



HAL
open science

impact de la tache solaire sur un modèle thermique tri-dimensionnel de bâtiment : application à une cellule fortement isolée

Auline Rodler, Joseph Virgone, Jean-Jacques Roux, E.J. Kim, Jean-Luc Hubert

► To cite this version:

Auline Rodler, Joseph Virgone, Jean-Jacques Roux, E.J. Kim, Jean-Luc Hubert. impact de la tache solaire sur un modèle thermique tri-dimensionnel de bâtiment : application à une cellule fortement isolée. CIFQ 2013, Jun 2013, reims, France. 6 p. hal-00985596

HAL Id: hal-00985596

<https://hal.science/hal-00985596>

Submitted on 19 Jun 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPACT DE LA TACHE SOLAIRE SUR UN MODELE THERMIQUE TRIDIMENSIONNEL DE BATIMENT

Auline **RODLER**^{*a}, Joseph **VIRGONE**, Jean-Jacques **ROUX**, Eui-Jong **KIM**, Jean-Luc **HUBERT**

^{a1}CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA-Lyon, Université Lyon1, 20 Av A. Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, France

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

RÉSUMÉ

Un modèle est développé pour simuler le comportement thermique dynamique de l'enveloppe d'un bâtiment. Il est basé sur les échanges radiatifs (radiations courtes et grandes longueurs d'ondes), la conduction tridimensionnelle, le bilan sensible de l'air et la convection sur un nœud d'air. Les données météorologiques d'entrées sont intégrées au pas de temps de la minute. Une spécificité du programme est qu'il projette la tache solaire évoluant au cours de la journée à l'intérieur du bâtiment, en accord avec une conduction tridimensionnelle. La simulation fournit la température d'air intérieure du local et les températures des mailles des parois.

Ce modèle a été développé pour tester différents paramètres : la discrétisation des volumes de contrôles, la discrétisation temporelle des données d'entrée du modèle et l'impact de la tache solaire. Enfin, ce papier présente une première application du modèle à une cellule isolée.

Mots Clés : tache solaire, conduction tri-dimensionnelle, pas de temps variable, isolation intérieure

NOMENCLATURE

Symboles :

λ conductivité thermique, W/mK
 C capacité thermique, J/m³K
 S matrice de surface des éléments, m²
 T température, K
 Q débit d'air entrant, kg/s
 h coefficient convectif, W/m²K
 E éclairage, W/m²
 FF matrice des facteurs de formes
 H coefficients radiatifs, W/m²K
 a coefficient d'absorption
 p inclinaison

Lettres grecques :

Φ Flux, W
 ρ coefficient de réflexion
 θ angle d'incidence sur la surface
 θ_z angle zénital

ε émissivité

Indices / Exposants :

i interne
 e externe
 c ciel
 s sol
 ai air à l'intérieur
 ae air à l'extérieur
 m moyenne de surface
 SE surface extérieure
 SI surface intérieure
BBC bâtiment basse consommation
GLO grandes longueurs d'ondes
CLO courtes longueurs d'ondes
NM nombre de mailles
N nombre de zone

1. INTRODUCTION

Le but du travail présenté dans cet article est de montrer dans quelle mesure les outils de simulation thermique dynamique actuels sont adaptés ou non à la

modélisation de bâtiments, notamment les BBC. Pour cela, nous avons modélisé l'enveloppe d'un bâtiment afin d'analyser sa sensibilité aux sollicitations internes et externes. Dans de nombreux travaux, les études sont réalisées au pas de l'heure, choisi par défaut. Un tel pas de temps ne permet pas d'intégrer dans la simulation

* auteur correspondant

Adresse électronique : auline.rodler@insa-lyon.fr

thermique les fluctuations climatiques rapides nécessitant une discrétisation temporelle plus fine. Ensuite, la conduction est souvent traitée de façon unidimensionnelle, ne permettant pas de prendre en compte les ponts thermiques ni l'impact de la tache solaire. Une discrétisation spatiale tridimensionnelle fine nous permettra de mieux appréhender ces phénomènes en régime dynamique. Nous allons donc introduire dans cet article un modèle thermique dynamique de bâtiment 3D à pas de temps variable adapté, appliqué à une cellule parallélépipédique monozone.

