

Développement d'un logiciel de modélisation thermique des abris militaires clos pour la prédiction des températures induites par la météorologie extérieure

Software development of thermal modelization of military closed shelters for predicting the temperatures induced by outdoor meteorological conditions

Jean NOEL (*), Serge LE VILAIN (**) et Philippe COMIEN (**)
(*) JNLOG - Lyon
(**) DGA/DET/LRBA – Vernon

Résumé

L'acquisition des matériels de la Défense au meilleur coût implique de spécifier au plus juste leurs performances attendues, en particulier en ce qui concerne leur maintien en condition opérationnelle en situation de stockage sous des climats très variés. Cet article présente l'outil logiciel RAIMANTA, développé par JNLOG et le LRBA pour évaluer les températures induites dans différents types d'abris militaires clos en fonction de données météorologiques représentatives.

Abstract

Defence equipment procurement at the lowest price leads to making out accurate specifications of their expected performance, in particular for keeping them in operational conditions when stored under various climates. This paper presents the tool RAIMANTA, developed by JNLOG and the LRBA for computing the temperatures induced in closed military shelters by outdoor typical meteorological conditions.

1. INTRODUCTION

1.1. Le contexte général

Dans le cadre de l'élaboration des spécifications des systèmes d'armes à base de missiles pour les forces armées, le LRBA (Laboratoire de Recherches Balistiques et Aérodynamiques) est responsable de la définition des environnements climatiques rencontrés par les systèmes dans les diverses situations de leur vie opérationnelle. Un de ses besoins est l'évaluation des températures subies par des matériels en situation d'attente ou de stockage dans des abris clos (températures induites). Ce paramètre influence en effet directement la mise en œuvre opérationnelle ainsi que le vieillissement des matériels.

La mise au point d'un outil logiciel de simulation du comportement thermique de différents abris militaires a fait l'objet du projet RAIMANTA (**R**estitution de l'**A**mbiance **I**nduite par **M**odélisation **A**Nalytique et **T**hermodynamique d'**A**bris). Cet outil a été livré au LRBA en juillet 2009.

1.2. Le contexte de RAIMANTA

En pratique, le problème consiste à mettre au point des modélisations géométriques et physiques des abris classiquement rencontrés, et à les valider par des campagnes de mesures sur site des grandeurs météorologiques et des températures induites associées.

Les méthodes générales d'obtention de données météo pour l'utilisation de l'outil dans son usage régulier ne seront pas décrites ici, et seules le seront au **paragraphe 2** les mesures effectuées dans le but de vérifier la validité de la modélisation des abris.

Le **paragraphe 3** de cet article présente la modélisation géométrique et physique des abris clos. Les **paragraphes 4 et 5** présentent les résultats obtenus sur deux abris militaires : une « hangarettte » (grande structure massive en béton) et un « conteneur » (petite structure légère de faible inertie).

2. LES DONNEES METEOROLOGIQUES

2.1. Les données météo

Les mesures sur site sur une période représentative sont souvent difficiles à obtenir et présentent l'inconvénient de n'être qu'une « photographie » instantanée d'un climat, même si les mesures couvrent une année ; pour la définition d'une météo représentative il est nécessaire de procéder par assemblage de séquences météo de différentes années, selon des procédés assez complexes [1].

La récupération de données météo répertoriées peut se faire par exemple par recherche sur le Web des différents fichiers météo associés aux divers logiciels de simulation thermique, comme TRNSYS [2] et EnergyPlus [3], qui mettent à disposition sur leur site un grand nombre de fichiers. Il ne reste plus alors qu'à effectuer des conversions de format. Le rejeu de ces données permet de se comparer aux logiciels utilisés couramment dans le bâtiment.

La validation finale de Raimanta est réalisée par des campagnes de mesures sur site effectuées par le LRBA.

2.2. Les campagnes de mesure pour la validation de RAIMANTA

Les campagnes de mesures sur site concernent deux abris très différents, l'un très massif (hangarette), l'autre très peu inerte (conteneur ISO 20 pieds). Ces mesures incluent la météo, ainsi que les températures relevées à l'intérieur des abris.

Les sondes de température intérieure ont été placées à deux hauteurs dans chaque abri. Ces sondes sont à l'air libre et mesurent donc la température résultante (voir 3.1.5) et non la température d'air.

Les sondes de mesure des températures de surface des parois sont placées à trois hauteurs différentes sur chaque face d'un abri. Placées contre la surface de la paroi, elles sont recouvertes d'un isolant et d'un revêtement réfléchissant (figure 1).

la station météorologique mesure la température, l'humidité relative, la pression, le rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent à 2 et 10 m (figure 2).



Figure 1 : mesures de températures de surfaces



Figure 2 : station météorologique

Classiquement, les données météo minimales nécessaires sont :

- la température d'air,
- la puissance de rayonnement solaire sur un plan horizontal.

A ces données, on peut ajouter :

- l'humidité d'air,
- le vent (vitesse et direction), la température de ciel (celle de la voûte céleste avec laquelle l'abri va échanger par rayonnement). Dans le cas présent où la température de ciel n'a pas été mesurée, elle est remplacée classiquement par la température d'air diminuée de 6°C.

Pour les abris militaires clos, la position du soleil a nettement moins d'importance que pour un bâtiment classique puisqu'ils ne possèdent pas de fenêtres. Malgré tout, la distinction entre rayonnement direct (provenant directement du soleil) et diffus (réémis dans toutes les directions par la voûte céleste) reste importante pour la proportion de flux solaire absorbé par une paroi, car ce flux absorbé dépend de l'angle d'incidence pour le rayonnement direct, ce qui n'est bien sûr pas le cas du diffus.

Dans un souci de généralité, RAIMANTA utilise donc en données d'entrée le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'un des problèmes majeurs rencontrés a été de définir correctement ces composantes à partir du rayonnement global. Différents essais d'optimisation ont montré que le ratio de répartition n'avait pas beaucoup d'influence sur les écarts calcul/mesure, et finalement une répartition 50% / 50% a été retenue.

3. LE MODELE D'ABRI

Un premier modèle d'abri avait été développé au LRBA et intégré dans un outil fonctionnant sous Excel, nommé Thermody [4]-[5]-[6]. Ce modèle possédait l'avantage de la simplicité et de la rapidité, mais présentait en particulier l'inconvénient de tenir insuffisamment compte de l'inertie de la structure.

