



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/6596>

#### **To cite this version :**

Aurélien HENON, Antoine DUGUE, Philippe LAGIERE, Patrick SEBASTIAN - Modélisation du comportement thermique dynamique des bâtiments : un outil adapté à l'échelle patrimoniale et à la problématique de rénovation. - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository  
Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)



# Modélisation du comportement thermique dynamique des bâtiments : un outil adapté à l'échelle patrimoniale et à la problématique de rénovation.

Aurélien HENON<sup>a</sup>, Antoine DUGUE<sup>a,b</sup>, Philippe LAGIERE<sup>a,b</sup>, Patrick SEBASTIAN<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Nobatek, (auteur correspondant : ahenon@nobatek.com)

Association Nobatek, Esplanade des Arts et Métiers F33405

<sup>b</sup>INSTITUT de MECANIQUE et d'INGENIERIE (I2M),

Esplanade des Arts et Métiers 33405 TALENCE

## Résumé

Nobatek propose un outil développé sous environnement MATLAB, permettant de réaliser des simulations thermiques dynamiques (STD) à échelle patrimoniale. Cet outil, actuellement en phase de validation, intègre un mode de paramétrage simplifié et est spécialement adapté aux problématiques de rénovation de patrimoine.

Reprenant des principes classiques de STD, il se différencie sur plusieurs points : typologie prédéfinie, description simplifiée des caractéristiques géométriques, scénarios d'utilisation des équipements associés à la typologie, distinction entre contraintes et variables de conception.

## Nomenclature

T	Température (K)		<i>Symboles grecques</i>
V	Volume (m <sup>3</sup> )	$\rho$	Masse volumique (kg m <sup>-3</sup> )
$c_{p,air}$	Chaleur spécifique de l'air (J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	$\psi$	Coefficient de pertes linéiques (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
S	Surface (m <sup>2</sup> )	$\phi_{inc}$	Flux solaire incident (W m <sup>-2</sup> )
h	Coefficients d'échange surfaciques aux interfaces solide/air (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	$\alpha$	Coefficient d'absorption
U	Coefficients de transfert thermique (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )		<i>Indices et exposants</i>
P	Puissance (W)	Sol	Relatif au sol
f	Facteur de répartition de flux	Chauff	Relatif au chauffage
A	Gains (solaires ou intérieurs, en W)	Clim	Relatif à la climatisation
		Int	Du côté intérieur
		Ext	Du côté extérieur

## 1. Contexte, objectif, et démarche

### 1.1 De la complexité de la rénovation

En France, dans le secteur du bâtiment, la diminution des consommations passe en partie par la diminution des besoins énergétiques des bâtiments existants ; ceci s'obtient au travers de leur rénovation énergétique.

Les besoins énergétiques d'un bâtiment sont liés à une grande variété de paramètres : conditions météorologiques, métré, forme du bâtiment, orientation, caractéristiques thermo-radiatives de l'enveloppe, présence de ponts thermiques, aménagement intérieur, présence d'équipements électriques, comportement des usagers,...

Un programme d'appel d'offres pour une construction neuve fait généralement intervenir un très grand nombre de variables de conception et de contraintes, issues :

- du programme de la maîtrise d'ouvrage (occupation, emprise au sol...),
- des règles d'urbanisme, voire du Plan Local d'Urbanisme (PLU) [3] (influençant les solutions de traitement des enveloppes),
- de la réglementation thermique (RT 2012),
- d'une éventuelle volonté de certification environnementale impliquant par exemple des variables de décision environnementales et sanitaires répertoriées dans les référentiels HQE® [4], classées en 14 cibles.

Dans le cas de la réhabilitation la marge de manœuvre des concepteurs, définie par l'espace des valeurs que peuvent prendre les variables de conception (ou variables de décision), est restreinte. Les contraintes sont plus nombreuses que dans le cas de la construction neuve, et ceci entraîne une limitation des objectifs de performance à atteindre.

