

# Logiciel RAIMANTA pour la simulation des abris militaires

Jean Noël<sup>1</sup>, Philippe Comien<sup>2</sup>, Serge Le Vilain<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JNLOG – Ingénieur FreeLance  
15, place Carnot, 69002 Lyon,  
[contact@jnlog.com](mailto:contact@jnlog.com)

<sup>2</sup> DGA-DET-LRBA – Laboratoire de Recherches Balistiques et Aérodynamiques  
BP 914, 27207 Vernon  
[philippe.comien@dga.defense.gouv.fr](mailto:philippe.comien@dga.defense.gouv.fr), [serge.le-vilain@dga.defense.gouv.fr](mailto:serge.le-vilain@dga.defense.gouv.fr)

---

*RESUME.* Cet article présente le noyau de calcul KoZiBu intégré dans le logiciel RAIMANTA. Cet outil développé pour la DGA permet la détermination des températures à l'intérieur des abris militaires lourds et légers, dans le but de spécifier au plus juste les conditions climatiques de stockage des systèmes d'armes.

*MOTS-CLÉS :* bâtiment, simulation, thermique

---

*ABSTRACT.* this paper presents the calculation model used in software RAIMANTA. This tool was developed for DGA to compute the temperatures induced in heavy and light military shelters, in order to specify at the lowest price the climatic conditions involved in storage of defence equipment.

*KEYWORDS :* thermal, building, simulation.

---

## 1. INTRODUCTION

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 ces matériels en situation 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.

L'évaluation de ce paramètre est l'objectif de l'outil logiciel de simulation du comportement thermique de différents abris militaires développé dans le cadre du projet RAIMANTA (Restitution de l'Ambiance Induite par Modélisation ANalytique et Thermodynamique d'Abris),

Cet outil logiciel intègre le noyau de calcul du logiciel KoZiBu, qui est présenté dans cet article. Ses résultats sur deux configurations types d'abris sont comparés à ceux obtenus dans le cadre d'une campagne d'essais réalisés sur sites par le LRBA.

## 2. TRAITEMENT DE DEUX ABRIS CARACTERISTIQUES

Les deux abris traités à titre de test dans le projet RAIMANTA sont très différents, l'un très massif (hangarette), l'autre très peu inerte (conteneur ISO 20 pieds).



Fig. 1 : schéma de l'hangarette

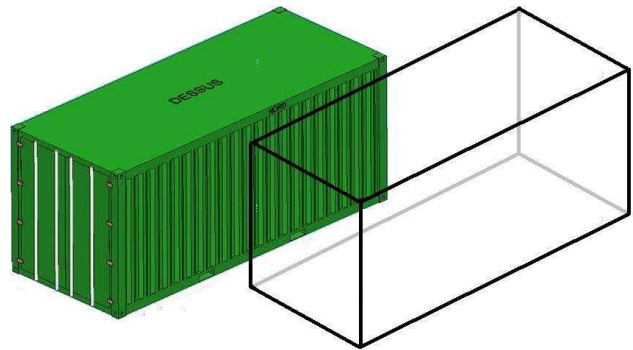


Fig. 2 : schéma du conteneur ISO 20 pied

L'hangarette (fig. 1) est une structure semi-cylindrique reposant sur une dalle de 25 cm de béton, en contact direct avec le sol. L'épaisseur de la voûte en béton est 66 cm et son rayon est de 7,30 m. Les faces latérales de l'hangarette ont été discrétisées par 6 facettes (nombre de sondes utilisées pour les températures de surface).

Le conteneur (fig. 2) est un parallélépipède en tôle légère (de base 6 x 2,40 m<sup>2</sup> et de hauteur 2,60 m). Les parois sont formées de 1,5 mm de tôle et le plancher de 2 cm de bois.

Tous ces abris sont considérés comme sans fenêtre et vides pour les simulations.