Fort des enseignements tirés de Thermody, des spécifications plus précises ont été établies pour le développement et la réalisation du logiciel RAIMANTA.

3.1. La modélisation physique

3.1.1. Présentation générale de la modélisation physique

Le modèle d'abri de RAIMANTA s'appuie sur l'expérience acquise dans le développement du logiciel KoZiBu [7]-[8], lui-même inspiré de CoDyBa [9]-[10].

KoZiBu est fondamentalement un logiciel de simulation multizones, c'est-à-dire effectuant des simulations sur des géométries comportant plusieurs locaux. De par sa méthode de résolution itérative, le nombre de locaux (ou « zones thermiques ») n'est pas une limite, et des simulations sur des cas réels ont déjà été effectuées sur de grandes géométries : sous-marin (70 zones), hôpital (100 zones), immeuble à structure répétitive (250 zones [11]), etc. Dans le cas présent, n'est présentée que la modélisation relative à une zone thermique, sans système de régulation (chauffage, climatisation, ventilation, etc.), et sans le traitement de l'humidité, également possible avec KoZiBu.

Les hypothèses physiques de base relèvent de la thermo-aéraulique du bâtiment dans des conditions d'occupation humaine, à savoir :

1. température de 10 à 40 °C,
2. "faibles" mouvements d'air intérieurs (renouvellements d'air a priori inférieurs à 10 vol/h),
3. temps caractéristique supérieur à 15 mn.

L'hypothèse 1 n'est pas une limite pour les évolutions temporelles des températures dans l'abri, mais justifie une hypothèse de température moyenne connue utilisée pour la linéarisation de certains termes (en particulier ceux en T^4). L'hypothèse 2 justifie la prise en compte d'une certaine température moyenne à l'intérieur de l'abri.

L'hypothèse 3 est plus limitative car elle est à la base du modèle de paroi 1R2C présenté plus loin (3.1.7) et qui présuppose une certaine inertie de la paroi.

Classiquement les différents flux thermiques intervenant dans la thermique d'un bâtiment relèvent de la conduction et du rayonnement. La convection est traitée par des lois d'échanges très simples au niveau des surfaces d'échange.

3.1.2. Les deux domaines de rayonnement

En ce qui concerne le rayonnement, on distingue les échanges dans les grandes longueurs d'onde (GLO) des échanges courtes longueur d'onde (CLO), qui relèvent de mécanismes tout à fait différents.

Le spectre électromagnétique est ainsi découpé en deux parties (voir figure 3), dans le domaine de fréquences qui intéresse la thermique du bâtiment.

La partie CLO correspond au rayonnement solaire et la partie GLO au rayonnement des parois entre elles.

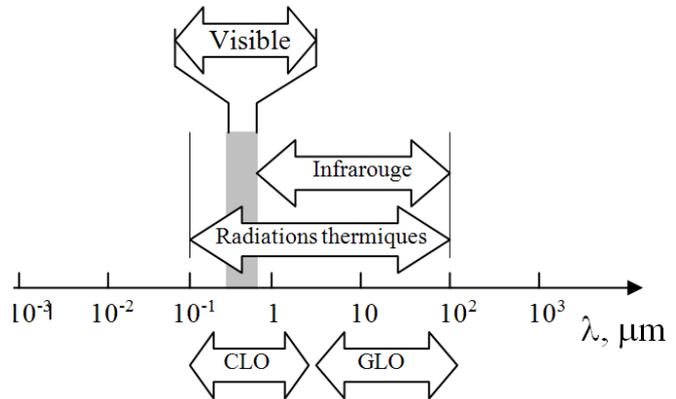


Figure 3 : découpage du rayonnement en deux domaines

3.1.3. Les mécanismes d'échanges extérieurs

La figure 4 présente schématiquement les différents mécanismes d'échanges par convection et par rayonnement CLO et GLO entre les surfaces extérieures d'un bâtiment et l'environnement extérieur.

Les flux radiatifs CLO F sont considérés classiquement à travers leur absorption par les parois selon une loi du type $F_{abs} = \alpha.F$, où α est le coefficient d'absorption.

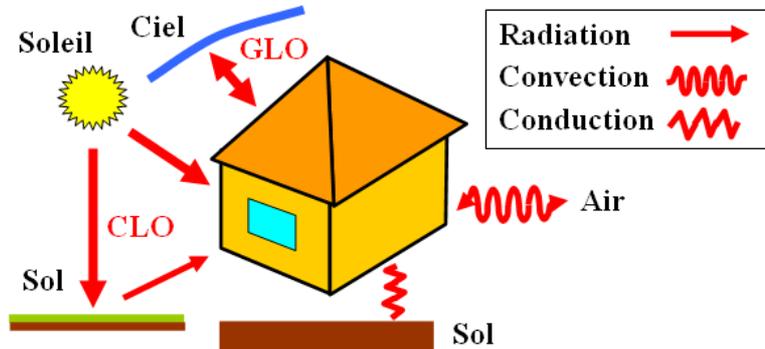


Figure 4 : schématisation des flux d'échange extérieurs

Les échanges radiatifs GLO avec la voûte céleste sont traités par une loi du type $F = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_c^4)$.

Les flux conductifs F avec l'air extérieur sont modélisés classiquement par une loi du type $F = h \cdot \Delta T$. La spécificité de RAIMANTA est de relier le coefficient d'échange h à la vitesse de vent moyenne observée sur la période de simulation (un calcul de h en fonction du vent à tout moment a été estimé inutile et trop complexe).

3.1.4. Les mécanismes d'échanges intérieurs

La figure 5 présente schématiquement les mécanismes de réflexion/absorption du rayonnement CLO dans un local. En présence d'une fenêtre, le rayonnement CLO pénètre dans le local, et subit une succession de phases de réflexion et d'absorption par les différentes parois. En l'absence de fenêtre, le rayonnement CLO peut être produit en plus petite quantité par une source interne (appareils de chauffage, etc.). Ce processus est rendu par un calcul matriciel.

La figure 6 présente la modélisation des transferts GLO, qui sont pris en compte par le biais d'une température radiante, et qui permet de traiter ces flux de la même façon que les transferts conductifs entre l'air et les parois.

