_{heat} issus des bilans énergétiques de chaque nœud sont repris au tableau 3. Une représentation des résultats du modèle M4 est reprise à la Figure 5.

D'après l'analyse des divers résultats, les modèles M1, M2 et M4 déterminent fiablement la température intérieure et la demande de chauffage. Sous différentes configurations de simulation⁴, seul le modèle M1 reste constant dans la précision de simulation du comportement thermique du bâtiment. Quant aux modèles M2 et M4, ceux-ci permettent d'atteindre d'excellents taux de précision avec la diminution du pas de temps.

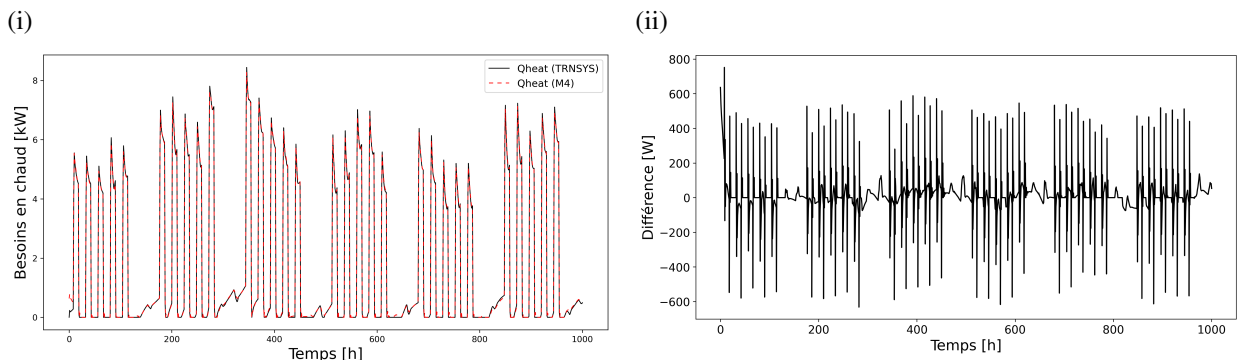


Figure 5 : Comparaison de \dot{Q}_{heat} de TRNSYS et du modèle M4 (i) et différence entre \dot{Q}_{heat} de TRNSYS et du modèle M4 (ii) sur les 1000^{res} h de l'année avec un taux de précision de 95,1 %.

6. Conclusion et perspectives

Pour rappel, l'objectif de ce travail est de développer des modèles basés sur des schémas RC pour déterminer les besoins en chauffage d'un bâtiment. Les modèles M1, M2 et M4 se sont révélés fiables quel que soit le type de simulation (paramètres investigués, essentiellement géométriques). L'analyse des paramètres R et C confirme leur cohérence physique et théorique, renforçant la pertinence de ces modèles pour des applications pratiques.

Une analyse détaillée de la répartition des résistances thermiques R_{total} , par exemple via l'étude des constantes de temps, et l'impact des périodes de simulation devra être effectuée par la suite. Par ailleurs, cette analyse permettra de déterminer une méthode pour attribuer les paramètres globaux R et C et les répartir de manière optimale en tenant compte des spécificités des bâtiments (telles que l'année de construction, le caractère léger ou lourd, etc.). L'objectif est donc d'offrir une approche permettant de développer des modèles plus génériques, tout en garantissant que les valeurs de leurs paramètres soient ajustées en fonction des caractéristiques propres à chaque type de bâtiment. Enfin, l'exploration de nouvelles configurations architecturales, telles que des bâtiments à deux ou trois façades, permettra d'étendre la validité des modèles à un éventail plus large de situations pratiques.

Références

- [1] E. Commission, Energy Performance of Buildings Directive (2024).
URL https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- [2] L. F. et le FTJ en Wallonie, Programmation 2021-2027.
URL <https://europe.wallonie.be/programmation-2021-2027/presentation>
- [3] Y. Li et al., Grey-box modeling and application for building energy simulations-A critical review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 146 (2021) 111174. doi:10.1016/j.rser.2021.111174.
- [4] M. Tobias, Understanding the Three Types of Building Energy Models.
URL <https://www.ny-engineers.com/blog/understanding-the-three-types-of-energy-models-for-buildings>
- [5] P. Stoffel et al., Evaluation of advanced control strategies for building energy systems, Energy and Buildings 280 (2023) 112709. doi:10.1016/j.enbuild.2022.112709.
- [6] L. Ghobad, Building Energy Models: What Are Black-Box, White-Box, and Gray-Box Models? (2024).
URL <https://www.enerlite-consulting.com/blog/building-energy-models>
- [7] A. Bagheri et al., Implementation of System Identification Techniques and Optimal Control for RC Model Selection by Means of TRNSYS Simulation Results and Experimental Data, Buildings 12 (10) (2022) 1625. doi:10.3390/buildings12101625.
- [8] M. Magni, F. Ochs, S. de Vries, A. Maccarini, F. Sigg, Detailed cross comparison of building energy simulation tools results using a reference office building as a case study, Energy and Buildings 250 (2021) 111260.
- [9] A. Bagheri et al., Coupling building thermal network and control system, the first step to smart buildings, in : 2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), 2016, pp. 1–6. doi:10.1109/ISC2.2016.7580820.
- [10] Matlab, System Identification Toolbox.
URL <https://nl.mathworks.com/products/sysid.html>

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le FEDER et le FTJ en Wallonie pour le financement des travaux de recherche.