Ce modèle sera décrit dans une première section. Divers tests seront ensuite présentés, permettant d'évaluer l'importance de la finesse du maillage et du mode de calcul du rayonnement solaire reçu à l'intérieur de la cellule.

2. MODELE ET DEMARCHE

Un modèle d'enveloppe du bâtiment a été réalisé à partir d'une conception modulaire en 3D d'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 respectivement CLO et GLO) déterminant la répartition du rayonnement solaire ;
- la conduction tridimensionnelle en volume fini ;
- le bilan sensible du volume d'air.

Les murs du local ont été maillés en surface et selon leur épaisseur tandis qu'un seul nœud d'air est considéré.

L'équation de bilan en flux par conduction, selon les trois directions x, y et z pour tous les volumes élémentaires de volume V est donné par :

$$\begin{aligned}
 CV \frac{\partial T}{\partial t} = & \lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+\frac{dx}{2}} dydz \\
 & - \lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x-\frac{dx}{2}} dydz \\
 & + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y+\frac{dy}{2}} dx dz \\
 & - \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y-\frac{dy}{2}} dx dz \\
 & + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z+\frac{dz}{2}} dx dy \\
 & - \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z-\frac{dz}{2}} dx dy \\
 & + \Phi_{TOT}
 \end{aligned} \quad (1)$$

avec

$$\Phi_{TOT} = \Phi_{CLO} + \Phi_{GLO} + \Phi_{CONV} \quad (2)$$

Φ_{CONV} désigne le flux convectif de la surface avec son environnement, Φ_{GLO} et Φ_{CLO} désignent respectivement les flux radiatif GLO et CLO. $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ désignent les conductivités thermiques et C la capacité thermique de chaque volume.

La température d'air T_{ai} est déterminée grâce au bilan sensible de l'air du local :

$$\begin{aligned}
 C_{ai} V_i \frac{\partial T_{ai}}{\partial t} = & \sum_{n=0}^N Q C_{ai} (T_{ae} - T_{ai}) \\
 & + \sum_{j=1}^{NM} Sh_{ci} (T_{Si} - T_{ai})
 \end{aligned} \quad (3)$$

2.1 Flux en CLO

Les flux radiatifs $\{\Phi_{CLOi}\}$ absorbé par les mailles des surfaces intérieures de la cellule sont donnés par :

$$\{\Phi_{CLOi}\} = [S][a_{CLOi}]\{E_{CLOi}\} \quad (4)$$

Définissant $[a_{CLOi}]$ les coefficients d'absorption des mailles et calculant $\{E_{CLOi}\}$ les éclaircissements qu'elles reçoivent selon la relation suivante:

$$[S]\{E_{CLOi}\} = [S]\{E_{CLOi}^o\} + [S][\rho][FF]\{E_{CLOi}\} \quad (5)$$

$[\rho]$ est la matrice des coefficients de réflexions, $[FF]$ la matrice des facteurs de forme calculés grâce à la méthode de la sphère unité. $\{E_{CLOi}^o\}$ désigne l'ensemble des éclaircissements primaires reçus par les volumes de contrôles, ils résultent des rayonnements directs horizontaux G_b et diffus G_d reçus par les mailles :

$$E_{CLOi}^o = \tau_b G_b R_b + \tau_d G_d R_d$$

pour les mailles touchées par la tache solaire

$$E_{CLOi}^o = \tau_d G_d R_d$$

pour les mailles hors de la tache solaire

τ_b et τ_d désignent les coefficients de transmission des rayonnements directs et diffus du vitrage, fonction de l'angle d'incidence du rayonnement (avec $\tau_d = 0.85$ pour un angle d'incidence nul).

$$R_b = \cos(\theta) / \cos(\theta_z) \text{ et}$$

$$R_d = (1 + \cos(p)) / 2 \text{ avec } p = 90^\circ,$$

permettent de calculer les rayonnements directs et diffus reçus par les parois verticales à partir des rayonnements horizontaux mesurés[1,2].

La position de la tache solaire est déterminée par un test d'appartenance : le contour de la fenêtre et les mailles des parois sont projetés sur un plan orthogonal aux rayons du soleil. On détermine alors si la projection de chaque maille est incluse ou non dans la projection de la fenêtre.

