

Proposition d'outil de modélisation et de simulation énergétique du bâtiment

Jaurès RATSIMBAZAFIHARIVOLA*, Heritina RAZAFIMANDIMBY,
Hery Tiana RAKOTONDAMIARANA et Andrianelison RAKOTOMAHEVITRA

*Université d'Antananarivo, Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME),
BP 566 Antananarivo 101, Madagascar*

* Correspondance, courriel : anproba@gmail.com

Résumé

Cet article porte sur la mise en place d'un outil de modélisation et de simulation énergétique du bâtiment, nommé ATOMO, afin de prédire son comportement dynamique ainsi que sa consommation d'énergie de manière plus simple et plus rapide. Dans le présent travail, le cœur de l'outil est la modélisation dynamique du bâtiment et se base essentiellement sur l'utilisation des métamodèles. En effet, l'analyse des effets des facteurs peut être utilisée afin d'obtenir un métamodèle associé à un modèle mathématique complexe. En revanche, la modélisation statique des données architecturales du bâtiment est obtenue via des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) et par la suite interprétée par l'outil ATOMO. L'outil de simulation dont nous avons mis en place a été appliqué pour un bâtiment monozone et suivi d'une confrontation avec des logiciels comme KoZibu.

Mots-clés : *ATOMO, métamodèle, outils de simulation, modélisation dynamique.*

Abstract

Proposal for a building Energy Modeling and Simulation Tool

This article focuses on the implementation of a building energy modeling and simulation tool, called ATOMO, to predict its dynamic behavior and energy consumption in a simpler and faster way. In the present work, the core of the tool is the dynamic modeling of the building and is essentially based on the use of metamodels. Indeed, the analysis of the effects of factors can be used to obtain a metamodel associated with a complex mathematical model. On the other hand, the static modeling of architectural data of the building is obtained via computer-assisted design (CAD) software and subsequently interpreted by the ATOMO tool. The simulation tool we put in place was applied for a monozone building and followed by a confrontation with software like KoZibu.

Keywords : *ATOMO, metamodel, simulation tools, dynamic modeling.*

Nomenclature

c_j	:	<i>Capacité thermique massique</i>
CAO	:	<i>Conception Assistée par Ordinateur</i>
CLO	:	<i>Courte Longueur d'Onde</i>
GLO	:	<i>Grande Longueur d'Onde</i>
ρ	:	<i>Masse volumique</i>
STL	:	<i>Standard Tessellation Langage</i>
T_i	:	<i>Température (°C) de l'élément i</i>
T_{air}	:	<i>Température moyenne (°C) de l'air intérieur</i>
$T_{façade}$:	<i>Température moyenne (°C) des façades</i>
$T_{plancher}$:	<i>Température moyenne (°C) du plancher</i>
$T_{vitrage}$:	<i>Température moyenne (°C) des vitrages</i>

1. Introduction

La modélisation de l'information du bâtiment est un outil de soutien à la visualisation et à la gestion de sa performance [1-4]. A cet effet certain nombre d'outils ont été développées non seulement afin de simuler et de prévoir le comportement thermique, optique des bâtiments [5-11] mais aussi et surtout dans le but d'obtenir une estimation de sa consommation énergétique durant une période donnée [12]. Chacun des outils conçus par les modélisateurs a sa spécificité et se différencie ainsi des autres par quelques points essentiels [13]. L'intérêt de ce travail est donc le développement et la proposition d'un outil de modélisation et de simulation énergétique du bâtiment : ATOMO. D'une part on modélise l'architecture du bâtiment dans un logiciel de CAO, l'outil ATOMO récupère ainsi le fichier exporté par ce dernier et l'interprète afin de pouvoir en traduire les données architecturales. Par la suite le fichier importé sera affiché dans son écran de visualisation graphique.

2. Méthodologie

2-1. Modélisation de l'architecture du bâtiment

La modélisation de l'architecture du bâtiment se base essentiellement sur l'utilisation des logiciels de CAO (Archicad, Catia, SweetHome3d,...). Cette dernière sera par la suite exporter au format STL ou OBJ pour pouvoir être interprété et affiché dans l'outil. La **Figure 1** montre l'architecture d'un bâtiment test mis en place sous le logiciel Sweet Home 3d [14], tandis que la **Figure 2** présente l'aspect du bâtiment test après son importation dans MeshLab [15-16].

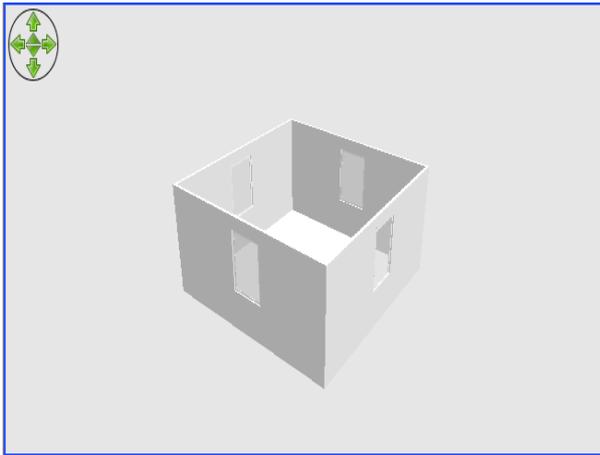


Figure 1 : Architecture (vue 3d) du bâtiment test sous SweetHome 3d

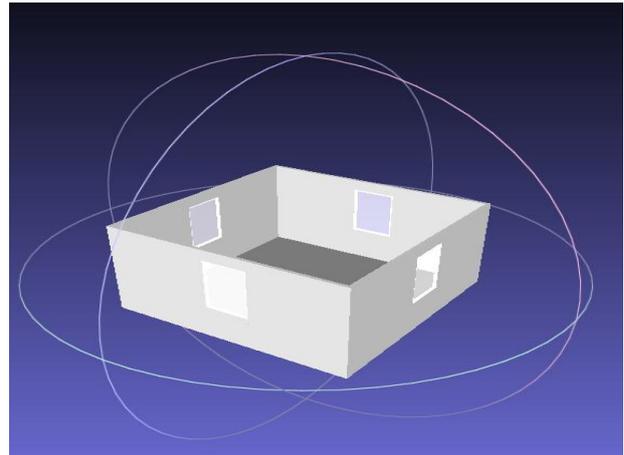


Figure 2 : Architecture (vue 3d) du bâtiment test dans MeshLab

2-2. Modélisation dynamique du bâtiment

2-2-1. Métamodèle et analyse de sensibilité

En évaluant l'impact des paramètres d'entrée du bâtiment, il est possible de mettre en place un modèle mathématique simplifié à partir d'un modèle complet de ce dernier. Moyennant le métamodèle [17] ainsi obtenu, il peut s'en suivre la mise en place d'un outil interfacé modélisant et simulant le comportement du bâtiment. Dans cette étude, les données utilisées pour la procédure de mise en place du métamodèle par analyse de sensibilité paramétrique d'un modèle mathématique complet du bâtiment ont été obtenues par simulation dans le logiciel Matlab [18] via plus précisément l'outil GoSAT [19]. Le métamodèle ainsi obtenu est une fonction mathématique :

