

Expérimentation in situ sur la cellule BestLab pour la validation d'un modèle prenant en compte la tache solaire

A. Rodler*¹; J. Virgone¹; J.-J. Roux¹; H. Castet²; R. Le Berre²; M. Baranzini²; J.L. Hubert²

¹ CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA-Lyon, Université Lyon 1 20 Av A. Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, France

² Site EDF R&D des Renardières, Avenue des Renardières – Ecuelles, 77818 MORET-SUR-LOING Cedex

*auline.rodler@insa-lyon.fr

RESUME.

Un modèle tridimensionnel fin d'enveloppe de bâtiment a été développé, tenant compte de la tache solaire dans son bilan énergétique. Sa validation expérimentale fait l'objet de cette communication. Une expérience en conditions réelles a été mise en place dans une des cellules, fortement isolée, du laboratoire BESTLab d'EDF R&D. Il s'agit de mesurer les distributions de températures des surfaces intérieures des parois de la cellule par le biais de sondes platine et de caméras infrarouges, ainsi que la température d'air grâce à trois sondes placées à différentes hauteurs. Par ailleurs, une attention particulière est portée à la localisation de la tache solaire grâce à l'interprétation de prises de vue dans le visible et dans l'infrarouge. L'ensemble de ces mesures relevées au pas de la minute, permet alors d'avoir une description fine du comportement thermique du bâtiment, de ses parois et de l'influence de la tache solaire dans la cellule.

MOTS-CLÉS : bâtiment basse consommation, validation de modèle, tache solaire, conduction tridimensionnelle

ABSTRACT.

This paper describes a numerical model to simulate a single room, using a refined spatial three-dimensional description of heat conduction in the envelope and considering the sun patch moving. Validation of the model was carried out using experimental data from a low energy and strongly insulated cell operating in a natural climate. This cell is located in the BESTLab of EDF R&D. A set of well calibrated temperature platine sensors and an infrared camera have been used to accurately measure the cell's thermal behavior. A particular attention is given to the location of the sun patch and its validation. This set of one minute wise measurements enables to have a refined description of the thermal behavior of the building and its walls, considering the impact of the sun patch.

KEYWORDS: low energy building, model validation, sun patch, three dimensional conduction

1. INTRODUCTION

La réglementation thermique 2012 (RT 2012) vise à réduire les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre en imposant une limite maximale à la consommation énergétique des bâtiments neufs. Ce nouveau contexte réglementaire privilégie le développement des bâtiments basse consommation (BBC) labélisé BBC 2009 dont la consommation conventionnelle en énergie primaire

est inférieure à 50 kWh/(m².an) en moyenne. La conception des BBC les rend particulièrement sensibles aux sollicitations internes et externes telles que, respectivement, les chauffages et autres charges d'un côté, et les sollicitations climatiques d'un autre (Duforestel et al.). En effet, le moindre apport énergétique peut avoir un impact important sur la dynamique thermique d'un BBC, ceux-ci nécessitant très peu d'énergie pour se chauffer. Ainsi, par exemple, l'éclairement solaire perçu dans une pièce peut très vite la chauffer jusqu'à l'inconfort.

Afin d'analyser l'impact des sollicitations sur le comportement thermique du bâtiment, il est nécessaire de modéliser fidèlement son enveloppe. Nous avons pris le parti de modéliser nous-mêmes l'enveloppe d'un bâtiment en trois dimensions, considérant les phénomènes thermiques et les sollicitations de façon dynamique. Ce papier est dédié à la validation de ce modèle, réalisée par confrontation à des mesures réalisées dans une cellule teste de l'installation BESTLab d'EDF les Renardières. Nous présenterons donc dans un premier temps le modèle implémenté puis le protocole expérimental mis en place pour enfin aboutir à l'étape de validation.