## 3. LES DONNEES METEOROLOGIQUES

Une station météorologique a relevé la température, l'humidité relative, la pression, le rayonnement solaire global sur un plan horizontal, vitesse et direction du vent à 2 et 10 m.

Les sondes des températures de surface des parois ont été placées à trois hauteurs différentes sur chaque face d'un abri. Celles de température intérieure ont été placées à deux hauteurs dans chaque abri (à l'air libre, elles mesurent la température résultante).

Comme les mesures ont porté sur le rayonnement global, les rayonnements direct et diffus ont dus être reconstitués : des essais ont montré que la répartition avait peu d'influence sur les écarts calcul/mesure, et finalement un ratio 50% / 50% a été retenu.

## 4. PRESENTATION DU LOGICIEL KOZIBU

Le logiciel RAIMANTA intègre le noyau de calcul de KoZiBu (Noël, 2009), qui est un logiciel de Simulation Thermique Dynamique (STD) inspiré de CoDyBa (Noël *et al.*, 2005)

Ce noyau de calcul a été validé par le passage des tests BESTEST, devenus le standard américain ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (Noël, 2004, Judkoff *et al.*, 1995). La comparaison calcul/expérience présentée plus loin 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 militaires très variés et cela sur de longues périodes de simulation.

KoZiBu est fondamentalement un logiciel de simulation multizones. De par sa méthode de résolution itérative, le nombre de locaux n'est pas limité, 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, etc. Ici n'est présentée que la modélisation relative à une zone thermique, sans système de régulation thermique et sans traitement de l'humidité, également possible avec KoZiBu.

Les hypothèses physiques de base relèvent de la thermo-aéraulique du bâtiment, à savoir : température de 10 à 40 °C, "faibles" mouvements d'air (renouvellements d'air a priori inférieurs à 10 vol/h), temps caractéristique supérieur à 15 mn. Cette hypothèse de temps caractéristique est plus limitative car elle est à la base du modèle de paroi « 1R2C » présenté plus loin et qui présuppose une certaine inertie de la paroi.

## 5. PRESENTATION DU NOYAU DE CALCUL DE KOZIBU

### 5.1. LES MECANISMES DE BILANS ENERGETIQUES

Les équations de bilan font intervenir des échanges au niveau de l'enveloppe du bâtiment. En ce qui concerne le rayonnement, on distingue les échanges dans les grandes longueurs d'onde (GLO, domaine de l'infrarouge) des échanges courtes longueur d'onde (CLO, domaine du visible), qui relèvent de mécanismes tout à fait différents.

La figure 3 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.