- approximant les réponses du modèle étudié,
- de coût négligeable,
- permettant de prédire avec une bonne précision de nouvelles réponses

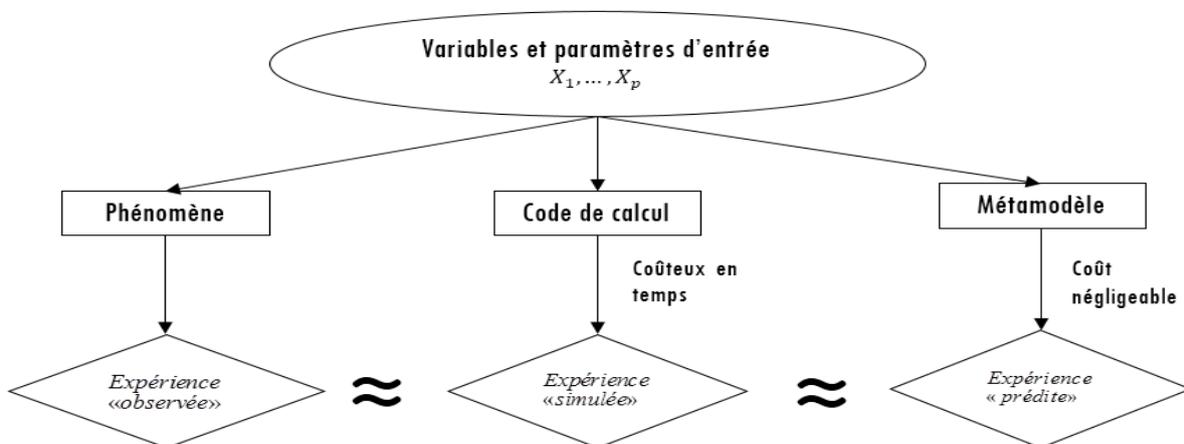


Figure 3 : Un outil multifonctionnel : le métamodèle [17]

2-2-2. Les Hypothèses de modélisation [20]

2-2-2-1. Échanges radiatifs CLO extérieurs

2-2-2-1-1. Rayonnement solaire absorbé par les surfaces extérieures

Pour caractériser les échanges radiatifs CLO extérieurs il est nécessaire de définir les différentes composantes du rayonnement solaire qui sont liées par la **Relation** :

$$H_{g,hor}(t) = H_{dif,hor}(t) + H_{dir,hor}(t) \cdot \cos(\theta_z(t)) \quad (1)$$

$H_{g,hor}(t)$ étant le rayonnement solaire global horizontal, $H_{dif,hor}(t)$ le rayonnement solaire diffus horizontal, $H_{dir,hor}(t)$ le rayonnement solaire direct normal et $\theta_z(t)$ l'angle d'incidence zénithal.

Le rayonnement solaire total absorbé par la surface extérieure i , $\varphi_{CLO,ext,i}(t)$ est défini par :

$$\varphi_{CLO,ext,i}(t) = \alpha_{ext,i} S_i (H_{dir,ext,i}(t) + H_{dif,ext,i}(t)) \quad (2)$$

$\alpha_{ext,i}$ étant l'absorptivité solaire hémisphérique de la surface extérieure i , S_i l'aire de la surface i , $H_{dir,ext,i}(t)$ le rayonnement solaire direct arrivant sur la surface extérieure i :

$$H_{dir,ext,i}(t) = \cos(\theta_{s,ext,i}(t)) H_{dir,nor}(t) \quad (3)$$

$\theta_{s,ext,i}(t)$ étant l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct sur la surface extérieure i , $H_{dif,ext,i}(t)$ le rayonnement solaire diffus arrivant sur la surface extérieure i :

$$H_{dif,ext,i}(t) = H_{dif,sol,ext,i}(t) + H_{dif,ciel,ext,i}(t) \quad (4)$$

$H_{dif,sol,ext,i}(t)$ étant le rayonnement solaire diffus atteignant la surface après réflexion par des surfaces environnantes.

En faisant l'hypothèse que seul le sol peut refléter une partie du rayonnement solaire direct et que le rayonnement est isotrope, on a :

$$H_{dif,sol,ext,i}(t) = \rho_s \left[\frac{1 - \cos(\theta_i)}{2} \right] H_{g,hor}(t) \quad (5)$$

ρ_s étant l'albédo, θ_i l'angle d'inclinaison de la surface extérieure i et $H_{dif,ciel,ext,i}(t)$ le rayonnement solaire diffus atteignant directement la surface i .

En faisant l'hypothèse que le rayonnement solaire diffus est isotrope, on a :

$$H_{dif,ciel,ext,i}(t) = \rho_s \left[\frac{1 - \cos(\theta_i)}{2} \right] H_{dif,hor}(t) \quad (6)$$

2-2-2-1-2. Rayonnement solaire transmis par la fenêtre et prise en compte du masque solaire

Il existe un masque solaire proche dû au retrait de la fenêtre par rapport au nu extérieur de la paroi. Pour en tenir compte, un facteur d'ombre f_{omb} doit être calculé. Nous supposons qu'il est égal à 1 pour la partie diffuse du rayonnement et qu'il est défini pour la partie direct par :

$$f_{omb} = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{a}{d+h}\right)}{\pi - \theta_i} \tag{7}$$

a étant l'avancée du masque, d le débord du masque et h la hauteur de la surface du vitrage.

En se plaçant dans les mêmes hypothèses que pour les parois opaques, on suppose que le rayonnement solaire net transmis par le vitrage est défini par :

$$\varphi_{CLO,ext,v}(t) = \tau_v S_v (H_{dir,ext,v}(t) + H_{dif,ext,v}(t)) \tag{8}$$

τ_v étant la transmissivité solaire hémisphérique du vitrage, S_v l'aire de la surface du vitrage, $H_{dir,ext,v}(t)$ le rayonnement solaire direct arrivant sur le vitrage.

En se plaçant dans les mêmes hypothèses que pour les parois opaques, on suppose que le rayonnement solaire net transmis par le vitrage est défini par :

$$H_{dif,ext,v}(t) = H_{dif,sol,ext,v}(t) + H_{dif,ciel,ext,v}(t) \tag{9}$$

$H_{dif,sol,ext,v}(t)$ étant le rayonnement solaire diffus atteignant le vitrage après réflexion par des surfaces environnantes.

En faisant l'hypothèse que seul le sol peut refléter une partie du rayonnement solaire direct et que le rayonnement est isotrope, on a :

$$H_{dif,ciel,ext,v}(t) = \rho_s \left[\frac{1 - \cos(v)}{2} \right] H_{dif,hor}(t) \tag{10}$$

ρ_s étant l'albédo, v l'angle d'inclinaison du vitrage i , $H_{dif,ciel,ext,v}(t)$ le rayonnement solaire diffus atteignant directement le vitrage.