L'étude des possibilités d'amélioration de la performance énergétique d'un parc de bâtiments existants doit intégrer des éléments d'analyse physique (thermique, mécanique), des contraintes réglementaires et/ou environnementales, des problématiques d'échelle (patrimoine), des contraintes d'évolution temporelle du projet de rénovation (ex : plan de financement). L'étude en question doit faire apparaître une démarche de conception intégrée permettant d'optimiser les choix de conception liés à la réhabilitation.

### 1.2 Les caractéristiques de la rénovation

Le problème de la réhabilitation énergétique présente généralement certains invariants. La littérature et l'expérience montrent que les solutions de réhabilitation énergétique consistent essentiellement à intervenir sur les éléments décrits ci-dessous [5]:

- Essentiels d'un point de vue technique et/ou réglementaire (imposé):
  - Isolation
  - Remplacement de fenêtres (menuiseries + vitrage)
  - Modernisation du système de chauffage
- Permettant des économies de coût de fonctionnement plus importantes :
  - Ventilation contrôlée avec récupération d'énergie
  - Mesures liées à l'utilisation d'énergies renouvelables
  - Régulation de températures

Il s'agit d'éléments récurrents qui révèlent que les efforts en matière d'économie d'énergie dans la majorité des pays européens reposent en priorité sur la diminution des besoins de chauffage. Toutefois, la liste présentée ci-dessus ne peut être exhaustive et dépend notamment de l'usage des bâtiments (logement, tertiaire,...) et du climat considéré, qui oriente la problématique vers la demande en chaud ou en froid.

### 1.3 Objectif et méthode

L'objectif d'une série de travaux de recherche et développement engagés par Nobatek et l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie est d'élaborer un outil d'aide à la conception en matière de rénovation énergétique patrimoniale, dont le travail présenté ici constitue une des premières étapes.

La méthode générale est la suivante, plusieurs solutions sont explorées à partir d'un état de référence. Celui-ci (bâtiments existants, équipements et usages associé) correspond à un point de fonctionnement dont il s'agit d'étudier le voisinage. L'analyse du voisinage permet de quantifier les gains de performance et de robustesse liés à des choix de conception/rénovation. Ceux-ci correspondent à des concepts (types d'enveloppes ou de systèmes énergétiques) préalablement définis et modélisés. L'exploration doit hiérarchiser les variables de conception du problème et le processus d'exploration doit être séquentiel au regard de cette hiérarchie.

La première étape d'élaboration de l'outil d'aide à la conception, objet de la présente communication, consiste en le développement d'un modèle physique thermique dédié. Ce modèle doit permettre de réaliser la simulation thermique dynamique du parc de bâtiments étudié, en différenciant contraintes et variables de conception propres au contexte de la réhabilitation énergétique. Il doit aussi intégrer une méthode de calcul d'indicateurs de performances énergétiques ; certains de ces indicateurs pourront servir de comparaison à des valeurs de référence (réglementaires ou non), d'autres pourront servir par la suite aux calculs de variables d'interprétation supplémentaires, économiques (ex : factures énergétiques) ou environnementales (ex : ACV).

## 2. Modèle développé

### 2.1 Généralités

Sera désignée par la suite comme « modèle » la partie de l'outil développé sous environnement MATLAB qui concerne les aspects thermiques dynamiques du problème traité.

La fonction du modèle développé est de permettre la simulation thermique dynamique (STD) d'un ensemble de bâtiments relativement homogènes par leur mode de construction, pour des conditions météorologiques correspondant à une année de référence. Cette STD fournit une évaluation des performances énergétiques globales annuelles et dynamiques, pour l'ensemble des bâtiments, pour chaque bâtiment, et pour chaque zone thermique. Cette évaluation se fait en fonction des caractéristiques géométriques du bâtiment, des données physiques décrivant son enveloppe, mais aussi en fonction du renseignement des équipements utilisés et du comportement des occupants. La description rapide et précise du comportement des bâtiments est ainsi rendue possible sous leur forme existante, mais tout aussi facilement la projection de leurs comportements selon les différents scénarios de réhabilitation.

La spécificité de l'outil est de permettre d'effectuer des simulations très rapidement, en simplifiant certains aspects de paramétrage (ex : description de la volumétrie), en réduisant le

choix des variables aux seuls paramètres concernés par la rénovation, et grâce à une description typologique des équipements et des usages de chaque bâtiment.