2. PRESENTATION DU MODELE

Il existe de nombreux outils de simulation du comportement thermique de bâtiment mis à disposition des ingénieurs thermiciens. Nous pouvons en effet citer, pour les plus utilisés, ENERGYPLUS, TRNSYS dont l'environnement TRNSYS building est spécialement dédié à ce type d'applications, DYMOLA développé à partir de MODELICA et CODYBA. Ces outils sont optimisés pour présenter des résultats relativement précis en un minimum de temps de calcul, si bien que certaines hypothèses ont été envisagées afin de simplifier les modèles. La conduction y est traitée de façon monodimensionnel, les flux radiatifs sont considérés uniformes sur chaque paroi et un seul nœud d'air intérieur est considéré.

Ces outils, quel que soit leur niveau de sophistication, semblent utiliser des modèles trop simplifiés et inadaptés pour traiter nos problématiques, si bien que nous avons développé notre propre modèle. D'ailleurs, cette disposition nous permet aussi de maîtriser parfaitement les entrées, les calculs et les sorties.

Un modèle 3D dynamique d'enveloppe du bâtiment a été réalisé pour une pièce isolée parallélépipédique avec une fenêtre. Le comportement thermique dynamique de la pièce est alors modélisé selon quatre fonctions calculant :

- les échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'ondes (notées CLO et GLO) déterminant la répartition du rayonnement solaire ;
- la convection aux interfaces paroi/environnement ambiant ;
- la conduction tridimensionnelle en volume fini au sein des matériaux de l'enveloppe ;
- le bilan du volume d'air.

Le comportement des températures à l'intérieur des parois T [K] est régi par l'équation de conduction :

$$CV \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda \Delta T \quad (1)$$

C désignant la capacité thermique volumique [J/(m³.K)], V le volume des volumes de contrôle [m³] tandis que λ est la conductivité thermique [W/(m².K)]. Au niveau des interfaces parois/environnement, les conditions aux limites, sous forme d'un bilan de flux, sont appliquées :

$$CV \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda \Delta T + \varphi_{conv} + \varphi_{CLO} + \varphi_{GLO} \quad (2)$$

φ_{conv} est le flux convectif [W], φ_{CLO} et φ_{GLO} sont les flux radiatifs courtes et grandes longueur d'onde [W]. La définition de ces flux est précisée dans (Rodler, 2013a ; Rodler, 2013b)

Enfin, la température d'air T_{ai} [K] à l'intérieur de la cellule est calculée par le bilan enthalpique donné par

$$CV \frac{\partial T_{ai}}{\partial t} = Q(T_{ae} - T_{ai}) + \sum h(T_{surf} - T_{ai}) + CI \quad (3)$$

Q étant le débit d'air extérieur de température T_{ae} [K] s'infiltrant dans la pièce, h sont les coefficients convectifs [W/(m².K)], T_{surf} [K] étant la température de surfaces des pièces.

La résolution des équations différentielles (1-2-3) est réalisée grâce à la méthode des volumes finis. Un maillage cartésien est effectué par le logiciel Heat3 d'où sont extraites les capacités et conductances des volumes de contrôle. Ensuite, les équations différentielles sont intégrées selon un schéma de type Crank-Nicholson et implémentées sous Matlab[®]. Ce schéma de résolution est apprécié car stable robuste et précis, et il permet de résoudre les équations différentielles avec un pas variable adapté : le pas d'intégration est raccourci automatiquement lorsque les sollicitations sont fluctuantes et inversement, il est allongé lorsque les sollicitations varient peu. La dynamique de la thermique du bâtiment est ainsi mieux prise en compte.

3. VALIDATION DU MODELE

3.1. PRESENTATION DE LA CELLULE TEST

BESTLab (Building Envelope and Solar Technologies Laboratory) est un laboratoire spécialement dédié aux études des enveloppes du bâtiment et aux technologies solaires intégrées au bâtiment. Ses objectifs sont d'étudier les performances d'enveloppes en conditions naturelles à l'échelle 1 et d'intégrer et étudier de nouveaux systèmes. A termes, il s'agit de caractériser les Bâtiments Basse Consommation (BBC) et des bâtiments rénovés selon des critères d'Economie d'Energie à partir de mesures expérimentales et de modèles validés grâce aux mesures. Les impacts de l'environnement extérieur (apport solaire, température ambiante) sur le comportement thermique de ce type de bâtiment sont entre autre étudiés.