En faisant l'hypothèse que le rayonnement solaire diffus est isotrope, on a :

$$H_{dif,ciel,ext,v}(t) = \rho_s \left[\frac{1 - \cos(\theta_v)}{2} \right] H_{dif,hor}(t) \tag{11}$$

2-2-2-2. Les échanges radiatifs GLO extérieurs

Pour modéliser les échanges GLO extérieurs avec le ciel et l'environnement, on suppose que la surface extérieure se comporte comme un corps gris et diffus et qu'elle n'échange avec le ciel et l'environnement qu'en fonction de son inclinaison et de son émissivité GLO. Enfin, le ciel et l'environnement sont supposés être des corps noirs isothermes. Ainsi, le flux radiatif net échangé entre la surface extérieure i et l'extérieur $\varphi_{GLO,ext,i}(t)$ est calculé selon :

$$\varphi_{GLO,ext,i}(t) = S_i \sigma \varepsilon_{ext,i} F_{ciel,i} (T_{s,ext,i}^4(t) - T_{ciel}^4(t)) + S_i \sigma \varepsilon_{ext,i} F_{env,i} (T_{s,ext,i}^4(t) - T_{ext}^4(t)) \quad (12)$$

S_i étant l'aire de la surface i , σ la constante de Stefan-Boltzman, $\varepsilon_{ext,i}$ l'émissivité totale hémisphérique extérieure de la surface i , $F_{ciel,i}$ le facteur de forme surface-ciel associé à la surface i :

$$F_{ciel,i} = \frac{\pi - \theta_i}{\theta_i} \quad (13)$$

θ_i étant l'angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale et $F_{env,i}$ le facteur de forme surface-environnement associé à la surface i pour lequel on a :

$$F_{env,i} = 1 - F_{ciel,i} \quad (14)$$

$T_{s,ext,i}(t)$ étant la température de surface extérieure de la surface, $T_{ciel}(t)$ la température de ciel et $T_{ext}(t)$ la température de l'air extérieur en supposant que l'environnement est à la température de l'air extérieur.

2-2-2-3. Les échanges convectifs extérieurs

Les échanges convectifs extérieurs entre la surface extérieure et l'air sont représentés par la loi de Newton :

$$\varphi_{conv,ext,i}(t) = h_{conv,ext,i}(t) S_i (T_{s,ext,i}(t) - T_{ext}(t)) \quad (15)$$

$h_{conv,ext,i}(t)$ étant le coefficient d'échanges convectifs entre la paroi et l'air qu'on suppose modélisé par une corrélation de la forme :

$$h_{conv,ext,i}(t) = a \cdot v^n(t) + b \quad (16)$$

$v(t)$ étant la vitesse du vent, tandis que a, b et n sont coefficients de corrélations fournis par la littérature [21]. Dans le modèle utilisé les valeurs suivantes ont été choisies :

- $n = 1$
- $a = 3,06$ et $b = 5,44$ lorsque la surface est dite « au vent » (angle d'incidence entre la normale à la paroi et la direction du vent est comprise entre -90° et $+90^\circ$)
- $a = 0,34$ et $b = 7,99$ lorsque la surface est dite « sous le vent » (les autres cas)

2-2-2-4. Les échanges radiatifs CLO intérieurs

On suppose que la totalité du rayonnement solaire est reçue par le plancher puis réfléchi vers les autres parois. Le rayonnement solaire absorbé par le plancher est calculé selon :

$$\varphi_{CLO,abs,pl}(t) = \alpha_{pl} \varphi_{CLO,ext,v}(t) \tag{17}$$

α_{pl} étant l'absorptivité solaire hémisphérique du plancher

Le rayonnement solaire net réfléchi par le plancher est défini par (seule la première réflexion est prise en compte) :

$$\varphi_{CLO,ref,pl}(t) = (1 - \alpha_{pl}) \varphi_{CLO,ext,v}(t) \tag{18}$$

Le rayonnement solaire absorbé ou retransmis vers l'extérieur (pour un vitrage) pour les surfaces autres que le plancher est caractérisé par :

$$\varphi_{CLO,int,i}(t) = \varphi_{CLO,ref,pl}(t) \frac{\alpha_{int,i} + \tau_i}{\sum_{k=1}^{N_i} S_k (\alpha_{int,k} + \tau_i)} \tag{19}$$

$\alpha_{int,i}$ étant l'absorptivité solaire hémisphérique de la surface intérieure i , τ_i la transmissivité solaire hémisphérique du vitrage i , N_i le nombre de surfaces autres que le plancher.

2-2-2-5. Les échanges radiatifs GLO intérieurs

Pour modéliser les échanges radiatifs GLO intérieurs, la cellule test peut être vue comme une cavité fermée, délimitée par surfaces planes isothermes. On suppose que les surfaces opaques se comportent comme des corps gris et diffus dans l'infrarouge. De plus, l'air au sein de la cellule est considéré comme un milieu non participant (complètement transparent aux flux rayonnés par les surfaces). Dans ce cas, la méthode des radiosités peut être utilisée pour définir le flux radiatif net sur la surface $\varphi_{GLO,int,i}(t)$ [22] :

$$\varphi_{GLO,int,i}(t) = S_i \sum_{j=1}^N F_{ij} (J_i(t) - J_j(t)) \tag{20}$$

S_i étant l'aire de la surface i , F_{ij} le facteur de forme entre les surfaces i et j qui correspond à la part du flux rayonné par la surface i qui va être intercepté par j :

$$F_{ij} = \frac{1}{S_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi d_{ij}^2} dS_i dS_j \tag{21}$$

θ_i et θ_j étant les angles entre les normales aux surfaces et la droite d_{ij} , d_{ij} la droite reliant les deux surfaces et $J_i(t)$ la radiosité de la surface i définie par :

$$J_i(t) = M_i(t) + \rho_{int,i} E_i(t) \quad (22)$$

$\rho_{int,i}$ étant la réflectivité totale hémisphérique de la surface intérieure, $M_i(t)$ l'émittance de la surface i définie par :

$$M_i(t) = \sigma \varepsilon_{int,i} S_i T_{s,int,i}^4(t) \quad (23)$$

σ étant la constante de Stefan-Boltzman, $\varepsilon_{int,i}$ l'émissivité totale hémisphérique de la surface intérieure i , $T_{s,int,i}(t)$ étant la température de surface intérieure de la paroi i et $E_i(t)$ l'éclairement de la paroi i définie comme la somme des radiosités provenant de toutes les autres parois, soit :

$$E_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^N F_{ij} S_j J_j(t)}{S_i} = \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j(t) \quad (24)$$

2-2-2-6. Les échanges convectifs intérieurs

Nous rappelons que les infiltrations et le renouvellement d'air des cellules sont considérés nuls. Les échanges convectifs intérieurs entre la surface intérieure et l'air sont représentés par la loi de Newton :

$$\varphi_{conv,int,i}(t) = h_{conv,int,i} \cdot S_i \cdot (T_{s,int,i}(t) - T_{aint,int}(t)) \quad (25)$$

$h_{conv,int,i}$ étant le coefficient d'échanges convectifs entre la paroi et l'air qu'on suppose constant ($h_{conv,int,i} = 4,27 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pour les parois opaques verticales, $h_{conv,int,i} = 6,58 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pour les parois opaques horizontales, $h_{conv,int,i} = 3,16 / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pour le vitrage)) et $T_{aint,int}$ la température de l'air intérieur.