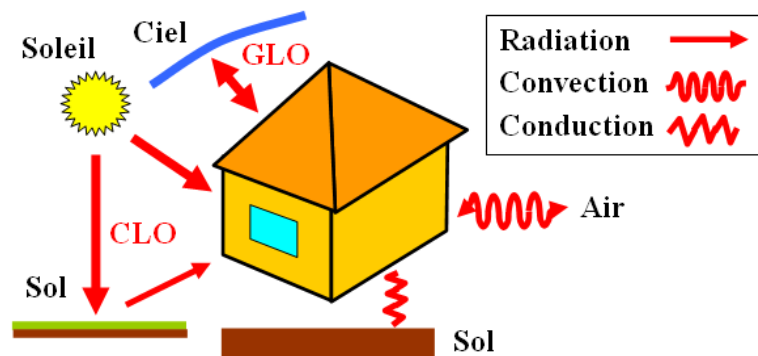


Figure 3 : schématisation des flux d'échange extérieurs

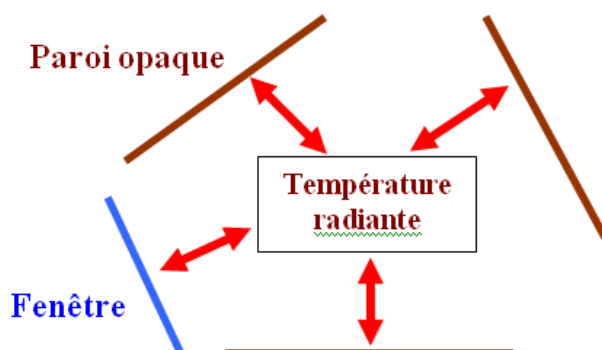


Figure 4 : flux GLO dans un volume d'air

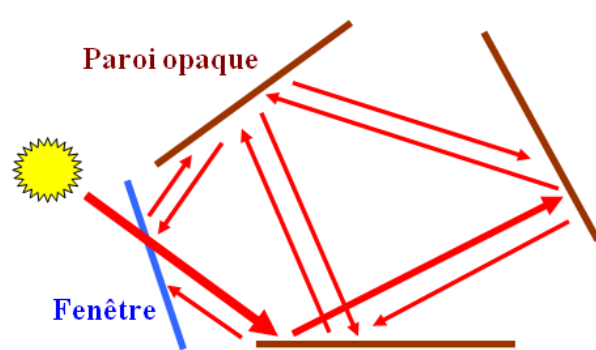


Figure 5 : flux CLO dans un volume d'air

La figure 4 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.

La figure 5 schématise les mécanismes de réflexion/absorption du rayonnement CLO dans un local. Le rayonnement CLO pénètre dans le local par une surface vitrée, et subit une succession de réflexions et d'absorptions par les différentes parois. Le rayonnement CLO peut également être produit en plus petite quantité par une source interne de chauffage. Ce processus de réflexions/absorptions est rendu par un calcul matriciel.

5.2. LE MODELE DE VOLUME D'AIR

A un volume d'air d'un abri sont associées les variables de température d'air et de température radiante (moyenne des températures surfaciques des parois).

Le sol correspond à un « volume d'air » rempli de « terre », échangeant thermiquement par conduction avec la face inférieure d'un plancher.

5.3. LE MODELE DE PAROI « 1R2C »

Pour les transferts conductifs dans les parois, le modèle "1R2C" est utilisé ("1 Résistance - 2 Capacités", Roux, 1984).

La modélisation des transferts conductifs en régime variable dans les parois opaques est obtenue en raisonnant sur les bilans énergétiques.

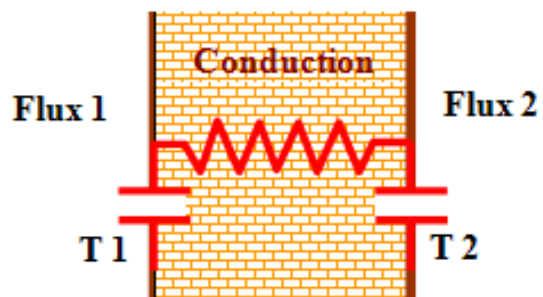


Figure 6 : modèle analogique d'une paroi

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 [1] 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 :

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

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

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.