Les flux CLO reçu par les mailles des surfaces extérieures sont déterminés selon la position des parois auxquelles elles appartiennent vis-à-vis du soleil, discriminant les parois touchées par le rayonnement direct et celles qui sont à l'ombre :

$$\{\Phi_{CLOe}\} = [S][a_{CLOe}]\{G_b R_b + G_d R_d + (G_d + G_b)R_r\} \quad (7)$$

avec

$$R_r = (1 - \cos(p))alb/2, \text{ alb est l'albedo du sol.}$$

2.2 Flux en GLO

Les flux GLO de l'ensemble des mailles des surfaces intérieures des parois de températures $\{T_{SI}\}$ sont donnés par la relation:

$$\{\Phi_{GLOi}\} = [a_{GLOi}][S]\sigma\{T_{SI}^4 - T_m^4\} \quad (8)$$

Ou par linéarisation:

$$\begin{aligned} \{\Phi_{GLOi}\} &= [\varepsilon][S] \left[[I][I] \right. \\ &\quad \left. - [FF][\rho] \right]^{-1} [FF][\varepsilon] HR\{T_{SI} - T_m\} \end{aligned} \quad (9)$$

$[I]$ étant la matrice unité, $[FF]$ la matrice des facteurs de formes et $[\varepsilon]$ la matrice d'émissivité. Les coefficients radiatifs HR ont été fixés à $5W/m^2K$. Nous supposons que toutes les parois de l'enceinte ainsi que le vitrage sont opaques dans le domaine des GLO.

Ensuite les surfaces extérieures échangent dans le domaine des grandes longueurs d'onde avec la voûte céleste de température T_c , et avec l'environnement et le sol de température T_s selon la relation linéarisée

$$\begin{aligned} \{\Phi_{GLOe}\} &= H_c[S] \left(\frac{1 + \cos p}{2} \right) (\{T_c\} \\ &\quad - \{T_{SE}\}) \\ &\quad + H_s[S] \left(\frac{1 - \cos p}{2} \right) (\{T_s\} \\ &\quad - \{T_{SE}\}) \end{aligned} \quad (10)$$

Dans cette étude, nous avons fixés coefficients radiatifs $H_c = H_s = 5,6W/m^2K$.

2.3 Flux par convection

Les flux convectifs entre l'environnement extérieur et la surface extérieure s'écrivent sous la forme :

$$\Phi_{CONV} = h_{ce}[S]\{T_{ae} - T_{SE}\} \quad (11)$$

avec $h_{ce} = 21W/m^2.K$ le coefficient d'échange convectif. De la même façon, les flux convectifs avec l'environnement intérieurs sont décrits par :

$$\Phi_{CONV} = h_{ci}[S]\{T_{ai} - T_{SI}\} \quad (12)$$

avec le coefficient d'échange convectif intérieur $h_{ci} = 8W/m^2K$. Ces coefficients seront gardés constants et identiques pour toutes les simulations.

2.4 Résolution générale

Les données d'entrées du modèle sont les caractéristiques thermiques des parois et les données météorologiques. Le maillage cartésien est effectué par le logiciel Heat3[3]. Les équations différentielles (1) et (2) sont intégrées selon la méthode de Runge Kutta implémentée sous Matlab. Cette méthode de résolution est appréciée car elle 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.

3. SIMULATIONS ET RESULTATS

Tout au long des simulations, nous avons gardé une même cellule de dimensions internes $3,01X 3,16 X 3,36$ m. Celle-ci est décrite par des murs de 10 cm d'épaisseur en béton ($\lambda=2,7 W/m.K$) et une grande baie vitrée orientée sud, de 1 cm d'épaisseur de vitrage ($\lambda=1W/m.K$) et de dimensions $:3,06X 3,26$ m. Les caractéristiques optiques des parois et du vitrage de la cellule sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: coefficients d'absorption et l'émissivité des parois

a_{CLOi} (parois)	1	a_{CLOe} (parois)	0,6
a_{CLOi} (vitrage)	0,05	a_{CLOe} (vitrage)	0,05
a_{GLOe} (parois)	0,9	ε (parois)	0,9

Les données météorologiques utilisées sont mesurées par la station de Vaulx-en-Velin (latitude : $45^{\circ}46'43''N$ et longitude : $4^{\circ}55'21''E$, altitude 170m) à la minute (<http://idmp.entpe.fr/vaulx/mesfr.htm>).

