
Modélisation thermique dynamique d'un amphithéâtre à l'aide d'un réseau de capteurs sans fil : vers un démonstrateur d'outil de diagnostic énergétique dans un bâtiment public

Frank Itoua Engoti¹, Nicolas Angellier², Laurent Ulmet², Raymond Quéré¹, Michèle Lalande¹, Frédéric Dubois²

¹ Laboratoire XLIM – CNRS, UMR 7252, Université de Limoges. 16 rue Jules Vallès 19100 Brive La Gaillarde, France (frank.itoua@xlim.fr)

² Laboratoire GEMH GC&D, Université de Limoges. 17 boulevard Jacques Derche 19300 Egletons, France

RÉSUMÉ. Cet article présente les avancées d'un travail collaboratif entre deux Laboratoires de l'Université de Limoges : l'un spécialisé dans les systèmes électroniques et réseaux intelligents (XLIM) et l'autre en Génie Civil (GEMH). Le point d'intérêt commun est la gestion optimale d'énergie des bâtiments accueillant du public. Le caractère prévisible des scénarios d'usage, et l'importance des charges internes (occupants, éclairage) rendent intéressant de compléter les techniques correctives classiques dans la régulation des systèmes par des stratégies prédictives reposant sur de la modélisation. Sur l'exemple particulier d'un amphithéâtre, l'article présente l'architecture et le mode de communication du réseau fin de capteurs sans fil, et l'utilisation des mesures pour alimenter un modèle de simulation thermique dynamique développé en interne. Les résultats de la simulation en termes de température et humidité relative ambiantes et de concentration en CO₂ sont confrontés avec les mesures. Bien qu'étant globalement validés, les résultats montrent l'influence importante de perturbations difficilement mesurables telles que les débits de circulation d'air dus aux ouvertures des portes.

ABSTRACT. This article presents the potential outcome of a research collaboration between two laboratories of the University of Limoges: one specialized in electronic and smart grid systems (XLIM) and the other in Civil Engineering (GEMH). The ultimate target is to optimize the energy management of the buildings which are open to public access. It is worthwhile to note that the predictive characteristics of buildings under various scenarios and by considering the internal loads (occupancy, lighting) offers essential information to implement the necessary correction techniques. This leads to enhance the regulatory system installed in the buildings based on predictive modeling. This article presents the development of dynamic thermal simulation model of a particular lecture theatre of the university building depending on the architecture and communication mode of the installed wireless network and by using measured building characteristics. The simulation results are in good agreement with the measurement for parameters such as temperature, humidity and Co₂ concentration. Although, the developed thermal simulation model shows promising results, the external disturbances such as opening of the doors has significant influence on model performance.

MOTS-CLÉS : réseau sans fil de capteurs autonomes, simulation thermique dynamique.

KEY WORDS: wireless network of sensors, dynamic thermal simulation

1. Introduction

L'un des défis de ce siècle est le développement durable, c'est-à-dire garder une bonne qualité de vie et un meilleur confort pour les générations à venir tout en respectant l'environnement. La production et la gestion d'énergie nécessaires pour répondre à ces attentes sont donc essentielles. Dans le contexte du monitoring de bâtiments et de la modélisation de leur comportement hygrothermique, le projet régional MEDYBAT (Modélisation Energétique Dynamique d'un BATiment universitaire) entre les laboratoires XLIM et GEMH GC&D de l'Université de Limoges a pour enjeu de réaliser un démonstrateur d'outil de diagnostic énergétique dans un bâtiment public. Le premier partenaire est en charge du déploiement d'un maillage fin de mesure par un réseau de capteurs autonomes sans fil dans le bâtiment de l'IUT GEII de Brive La Gaillarde, tandis que le second partenaire exploite ces données pour la modélisation thermique dynamique du bâtiment, tenant compte des scénarios d'usage effectifs.

L'objectif à terme est d'élaborer des stratégies de conduite des équipements thermiques visant à optimiser leur dépense énergétique. Dans ce type de bâtiments publics, une part importante des scénarios d'usage est prévisible, de sorte qu'il peut être envisagé d'anticiper les actions, à condition de pouvoir prévoir la conséquence de chacune d'elles sur l'évolution future des conditions de confort hygrothermique et des consommations. Le recours à la Simulation Thermique Dynamique (STD) permet ce type de prévision, et donc l'optimisation des actions, dans le cadre d'une analyse inverse.