### 6. PRESENTATION DES RESULTATS DANS LE CAS DU 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.

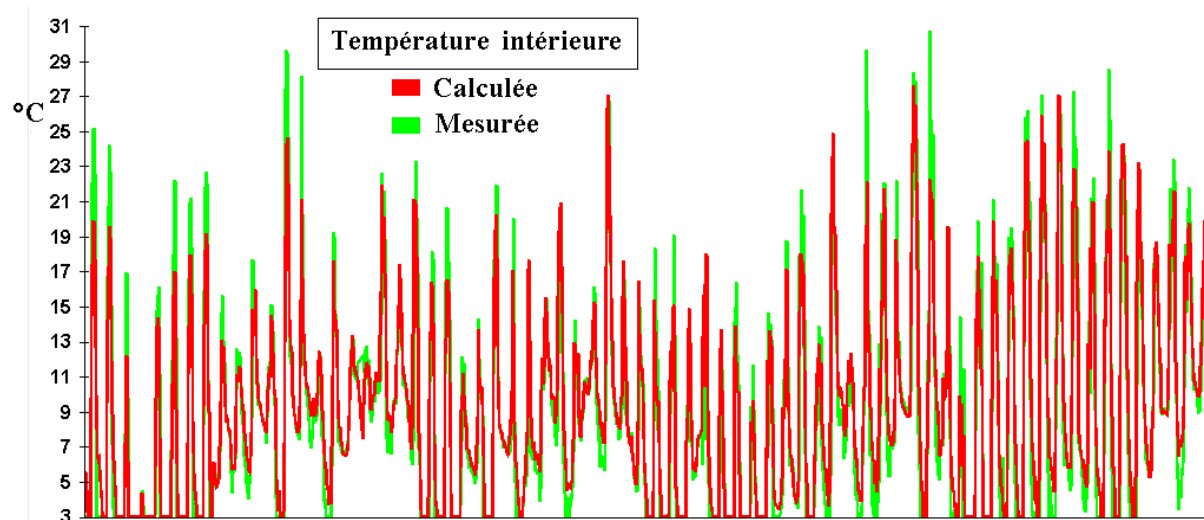


Fig. 7 : températures intérieures calculée et mesurée pour le conteneur ISO 20 pieds

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).

La figure 8 donne 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.

Les fréquences sont correctement prédites, à part pour des températures inférieures à 10°C, mais il y a un doute sur la validité des mesures de températures proche de 0°C, compte-tenu de l'humidité observée dans le conteneur.

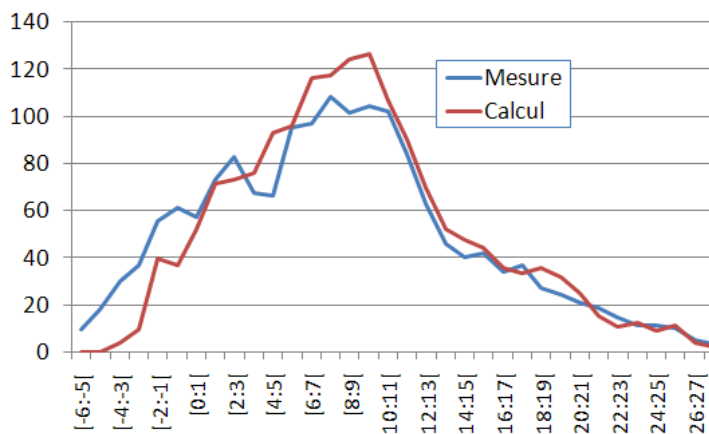


Fig. 8 : relation entre nombre d'heures et classes de températures pour le conteneur

## 7. PRESENTATION DES RESULTATS DANS LE CAS DE L'HANGARETTE

### 7.1. TEMPERATURE INTERIEURE (TEMPERATURE DU VOLUME D'AIR)

Dans le logiciel KoZiBu, le sol est modélisé par une épaisseur constante  $E$  de matériau  $M$ . 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 dans des plages de valeurs réalistes : par défaut, les « bons » paramètres sont une épaisseur  $E$  de 25 m et une température initiale  $T$  de 15 °C, le sol étant pris aux paramètres habituels ( $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$ ,  $C=1100 \text{ J/K.kg}$ ).

La figure 9 présente les températures intérieures calculée et mesurée dans l'hangarette, pour la période du 29 septembre 2003 au 13 juin 2004.