BESTlab est composé de 12 cellules de test de dimensions 3 m x 3 m x 3 m environ, réparties sur deux étages. Les 6 cellules de l'étage sont mansardées, les éléments de leur toiture étant modifiables tandis que les 6 cellules du rez-de-chaussée disposent d'une paroi amovible. Chacune des cellules est instrumentée : des capteurs mesurent températures d'air et de parois, rayonnement incident, tandis que le bâtiment est doté d'une station météorologique installée à proximité. Enfin le bâtiment est piloté de telle sorte que les cellules soient entourées d'une garde thermique de température constante gardée à 20°C.

La cellule de teste utilisée dans le cadre de notre expérience se situe au rez-de-chaussée, orientée à l'Ouest (Fig. 1) :

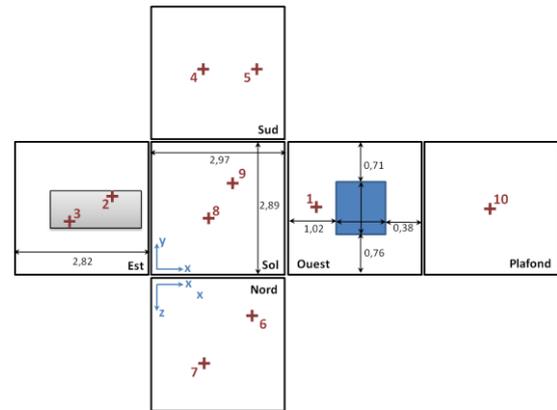


Figure 1: Face Ouest de BESTlab Figure 2: Emplacement de la fenêtre et position des sondes

Il s'agit d'une pièce de dimensions 2,97 x 2,90 x 2,82 m, dont les 5 faces donnant sur l'intérieur du bâtiment sont fortement isolées ($U < 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Les murs sont composés de couches constituées de différents matériaux - enduits, isolants, plâtre - représentant une épaisseur totale de 41 cm pour les murs latéraux gauche/droite/fond, et 32,4 cm pour la paroi donnant à l'extérieur. Une fenêtre est apposée à la paroi extérieure. Elle est équipée d'un double vitrage DV 4/16/4 FEA, une lame d'air de 16 mm, encadrée de deux vitres de 4 mm. La vitre a une dimension de 1,31 x 1,31 m² et est à 1,02m du plancher et 0,76cm du nu intérieur de la paroi latérale nord (Fig. 2). La fenêtre est légèrement encastrée dans le mur de la paroi Ouest. Il est indispensable de considérer l'encastrement pour le positionnement de la tache solaire, celui-ci influençant particulièrement la taille de la tache solaire. Dans cette optique, la taille réelle de la fenêtre pour le calcul géométrique de la tache solaire a été modulée en fonction de la profondeur de l'encastrement (30cm ici) et de la position du soleil.

3.2. METROLOGIE

3.2.1. Mesures de températures

La cellule a été instrumentée par un ensemble de sondes (Fig. 2) afin de connaître précisément son comportement thermique. Les mesures réalisées auront deux applications potentielles :

- soit elles serviront de conditions aux limites appliquées dans le cadre des simulations réalisées avec notre modèle,
- soit elles serviront de référence pour la validation de notre modèle.