2-2-2-7. Les échanges par conduction dans les parois opaques

Pour modéliser les échanges par conduction au sein des parois opaques, les matériaux sont supposés avoir des propriétés thermiques (capacité et conductivité thermiques) constantes et indépendantes de la température. De plus, les parois multicouches ont des contacts thermiques parfaits entre deux couches et les matériaux sont considérés comme des milieux continus homogènes et isotropes. Enfin, les transferts sont supposés monodimensionnels, dans la direction de la normale aux parois. Les transferts par conduction au sein des parois sont décrits par la loi de Fourier qui s'écrit avec ces hypothèses :

$$\rho_j c_j \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \lambda_j \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (26)$$

ρ_j étant la masse volumique du matériau j , c_j la capacité thermique massique du matériau j , λ_j la conductivité thermique du matériau j et $T(x,t)$ la température du point x au temps t au sein de la paroi

Des conditions aux limites d'égalité de température et de flux sont imposées à l'interface Γ_{jk} entre deux couches de matériaux j et k :

$$T_j(x, t) = T_k(x, t) \quad x \in \Gamma_{jk} \tag{27}$$

$$\lambda_j \frac{\partial T_j(x, t)}{\partial x} \Big|_{x \in \Gamma_{jk}} = \lambda_k \frac{\partial T_k(x, t)}{\partial x} \Big|_{x \in \Gamma_{jk}} \tag{28}$$

Des conditions aux limites sur les surfaces extérieures de la paroi de largeur sont également imposées :

$$\pm \lambda_j \frac{\partial T_j(x, t)}{\partial x} = \varphi_{CLO}(t) + \varphi_{GLO}(t) + \varphi_{conv}(t) \tag{29}$$

$\varphi_{CLO}(t)$ étant la densité de flux solaire absorbée défini par $\varphi_{CLO,ext,i}(t) / S_i$ à l'extérieur et $\varphi_{CLO,int,i}(t)$ à l'intérieur, $\varphi_{GLO}(t)$ la densité de flux radiatif GLO défini par $-\varphi_{GLO,ext,i}(t) / S_i$ à l'extérieur et $-\varphi_{GLO,int,i}(t) / S_i$ à l'intérieur, $\varphi_{conv}(t)$ la densité de flux convectif défini par $-\varphi_{conv,ext,i}(t) / S_i$ à l'extérieur et $-\varphi_{conv,int,i}(t) / S_i$ à l'intérieur.

2-3. Etape de conception et de fonctionnement de l'outil

Les différentes étapes de conception de l'outil ATOMO sont illustrées sur la **Figure 4**. Tandis que la **Figure 5** illustre les différentes étapes de simulation d'un bâtiment sous ATOMO.

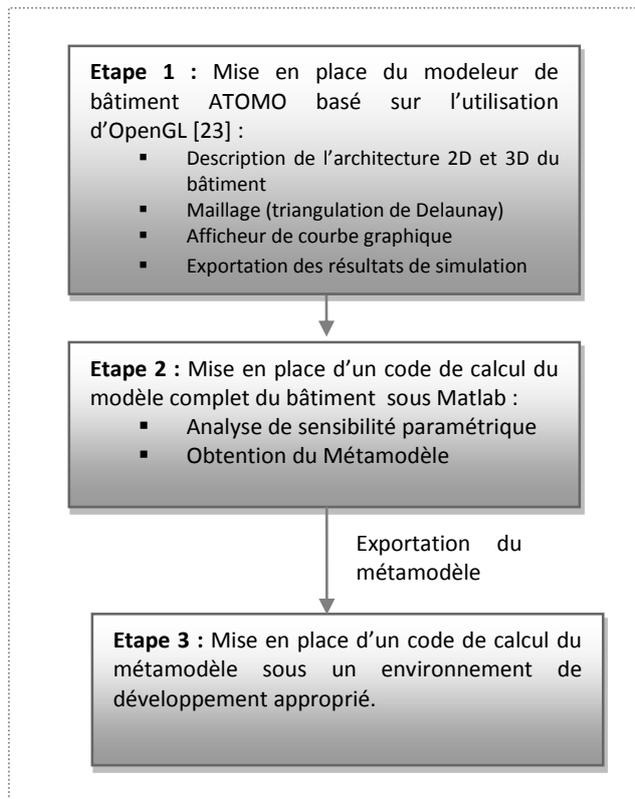


Figure 4 : Etapes de la conception de l'outil de modélisation et de simulation du bâtiment ATOMO

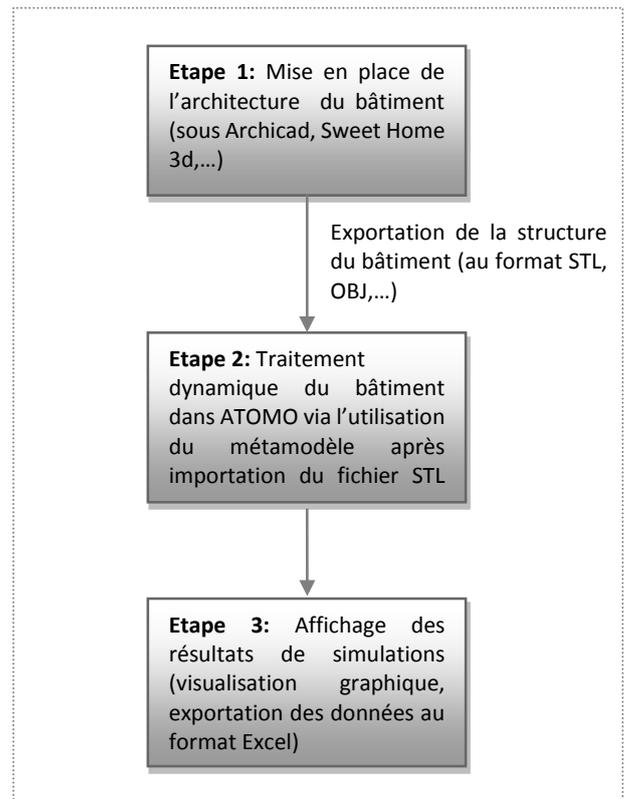


Figure 5 : Etapes de simulation d'un bâtiment sous ATOMO

L'étape 1 et l'étape 2 de la **Figure 4** peuvent être traitées séparément, par conséquent on peut intervertir leur ordre de réalisation. En effet, l'étape 2 s'effectue sous Matlab [18] alors que l'étape 1 peut être réalisée sous un environnement de développement logiciel de son choix pouvant faciliter l'utilisation de la librairie graphique OpenGL [23]. OpenGL présente l'intérêt majeur d'être indépendante du matériel utilisé, donc de l'architecture sur laquelle l'application graphique est développée.

3. Résultats et discussion

3-1. Présentation de l'outil de simulation dynamique de bâtiment (ATOMO)

ATOMO est un outil de modélisation et de simulation énergétique du bâtiment basé sur l'utilisation de métamodèle obtenue par analyse d'influence de l'impact des facteurs d'entrée d'un modèle complexe sur la sortie de ce dernier. Disposant d'une interface graphique et exploitant la convivialité du multifenêtrage, il est un moyen simple pour simuler le comportement dynamique d'un bâtiment sans que l'intervenant ait une connaissance avancée en la matière.