Afin de vérifier la cohérence des résultats du modèle, ceux-ci ont été comparés aux résultats obtenus par les

logiciels Dymola[4] et TRNSYS [5] dans le cadre d'hypothèses conventionnelles (Figure 1) :

- une maille par surface intérieure ;
- rayonnement solaire entièrement projeté sur le sol et absorbé, sans prise en compte des réflexions ;
- pas de flux GLO à l'intérieur de la cellule ;
- coefficients convectifs et radiatifs constants ;

Les différences observées entre ces trois simulations viennent de plusieurs facteurs : le traitement des échanges par conduction (1D contre 3D) ainsi que les méthodes de résolution et le choix du pas de temps.

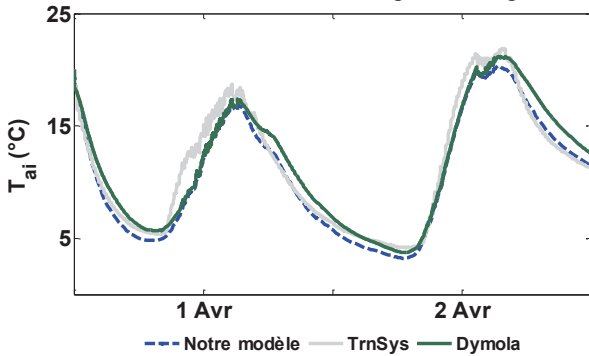


Figure 1: Comparaison TRNSYS, Dymola et notre modèle

Ce modèle a ensuite été complexifié et affiné pas à pas : dans un premier temps la fréquence d'échantillonnage des données météorologiques d'entrée a été analysée, le maillage a été optimisé pour ce cas d'application etenfin, l'évolution de la tache solaire sera intégrée.

Les données météorologiques sont souvent prises au pas de temps horaire. Si ce pas de temps peut être suffisant lorsqu'il s'agit d'étudier le comportement global d'un système, il n'est pas adapté à une modélisation dynamique tenant compte des ambiances intérieures des habitations et des sollicitations climatiques.

Escudero [6] a ainsi montré qu'un pas de 40 min était nécessaire pour tenir compte des fluctuations de température extérieure, et des pas de temps de 5 et 2 minutes pour tenir compte respectivement des variations de flux solaire diffus et direct. Nous avons de notre côté constaté que les fluctuations de la température d'air du local, perceptibles lorsque des données météorologiques à la minute sont utilisées, sont complètement lissées lorsqu'on utilise des données horaires. Nous avons donc conservé des données météorologiques à la minute, sachant que ce pas de temps n'est pas encore optimisé : nous avons pu en effet remarquer que les pas de temps d'intégration peuvent être de l'ordre de la seconde lorsque les fluctuations sont importantes (Figure 2).

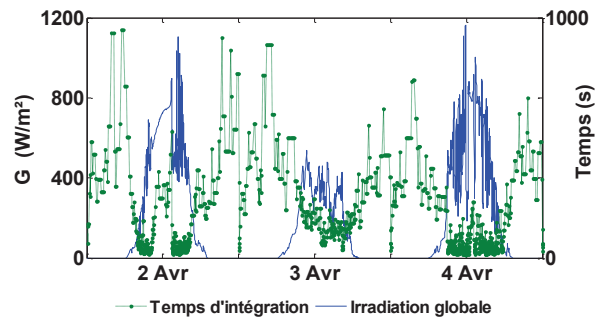


Figure 2: Influence des fluctuations sur les pas de temps d'intégration

3.2 Etude du maillage

Plus la discrétisation nodale d'un système est fine et plus la précision des dynamiques calculées sera grande : il existe un rapport étroit entre le pas de temps adopté dans la résolution du problème thermique et la finesse de la discrétisation spatiale du système décrit. Nous savons aussi que lors de variations des sollicitations brusques, les parties des murs les plus proches des surfaces sont plus perturbées que les mailles centrales des parois. Selon les sollicitations étudiées et le côté du mur sur lequel elles ont un impact, on pourra choisir de mailler plus finement le côté du mur concerné. Ainsi il paraît judicieux de mailler plus finement vers le côté de la paroi donnant sur le volume d'air.