Les températures en surfaces des parois intérieures de la cellule sont mesurées grâce à 11 sondes PT100 réparties à la surface des parois. A l'extérieur, 4 sondes sont réparties autour de la fenêtre de la paroi opaque Ouest tandis qu'une sonde PT100 est placée en surface de la contreporte de la paroi Est. En ce qui concerne le sol, cinq sondes ont été fixées entre l'isolant et les panneaux en CTBH et six autres ont été placées de la même façon entre l'isolant et la dalle. Les sondes sont dispersées seulement sur une moitié du plancher : une symétrie dans les températures mesurées à ce niveau avait été observée lors d'une étude préalable. Enfin, la température d'air à l'intérieur de la cellule est mesurée grâce à 3 sondes PT100 placées à différentes hauteurs, aux centres de 3 volumes fictifs représentant le tiers de la hauteur de la cellule. Cette disposition est prise pour évaluer et tenir compte de l'éventuelle

hétérogénéité et stratification des températures d'air. L'incertitude globale des sondes PT100 est évaluée à 0.15.

3.2.2. Suivi de la tache solaire

L'objet de notre étude étant entre autre d'étudier l'impact des variations climatiques sur le comportement thermique du bâtiment, il a été décidé au préalable de modéliser les apports extérieurs le plus précisément possible, justifiant le choix de localiser à chaque instant la tache solaire dans le bâtiment. La validation de ce nouveau modèle passe alors par une vérification du bon positionnement de la tache solaire et l'évaluation des températures en son sein. Dans cette optique, deux dispositifs de suivi de la tache solaire ont été installés dans la cellule :

- une caméra Infrarouge (IR) a été placée dans un premier temps sur le plafond, visant le sol. Il s'agit d'une caméra FLIR SC500 de résolution 320 x 420 pixels, mesurant un spectre entre 7,5 et 13,0 μm . Cette caméra permet de mesurer le champ de température pour tout le sol. Par la suite, celle-ci a été déplacée sous la fenêtre afin de viser la paroi Est.
- Juste à côté de la caméra IR et à la même hauteur, une caméra dans le visible de type GoPro a été placée. Celle-ci permet d'observer la partie visible et de localiser visuellement la tache solaire.

3.2.3. Données météorologiques

Les données météorologiques sont des entrées primordiales de notre modèle. Dans le cadre de ce dispositif expérimental de validation, nous disposons de nombreuses mesures météorologiques. Un pyranomètre a été installé sur la paroi Ouest de la cellule BESTlab mesurant l'éclairement global vertical arrivant sur le mur. Ensuite, nous disposons de données de la station météorologique du site des Renardières. La température de l'air extérieur y est mesurée à la hauteur de 4 mètres, par l'intermédiaire d'une sonde platine protégée du rayonnement (précision $\pm 0,2^\circ\text{C}$). La mesure de la vitesse du vent est réalisée par des anémomètres à hélice placés sur un mât à 3m du sol (précision de 1%). La direction du vent est quant-à elle déterminée par une girouette placée au niveau de l'anémomètre (précision de 1%). Enfin, le rayonnement global horizontal (précision $\pm 0,6\%$) ainsi que ses composantes diffuses et directes (précision $\pm 0,2\%$) du rayonnement solaire sont mesurés

Dans une étude précédente, nous avons montré que des données à la minute étaient indispensables pour gagner en précision (Rodler et al. 2013a ; Rodler et al 2013b.). Considérant ces contraintes, l'ensemble des mesures enregistrées, qu'il s'agisse donc des données météorologiques, les températures de garde et d'air intérieur, mais aussi des images IR et dans le visible ont été réalisées avec un pas de temps de 1 minute. Par ailleurs, afin de garantir une cohérence dans le modèle et ses sorties, l'ensemble de ces mesures ont été synchronisées.

4. RESULTATS DE LA VALIDATION

4.1.1. Température d'air de la cellule

Les calculs de températures d'air étant effectués ne considérant qu'un seul volume d'air dans la cellule, aucun effet de stratification n'est pris en compte. La validation du modèle se fera donc par comparaison avec les mesures au niveau de la sonde placée au milieu de la cellule. Ce choix se justifie

par le fait que les trois mesures de la température d'air sur le mât atteignant des écarts de 0.5°C en moyenne, l'effet de stratification de l'air dans nos conditions expérimentales (pièces fermée et sans ventilation) reste assez faible. Ici, les données d'entrées du modèle et les mesures utilisées pour la comparaison ont été réalisées pendant une semaine au mois de mai 2013.