Pour ce faire, nous utilisons un outil ouvert et polyvalent de STD développé au laboratoire GEMH GC&D qui repose sur un modèle de parois en différences finies 1D, uni-zone [MED 15]. A ce stade, la simulation se limite à une zone d'intérêt du bâtiment qu'est son Amphithéâtre. La présente étude montre une première étape de validation du modèle. A partir de conditions initiales et limites données par les mesures, les résultats numériques en termes de conditions ambiantes intérieures sont confrontés aux mesures effectives.

2. Réseau de capteurs et système de récupération de données

Le réseau de capteurs MEDYBAT [ITO 16a] (Fig. 1) ayant principalement une fonction de supervision, il est déployé suivant une structure en étoile. Pour des raisons de flexibilité de programmation et de gestion des algorithmes de communication des données et de limitation des coûts de déploiement, il utilise le protocole Zigbee qui s'appuie sur le standard IEEE 802.15.4 (mode « Non Beacon ») dans la bande 2,4 GHz [PRI 09] et est implémenté avec du matériel disponible en open source.

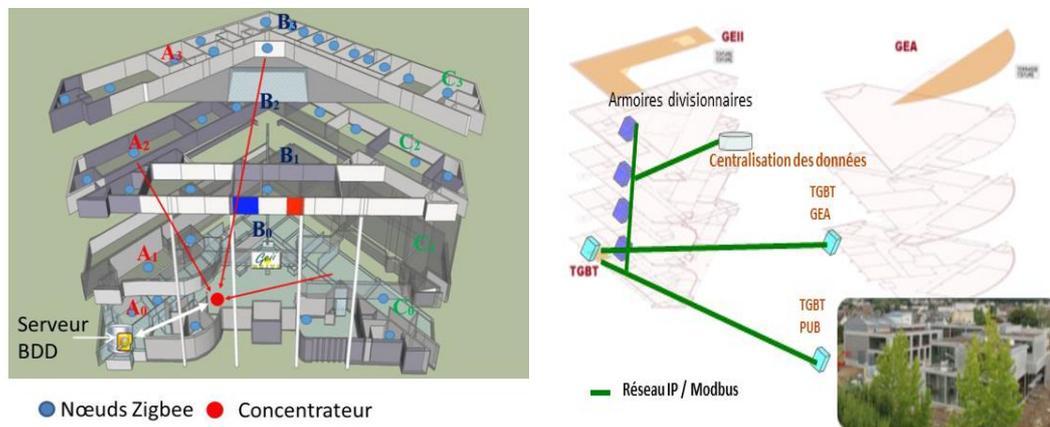


Figure 1. Architecture des réseaux MEDYBAT et RAMCES.

Ainsi, le réseau comprend plus de 60 nœuds répartis sur les 3 étages du bâtiment et chaque nœud gère en moyenne 3 capteurs (de mesure ou d'évènement). Des nœuds synchrones envoient leurs données après une période définie de veille profonde pour des soucis d'économie de batterie, tandis que des nœuds asynchrones font leurs mesures en surveillant les changements d'états de certains capteurs.

Plus précisément, le réseau mesure des paramètres d'ambiances internes (température, humidité relative, luminosité, présence...) et externes (rayonnement solaire, vitesse du vent...) du bâtiment ainsi que des paramètres spécifiques à l'Amphithéâtre (températures d'entrée-sortie des radiateurs, taux de CO₂, caractéristiques et débit de l'air soufflé issu de la Centrale de Traitement d'Air (CTA), ouvertures des portes...). Certains capteurs sensibles pour la modélisation thermique à venir ont fait l'objet de calibrations supplémentaires en chambre climatique

(température, humidité relative) ou sur banc de soufflage (vitesse d'air dans la gaine) [ITO 17] afin de s'assurer d'une bonne fiabilité des mesures.

Ces données sont complétées par la mesure de la consommation énergétique (tensions, courants, puissances, phase, gaz...) et toute la gestion de la chaufferie-CTA fournies par le réseau d'automates RAMCES (Réseau Avancé de la Consommation Énergétique et de la Supervision) dont les centrales de mesures sont installées à chaque étage du bâtiment (Fig. 1), pour connaître les besoins en puissances, en particulier de l'Amphithéâtre.