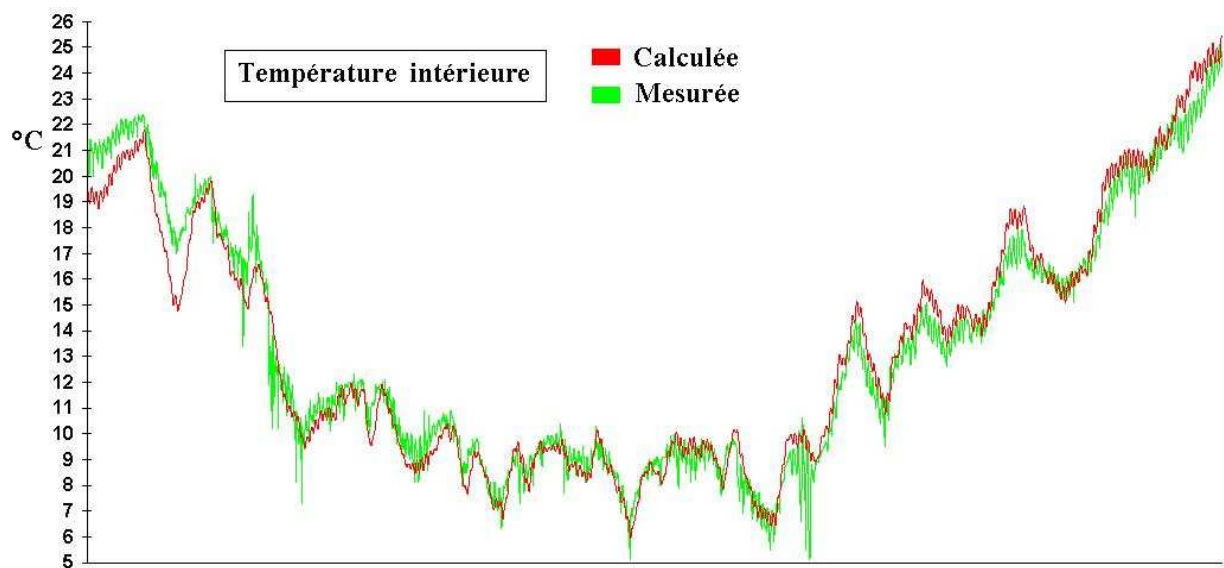


Figure 9 : températures intérieures calculée et mesurée pour l'hangarette

L'écart sur les premiers temps de simulation est probablement imputable à la « mise en régime » du système « bâtiment » + « sol ».

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 10 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.

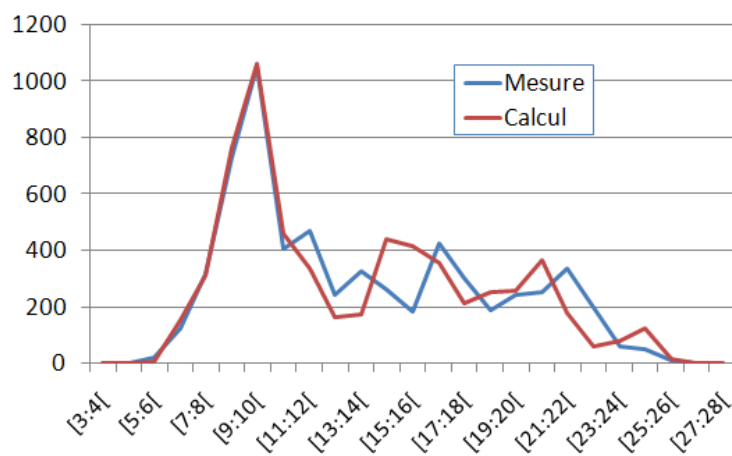


Fig. 10 : relation entre nombre d'heures et intervalle de températures pour l'hangarette

On constate globalement une prédiction satisfaisante des fréquences.

## 7.2. TEMPERATURES DE SURFACE INTERIEURE ET EXTERIEURE (FACETTES DE L'ENVELOPPE)

Les figures 11 et 12 présentent les températures extérieures des facettes « basses » côté Nord et Sud, et la figure 13 la température intérieure côté Sud (29/9/2003 au 13/6/2004).