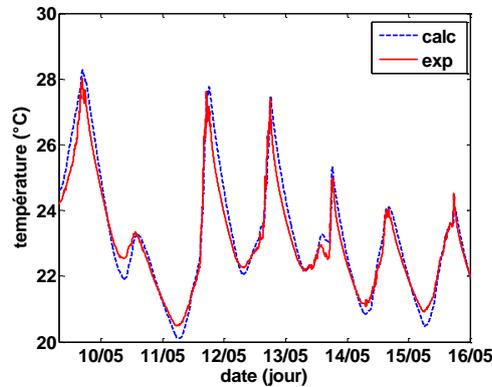


Figure 3: Température d'air intérieure modélisée et mesurée (sonde au centre de la cellule)

Nous observons que les températures d'air simulées et la mesure suivent les mêmes tendances, avec des différences atteignant $1,2^{\circ}\text{C}$, dépassant légèrement les barres d'incertitudes des mesures, mais en moyenne de 0.49°C .

En journée, le modèle tend à surestimer les températures d'air et plus les apports solaires sont élevés, plus les différences sont importantes. Ces écarts peuvent être expliqués soit par une sous-estimation d'un flux par déperdition, rayonnement grandes longueurs d'ondes (GLO) ou flux par conduction ; soit par la surestimation des flux courtes longueurs d'ondes, ou encore par le fait que des supports de la paroi ouest, à l'origine de ponts thermiques, ne sont bien pas pris en compte. A contrario, la nuit, le modèle a tendance à sous-estimer légèrement les températures d'air. Nous pouvons ainsi constater que les températures minimales de chaque jour sont légèrement plus basses pour le modèle que pour les mesures. A ces moments de la journée, lorsque les apports solaires sont nuls ou quasi nuls, les flux par déperdition (GLO ou convectifs) semblent donc surestimés.

4.1.2. Localisation de la tache solaire

Les températures de surfaces sont liées à la localisation de la tâche solaire. Dans le cadre de notre expérience, des images dans le visible ont été prises, dans le but de comparer la position de la tâche solaire observée aux localisations calculées. Il en résulte une série de comparaisons visuelles (Fig. 4a et 4b) : on y voit la tâche solaire en claire, alors que la tâche solaire calculée apparaît en encadré noir.