Au final, toutes les mesures sont centralisées au niveau d'un serveur open source SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) [ALM 14] dédié à l'Internet of Things et au Machine to Machine qui est le centre de stockage et de traitement des mesures, intégrant un grand nombre de protocoles industriels.

3. Modélisation thermique dynamique de l'Amphithéâtre

Le modèle de paroi aux différences finies repose sur l'équation de diffusion de la chaleur unidimensionnelle pour étudier la transmission de la chaleur à travers des parois planes, constituées d'une succession de couches de matériaux. La paroi est discrétisée spatialement en éléments d'égale épaisseur, chacun des plans constituant une surface isotherme. Pour la discrétisation temporelle nous choisissons d'utiliser la méthode d'Euler explicite en partie courante, peu gourmande en temps de calcul, mais non inconditionnellement stable ce qui nécessite de satisfaire un critère de convergence, compromis entre la finesse spatiale et temporelle. Pour l'équation d'échange à la surface d'une paroi, nous considérons que les conditions aux limites à la surface d'une paroi en contact avec une ambiance sont du type Newton. L'obtention du coefficient d'échange superficiel repose sur une hypothèse de linéarisation des échanges par convection et par rayonnement, dans la plage de température qui nous concerne. La surface peut également absorber une partie du rayonnement Courte Longueur d'Onde (CLO) d'origine solaire.

Il s'agit d'une Simulation Dynamique uni-zone. Les conditions hygrothermiques et de teneur en CO₂ dans le local sont supposées uniformes, ce qui revient à considérer un brassage parfait de l'air intérieur. Le modèle vise à calculer les évolutions de la température T, de l'humidité relative HR et de la teneur en CO₂ dans la zone. A ces trois grandeurs correspondent trois équations de bilan, respectivement thermique, hygrique et de CO₂.

- Données d'entrée mesurées :**
- T Température extérieure
 - Hr Humidité relative extérieure
 - Sol Flux solaire horizontal
 - T Température locaux adjacents
 - Pe Puissance électrique consommée
 - T Températures entrée/sortie radiateurs
 - T Température air soufflé
 - Hr Humidité relative air soufflé
 - V Vitesse air soufflé dans la gaine → débit
 - Po Ouverture des portes
 - Pr Présence
 - Lum Luminosité
- Données d'entrée prévisibles :**
- Oc Nombre d'occupants (d'après emploi du temps)
- Grandeurs de sortie mesurées :**
- T Température amphi
 - Hr Humidité relative amphi
 - CO2 Taux de CO₂ amphi

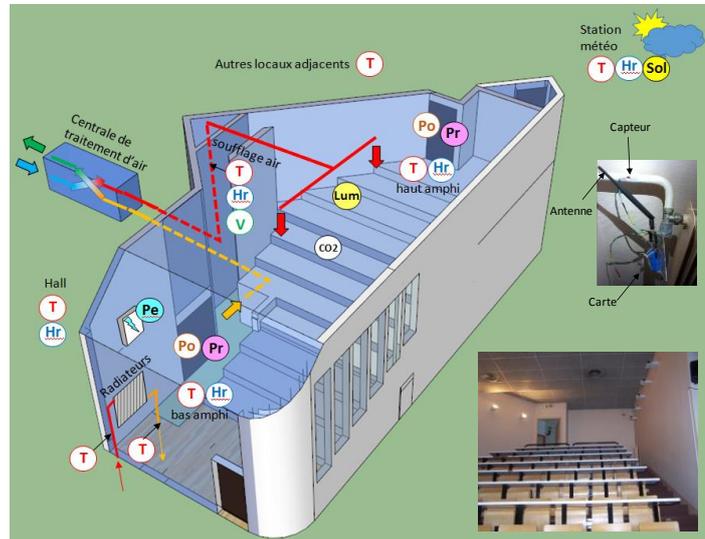


Figure 2. Situation schématique de l'amphithéâtre : données d'entrées mesurées/prévisibles et grandeurs de sortie mesurées.