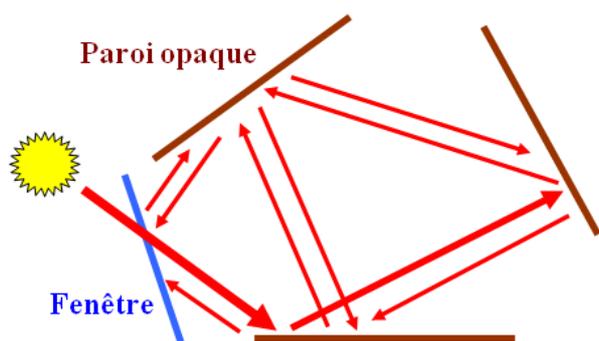


Figure 5 : flux CLO dans un volume d'air

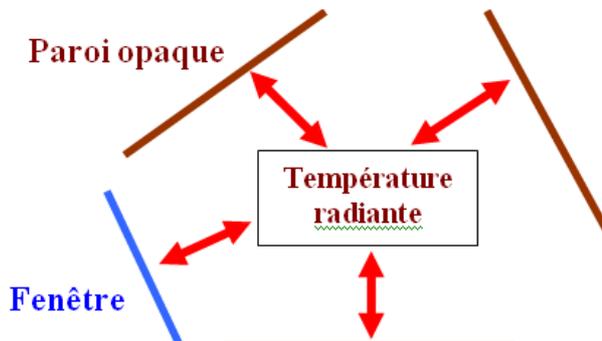


Figure 6 : flux GLO dans un volume d'air

3.1.5. Le modèle de volume d'air

A un volume d'air d'un abri sont associées les variables suivantes :

- température d'air,
- température radiante.

La température radiante est la moyenne des températures surfaciques des parois (la pondération est effectuée par les surfaces).

A noter que du point de vue « confort », l'être humain est sensible à la **température résultante**, qui est la demi-somme de la température d'air et de la température radiante (ce qui explique la prise en compte de cette température radiante dans les modèles de bâtiment, alors qu'ici cette prise en compte aurait pu être négligée).

3.1.6. Les mécanismes d'échange aux parois

La figure 7 présente les différents modes d'échange au niveau des surfaces opaques.

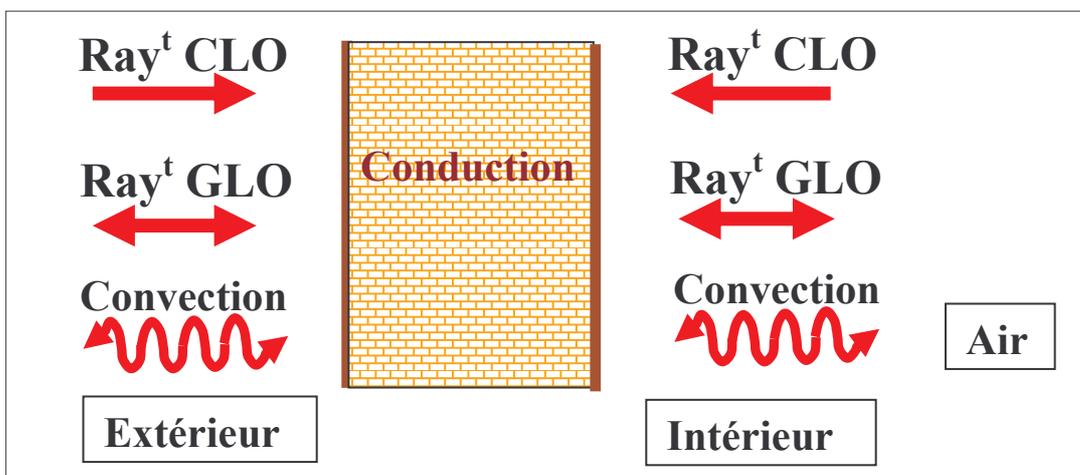


Figure 7 : phénomènes physiques sur les faces d'une paroi opaque

3.1.7. Le modèle conductif des parois opaques (modèle « 1R2C »)

Pour les transferts conductifs dans les parois, le modèle "1R2C" est utilisé (ce sigle signifie "1 Résistance - 2 Capacités" [12]).

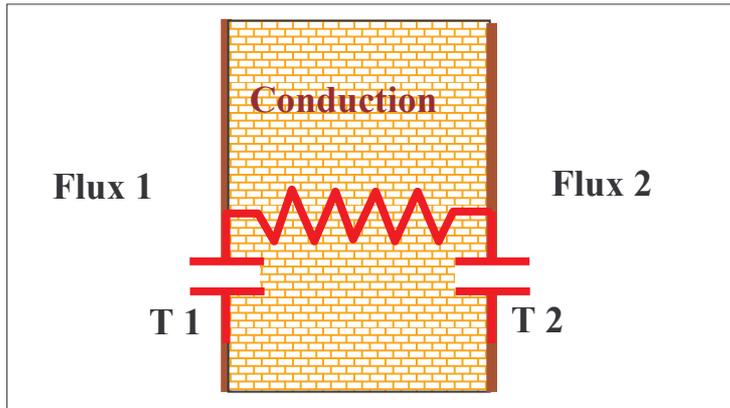


Figure 8 : modèle conductif analogique d'une paroi

La modélisation des transferts conductifs en régime variable dans les parois opaques est obtenue en raisonnant sur les bilans énergétiques. Si l'on suppose à chaque instant une répartition linéaire des températures dans chaque couche d'une paroi, la quantité de chaleur dQ stockée entre l'instant t et t+dt est évaluée selon l'équation ci-dessous :

$$dQ = \sum_{k=1}^{Nb_couches} \rho_k \cdot C_k \cdot w_k \cdot S \cdot [(1 - \beta_k) \cdot dT_1^S + \beta_k \cdot dT_2^S] \quad (1)$$

La sommation est effectuée de la face 1 (k=1) vers la face 2 (k=Nb_couches).