La figure 3 montre l'évolution de la température d'air pour 2, 4, 8 et 13 mailles, le maillage étant progressif vers la surface intérieure du mur. Nous constatons qu'avec peu de mailles, les fluctuations de la température d'air sont moins visibles. Les mailles étant plus épaisses, les premiers volumes, à l'intérieur du bâtiment, atténuent plus les fluctuations du rayonnement incident par conduction. Les écarts de températures se situent dans la fourchette [0-2,3°C] entre une simulation avec 2 mailles et 8 mailles. Enfin, l'affinement des mailles a un effet moins perceptible lorsque nous considérons plus de 8 mailles. Nous pouvons donc conclure que 8 mailles suffisent pour capter les fréquences des sollicitations pour cette configuration de paroi, sachant que la maille de surface a une épaisseur de l'ordre de 1mm.

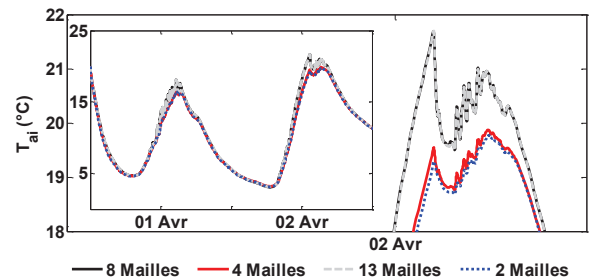


Figure 3: Influence du maillage en épaisseur sur l'évolution de la température d'air intérieure

3.3 Intégration de la tache solaire

Dans la plupart des modèles, le rayonnement solaire incident est totalement projeté sur le sol quand d'autres modèles n'en projettent que 60% alors que le rayonnement solaire pénètre dans une pièce sous forme de tache solaire. Wall[7] a montré qu'il est important de prendre en compte la distribution de celle-ci, surtout lorsque l'on souhaite calculer les besoins en chauffage d'espaces fortement vitrés. Tittlein [8] a simulé la projection de la tache solaire sur les parois en attribuant à chaque paroi un pourcentage de flux solaire. Il a démontré que l'écart entre les besoins de chauffage avec et sans prise en compte de la tache solaire est de 8,5%. Reste à savoir si attribuer à chaque paroi un pourcentage de flux solaire est suffisamment précis pour simuler l'évolution de la tache solaire. En effet, une répartition uniforme du flux solaire sur les parois ne semble adaptée qu'avec une conduction unidimensionnelle ; si l'on veut traiter l'impact des sollicitations de façon précise, il est plus judicieux de localiser la tache solaire sur des parois suffisamment finement maillées en 3D et réaliser un bilan surfacique par maille et non par paroi. Afin de localiser de façon assez précise la tache solaire, les parois de la cellule ont été maillées en surface en plus d'être maillées en épaisseur. Les réflexions internes sont alors prises en compte au travers des facteurs de forme, les coefficients d'absorption CLO intérieurs ont été fixés à 0.6 et par conséquent, les coefficients de réflexions sont égaux à 0.4. La localisation de la tache solaire va dépendre de la hauteur du soleil sur la voûte céleste. Nous observons ainsi que, pour le deuxième jour d'avril à 12h (heure locale), la tache solaire se situe principalement sur une partie du sol et une partie de la paroi ouest (Figure 4).

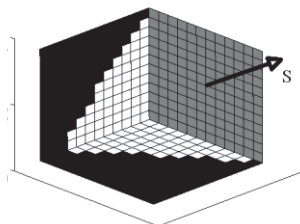


Figure 4: Position de la tache solaire à midi

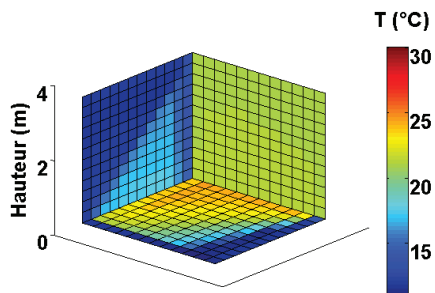


Figure 5: Températures des cellules intérieures (baie, paroi ouest et sol)

La tache solaire est repérable car les mailles touchées sont plus chaudes, atteignant 23°C (Figure 5). Des réflexions sont observables sur les mailles opposées. Nous remarquons que les différences de température d'une maille à une autre peuvent atteindre 10°C.