Pour le bilan thermique de la zone, le système étudié est l'air intérieur, considéré comme un corps de température uniforme. On procède à l'inventaire des flux thermiques échangés par l'air avec la surface interne des parois opaques et vitrées délimitant l'enveloppe, la surface des cloisons intérieures et du mobilier, les ponts thermiques. Interviennent aussi dans le bilan la part convective des apports internes et les apports par introduction d'air. On procède également à la gestion du rayonnement en considérant le flux solaire absorbé par les parois opaques externes et la distribution sur les parois internes du flux solaire pénétrant par les vitrages

Pour le bilan hygrique de la zone, la modélisation néglige les phénomènes de diffusion et de stockage de l'humidité dans les parois, ce qui est justifié étant donné le caractère faiblement hygroscopique des matériaux et revêtements de surface utilisés. Le système étudié est toujours l'air intérieur de la zone dont on effectue un bilan

massique des quantités d'eau « entrant ». On procède à l'inventaire des flux hygriques apportés à l'air que sont les apports massiques internes et ceux dus au renouvellement d'air. Le bilan hygrique permet de calculer directement l'humidité spécifique de l'air intérieur. Les relations entre grandeurs hygrothermiques permettent alors de recalculer l'humidité relative.

Des tests de validation ont été menés à l'échelle de la paroi (sensibilité au maillage et à la discrétisation temporelle pour des régimes transitoires élémentaires tels que créneau ERF et sinus) et de la zone (sur des régimes permanents).

La modélisation proposée doit tenir compte des diverses caractéristiques de la zone étudiée :

- données « géométriques » générales : surfaces et orientation des parois opaques et des vitrages, nature de l'espace adjacent (extérieur, hall, salles de cours, local technique...), volume intérieur ;
- propriétés des parois : composition des couches, propriétés thermiques des matériaux, facteurs solaires des vitrages, états de surface, coefficients de déperditions linéiques des ponts thermiques ;
- les flux associés à l'ensemble des équipements tels que le réseau de soufflage alimenté par la CTA, le chauffage statique (radiateurs), l'éclairage et les processus).

Les données d'entrée du modèle sont mesurées à partir du réseau de capteurs (Fig. 2). Elles comprennent d'une part les conditions aux limites externes à l'enveloppe de la zone (données météorologiques, températures des locaux adjacents), et d'autre part les charges internes mesurables (puissance électrique dissipée) et les apports énergétiques et massiques dus aux équipements de chauffage et de traitement d'air (radiateurs, CTA). Les charges internes dues aux occupants ne pouvant pas être mesurées directement, celles-ci sont déduites du planning d'occupation de la salle et de l'effectif théorique des étudiants (logiciel de planification ADE). Leur calcul s'appuie sur des valeurs conventionnelles d'apports sensibles et latents pour des individus assis. Des capteurs binaires de présence et d'ouverture des portes donnent des informations complémentaires qui peuvent être corrélées à des anomalies constatées par rapport au planning.

4. Résultats du modèle thermique et discussions

Nous confrontons les grandeurs de sortie mesurées dans l'amphithéâtre avec les résultats du modèle. Nous nous focalisons ici sur l'exemple d'une semaine de cours en période hivernale (Fig. 3). Nous notons un comportement globalement satisfaisant du modèle thermique. L'évolution théorique de température ambiante reste comprise entre les courbes mesurées en partie haute et basse de la zone, qui sont écartées de 2 à 3K. Le modèle uni zone ne permet pas de tenir compte de ce phénomène de stratification thermique.

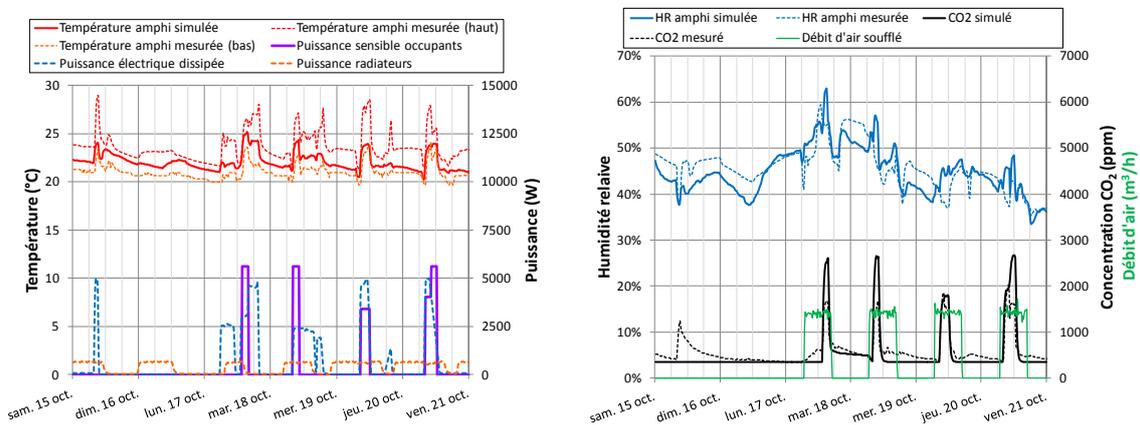


Figure 3. Comparaisons entre résultats de simulation et mesures (à gauche : températures et apports internes, à droite : humidité relative et CO2).