On prend :

$$\beta_k = K \cdot \left(\frac{R_k}{2} + \sum_{j=1}^{k-1} R_j \right) \left\{ \begin{array}{l} R_j = \frac{w_j}{\lambda} \quad \text{résistance thermique de la couche } j \\ K = \frac{1}{\sum_{j=1}^{Nb_couches} R_j} \quad \text{conductance de la paroi} \end{array} \right. \quad (2)$$

Et donc :

$$dQ = c_1 \cdot dT_1^S + c_2 \cdot dT_2^S \left\{ \begin{array}{l} c_1 \text{ (couche 1)} = \sum_{k=1}^{Nb_couches} \rho_k \cdot C_k \cdot w_k \cdot S \cdot (1 - \beta_k) \\ c_2 \text{ (couche N)} = \sum_{k=1}^{Nb_couches} \rho_k \cdot C_k \cdot w_k \cdot S \cdot \beta_k \end{array} \right. \quad (3)$$

Ce qui donne les deux équations différentielles suivantes pour l'évolution des températures de surfaces (les seules variables de la paroi) :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1 \cdot \frac{dT_1^S}{dt} = K \cdot S \cdot (T_2^S - T_1^S) - F_1 \\ c_2 \cdot \frac{dT_2^S}{dt} = K \cdot S \cdot (T_1^S - T_2^S) - F_2 \end{array} \right. \quad (4)$$

Les flux F1 et F2 sont respectivement les flux sur les faces 1 et 2 de la paroi. Ils sont positifs s'il s'agit de flux sortant de la paroi.

A noter la nécessité de disposer d'une version « dégradée » de ce modèle, mise en œuvre dans le cas de paroi peu inerte (et donc possédant un temps caractéristique très petit, qui impliquerait un pas en temps très faible et donc un temps de simulation trop élevé). Cette version dégradée fusionne les deux températures de surface en une seule et suppose l'équilibre thermique atteint à tout moment.

3.1.8. Le modèle de sol

Le modèle de sol est très simple : il consiste en une couche de matériau à une seule température, échangeant thermiquement par conduction avec la face inférieure d'un plancher.

Ce modèle de sol est simple, voire simpliste, mais l'alternative serait un modèle 3D (par volumes finis par exemple), pour la prise en compte des effets de profondeur, et également des effets de bord sur le pourtour de la géométrie.

3.2. La modélisation géométrique

La modélisation géométrique de l'abri passe par la discrétisation de l'enveloppe en facettes, représentée sur les figures 9 et 10 dans le cas de l'« hangarette » et du « conteneur ».

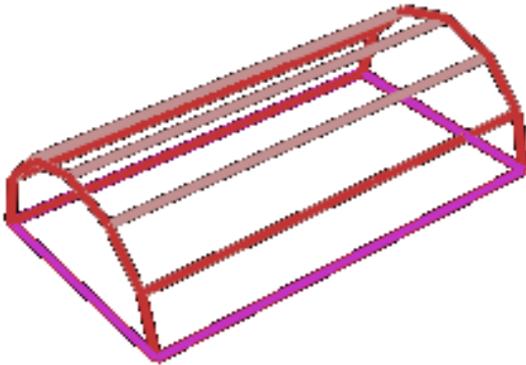


Figure 9 : schéma de l'« hangarette »

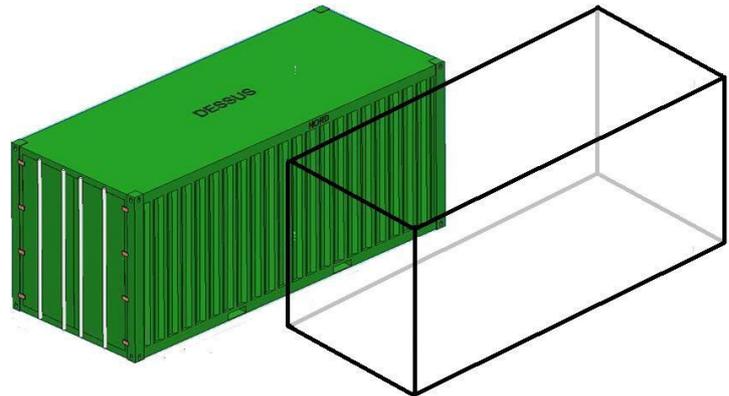


Figure 10 : schéma du « conteneur »

L'« **hangarette** » est une structure semi-cylindrique en béton reposant sur une dalle épaisse également en béton. L'épaisseur de la voûte en béton est 66 cm et son rayon est de 7,30 m. La dalle est représentée par une couche de 25 cm de béton, reposant directement sur le sol.

Le « **conteneur** » est un parallélépipède en tôle légère (de base 6 x 2,40 m² et de hauteur 2,60 m). Les parois sont formées de 1,5 mm de tôle et le plancher de 2 cm de bois.

Ici les faces latérales de l'« **hangarette** » ont été représentées par 6 facettes, car ce nombre correspond au nombre de sondes utilisées pour la mesure des températures de surface, mais ce nombre est une donnée d'entrée de RAIMANTA. Parmi les résultats présentés plus loin figurent ceux des températures de surface des facettes latérales situées près du sol.

Tous ces abris sont considérés comme vides pour les simulations.

Aucun de ces abris ne possède de fenêtre.

3.3. Validation de la modélisation

La procédure de validation du modèle d'abri repose en premier lieu sur les tests effectués lors du développement de chaque élément de modélisation, et au final par le passage des tests BESTEST, devenus le standard américain ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 [13]-[14] et point de passage obligé pour les logiciels d'une certaine dimension (TRNSYS [2], EnergyPlus [3], Esp [15], etc.).

Le standard BESTEST se présente sous la forme d'une série incrémentale de cas, du plus simple au plus compliqué et cela sur une zone thermique unique. Les phénomènes physiques traités sont ceux que l'on retrouve dans le bâtiment en général (conduction, rayonnement, ventilation, vitrage, etc.).

La comparaison calcul/expérience présentée dans les prochains paragraphes n'est pas considérée comme une validation des modèles employés, mais comme une vérification de la pertinence de cette modélisation lorsqu'elle est appliquée à des abris et cela sur de longues périodes de simulation.

4. PRESENTATION DES RESULTATS DANS LE CAS « HANGARETTE »

Dans le logiciel RAIMANTA, le sol est modélisé par une épaisseur constante E de matériau M (cf. 3.1.8). A partir d'une valeur initiale T, sa température évolue en fonction des échanges thermiques avec l'« hangarette ». Ici les paramètres E, M et T sont inconnus et ont été définis au mieux, par un réglage a priori, effectué dans des plages de valeurs réalistes : par défaut, les « bons » paramètres sont une épaisseur de 25 m et une température de 15 °C, le sol étant pris aux paramètres habituels ($\rho=1800 \text{ kg.m}^{-3}$, $C=1100 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, $\lambda=2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Dans le cas particulier présenté ci-après, la valeur de température de sol initiale est prise à 17,5 °C.