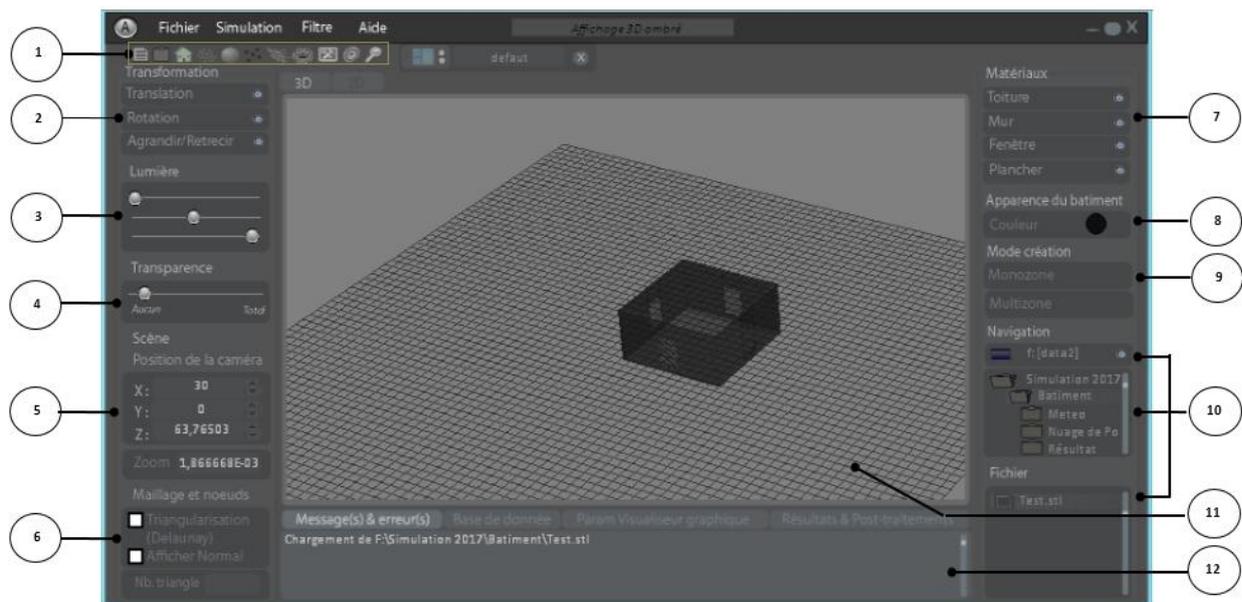


Figure 6 : Champs et zones de l'interface graphique d'ATOMO

La **Figure 6** présente le bâtiment test mis en place avec un logiciel de CAO. ATOMO récupère le bâtiment exporté via le logiciel de CAO, récupère les données architecturales (dimension, structure, ...) et l'affiche comme l'original. Il est aussi possible de personnaliser l'apparence du bâtiment pour plus de confort visuel après que le chargement de ce dernier soit effectué. Il est également mis à la disposition de l'utilisateur la possibilité de visualiser les données architecturales récupérées par l'outil ATOMO dans le but d'une éventuelle correction. Compte tenu du fait qu'ATOMO dispose d'une interface graphique, son utilisation consiste à manipuler convenablement les différents champs et zones présents sur les **Figures 6 et 7**. La **Figure 6** montre un extrait de l'interface graphique d'ATOMO dans le cas du bâtiment test tels que :

- (1) : « Outils » : zone permettant de créer un nouveau bâtiment, d'effectuer quelques réglages,

- d'ajouter des nuages de point ;
- (2) : « Transformation » : zone permettant d'effectuer quelques transformations basiques sur le bâtiment à modéliser ;
- (3) : « Lumière » : zone permettant de modéliser, calibrer l'éclairage du bâtiment à modéliser ;
- (4) : « Transparence » : zone permettant de calibrer la transparence de l'architecture du bâtiment à modéliser ;
- (5) : « scène » : zone permettant de modifier, visualiser la position de la caméra virtuelle ainsi que le zoom du modeleur ;
- (6) : « Maillage et nœud » : zone permettant de mailler les différents éléments du bâtiment en utilisant la triangulation de Delaunay [24] ;
- (7) : « Matériaux » : zone permettant de sélectionner le type de Toiture, mûr, fenêtre, plancher souhaité pour le bâtiment à modéliser. Sous ATOMO, le choix est restreint à quelques types de matériau ;
- (8) : « Apparence du bâtiment » : zone permettant de changer la couleur pour plus de confort visuel;
- (9) : « Mode création » : mode permettant de créer un bâtiment, sans avoir recours à l'utilisation d'un logiciel de CAO, dans le but de l'étudier dynamiquement ;
- (10) : « Navigation » : zone permettant de naviguer dans les différents répertoires afin de trouver les fichiers à importer ;
- (11) : « Ecran 1 » : écran de visualisation des fichiers (bâtiments) importés dans ATOMO ;
- (12) : « Ecran 2 » : écran de visualisation des notifications sur les fichiers (bâtiments) importés dans ATOMO ;

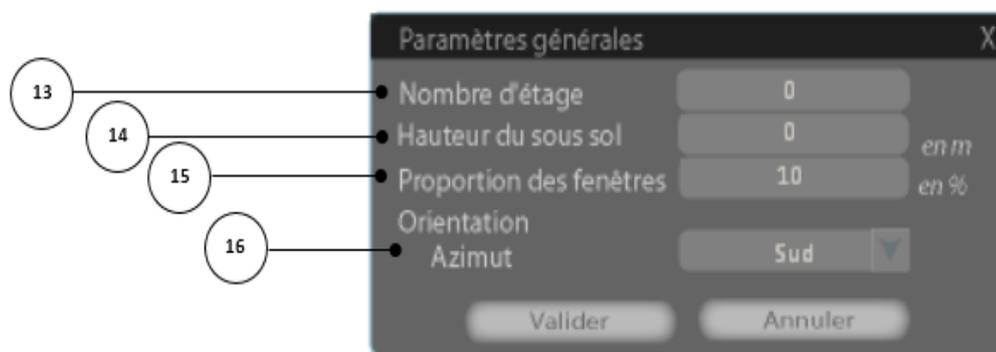


Figure 7 : Paramètre supplémentaire lors de la simulation d'un bâtiment monozone sous ATOMO

La **Figure 7** montre une fenêtre de l'interface graphique d'ATOMO dans le cas du bâtiment test. Cette fenêtre apparaît uniquement dans le cas d'un bâtiment monozone tels que :

- (13) : « Nombre d'étage » : champs recevant le nombre d'étage ;
- (14) : « Hauteur du sous-sol » : champs recevant la hauteur du sous-sol (s'il y en a) ;
- (15) : « Proportion des fenêtres » : champs recevant la proportion des fenêtres du mur ;
- (16) : « Azimut » : champs permettant de sélectionner l'azimut.

3-2. Comportement thermique du bâtiment Test

Un fichier météo doit être obligatoirement associé à l'étude pour que le calcul puisse s'effectuer.

La **Figure 8** donne une allure de l'évolution de la température extérieure, de l'humidité de l'air, de la température de rosé ainsi que la vitesse moyenne du vent pendant les cinq premières journées du mois de

Janvier 2016.