Même si les allures générales des évolutions simulées de l'humidité et du taux de CO2 sont globalement cohérentes par rapport aux mesures, des écarts significatifs sont constatés à des périodes particulières. Une première explication réside dans des différences d'occupation effective par rapport au planning théorique : écarts quantitatifs (étudiants absents), ou temporels (confirmés par les indications des détecteurs de présence et d'ouverture des portes). Pour des séquences de cours se terminant au-delà de l'heure programmée d'arrêt de la ventilation (17h00), la simulation produit des élévations d'humidité et de CO2 très supérieures à la mesure. Les influences sur le renouvellement d'air de la perméabilité et de l'ouverture simultanée ou non des deux portes semblent donc significatives mais restent difficiles à quantifier. Des études de sensibilité et d'analyse inverse sont

à entreprendre pour mieux évaluer l'influence de l'ouverture des portes sur le débit d'air balayant la zone sous l'effet du tirage thermique.

5. Conclusions et perspectives

Ce projet constitue une étape clé pour le développement d'un outil prédictif à même d'optimiser en temps réel la conduite des équipements pour réduire les consommations énergétiques. Les conditions aux limites définissant les données d'entrée sont actuellement circonscrites à la zone de l'amphithéâtre, et le bon comportement de la STD a été prouvé. Le taux d'air neuf n'étant pas mesuré en temps réel, l'implantation de capteurs supplémentaires dans la CTA est envisagée afin de pouvoir réaliser un bilan énergétique complet.

Cette étude a permis à l'équipe d'acquérir une expertise dans la conduite de monitorings de longue durée par capteurs autonomes. L'enjeu pour le fonctionnement pérenne d'un réseau de capteurs sans fil est l'optimisation de l'autonomie énergétique de ces capteurs [ITO 16b], qui passe par une minimisation de la fréquence des mesures et de leur transmission, Il s'agit donc de savoir, en fonction de la situation du bâtiment à un instant donné, quelles mesures seront réellement nécessaires à très court terme. La simulation peut être une aide efficace dans cette prise de décision.

Par ailleurs, cette collaboration entre le GEMH GC&D et XLIM se prolonge également dans le cadre du projet régional MédiaBois, qui porte sur la supervision et l'analyse du comportement hygrothermique d'enveloppes à ossatures bois, en particulier la caractérisation des propriétés et l'influence des lames d'air de bardages en bois : il s'agira donc d'une nouvelle mise à l'épreuve d'un réseau de capteurs in-situ autonome d'une part, et du modèle de simulation thermo-hydrrique dynamique d'autre part.

6. Bibliographie

- [MED 15] MEDJELEKH D., Caractérisation multi-échelles du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2015.
- [ITO 16a] ITOUA ENGOTI F., QUERE R., LALANDE M., Optimisation d'un réseau Zigbee de diagnostic énergétique pour la gestion intelligente d'un bâtiment, 19^{ème} Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-nanoélectronique, Toulouse, 11-13 mai 2016.
- [PRI 09] PRINCE-PIKE A., "Power characterisation of a Zigbee wireless network in a real time monitoring application," Auckland University of Technology, 2009.
- [ITO 17] ITOUA ENGOTI F. & Al, A Low Cost Wireless Sensor System for Monitoring the Air Handling Unit of the University Building, 11th International Conference on Intelligent systems and control (ISCO), Tamilnadu, India, january 2017
- [ALM 14] ALMAS M. S., VANFRETTI L., LOYLUND S., and GJERDE J. O., "Open source SCADA implementation and PMU integration for power system monitoring and control applications," in *2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition*, 2014, pp. 1–5.
- [ITO 16b] ITOUA ENGOTI F., QUERE R., LALANDE M., Co-conception hardware/software pour la minimisation de la consommation d'un nœud de capteur dans un réseau zigbee, Journées Scientifiques URSI Energie et Radiosciences, Rennes, 15-16 mars 2016.