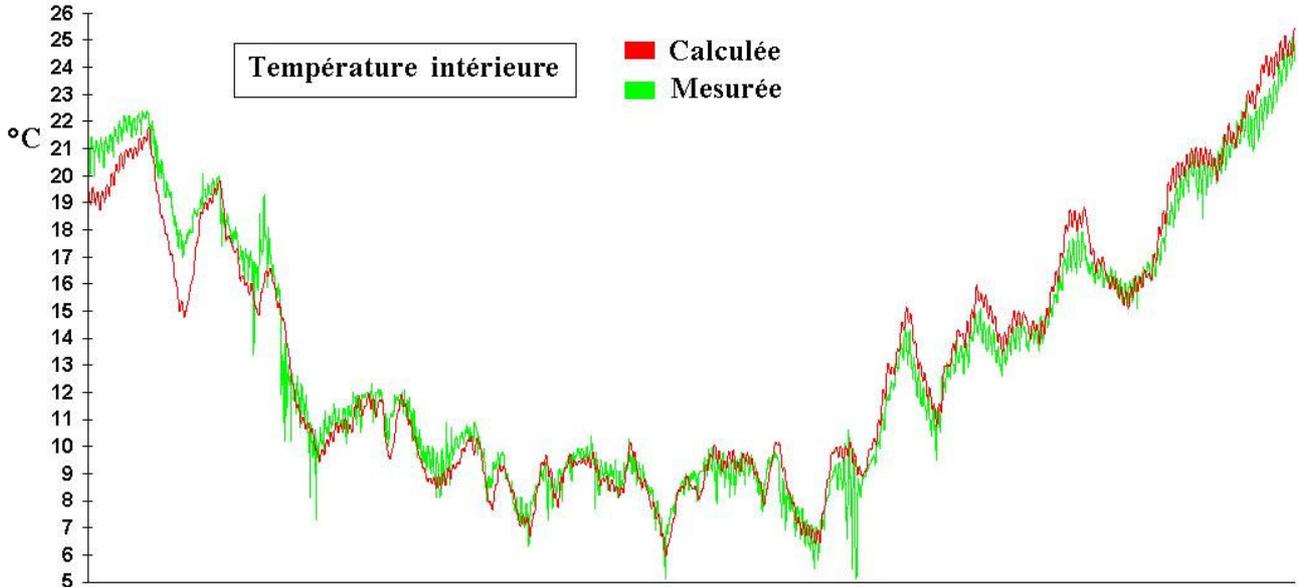


Fig. 11 : tracé des évolutions temporelles des températures intérieures calculée et mesurée pour l'« hangarette »

La période de simulation va du 29 septembre 2003 au 13 juin 2004.

La **moyenne des écarts calcul/mesure** est de 0,03°C et l'écart-type sur ces écarts est de 0,89°C.

La figure 12 présente les fréquences de températures calculées et mesurées.

En abscisse figurent les classes de températures et en ordonnée le nombre d'heures pour lesquelles ces températures sont observées.

On constate globalement une prédiction satisfaisante des fréquences.

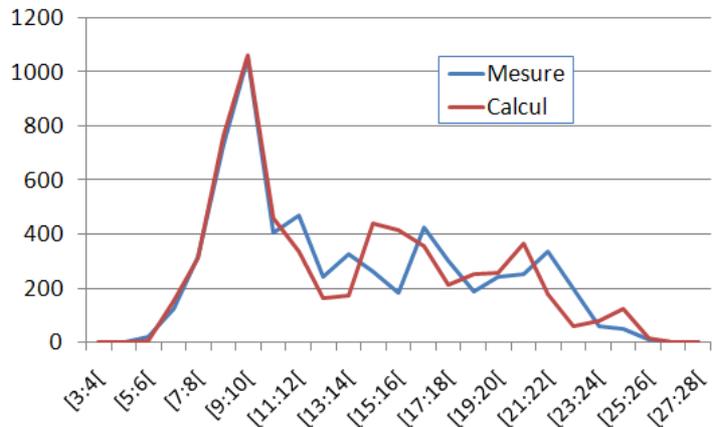


Figure 12 : relation entre nombre d'heures et classes de températures pour l'« hangarette »

La figure 13 présente les évolutions temporelles de la température de sol calculée (modèle de sol à une épaisseur de 25 m) et mesurée en surface autour de l'abri.

Il n'y a bien sûr pas équivalence, mais on retrouve bien la forme générale de l'évolution.

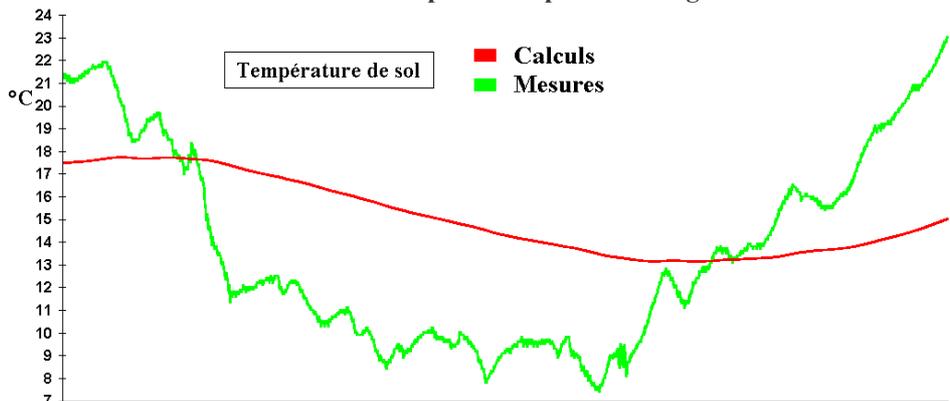


Figure 13 : tracé des températures de sol calculée/mesurée

Les figures 14 à 17 présentent les températures de surface calculées et mesurées sur les facettes situées à la base de la « hangarette », sur les côtés Nord et Sud (le Sud reçoit bien évidemment plus de soleil que le Nord).