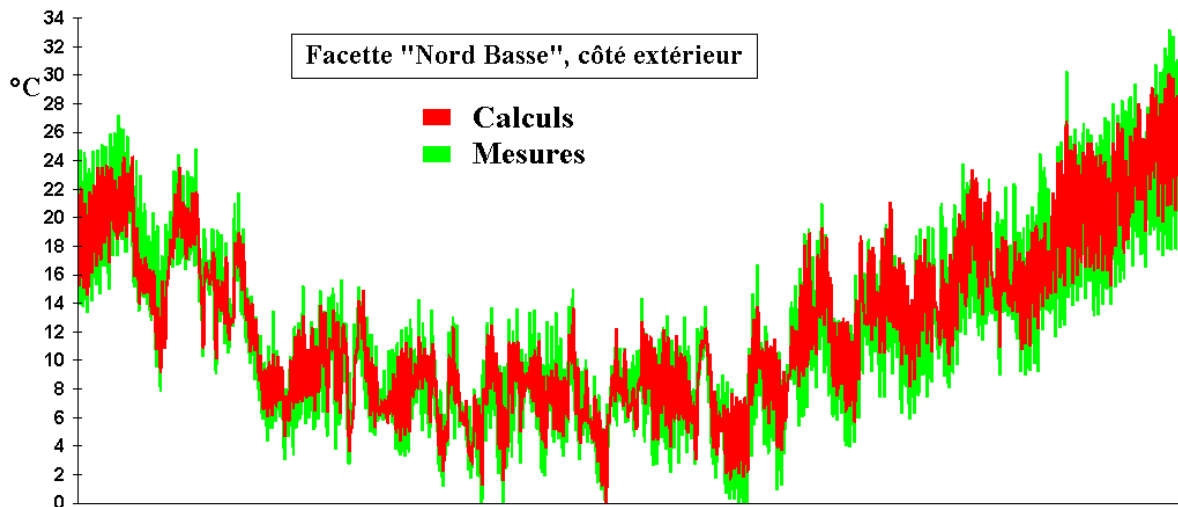


Figure 11 : températures de surface extérieure de la facette Nord Basse de l'hangarrette

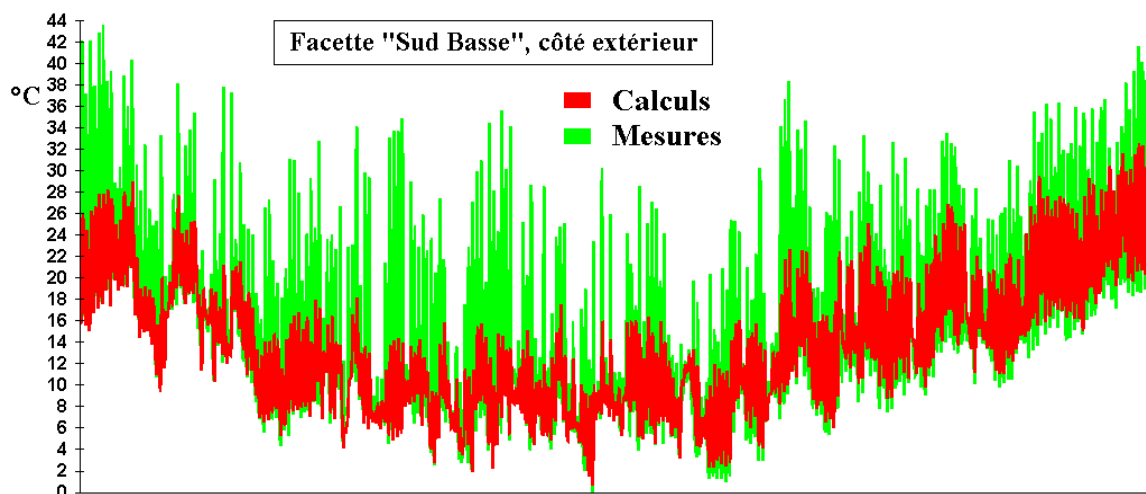


Figure 12 : températures de surface extérieure de la facette Sud Basse de l'hangarrette