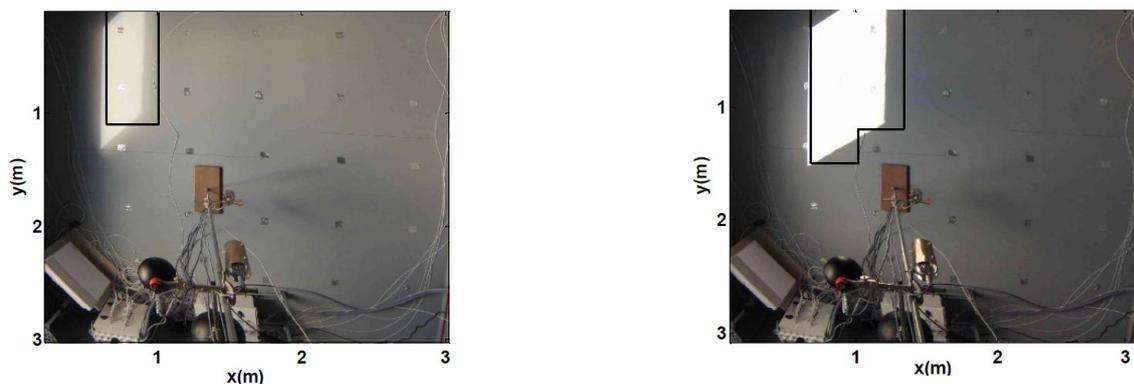


Figure 4: Emplacement de la tache solaire à 13h30 et 14h00 sur le sol en Mai

Nous observons ainsi sur les deux images de la figure qu'il existe de légers décalages entre le résultat photographié et simulé, pouvant atteindre 20 cm. Ce décalage peut trouver son origine soit dans une mauvaise définition de l'azimut du bâtiment de l'ordre de quelques degrés, soit d'un problème lié au temps de prise de vue ou encore aux artefacts liés aux traitements de l'image, son maillage et son calage spatial.

4.1.3. Températures de surfaces

Les températures des surfaces ont été mesurées selon deux types de données :

- les mesures directes obtenues des sondes PT-100 dispersées sur toutes les parois et placées à en surface ;
- les images infrarouges du sol réalisées par la caméra IR, permettant d'avoir un champ complet de températures avec une résolution élevée.

Les températures mesurées par les dix sondes placées à l'intérieur de la cellule ont été comparées aux températures surfaciques calculées par notre modèle, localisant la maille du modèle correspondant à l'emplacement de la sonde étudiée.

En se focalisant sur les comportements des températures de la maille correspondant aux coordonnées d'une sonde située sur la paroi Est (coordonnées : 0, 1.7 m, 1 m) qui reçoit la tache solaire, nous avons pu observer que les résultats suivent ainsi la même tendance (Fig. 5). Nous remarquons ainsi que les pics de températures témoignant du passage de la tache solaire se retrouvent bien dans les simulations. Cependant, des différences allant jusqu'à 1.8 °C peuvent être constatées.

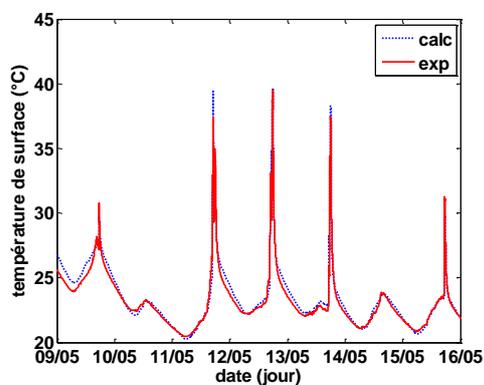


Figure 5: Température de surface sur la paroi est

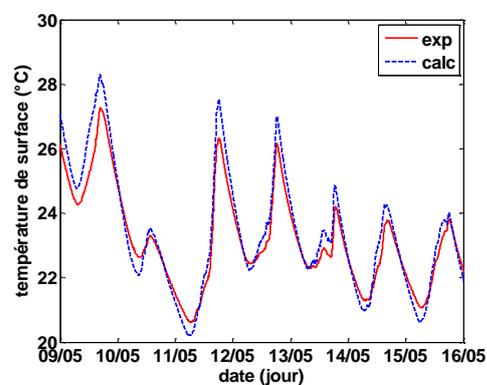


Figure 6: Température de surface sur la paroi nord

Si l'on compare, par ailleurs, les températures calculées et mesurées sur des sondes ne recevant jamais de tache solaire (sur la paroi Nord par exemple), on observe que la baisse des températures en fin d'après-midi et la nuit de chaque jour, ainsi que les montées en température dans la journée sont plus rapides pour notre modèle (Fig. 6). Il apparaît alors des températures trop importantes en milieu d'après-midi et des minima trop bas en fin de nuit.

Finalement, les images infrarouges permettent de comparer les champs de températures de surfaces calculées et mesurées. A 16h, une tache solaire est observable sur le sol (Fig 7 et 8) : il s'agit de

mailles où les températures sont plus élevées. La tache solaire est ici légèrement décalée vers les parois sud par rapport à celle de l'image infrarouge.

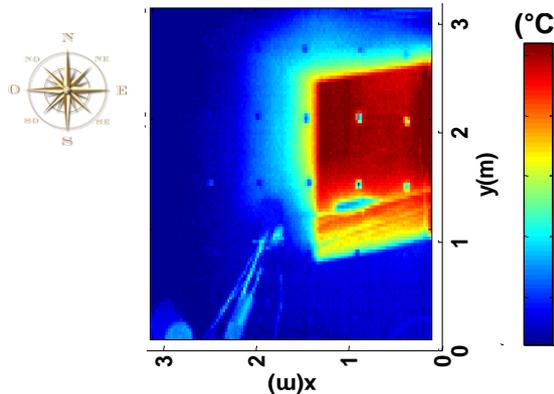


Figure 7: Mesures Infrarouges le 11/05/13 à 16h

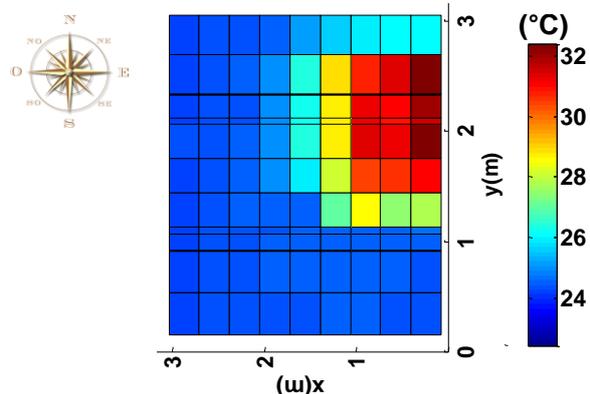


Figure 8: Simulation 11/05/13 16h

5. CONCLUSION

L'objet de ce papier est de présenter la validation d'un modèle d'enveloppe de bâtiment 3D tenant compte de la dispersion réelle, entre autre, des flux radiatifs incidents en localisant la tache solaire. Un protocole expérimental spécifique a été mis en place dans cette optique. Il s'agit à la fois de comparer les températures d'air et de surfaces des parois aux températures issues des simulations. Ainsi, trois sondes placées sur un mât ont mesuré la température d'air de l'enceinte tandis que de nombreuses sondes ont été dispersées sur les surfaces des parois du bâtiment. Ces mesures ont été complétées par des prises de vue dans l'infrarouge permettant d'obtenir les champs complets de températures, tandis que des photographies dans le visible ont permis de valider la localisation de la tache solaire.

La comparaison des températures d'air mesurées aux températures calculées montre en moyenne des écarts de l'ordre 0.5°C. Des différences similaires ont été observées entre les températures calculées en surfaces et les mesures données par les sondes placées en surface. L'observation des champs en températures observés et calculés montrent que la tache solaire est bien localisée et prise en compte, ce que les images dans le visible ont confirmé.

Nous avons pu observer, en conséquence, que l'effet du rayonnement non seulement sur le sol mais aussi sur les parois latérales est important. Ainsi, même en mi-saison, la distribution des températures n'est pas homogène, ce qui peut avoir des conséquences sur le confort des occupants dans un BBC et sur la distribution des flux de chaleur dans les parois.

6. BIBLIOGRAPHIE

Duforestel, H. Bouia, O. Hartmann, J. J. Roux, et G. Krauss, 2008. Les outils de modélisation énergétique des bâtiments très basse consommation.

A. Rodler, J. Virgone, J. J. Roux, E.-J. Kim, et J. L. Hubert, 2013a. Impact de la tache solaire sur un modèle thermique tridimensionnel de bâtiment, *Proceedings de la conférence CIFQ, Reims*

A. Rodler, J. J. Roux, J. Virgone, E.-J. Kim, et J. L. Hubert, 2013b. Are 3D heat transfer formulation with short time step and sun patch evolution necessary for building simulations. *Proceedings de la conférence BS2013, Chambéry*