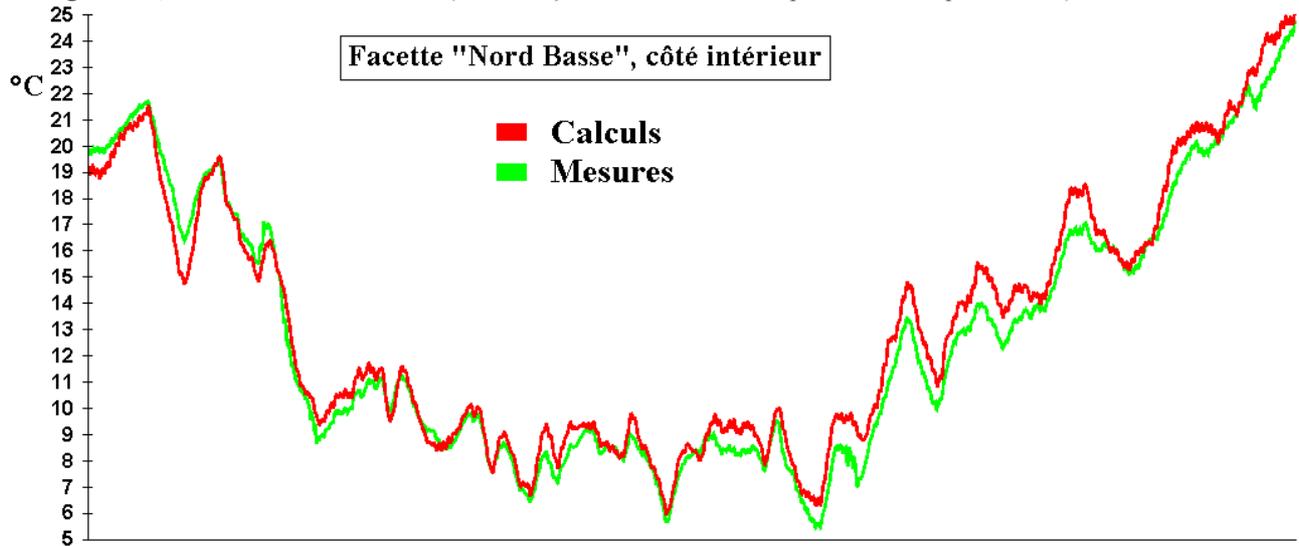


Fig. 14 : tracé des températures de surface intérieures de la facette Nord Basse de l'« hangarette »

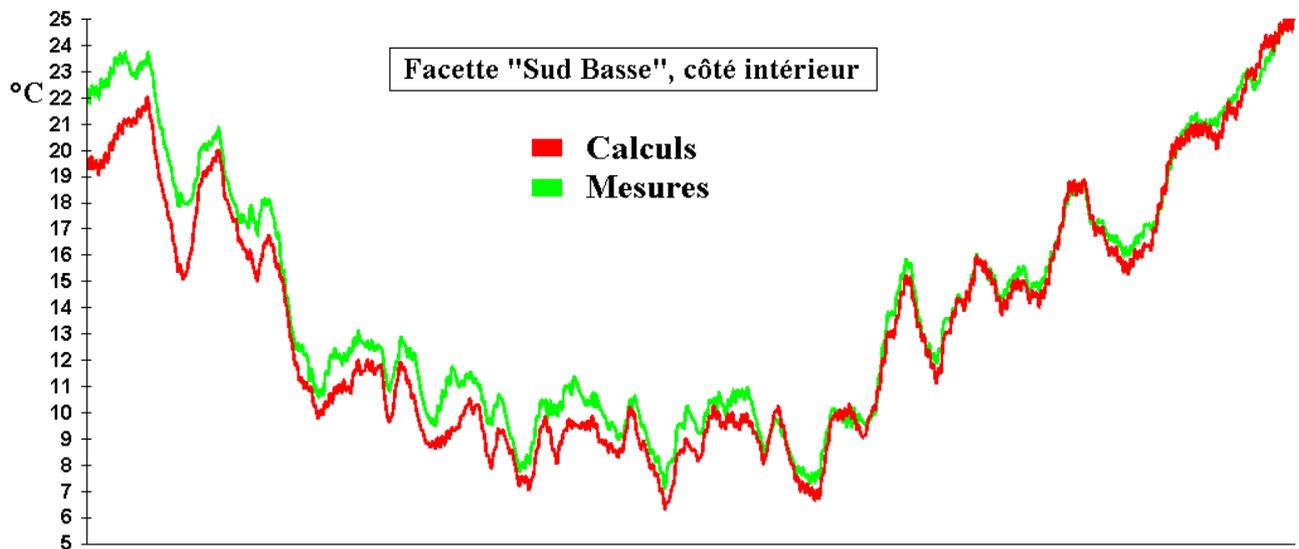


Fig. 15 : tracé des températures de surface intérieures de la facette Sud Basse de l'« hangarette »

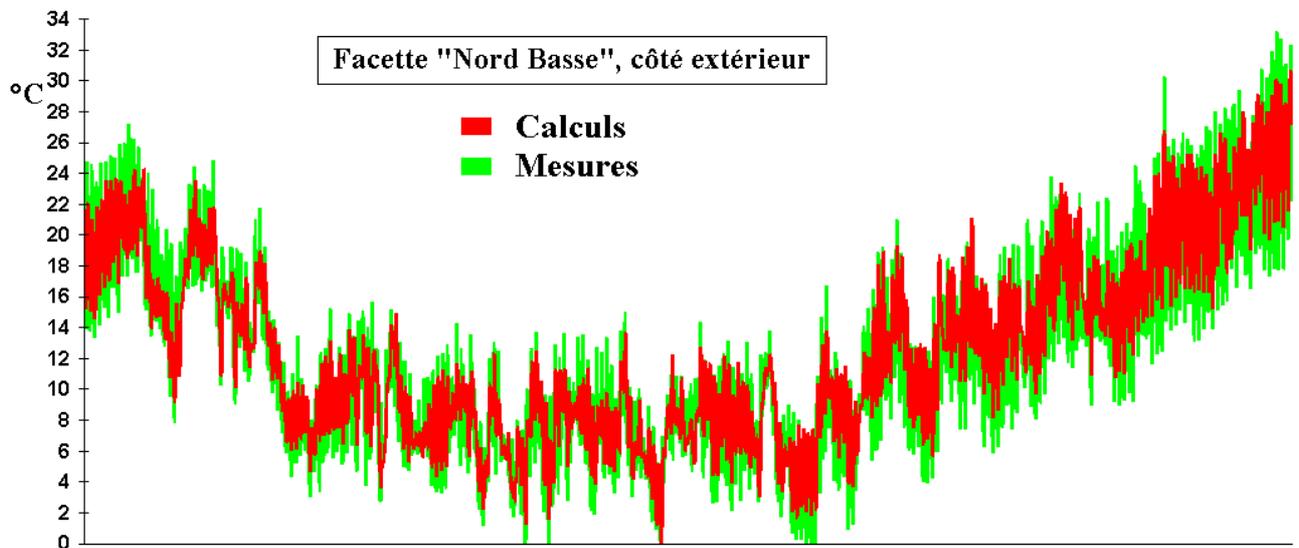


Fig. 16 : tracé des températures de surface extérieures de la facette Nord Basse de l'« hangarette »