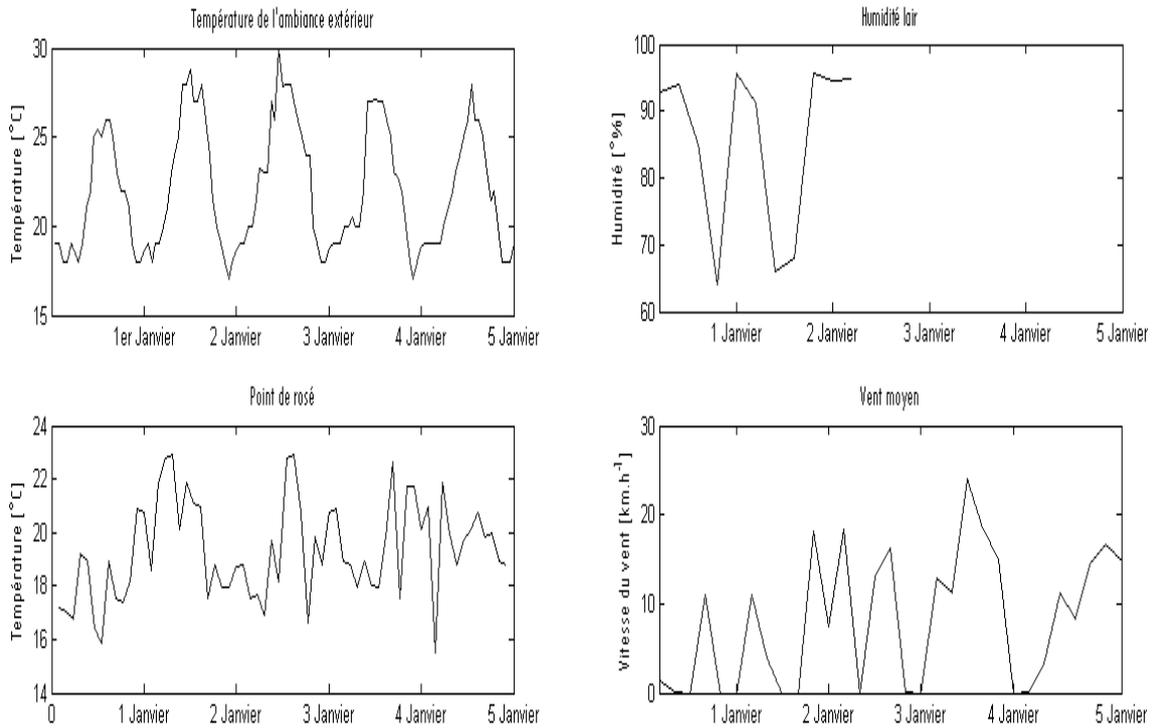


Figure 8 : Élément du fichier météo utilisé

La **Figure 9** donne une allure de l'évolution de la température moyenne au niveau de la façade obtenue par simulation pendant les cinq premières journées du mois de Janvier 2016.

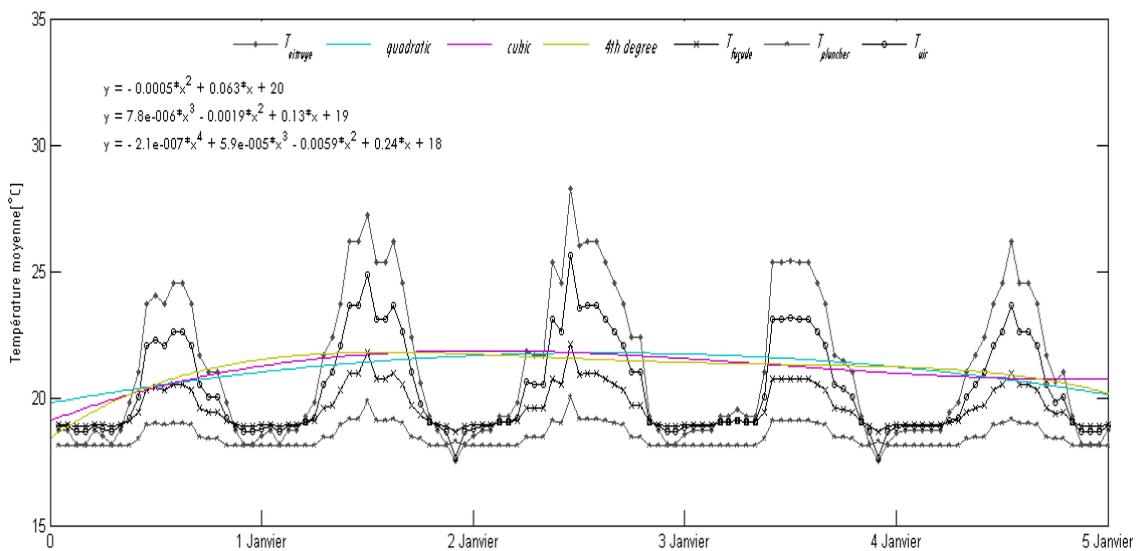


Figure 9 : Température moyenne des éléments du bâtiment Test obtenues sous ATOMO

A titre de comparaison, la **Figure 10** donne une allure de l'évolution de la température moyenne au niveau de la façade obtenue par simulation sous ATOMO ainsi que celle obtenue par simulation sous le logiciel KoZibu [25].

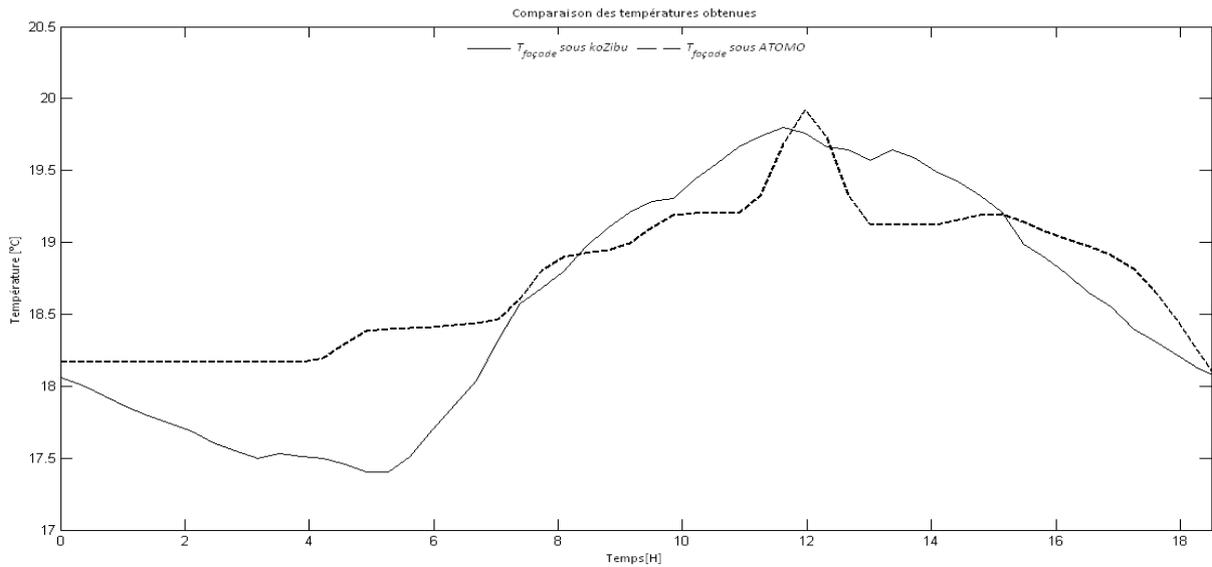


Figure 10 : Comparaison des températures moyenne des éléments du bâtiment Test obtenues sous ATOMO et KoZibu