L'outil se démarque par la rapidité de calcul comparativement à des plateformes de simulation comparables sur le marché, et surtout par la possibilité d'itérer les calculs de manière automatique à partir d'un fichier d'entrée définissant les paramètres des simulations à réaliser.

## 2.2 Entrées et sorties

Les principales contraintes prises en compte en entrée de modèle sont les suivantes :

- Morphologie (emprises au sol, surfaces d'enveloppe par orientation, éloignement),
- Structure des bâtiments (bois, béton, brique, acier),
- Description des parois,
- Scénarios d'occupation des bâtiments,
- Scénarios d'usage des équipements,
- Milieu extérieur : données météorologiques (température de l'air, rayonnement solaire incident) et de voisinage (ombres portées),
- Contraintes de confort (ex : scénarios de températures de consigne),
- Débits de ventilation minimaux à respecter,

Les principales variables de conception prises en compte ici sont :

- Les choix de modes d'isolation (intérieur ou extérieur, matériau, épaisseur), pour chaque type de paroi considéré (toitures, façades, planchers),
- Le choix d'équipements spécifiques de ventilation (ex : utilisation ou non d'une VMC double-flux, période de l'année où elle est utilisée en by-pass),
- Choix de traitement des ponts thermiques,
- Choix de nouveaux types de fenêtres et de cadres.

Les principales sorties d'observation et d'interprétation de modèle sont :

- Besoins annuels en chauffage et refroidissement pour respecter les températures de consigne,
- Températures d'air intérieur à chaque pas de temps (ex : chaque heure pour une année complète), pour chaque bâtiment et pour chaque zone thermique (ex : bureau ou couloir),
- Puissances d'appel à chaque pas de temps à fournir (en chaud ou en froid) pour respecter les températures de consigne, pour chaque bâtiment et pour chaque zone thermique,
- Certains indicateurs de performance d'enveloppe (ex : Ubat)

A noter que ces sorties peuvent servir pour la plupart au calcul d'autres variables d'interprétation (ex : puissance minimale pour assurer 90 % de la période de chauffage, consommation cumulée).

On rappelle que l'outil développé, même lorsqu'il permet de calculer des valeurs définies de façon semblable à la réglementation, est un outil d'aide à la conception et qu'il n'a pas vocation à être un outil réglementaire.

## 2.3 Hypothèses et principes

Plusieurs outils, tels que la suite Pleiades+COMFIE [1] ou Energy Plus [2], permettent de simuler la demande dynamique de bâtiments, parfois en différenciant plusieurs zones

thermiques. Ils comprennent une modélisation avancée de l'ensemble des phénomènes thermiques transitoires mis en jeu ; ils intègrent également des scénarios détaillés d'occupation et d'utilisation d'équipements.

Ces outils ne sont toutefois pas spécialement dédiés à la problématique de simulation de bâti ancien, pour laquelle les contraintes et la particularité des possibilités de rénovation rendent parfois difficile la mise en œuvre de la recherche d'amélioration de la performance énergétique.

Le modèle physique présenté ici se base sur des bilans thermiques réalisés à chaque pas de temps en chaque nœud de calcul. L'ensemble des bâtiments à étudier est modélisé de la manière suivante (figure 1) :

- une description physique est définie pour chaque bâtiment, chaque bâtiment correspondant à une classe de la typologie,
- pour chaque bâtiment plusieurs zones thermiques sont définies, chacune correspondant à un usage différent (ex : bureau, salle de réunion, couloirs, etc...) et dont le nombre et la description sont choisis par le modélisateur à partir des éléments définis par la typologie.
- à chaque zone thermique sont associés trois nœuds et à chaque nœud correspond un bilan de flux et une température à calculer.

On remarque que seuls 2 des 3 nœuds par zone thermique concernent les parois, la modélisation de l'enveloppe permet de prendre en compte autant de couches de matériaux que l'on souhaite en intégrant leurs propriétés physiques (épaisseur, conductivité, capacité), prenant en compte autant de couches de matériaux que l'on souhaite en les réduisant selon le modèle proposé par BOUYER [6] en une paroi équivalente ayant des propriétés dynamiques équivalentes (deux capacités, à l'extérieur et à l'intérieur, et une résistance).