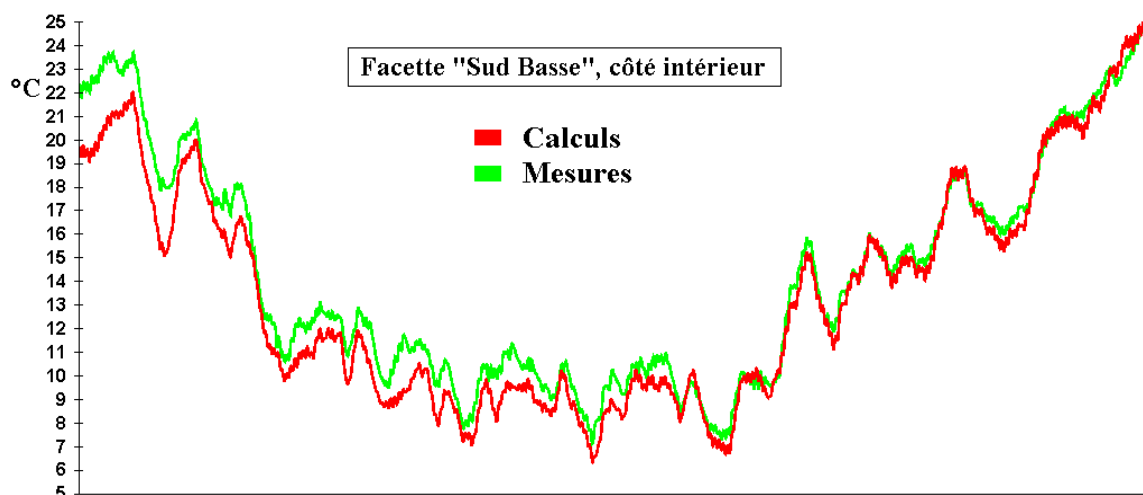


Figure 13 : températures de surface intérieure de la facette Sud Basse de l'hangarrette

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.

## 8. 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.

Le modèle physique est celui du logiciel KoZiBu, modèle classique de la thermo-aérodynamique des bâtiments. Il permet d'atteindre l'objectif du LRBA (fréquences des températures) même si ce modèle est utilisé pour des géométries non prévues à l'origine.

Le modèle de paroi « 1R2C » atteint ici ses limites, et doit être revu. L'amélioration prévue est de procéder de la même façon que pour le traitement de matériaux à changement de phase (MCP). Il s'agit de placer quelques nœuds de calculs intermédiaires. Dans le cas des MCP, deux nœuds supplémentaires sur les deux faces de la couche suffisent à atteindre une précision acceptable (Virgone *et al.*, 2009).

## 9. BIBLIOGRAPHIE

- Judkoff R., Neymark J. (1995) « International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and diagnostic Method », NREL/TP-472-6231, National Renewable Energy Laboratory. , Golden, CO.
- Noël J. (2009) «KoZiBu, Dossier des Algorithmes», "JNLOG Report 0901", [http://www.jnlog.com/pdf/kozibu\\_methods\\_report\\_fr.pdf](http://www.jnlog.com/pdf/kozibu_methods_report_fr.pdf)
- Noël J., Roux J.-J., Schneider P. S. (2001) « CoDyBa, a design tool for buildings performance simulation », *Building Simulation*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Noël J., Roux J.-J., Virgone J. (2005) « Présentation et perspectives du logiciel CoDyBa », *Journée thématique SFT-IBPSA*, La Rochelle.
- Noël J. (2004) « CoDyBa, BESTEST Qualification », « JNLOG Report 0401 » [http://www.jnlog.com/pdf/codyba\\_bestest.pdf](http://www.jnlog.com/pdf/codyba_bestest.pdf)
- Roux J.-J. (1984) « Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments », Thèse de doctorat, INSA de Lyon.
- Virgone J., Noël J., Reisdorf R. (2009) "Numerical study of the influence of the thickness and melting point on the effectiveness of phase change materials: application to the renovation of a low inertia school", *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, Scotland.