Les deux courbes de la **Figure** précédente montrent une légère similarité en correspondance avec l'élévation de température, observée entre 05 : 00 et 12 : 00 pour la simulation sous ATOMO et pour la simulation sous KoZibu [25]. Une soudaine descente, correspondante à l'apport d'énergie solaire, se fait alors remarquer : entre 12 : 00 et 18 : 00 pour la simulation sous ATOMO et pour la simulation sous KoZibu [25]. La **Figure 11** donne une allure de l'évolution de l'écart température moyenne au niveau de la façade obtenue par simulation sous ATOMO ainsi que celle obtenue par simulation sous le logiciel KoZibu [25].

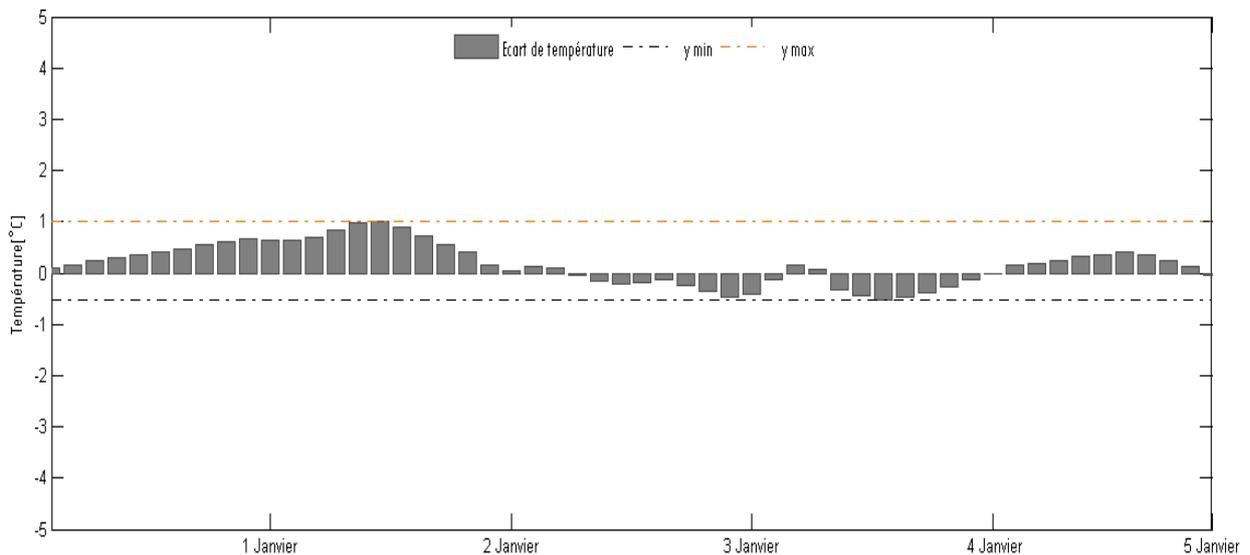


Figure 11 : Ecart températures moyenne des éléments du bâtiment Test obtenues sous ATOMO et KoZibu

Il convient de remarquer que les courbes obtenues par simulation sous ATOMO concordent assez bien avec celles obtenues par simulation sous KoZibu [25], il ne faut cependant pas perdre de vue que ces deux études ont été effectuées en s'appuyant sur des données météorologiques distinctes (celles d'Antananarivo pour la simulation sous ATOMO). Ainsi, peut donc s'expliquer en partie, l'écart observé entre les courbes obtenues.

3-3. Besoin énergétique du bâtiment Test

La **Figure 12** donne une allure de l'estimation de la besoin thermique obtenue par simulation sous ATOMO.

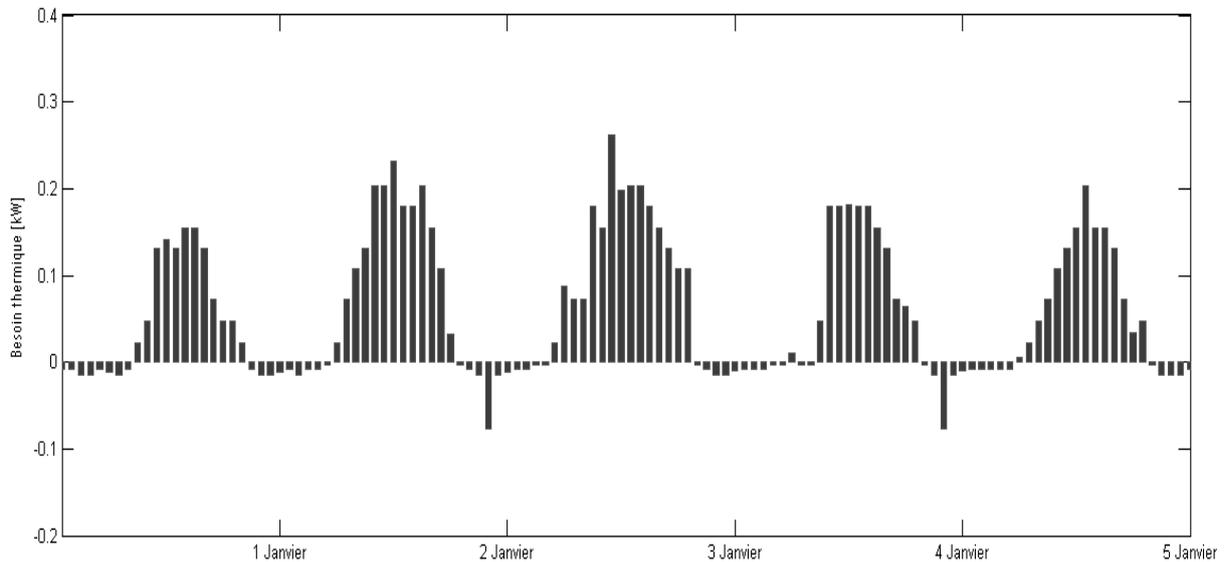


Figure 12 : *Besoin thermique du bâtiment Test obtenues sous ATOMO*

Sur la **Figure 13** est donnée une allure de l'énergie consommée par le bâtiment test, ainsi que leur approximation via une interpolation de type quadratique, cubique, polynomiale, en fonction de la température intérieure.