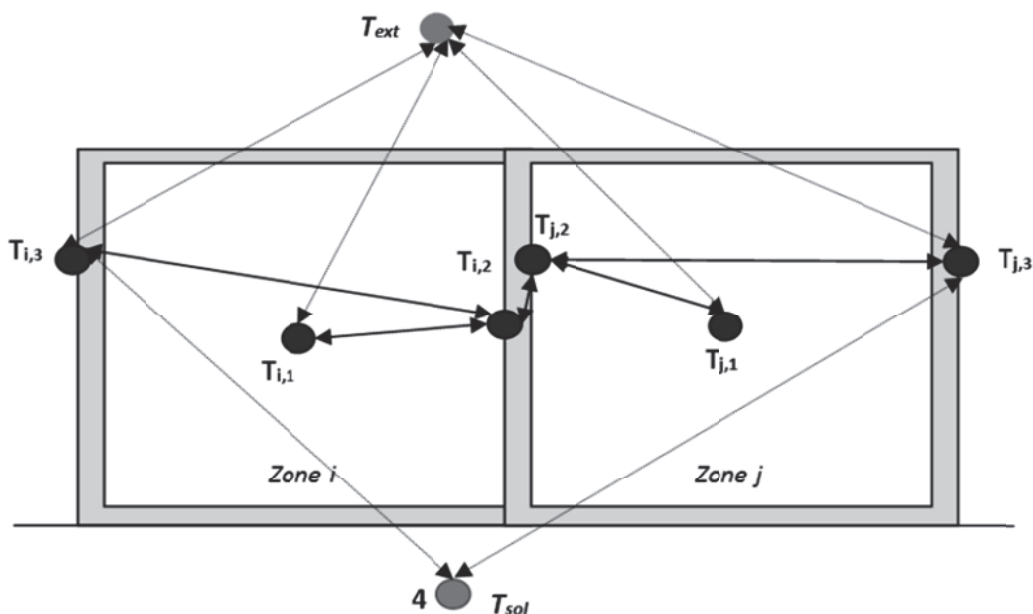


Figure 1 : modélisation des bâtiments, les points noirs sont les températures de nœud à calculer, les points gris sont les températures extérieures (air, et sol)

Le contenu théorique du modèle est proche de celui d'outils STD couramment utilisés pour la STD de bâtiments individuels (ex : COMFIE/PLEIADES). Toutefois, l'outil de STD de patrimoine se distingue essentiellement par le fait qu'il permet de :

- simuler non pas un seul bâtiment, mais un parc entier, en simplifiant le paramétrage par l'intégration dans le modèle de typologies et de scénarios d'utilisation prédéfinis (ex : type administratif, type résidentiel collectif, etc...). La réduction de paramètres d'entrée par le travail sur la typologie limite le nombre de données à récupérer et épargne ainsi un travail fastidieux sur des points peu impactants. La simplification du paramétrage pour ce type de modèles et cette échelle d'étude est justifiée et validée dans d'autres études (on notera par exemple HENON et al, 2011 [7], dans un contexte toutefois différent).

- rendre possible le calcul des températures intérieures et des puissances d'appel, à l'échelle du bâtiment comme à celle du parc, pour toute situation et tout instant choisis.

Si on considère  $i$  l'indice de la zone thermique courante et les indices  $j$  ceux des zones voisines, les bilans thermiques aux 3 nœuds de la zone thermique  $i$  s'écrivent (DUMBLIAUSKAITE, 2011, [8]) :

- **Nœud<sub>i,1</sub>**

$$\begin{aligned}
 & (\rho c_{p,air} V)_{i,1} \frac{dT_{i,1}}{dt} \\
 = & - \left( \sum Sh_{int} \right) (T_{i,1} - T_{i,2}) - \left[ (\rho c_p)_{air} \dot{V} + \sum_{fenetres} SU + \sum \psi L \right] (T_{i,1} - T_{ext}) + P_{chauff,i} - P_{clim,i} + f \cdot (A_{sol,i} \\
 & + A_{int,i})
 \end{aligned}$$

- **Nœud<sub>i,2</sub>**

$$\begin{aligned}
 & \sum_{parois} (C_{int} S)_i \frac{dT_{i,2}}{dt} \\
 = & - \sum Sh_{int} (T_{i,2} - T_{i,1}) - \sum_j SU_{paroi,j} (T_{i,2} - T_{j,2}) - \sum SU_{paroi,ext} (T_{i,2} - T_{i,3}) + (1 - f) \cdot (A_{sol,i} + A_{int,i})
 \end{aligned}$$

- **Nœud<sub>i,3</sub>**

$$\begin{aligned}
 & \sum_{parois} (C_{ext} S)_i \frac{dT_{i,3}}{dt} \\
 = & - \sum Sh_{ext,eq} (T_{i,3} - T_{ext}) - \sum SU_{paroi,ext} (T_{i,3} - T_{i,2}) - S_{plancherext} U_{sol} (T_{i,3} - T_{sol}) + \left( \sum \alpha S_{ext} \phi_{inc} \right)_i
 \end{aligned}$$

A partir des équations écrites précédemment, il est possible de générer les matrices A et B, qui sont telles que pour N zones thermiques :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ \dots \\ T_{N1} \\ T_{N2} \\ T_{N3} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ \dots \\ T_{N1} \\ T_{N2} \\ T_{N3} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} P_{chauff,1} - P_{clim,1} + f \cdot (A_{sol,1} + A_{int,1}) \\ (1 - f) \cdot (A_{sol,1} + A_{int,1}) \\ (\sum \alpha S_{ext} \phi_{inc})_1 \\ \dots \\ P_{chauff,N} - P_{clim,N} + f \cdot (A_{sol,N} + A_{int,N}) \\ (1 - f) \cdot (A_{sol,N} + A_{int,N}) \\ (\sum \alpha S_{ext} \phi_{inc})_N \\ T_{ext} \\ T_{sol} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \frac{d}{dt} T = AT + BU$$

Le vecteur T est de longueur 3N tandis que le vecteur U est de longueur 3N+2.

Les équations (différentielles linéaires du premier degré) sont résolues selon la méthode des différences finies par un schéma centré (ou de Crank-Nicholson). Celui-ci, a priori plus coûteux en temps de calcul, est également plus précis et plus stable que les schémas explicites ou implicites. Le schéma centré est ici retenu car dans notre cas le faible nombre de nœud garantit la rapidité de calcul.

### 3. Cas d'application

Le modèle développé a déjà été partiellement validé par comparaison avec d'autres modèles sur des cas-tests. Il est actuellement en phase de validation par comparaison à des résultats issus de l'expérimentation. Cette section présente quelques exemples de résultats obtenus sur un cas théorique de rénovation énergétique d'un ensemble de 6 bâtiments présentant des modes de construction similaires, mais de taille, forme, orientation, occupation et usages divers, tels qu'on peut en trouver sur le campus Talence-Pessac-Gradignan. Deux classes de bâtiments apparaissent ici, administratif et résidentiel ; ces classes proviennent de la typologie décrite dans le modèle.

Deux séries de simulations sont réalisées, une pour l'état existant, l'autre pour la rénovation. Elles sont réalisées sur une période d'une année, avec un pas temps d'une heure. Le temps de calcul apparaît comme très raisonnable (moins de 5 secondes par bâtiment pour une configuration PC moyenne : double-core 2.53 GHz, 4.00 Go de RAM).

Bâtiment	1		2		3		4		5		6	
Etat (existant=E, rénové=R)	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R
Besoin annuel (kWh/m²)	47	12	138	19	44	9.4	119	21	50	11	49	13
Puissance max (kW)	842	745	676	522	1990	1710	473	363	1030	890	1200	1060
Ubat (W/K.m²env)	0.80	0.54	0.78	0.53	0.85	0.68	0.51	0.29	0.78	0.62	0.85	0.68

Table 1. Exemple de résultats pour le parc de 6 bâtiments simulés pour une année météorologique de référence à Bordeaux



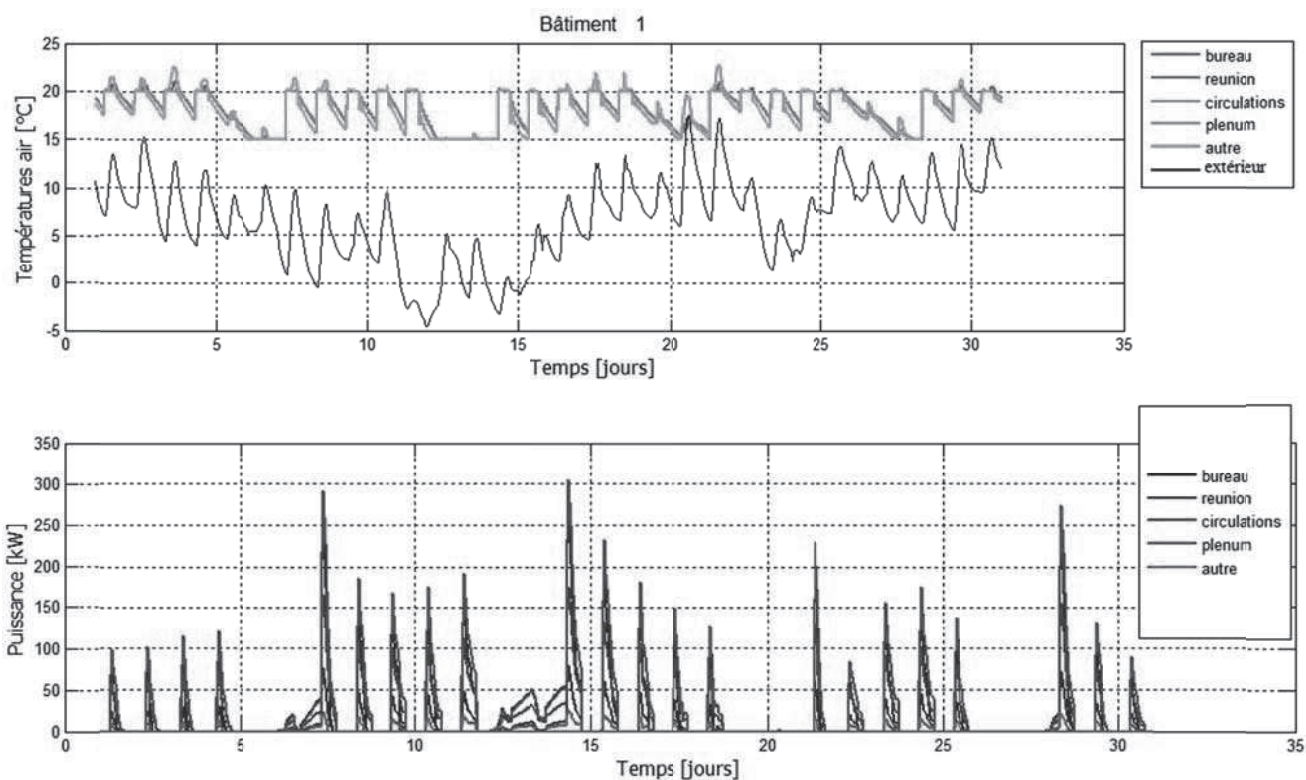


Figure 2 : Evolution des températures intérieures et des appels de puissance de chauffage, pendant un mois de janvier de référence, pour les zones thermiques du bâtiment 1 existant.