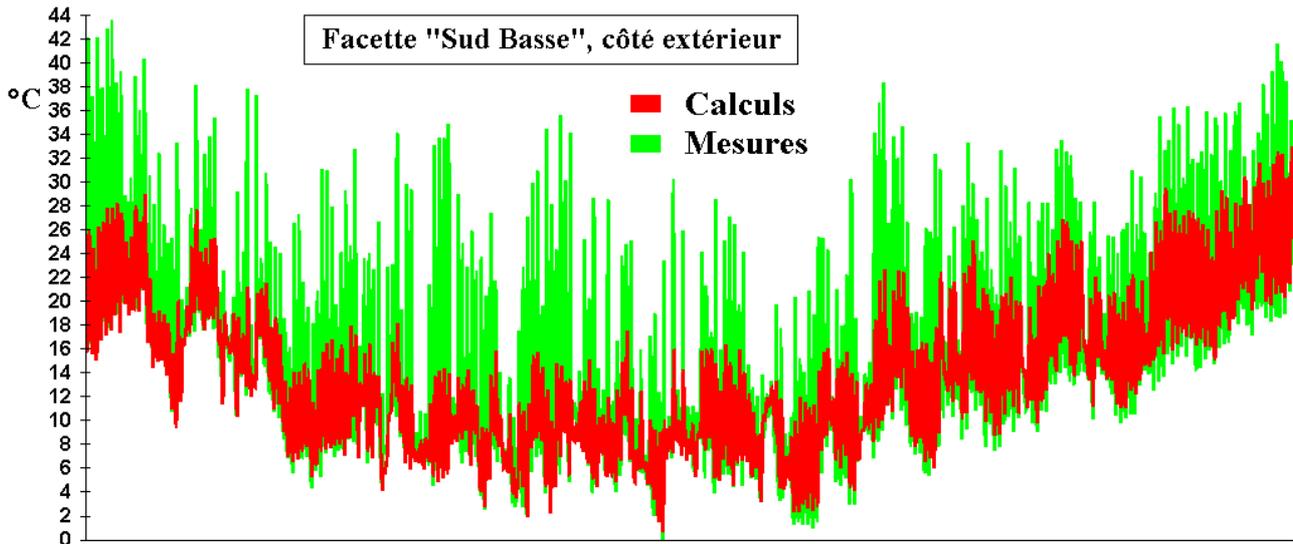


Fig. 17 : tracé des températures de surface extérieures de la facette Sud Basse de l'« hangarette »

On constate une bonne prédiction des températures pour les côtés intérieurs, et une moins bonne pour les côtés extérieurs, en particulier pour le côté Sud qui reçoit le plus de soleil. Cela est dû à la « rusticité » du modèle de paroi 1R2C, qui ne peut suivre des variations horaires, compte tenu de la forte épaisseur et de l'inertie de la paroi (ce modèle a surtout pour objectif de restituer les flux et températures moyennes au-delà des variations horaires).

5. PRESENTATION DES RESULTATS DANS LE CAS « CONTENEUR »

La température d'air intérieur a été mesurée à deux hauteurs : celle qui minimise les écarts avec les calculs est la plus basse, et c'est celle qui est utilisée pour les comparaisons.

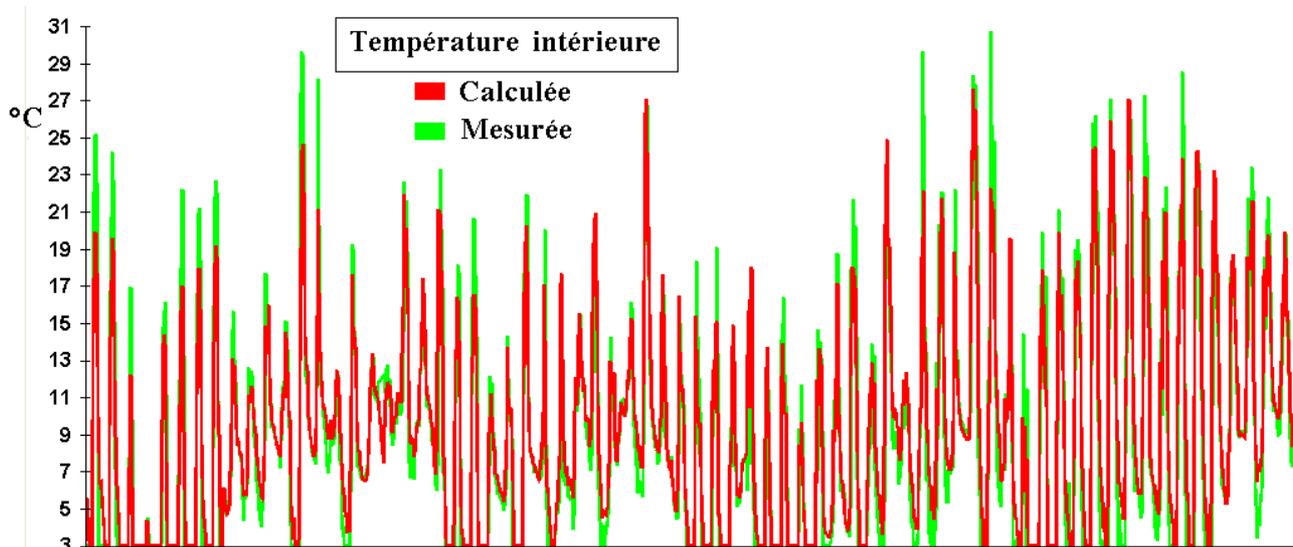


Fig. 18 : tracé des évolutions temporelles des températures intérieures calculée et mesurée pour le « conteneur »

La période de simulation va du 12 février au 22 avril 2008. La **moyenne des écarts calcul/mesure** est de 0,14 °C et l'**écart-type sur ces écarts** est de 1,23 °C (pour l'ensemble des valeurs de température extérieure supérieures à 3 °C).