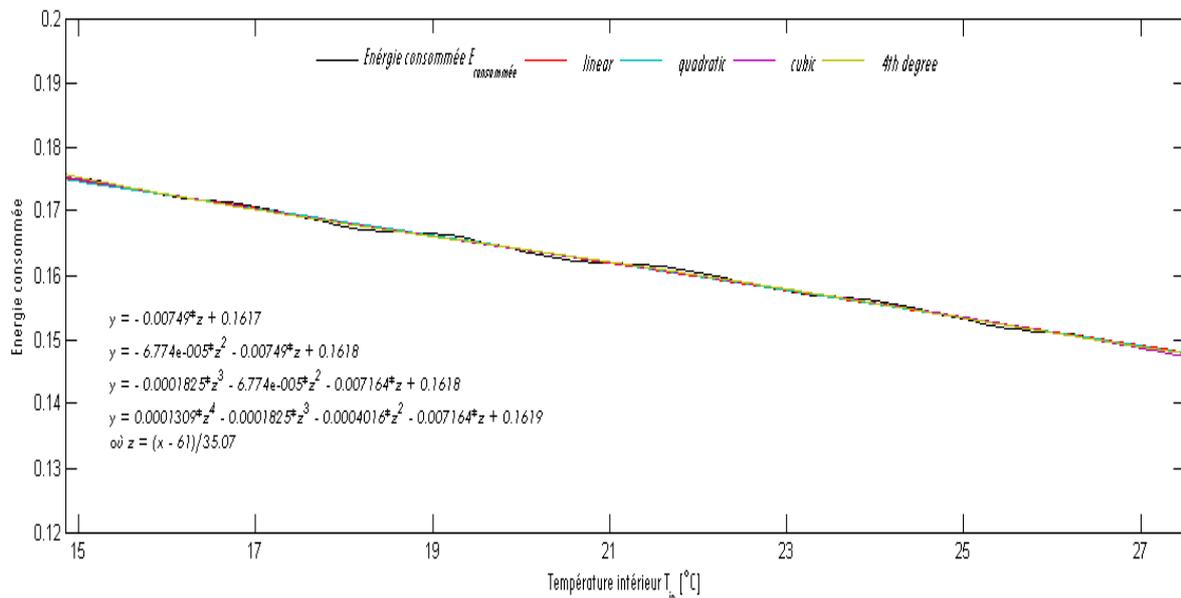


Figure 13 : *Energie consommée par le bâtiment Test en fonction de la température intérieure*

On constate une légère descente de la valeur de l'énergie consommée lorsque la température intérieure du bâtiment augmente. Ce fait est, en effet, justifié par la simple raison que les consommations de chauffage sont normalement proportionnelles à l'écart de température entre l'ambiance intérieure et l'extérieur du bâtiment.

4. Conclusion

Cet article permet de mettre en place un outil de modélisation et de simulation énergétique du bâtiment moyennant une analyse des effets des facteurs ou analyse de sensibilité paramétrique. En prenant en entrée la structure du bâtiment modélisé de façon extrêmement pratique via un logiciel de CAO, l'outil ainsi mis en place permet l'évaluation du comportement thermique et de la consommation énergétique du bâtiment. L'outil proposé dispose d'une interface graphique et n'exige pas une grande mémoire d'ordinateur et le temps de traitement ou de calcul est raisonnable.

Références

- [1] - TRISTAN GERRISH, KIRTIRUIKAR, MALCOLM COOK, MARK JOHNSON, MARK PHILLIP, CHRISTINE LOWRY, " BIM application to building energy performance visualization and management : Challenges and potential ", *Energy & Buildings* (2017)
- [2] - PAWEL NOWAK, MARIOLA KSIAZEK, MARCIN DRAPS, JACEK ZAWISTOWSKI, "Decision Making with use of Building Information Modeling", *Procedia Engineering* 153 (2016) 519-526
- [3] - MOSHOOD OLAWALE FADEYI, "The role of building information modeling (BIM) in delivering the sustainable building value", *Sustainable Infrastructure Engineering* (2017)
- [4] - M. MARZOUK, A. OTHMAN, "Modeling the performance of sustainable sanitation systems using building information modeling", *Journal of Cleaner Production* (2016)
- [5] - J. NOEL, J. J. ROUX, P.S. SCHNEIDER, "CodyBa, a design tool for buildings performance simulation ", *Building Simulation*, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15
- [6] - THIERRY SALOMON, RENAUD MIKOLASEK, BRUNO PEUPORTIER, "Outil de simulation thermique du bâtiment, comfie ", *Journée thématique SFT-IBPSA* (2005)
- [7] - AURELIEN 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 ", *Congrès français de thermique* (2012)
- [8] - TRNSYS, "A TRaNsient SYstems Simulation Program"(2011), <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- [9] - SIMBAD, "Building and HVAC modeling toolbox for Matlab/Simulink" (2011), <http://www.simbad-cstb.fr/>
- [10] - RADIANCE, "Radiance, synthetic imaging system" (2011), <http://radsite.lbl.gov/radiance/>
- [11] - DIALux, Logiciel dialux. (2011), <http://www.dial.de/DIAL/fr/>
- [12] - M. OUF, M. H. ISSA, "Energy consumption analysis of school buildings in manitoba", *International Journal of Sustainable Built Environment*(2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbe.2017.05.003>
- [13] - HAIDONG WANG, ZHIQIANG (JOHN) ZHAI, "Advances in Building Simulation and Computational Techniques : A Review between 1987 and 2014", *Energy and Buildings* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.080>
- [14] - Meilleur programme d'Architecture Intérieure 3D dans le test comparatif du n°278 de SVM (février 2009)
- [15] - P. CIGNONI, M. CALLIERI, M. CORSINI, M. DELLEPIANE, F. GANOVELLI, G. RANZUGLIA, "MeshLab : an Open-Source Mesh Processing Tool", *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*, (2008) 129-136
- [16] - G. RANZUGLIA, M. CALLIERI, M. DELLEPIANE, P. CIGNONI, R. SCOPIGNO, "MeshLab as a complete tool for the integration of photos and color with high resolution 3D geometry data", *CAA 2012 Conference Proceedings*, (2013) 406-416
- [17] - ISSA JAFFAL, CHRISTIAN INARD, "A metamodel for building energy performance". *Energy and Buildings* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.072>
- [18] - MATLAB, High-performance numeric computation and visualization software, The MathWorks

- [19] - H. T. RAKOTONDAMIARANA, A. L. ANDRIAMAMONJY, "Matlab automation algorithm for performing global sensitivity analysis of complex system models with a derived FAST method", *Journal of Computations & Modeling*, Vol.3, N° 3 (2013) 17-56
- [20] - STEPHANIE BONTEMPS, " Validation expérimentale de modèles : application aux bâtiments basse consommation. Construction durable ", Thèse unique, Université de Bordeaux, (2015)
- [21] - EDF R&D, Mode d'emploi du modèle n°112, "Echange convectif extérieur", Manuel utilisateur CLIM 2000, Interne EDF
- [22] - J-L. BATTAGLIA, A. KUSIAK, J-R. PUIGGALI, "Introduction aux transferts thermiques", 2ème éd., Dunod, (2014)
- [23] - OpenGL 1.2 Specification, <http://www.sgi.com/software/opengl/manual.html>
- [24] - A. I. BELOKRYSS-FEDOTOV, V. A. GARANZHA, L. N. KUDRYAVTSEVA, "Delaunay meshing of implicit domains with boundary edge sharpening and sliver elimination", *Math. Comput. Simulation* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.matcom.2017.07.007>
- [25] - J. NOEL, JNLOG, " KoZibu, Dossier des Algorithmes ", (2009) http://www.jnlog.com/pdf/kozibu_methods_report_fr.pdf