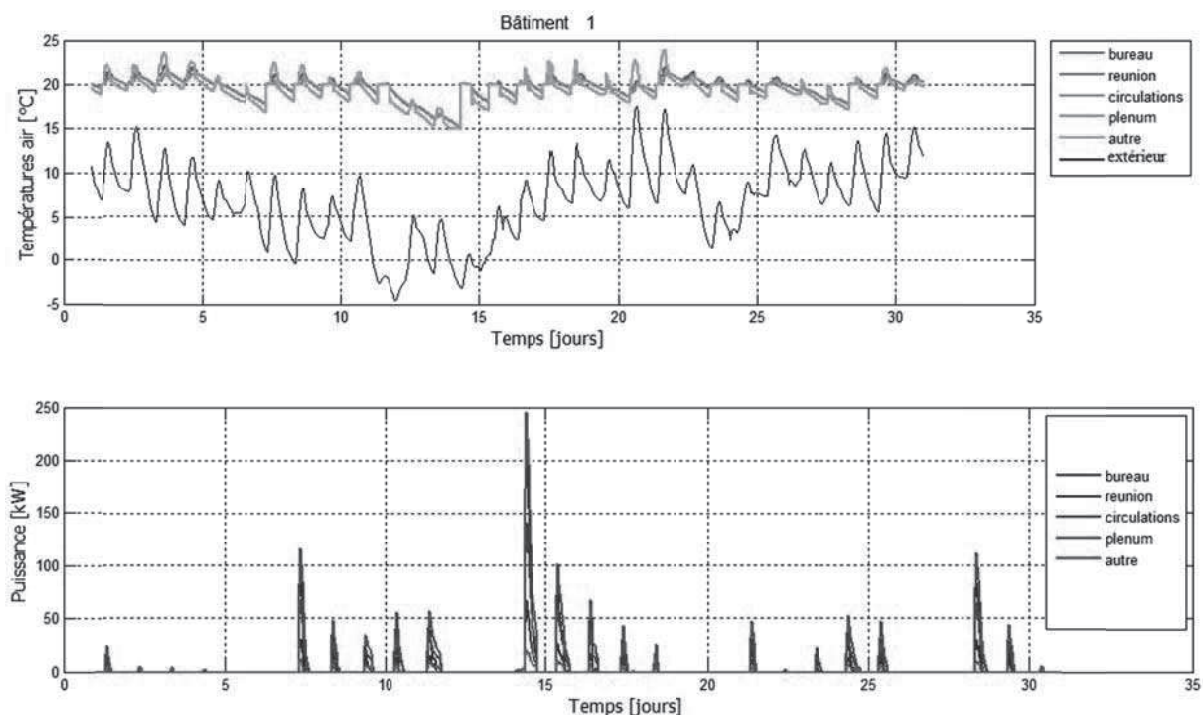


Figure 3 : Evolution des températures intérieures et des puissances de chauffage appelées, pendant un mois de janvier de référence, pour les zones thermiques du bâtiment 1 rénové.

Le tableau 1 et les figures 2 et 3 donnent un aperçu des résultats quantitatifs et qualitatifs qu'il est possible d'obtenir pour le parc de bâtiments étudiés. Ils permettent notamment d'apprécier

l'amélioration des performances énergétiques globales et dynamiques obtenues après la prise en compte d'un scénario de rénovation.

#### 4. Perspectives

Les prochaines étapes de développement du modèle, outre celles concernant les compléments de validation (validation par la méthode BESTSET), consisteront à interpréter en termes économiques et environnementaux les indicateurs de performance énergétique. Il sera également question d'implémenter une méthode d'amélioration des scénarios de rénovation proposés.

#### 5. Références

- [1] PEUPORTIER B., BLANC-SOMMEREUX I., 1994. COMFIE, passive solar design tool for multizone buildings: Manuel des utilisateurs, Version 3.3, Centre d'énergétique, Ecole des Mines de Paris (in French).
- [2] LBNL, Energy Plus Manual, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [3] CASSIN, I., 2007, Le PLU, 3e édition, Le Moniteur Editions.
- [4] CERTIVEA (CSTB) et Association HQE®, Référentiel pour la qualité environnementale des bâtiments, 2008. Disponible sur <http://www.certivea.fr/docs.php?certif=HQE>
- [5] GONZALO, R., HABERMANN, K.J., 2006, Architecture et Efficacité Energétique : Principes De Conception Et De Construction, Ed. Birkhauser
- [6] BOUYER J, INARD C, MUSY M (2011) Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings* 43:1549-1559.
- [7] HENON A, MESTAYER PG, GROLEAU D, VOOGT J (2011) High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign, *Building and Environment* 46:1747-1764.
- [8] DUMBLIAUSKAITE Monika, 2011. Simulation thermique dynamique d'un bâtiment. Communication professionnelle interne.