D'ailleurs, l'impact de la tache solaire à l'intérieur du local a un effet important sur le transfert de chaleur par conduction dans les parois. La surchauffe locale intérieure modifie les flux conduits vers l'extérieur (Figure 6). Nous avons comparé les résultats de la première étude effectuée sans tache solaire, avec une maille par paroi et un rayonnement constamment projeté

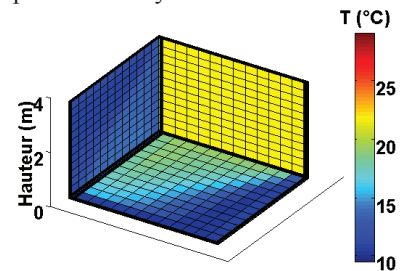


Figure 6: Température des mailles extérieures

sur le sol, à cette deuxième étude avec la localisation et l'évolution de la tache solaire sur le 2 avril 2011. Nous remarquons que la prise en compte précise de la distribution des CLO dans la pièce a une conséquence sur la température d'air. En tenant en compte de la tache solaire, nous avons un flux CLO incident localisé, qui peut être plus faible ou plus important que lorsqu'on prend un flux incident homogène sur le sol avec les mêmes coefficients d'absorption en CLO. En moyenne, nous obtenons une évolution moins fluctuante de la température d'air avec la prise en compte de la tache solaire, avec des écarts atteignant 3 °C avec les résultats présentés précédemment (pour $a_{CLOi} = 1$), et allant de 0 à 1,6 °C lorsque seul 60 % du rayonnement projeté sur le sol est absorbé (Figure 7).

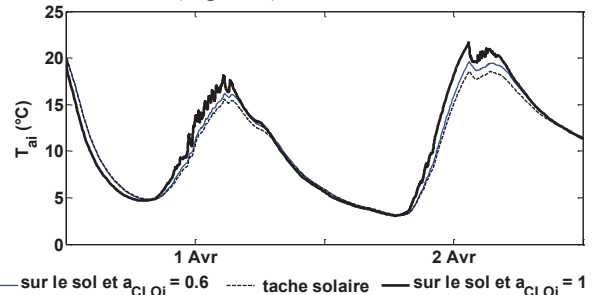


Figure 7: Influence de la tache solaire sur la température d'air pour deux journées

3.4 Intégration de la tache solaire a une cellule isolée par l'intérieure

Afin d'étudier l'influence de la tache solaire sur la température d'air d'une cellule comprenant 10cm d'isolant ($\lambda=0,037$ W/mK et $C= 0,094 \cdot 10^6$ J/m³K) à

l'intérieur sur l'ensemble des parois, excepté au sol où uniquement du béton a été conservé. Comme recommandé, nous avons effectué un maillage raffiné vers les surfaces.

La figure 8 montre les températures de surfaces des parois calculées à 12h15 le 2 avril alors que le flux solaire entrant dans la pièce est important et pour une tache solaire étendue. Nous observons que les températures de surfaces à l'intérieur de la cellule atteignent 60°C, bien supérieures des températures calculées lorsque nous avons uniquement du béton (Figure 5). De telles températures s'expliquent par le fait que le rayonnement incident est directement projeté sur l'isolant et peu conduit vers les couches intérieures de la paroi.

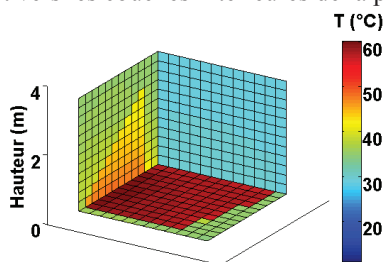


Figure 8: Température des mailles à l'intérieur pour une isolation intérieure et tache solaire

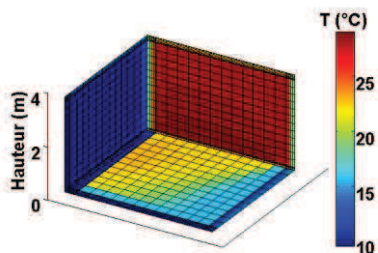


Figure 9: Température des mailles à l'extérieur

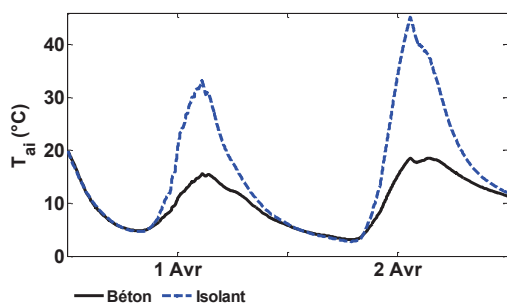


Figure 10: Comparaison de la température d'air intérieure pour les deux configurations

D'ailleurs, la figure 9 nous permet d'observer que sur le mur ouest, la tache solaire est peu transmise et ne modifie pas les conditions aux limites des parois externes. Nous constatons alors que la température d'air du local augmente rapidement dès que les apports solaires sont importants (Figure 10), pouvant atteindre 42°C. Ces températures importantes s'expliquent par les petites dimensions du local et la

grande taille de la baie vitrée, permettant au rayonnement solaire de chauffer de grandes surfaces des parois, l'isolant limitant la conduction vers l'extérieur. Nous remarquons à l'inverse que les températures baissent vite en absence de flux solaire.

4. CONCLUSION

A partir d'un modèle simplifié, un modèle optimisé d'enveloppe de bâtiment a été développé. Dans un premier temps, nous nous sommes rapproché des hypothèses de modèles usuels : volume peu maillé, données météorologiques horaires, rayonnement projeté sur le sol et totalement absorbé. Le modèle initial a été affiné, en travaillant notamment sur l'importance de la prise en compte des fluctuations solaires, du maillage et de la projection de la tache solaire. Nous avons quantifié au fur et à mesure les écarts observés pour chaque modification. La localisation de la tache solaire et son intégration à un modèle thermique tridimensionnel nous a permis de connaître la sensibilité d'une cellule 3D avec une baie vitrée à ce type de sollicitation. Ainsi, nous avons pu constater à quel point l'intégration de la tache solaire engendrait de modifications au niveau des flux radiatifs et par conséquent sur les conditions aux limites des parois, cela se répercutant sur la température d'air du local. Finalement, nous avons étudié la même cellule avec une isolation intérieure. Les températures de surfaces des parois se trouvant incluses dans la tache solaire peuvent être très élevées et induire des inconforts importants. Un bâtiment isolé est donc très sensible aux apports solaires et peut facilement basculer dans l'inconfort. Ces phénomènes auront aussi un impact sur les appels de puissances de chauffage. Par la suite, ce modèle sera d'avantage affiné, calculant les coefficients d'échanges convectifs pour chaque maille à partir de corrélations existant dans la littérature. Les coefficients radiatifs seront par ailleurs calculés en fonction des températures de surfaces des mailles. Enfin, nous appliquerons ce modèle pour une cellule BBC afin de vérifier ces conclusions.

RÉFÉRENCES

[1] Esveev, E.G. and Kudish, A.I., 2009. The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. *Solar Energy* 83 377–388

[2] Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1961. Daily insolation on surfaces tilted towards to equator. *Trans ASHRAE* 67, 526–541.

[3] Blomberg, « HEAT CONDUCTION IN TWO AND THREE DIMENSIONS Computer Modelling of Building Physics Applications », Lund University, Lund Institute of Technology Department of Building Technology, Building Physics, 1996.

[4] Dymola Version 2013, (10.01.2013) homepage: <http://www.3ds.com/products/catia/portfolio/dymola>

[5] TRNSYS Mathematical Reference, « Solar Energy Laboratory Madison, Etats-Unis, Université de Wisconsin ». 1996.

[6] Escudero Alain, « Etude du comportement thermique des batiments. Proposition d'un modele a deux dynamiques. », INSA de Lyon, 1989.

[7] Wall, « Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. A comparison of simulation programs », *Energy and Buildings*, vol. 26, n° 2, p. 129–135, 1997.

[8] Tittlein, « Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation », Université de Savoie, 2008.