A noter un problème observé sur les températures intérieures mesurées lorsque la température extérieure est inférieure à environ 3 °C : on observe régulièrement une incohérence des mesures. En effet, compte tenu de la faible inertie de la structure, la température intérieure mesurée doit être sensiblement la même que la température extérieure mesurée, ce qui n'est pas toujours le cas. Cet écart est mis sur le compte d'un problème à vérifier, dû peut-être à la condensation ou au gel. C'est pourquoi, les comparaisons ne sont pas faites lorsque la température extérieure est inférieure à 3 °C.

La figure 14 présente les fréquences de températures calculées et mesurées. En abscisse figurent les classes de températures et en ordonnée le nombre d'heures pour lesquelles ces températures sont observées.

On constate globalement une prédiction satisfaisante des fréquences, à part pour des températures inférieures à 10°C, mais le problème de mesures qui a été rencontré est certainement à prendre en compte.

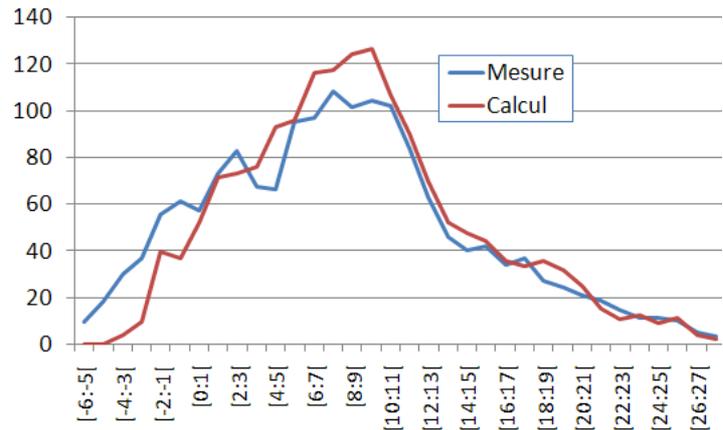


Figure 19 : relation entre nombre d'heures et classes de températures pour le « conteneur »

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le logiciel RAIMANTA donne au LRBA les moyens d'évaluer avec une bonne précision les températures induites dans les abris militaires clos, contribuant au processus de spécification au plus juste des matériels susceptibles d'être stockés dans ces abris.

Le modèle physique est celui du logiciel KoZiBu [7]-[8], qui s'appuie sur une modélisation classique dans le domaine de la thermo-aéraulique des bâtiments. La spécificité de RAIMANTA est l'application de ce modèle à une palette plus vaste de géométries pour lesquelles il n'était pas prévu à l'origine.

Il faut cependant noter que le modèle physique de RAIMANTA atteint ici ses limites, qui sont d'ailleurs celles de la modélisation actuelle dans le domaine du bâtiment. Il est en effet difficile de couvrir avec le même modèle de grands abris inertes semi-enterrés, et des petits abris à parois très minces, alors que ce modèle a été essentiellement développé pour des habitations tertiaires ou résidentielles à la palette de configurations bien plus réduite. Les points faibles rencontrés concernent essentiellement la stratification thermique et le modèle de paroi (par extension, le modèle de sol).

La stratification thermique est un point très difficile à aborder, car ce phénomène se situe à l'intersection de deux mondes, le premier étant celui de la CFD (Computational Fluid Dynamics) et le second celui des modèles globaux à une ou deux températures. L'utilisation de modèles intermédiaires (modèle zonaux, etc.) n'est pas actuellement satisfaisante, car elle fait appel à trop de paramètres de réglage. Une piste de recherche actuellement envisagée pour KoZiBu est celle des modèles utilisés pour la stratification thermique dans les ballons d'eau chaude, où un modèle simple de découpage en strates donne de bons résultats.

Quoiqu'il en soit, l'objectif visé par le LRBA a été atteint avec le logiciel RAIMANTA, puisque celui-ci permet par simulation de retrouver les résultats statistiques observés en situation réelle.

7. REFERENCES

- [1] « Climate classification for building energy codes and standards : part 1 & 2 - development process » R. S. BRIGGS, R. G. LUCAS and Z. T. TAYLOR, ASHRAE Transactions 2003, vol. 104, Pt 1, pp. 109-130.
- [2] <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- [3] <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- [4] Note interne - T. MAROT, P. AUBINEAU, L. LONGUET, DGA/DET/LRBA – Vernon
- [5] « Détermination de modèles thermodynamiques paramétrables de bâtiments pour la prédiction des conditions thermiques à l'intérieur des locaux en fonction de l'historique des conditions météorologiques » I. GUILLOTON, Université Pierre et Marie Curie, rapport de stage LRBA 2006
- [6] « Calcul dans des abris clos des paramètres d'ambiance induite par la météorologie extérieure » P. COMIEN, DGA/DET/LRBA – Vernon, ASTELAB 2007
- [7] http://www.jnlog.com/kozibu1_fr.htm
- [8] « KoZiBu, Dossier des Algorithmes », NOEL J., JNLOG Report 0901 2009, http://www.jnlog.com/pdf/kozibu_methods_report_fr.pdf

- [9] « CoDyBa, a design tool for buildings performance simulation »
J. NOEL, J.-J. ROUX, P. S. SCHNEIDER, Building Simulation 2001, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001
- [10] « Présentation et perspectives du logiciel CoDyBa »
J. NOEL, J.-J. ROUX et J. VIRGONE, Journée thématique SFT-IBPSA, La Rochelle, 31 mars 2005
- [11] « CoDyBa, Tests Paramétriques sur bâtiments de Taille Réelle »
J. NOEL, JNLOG Report 0403 2004, http://www.jnlog.com/pdf/codyba_samples_report_fr.pdf
- [12] « Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments »
J.-J. ROUX, Thèse de doctorat 1984, INSA de Lyon.
- [13] « CoDyBa, BESTEST Qualification», J. NOEL, JNLOG Report 0401 2004
http://www.jnlog.com/pdf/codyba_bestest.pdf
- [14] BESTEST Report
« International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and diagnostic Method »
R. JUDKOFF and J. NEYMARK, NREL/TP-472-6231, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
<http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf>
- [15] http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm