

visualisées sur des images prises dans le visible avec la caméra *GoPro*. Ces images seront dans un premier temps traitées afin de s'affranchir d'artéfacts liés au grand angle de la caméra et à d'éventuels problèmes de positionnement de celle-ci selon la procédure présentée en annexe D. La tache solaire calculée sera ensuite superposées aux images afin de permettre une comparaison visuelle de sa localisation.

Les comparaisons visuelles se basent sur des images dans le visible focalisées sur sol entre le 8 et le 16 Mai 2013, sur la paroi Est entre le 03 et le 10 Juillet 2013 et sur la paroi Nord du 09 au 16 Décembre. Nous avons sélectionné ici quelques images dans le visible aux instants lors desquels la tache solaire est très visible, lorsque le rayonnement entrant dans la cellule est suffisamment important.

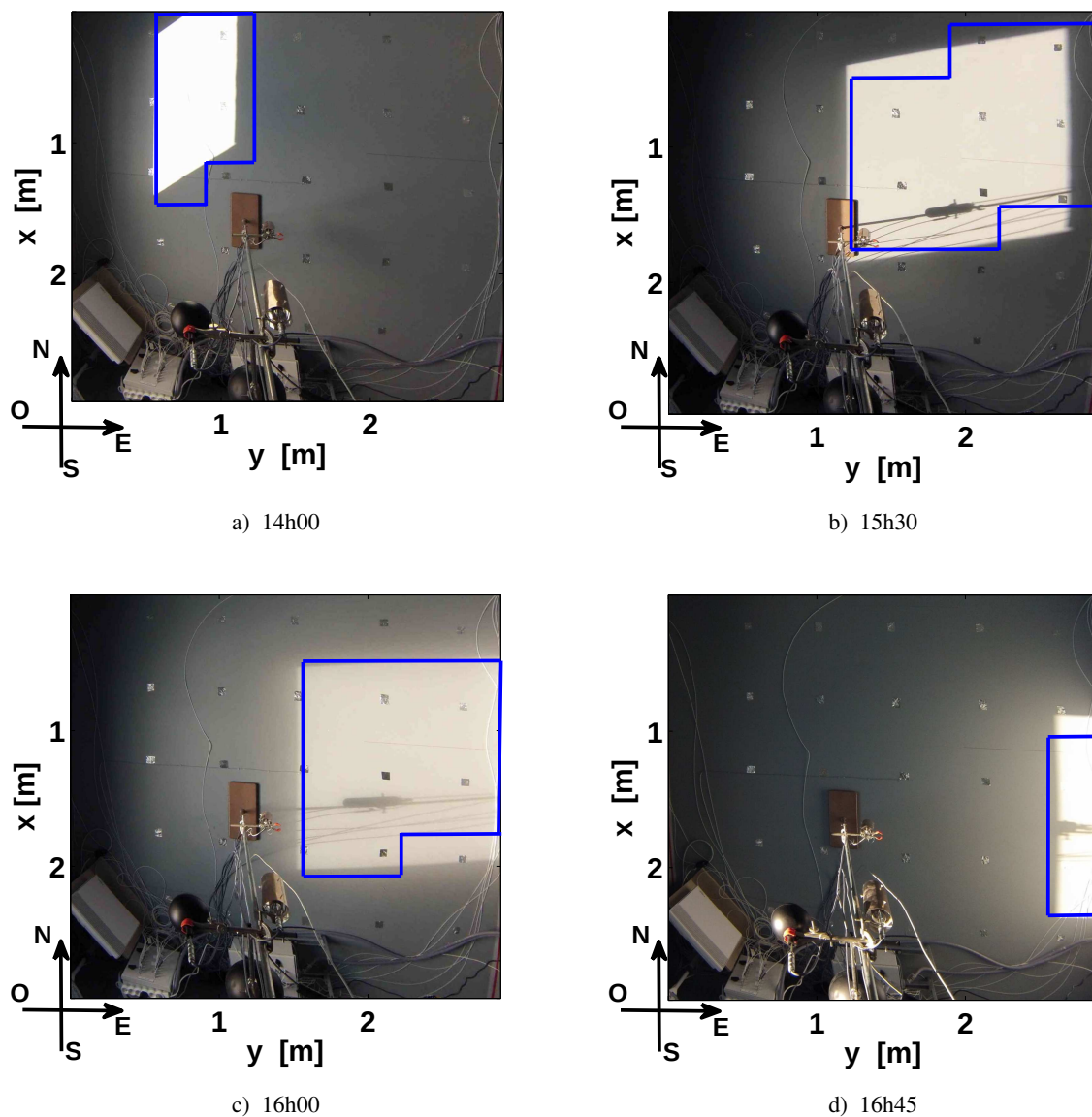


FIGURE III.30 – Image visible et positionnement de la tache solaire par le calcul sur le sol, le 08 Mai 2013

Nous pouvons observer que la tache solaire du 08 Mai 2013 apparaît sur le sol, proche de la paroi Nord (Fig. III.30.a), poursuit sa course vers la paroi Est en se décalant légèrement vers le sud (Fig. III.30.b et Fig.

III.30.c) puis remonte sur la paroi Est en fin d'après-midi (Fig. III.30.d).

La trajectoire de la tache solaire est légèrement différente en Juillet : à cette période de l'année, le soleil montant plus haut dans le ciel, la tache solaire apparaît plus vers le centre du sol puis se décale vers la paroi Est et remonte dessus (Fig. III.32.a) en se décalant vers la paroi Sud (Fig. III.32.b).

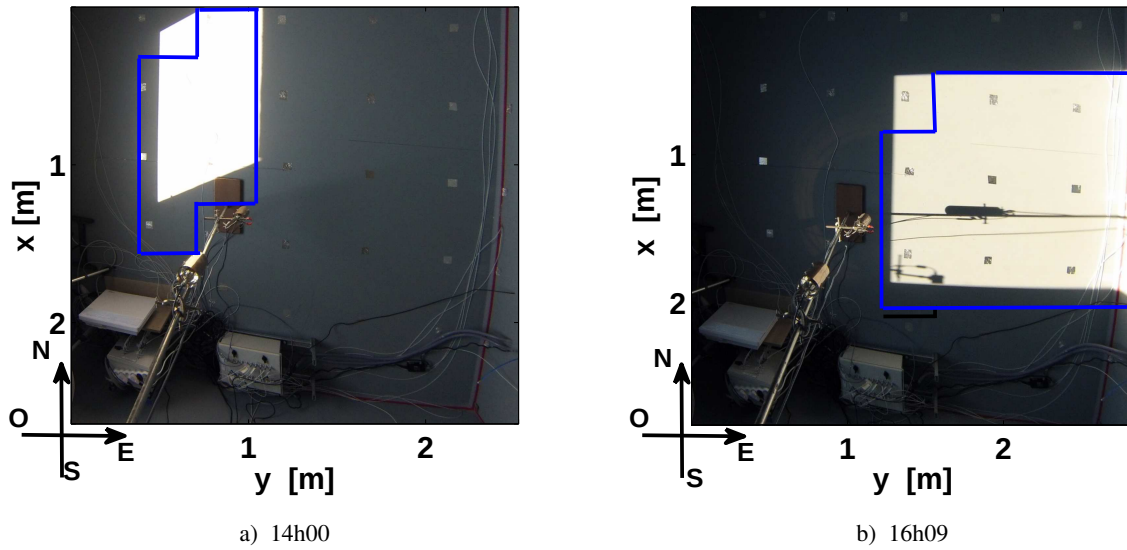


FIGURE III.31 – Image visible et positionnement de la tache solaire par le calcul sur le sol le 08 juillet 2013

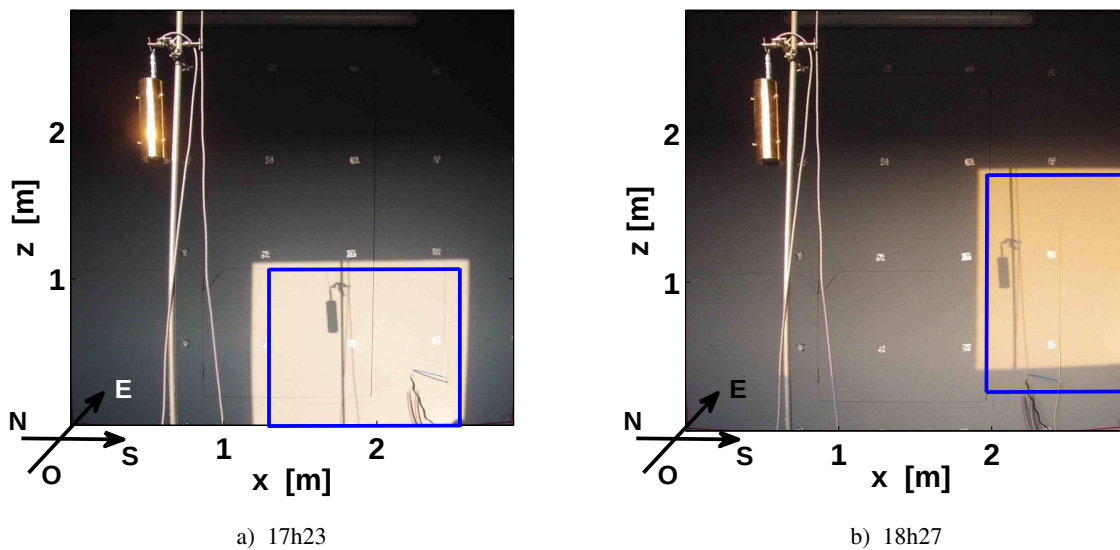


FIGURE III.32 – Image visible et positionnement de la tache solaire par le calcul sur la paroi Est, où se situe la porte, le 15 juillet 2013

Enfin, en Décembre, le soleil étant bas dans le ciel, la tache solaire reste sur la paroi Nord, apparaissant vers midi sur la partie Ouest de cette paroi (Fig. III.33.a) et disparaissant en milieu d'après-midi, après avoir migré vers la partie Est de celle-ci (Fig. III.33.b)

Pour les trois journées étudiées, nous pouvons remarquer que nos calculs reproduisent fidèlement ces

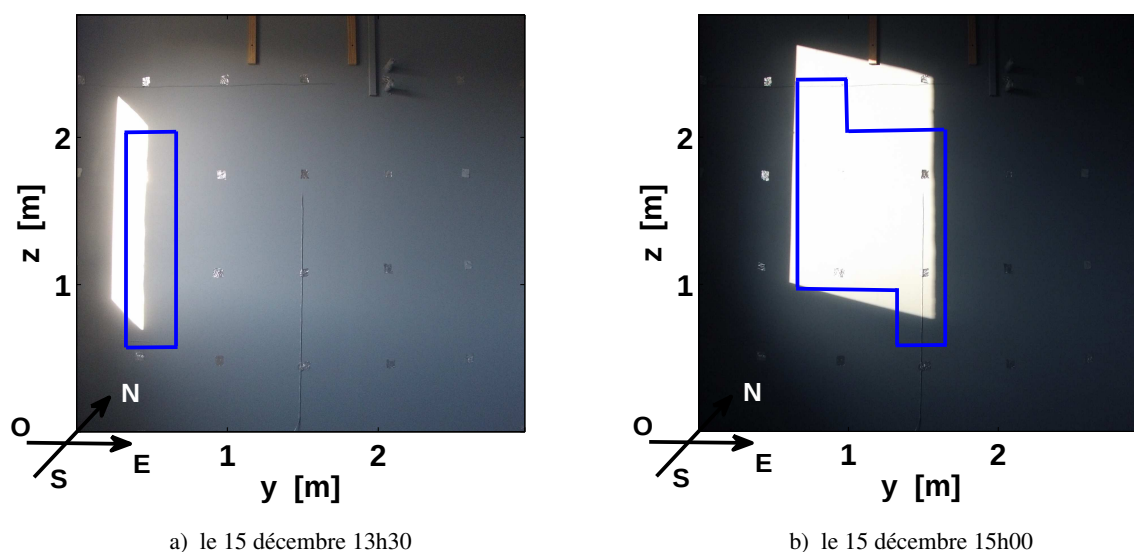


FIGURE III.33 – Image visible et positionnement de la tache solaire par le calcul, sur la paroi Nord le 15 décembre

courses, la position de la tache solaire et sa taille étant respectées. Nous pouvons cependant observer des différences notables : les taches solaires calculées ne sont pas systématiquement parallélépipédiques tandis que des décalages spatiaux sont perceptibles. Ces différences peuvent être expliquées tout d'abord par la nature même du test d'appartenance des mailles de la cellule à la tache solaire : selon ce test, on considère qu'une maille est incluse dans la tache solaire si son centre vérifie la condition d'inclusion dans le parallélépipède image de la fenêtre projetée dans le plan orthogonal aux rayons du soleil. Une maille partiellement incluse dans la tache solaire sera alors considérée incluse si son centre l'est ou sera exclue si son centre ne vérifie pas la condition d'inclusion. Il résulte alors des décalages pouvant atteindre la taille d'une demi-maille. Les décalages et erreurs seront alors d'autant plus importants que le maillage sera grossier. Par ailleurs, des incertitudes sur l'orientation du bâtiment de l'ordre de quelques degrés, peuvent suffire à décaler sensiblement la tache solaire. Enfin, nous pouvons noter que la réfraction du double vitrage de la fenêtre, dont nous ne tenons pas compte dans le modèle, peut aussi avoir une légère incidence sur le positionnement de la tache solaire.

Plus généralement, les surfaces des taches solaire calculées et repérées sur les images dans le visible, sur une journée de mai et juillet, ont été comparées. Cette comparaison a nécessité au préalable un traitement des images fournies par la caméra *Gopro* afin d'y discriminer les pixels touchés par la tache solaire des pixels hors de celle-ci.

Les couleurs des pixels des images sont codées en RGB¹ sur 8 bits, permettant 256 nuances de chaque couleur primaire, rouge, vert et bleu. La combinaison des trois couleurs nuancées, nommée synthèse additive, permet de générer la couleur des pixels : un pixel rouge aura 100 % de rouge et sera alors codé (255 - 0 - 0) tandis qu'un pixel bleu sera codé (0 - 0 - 255) et un pixel jaune, combinaison de rouge et de vert, sera codé

1. Red Green Blue

(255 - 255 - 0). Dans notre cas, les pixels ensoleillés inclus dans la tache solaire tendent vers le blanc et leur codes RGB présente des valeurs importantes pour les trois couleurs primaires. Il s'agit alors d'établir une valeur seuil s de code couleurs à partir de laquelle le pixel P sera considéré suffisamment blanc :

$$s \in [0; 255] \text{ tel que } (R_P > s; G_P > s; B_P > s) \Rightarrow P \text{ est inclus dans la tache solaire} \quad (\text{III.19})$$

Après quelques tests de sensibilité sur la valeur du seuil s , celle-ci a été fixée à $s = 170$. Une telle valeur de seuil permet de localiser les taches solaires même dans les cas où le rayonnement incident est relativement faible et les différences de couleur entre pixels inclus et exclus de celles-ci sont relativement faibles. Nous devons noter cependant que certains éléments de la pièce, très réfléchissants tels que les feuilles d'aluminium disposées au sol, sont repérées par le procédé et considérées dans la tache solaire, même si ils sont en dehors. Ils biaisent donc légèrement les calculs de surface de la tache solaire, mais leur marginalité ainsi que leurs petites surfaces relativisent l'erreur inhérente à leur prise en compte.

Enfin, une fois les pixels frappés par la tache solaire repérés et connaissant la surface réelle que recouvre un pixel, il est possible de déterminer la surface totale de la tache solaire.

Les surfaces des taches solaires calculées et repérées sur les images visibles, au niveau du sol, sont présentées sur la figure III.34. Nous pouvons tout d'abord constater des points résiduels apparaissant hors de la gaussienne dessinée par la majorité des points en Mai (Fig III.34.a). Ces points correspondent à des instants de la journée pendant lesquels soit le seuil ne permet pas de relever tous les pixels de la tache solaire, soit celle-ci est réduite par la présence de l'ombre du mât de mesure des températures d'air. Ces points résiduels sont d'ailleurs beaucoup moins nombreux en Juillet (Fig. III.34.b), la tache solaire étant, à cette période, plus marquée et donc plus facilement repérable.

Par ailleurs, l'évolution de la surface de la tache solaire suit les mêmes tendances, qu'elle soit calculée ou observée :

- en Mai, dans les deux cas, elle apparaît sur le sol au-delà de 12h30 et disparaît totalement vers 17h, atteignant aux mêmes instants une aire maximale de 2,18 m² pour la tache solaire calculée contre 2,33 m² pour la tache solaire mesurée ;
- en Juillet, au sol, la tache solaire apparaît et disparaît aux mêmes instants sur les images dans le visible et sur le sol de la cellule modélisée, et sa surface évolue de la même façon dans les deux cas ;
- en décembre, dans les deux cas, la tache solaire ne reste que brièvement sur la paroi Nord, entre 13h00 et 16h40. Elle apparaît très fine pendant les 20 dernières minutes. Nous pouvons observer que le modèle tend à légèrement sous-estimer les surfaces dans un premier temps, puis à les sur-estimer lorsque la tache solaire s'agrandit. Ainsi, lorsqu'elle atteint sa taille maximale, celle-ci est de 2,26 m² selon le modèle contre 2,046 m² selon les images dans le visible.

Enfin, pour compléter la validation de la position de la tache solaire, les heures exactes d'apparition et de

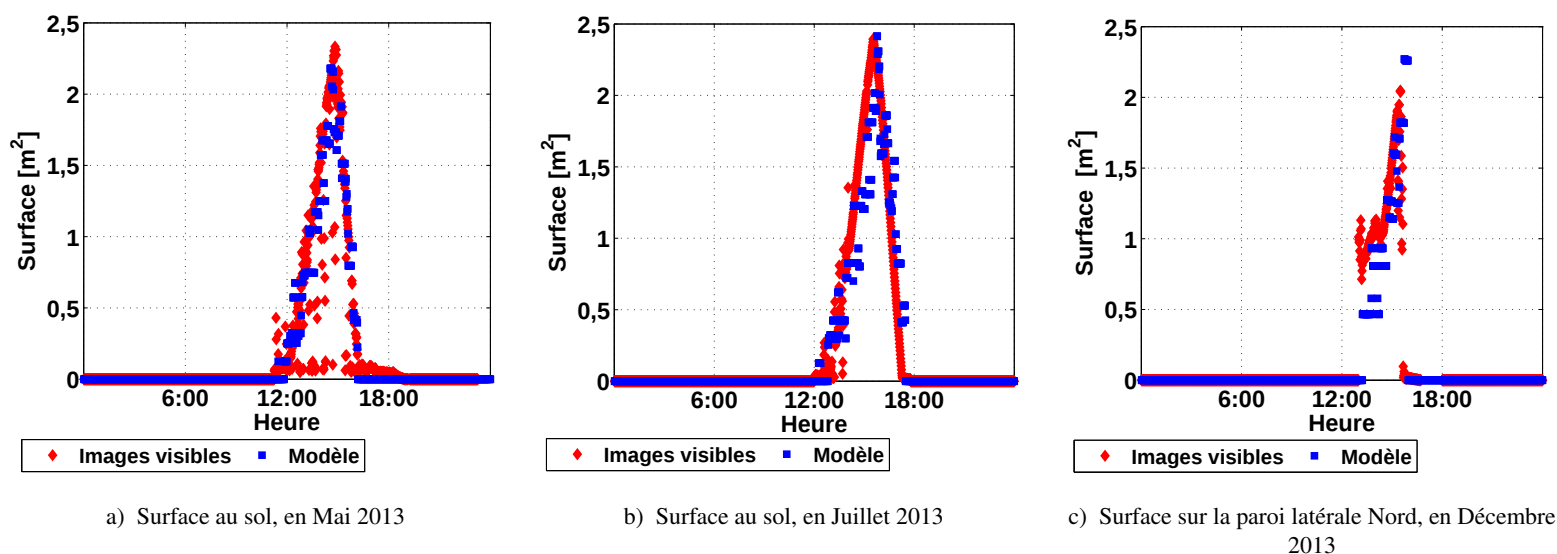


FIGURE III.34 – Surfaces de la tache solaire en fonction de l’instant de la journée en Mai, Juillet et Décembre

disparition de la tache solaire dans la cellule ont été étudiées. L’utilisation des images dans le visible n’est pas suffisante pour déterminer ces heures extrêmes. En effet, le traitement présenté précédemment, bien que performant, peut ne pas permettre de les déterminer, les flux solaires incidents aux instants correspondants pouvant être trop faibles. Par ailleurs, ces images ne se focalisent que sur une paroi, alors que la tache solaire se déplace de la paroi Nord vers la paroi Sud en passant par le sol et la paroi Est.

Les instants d’apparition et de disparitions exactes de la tache solaire ont donc été comparés aux résultats obtenus géométriquement par un modèle réalisé avec Google SketchUp. Par exemple, en Juillet, la tache solaire apparaît à 12h50 sur le sol selon notre modèle et à 12h54 selon Google SketchUp. Elle disparaît de la paroi Sud à 19h47 selon le modèle et à 19h52 selon Google SketchUp. Ces constats confirment de nouveau une très bonne cohérence de nos calculs.

4.2 Validation en évolution libre

Notre modélisation du comportement thermique du bâtiment, dynamique et en 3D, permet le calcul des températures des murs, en surfaces et en leur sein. La localisation de la tache solaire, validée dans la section 4.1, offre l’opportunité de connaître de façon précise la distribution des flux solaires dans la pièce à l’origine dans notre cas des hétérogénéités des températures surfaciques des parois. Il semble donc intéressant, maintenant, de s’interroger sur la validité de ces températures. Dans ce but, les températures des surfaces de parois ont été mesurées selon deux procédés dans le protocole expérimental présenté dans la section 2.2 :

- les mesures directes obtenues des sondes PT-100 dispersées sur toutes les parois et placées en surface (Fig. III.7 et Tab. III.8) ;
- les images prises dans l’infrarouge du sol réalisées par la caméra InfraRouge, permettant d’avoir un

champ complet de températures avec une résolution élevée.

4.2.1 Températures de surfaces extérieures mesurées par les sondes

Les températures mesurées par les quatre sondes placées à l'extérieur de la cellule, entourant la fenêtre, ont été comparées aux températures de l'extérieur de la paroi Ouest calculées par notre modèle.

Les températures observées du 08 au 16 Mai varient entre 5 °C en fin de nuit et 25 °C en milieu de journée (Fig. III.35). L'évolution temporelle de ces températures est semblable, qu'elles soient mesurées ou calculées, mais nous avons pu constater des différences de 2 °C à 4 °C à certains instants. D'ailleurs, les courbes semblent présenter un léger décalage temporel, les fluctuations des températures mesurées paraissant anticipées de quelques minutes dans les calculs.

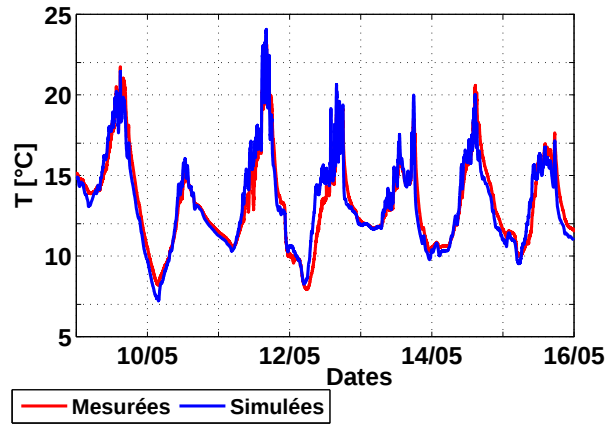


FIGURE III.35 – Températures mesurées par les sondes extérieures et simulées au niveau des mailles correspondantes (du 08 au 16 Mai 2013)

Les erreurs moyennes sont quantifiées en termes d'erreurs quadratiques (RMSE²) calculées selon la relation :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_T} (T_{\text{mes}}(i) - T_{\text{calc}}(i))^2}{N_T}} \quad (\text{III.20})$$

T_{mes} exprimés en °C, désignant les températures mesurées, T_{calc} en °C, étant les températures calculées et N la taille de l'échantillon de comparaison.

Nous avons ainsi pu calculer des RMSE de 0,94 °C en Mai et de la même façon une RMSE de 1,42 °C en Juillet.

Les erreurs intrinsèques non liées au décalage temporel peuvent trouver leur origine dans le mode de calcul des flux convectifs entre la paroi et l'extérieur. Nous avons en effet noté que les coefficients convectifs utilisés dans notre modèle, calculés selon la corrélation de [McAdams \(1954\)](#), étaient entachés d'incertitudes

2. Root Mean Square Errors

pouvant être importantes. Par ailleurs, certaines incertitudes sur leur utilisation subsistaient :

- il s'agit en effet de corrélations liant le coefficient convectif aux vitesses de vent dont le mode de mesure peut ne pas être adapté : elles peuvent effectivement être prises en champ libre ou proche de la paroi. En ce qui concerne les vitesses de vent utilisées dans notre modèle, celles-ci ont été mesurées en champ libre, au niveau de la station météorologique, suivant alors les recommandations de [McAdams \(1954\)](#) ;
- les coefficients convectifs devrait être fonction de la direction du vent et doivent tenir compte de température de l'air en mouvement. Par ailleurs, les différences de température entre la paroi et l'air ambiant sont aussi à prendre en considération, à l'instar des coefficients convectifs calculés à l'intérieur de l'enceinte ;
- les corrélations utilisées ne tiennent pas compte de la géométrie du bâtiment, de sa situation et de la rugosité de ses parois. Elles demeurent donc peu paramétrables alors que les coefficients convectifs résultent de l'interaction de l'environnement avec les parois ;
- enfin, les coefficients convectifs ont été appliqués de façon homogène à l'ensemble des mailles décrivant la paroi extérieure de la cellule alors que leurs températures et leur exposition au vent diffèrent.

Ainsi, le calcul des flux convectifs extérieurs demeurent un point faible du modèle, à l'origine d'erreurs de calculs des températures des surfaces de parois directement exposées à l'environnement. Dans l'idéal, il s'agirait de calculer ces flux plus précisément en tenant compte des facteurs cités ci-dessus, à partir de modèles aérauliques par exemple. Cependant, les bâtiments à l'étude étant particulièrement isolés, l'influence du comportement thermique de leurs couches superficielles extérieures sur les températures intérieures est atténuée, et l'impact des erreurs de calcul des températures de ces couches sur la précision des températures internes à la cellule demeure négligeable.

4.2.2 Températures de surfaces intérieures mesurées par les sondes

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.

Les températures de surface sont liées à la localisation de la tache solaire, de telle sorte que les dimensions des mailles deviennent un artéfact important à leur calcul, puisqu'elles biaisent le test d'appartenance de la tache solaire. Dans le modèle, une maille donnée localisant une sonde peut à un instant précis être considérée incluse dans la tache solaire et donc avoir été irradiée et chauffée, alors que celle-ci est restée froide car non incluse en réalité. Réciproquement la maille considérée peut avoir été non incluse dans la tache solaire alors qu'elle l'était. Ainsi, une étude de sensibilité du positionnement de la sonde et du choix de la maille correspondante s'impose.

Autour de la sonde 8 située au sol (Fig. [III.7](#) et Tab. [III.8](#)), nous pouvons effectivement observer alors

des différences de températures importantes entre mailles pourtant voisines (Fig. III.36). Il existe en effet des décalages temporels liés au fait que la tache solaire frappe les mailles étudiées avec un certain délai : la maille située à l'Est, par exemple, est chauffée bien après les mailles situées à l'Ouest de la maille étudiée (Fig. III.36.a). Des différences d'amplitude dans les variations sont observables aussi. Celles-ci sont liées au fait que les conditions d'ensoleillement ont eu le temps d'évoluer pendant le déplacement de la tache solaire.

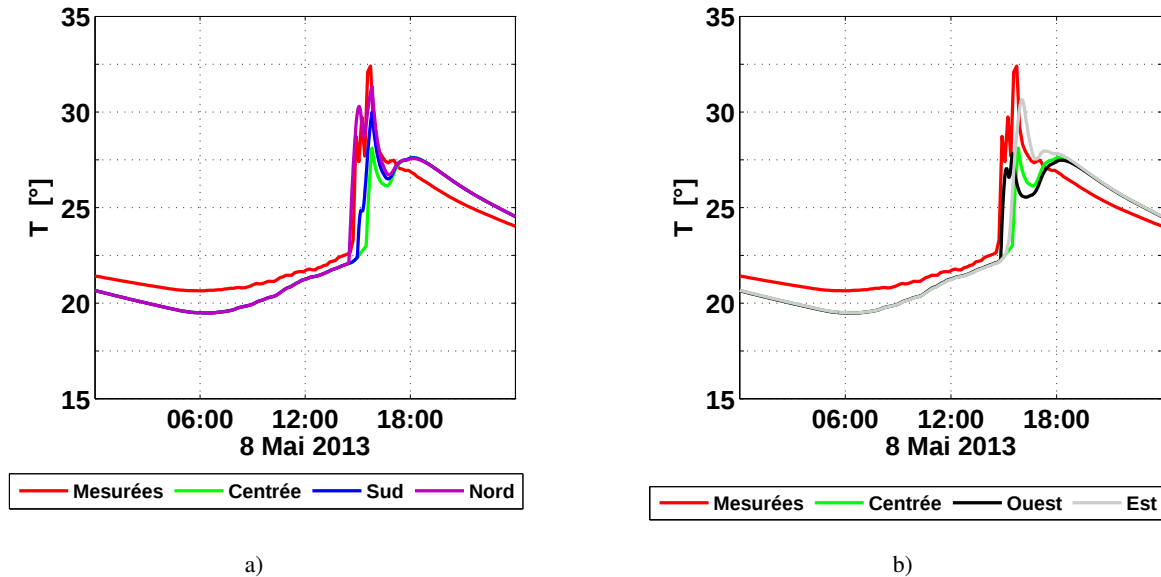


FIGURE III.36 – Températures simulées au niveau des mailles correspondant ou entourant la sonde 8 (le 08 Mai 2013)

Ici, les écarts et décalages temporels entre les températures de la maille correspondant aux coordonnées de la sonde 8 et de ses mailles voisines avec les mesures semblent minimisées lorsque l'on prend la maille voisine décalée vers le Nord (Fig. III.36.b). Ceci semble d'ailleurs en accord avec les observations des décalages de la tache solaire montrés en section 4.1.

Sur la semaine du 9 au 16 Mai 2013, les températures calculées suivent les mêmes tendances que les mesures réalisées au niveau de la sonde 8, même si des différences allant jusqu'à 1,8 °C peuvent être observées lors de pics de température, correspondant à des passages de la tache solaire sur la maille (Fig. III.37). Notre modèle, à ces instants, tend à sous-évaluer les températures de surface, indiquant que les flux CLO incidents sur cette maille pourraient être sous-estimés. Nous pouvons noter par ailleurs que les températures les plus basses, la nuit, sont sous-estimées aussi, montrant que les flux déperditifs semblent à ces moments surestimés.

Pendant la même période, sur la paroi Nord, les sondes 6 et 7 ne reçoivent jamais la tache solaire et ne sont donc éclairées, en journée, que par du rayonnement diffus. Nous avons des résultats cohérents, suivant fidèlement les tendances des mesures (Fig. III.38). On observe cependant que les baisses de température, 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 dont il résulte conséquemment des températures maximales légèrement plus importantes en milieu d'après-midi et des minima plus bas en fin de nuit. Les écarts, dans ces cas, n'excèdent

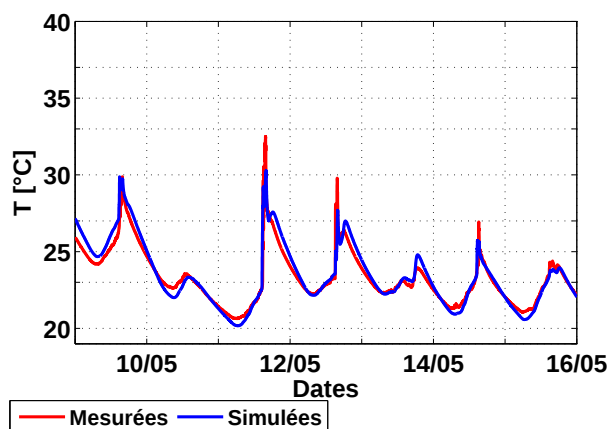


FIGURE III.37 – Températures mesurées par la sonde 8 et simulées au niveau de la maille correspondante (du 08 au 16 Mai 2013)

cependant jamais 1 °C. Il semble donc que le flux reçu en journée par les mailles correspondant à ces sondes soit trop important, tandis que le flux déperditif y paraît trop important la nuit.

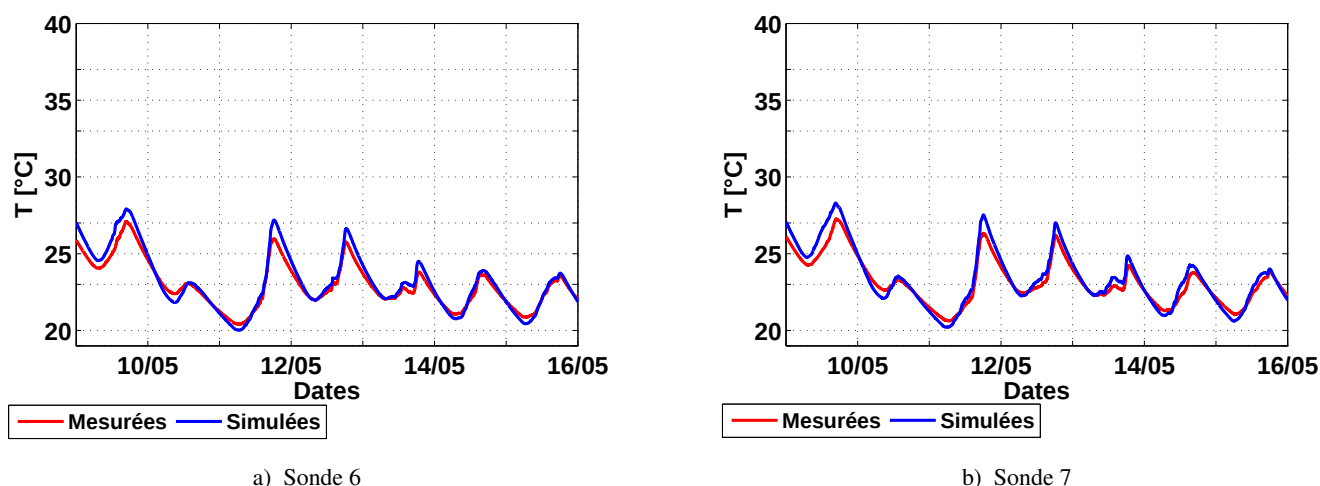


FIGURE III.38 – Températures mesurées par les sondes 6 et 7 et simulées au niveau des mailles correspondantes (du 08 au 16 Mai 2013)

Les sondes 4 et 5 sont placées sur le mur latéral Sud. Pendant la période de mesure étudiée, seule la sonde 4 reçoit la tache solaire en fin d'après-midi, de légers pics de température témoignant de son passage (Fig. III.39.a). La sonde 5, décalée vers la paroi Ouest, n'est jamais touchée par la tache solaire et ne reçoit donc que le rayonnement diffus. La tendance des températures qu'elle mesure est similaire à celle des sondes 6 et 7 (Fig. III.38 et Fig. III.39.b). Finalement le modèle semble reproduire les signaux mesurés par les sondes 4 et 5 et à l'instar des observations déjà faites pour les sondes 6, 7 et 8, il surestime les températures en journée et sous-évalue les températures la nuit.

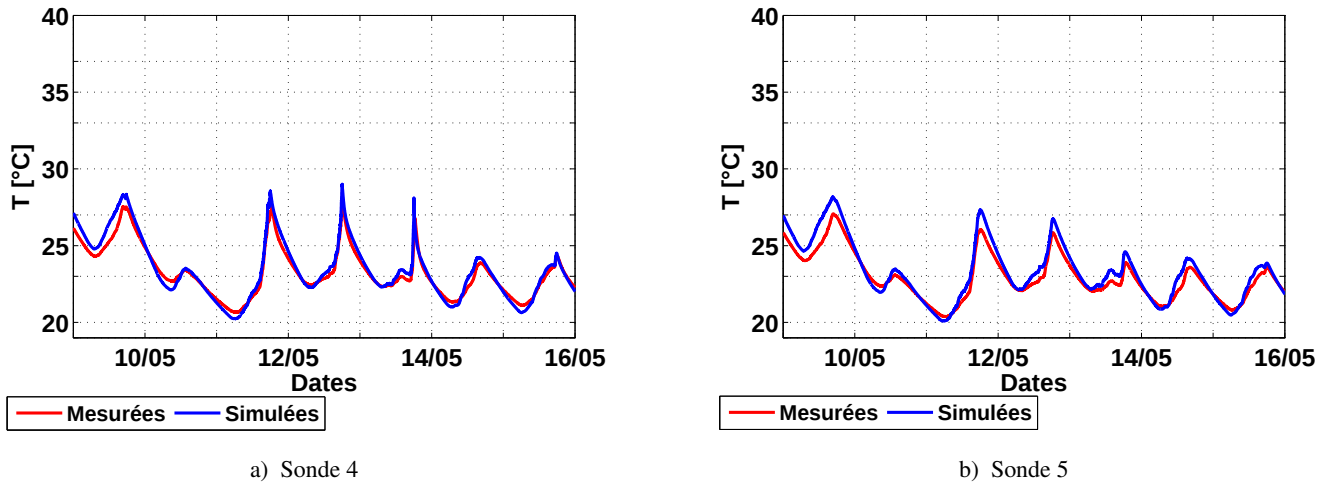


FIGURE III.39 – Températures mesurées par les sondes 4 et 5 et simulées au niveau des mailles correspondantes (du 08 au 16 Mai 2013)

Les sondes 1 et 10 placées respectivement sous la fenêtre et au plafond reçoivent uniquement du rayonnement diffus. Des observations similaires à celles des sondes 5, 6 et 7 peuvent être faites. Ici, les écarts ne dépassent pas 1 °C pour la sonde 1 (Fig III.40.a) tandis qu'ils sont plus importants pour la sonde 10 (Fig III.40.b), atteignant 1,8 °C.

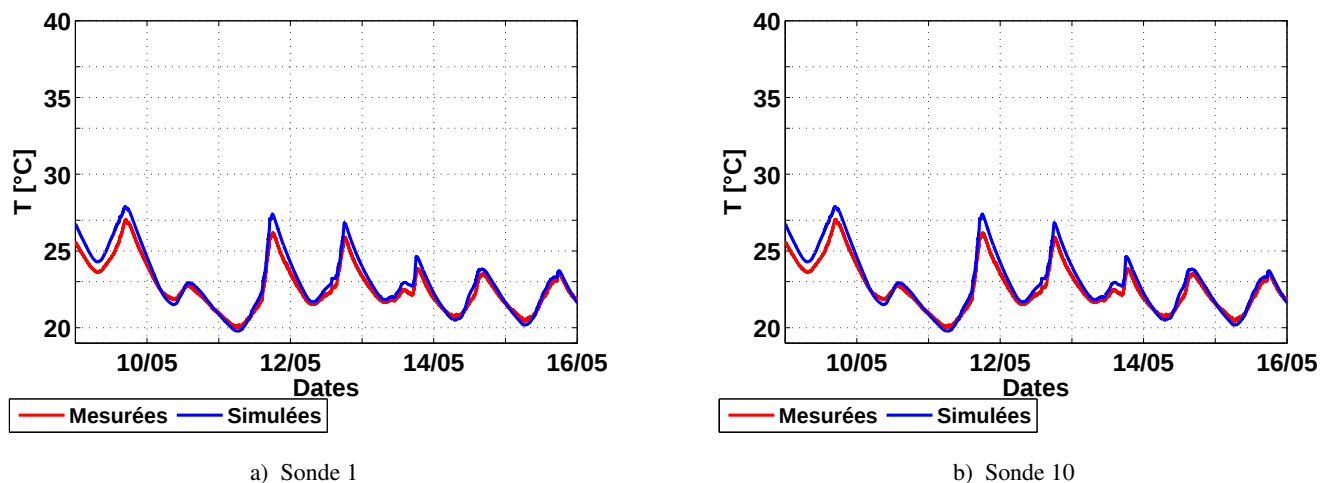


FIGURE III.40 – Températures mesurées par les sondes 1 et 10 et simulées au niveau des mailles correspondantes (du 08 au 16 Mai 2013)

En ce qui concerne les sondes 2 et 3 situées sur la paroi Est : la première, proche du sol, est frappée par la tache solaire en après-midi, d'importants pics de température, à ces instants, témoignant d'un apport énergétique important (Fig. III.41.a). Ces pics sont bien reproduits aux mêmes instants dans nos simulations, nous constatons cependant que les températures sont surévaluées, les écarts atteignant 2,5 °C voire 3 °C. La sonde 3 quant-à-elle, est placée au-dessus de la porte, et ne reçoit que du rayonnement diffus. Les températures mesurées y sont proches de celles des sondes 1, 5, 6 et 7, le modèle reproduisant tout aussi fidèlement le signal.

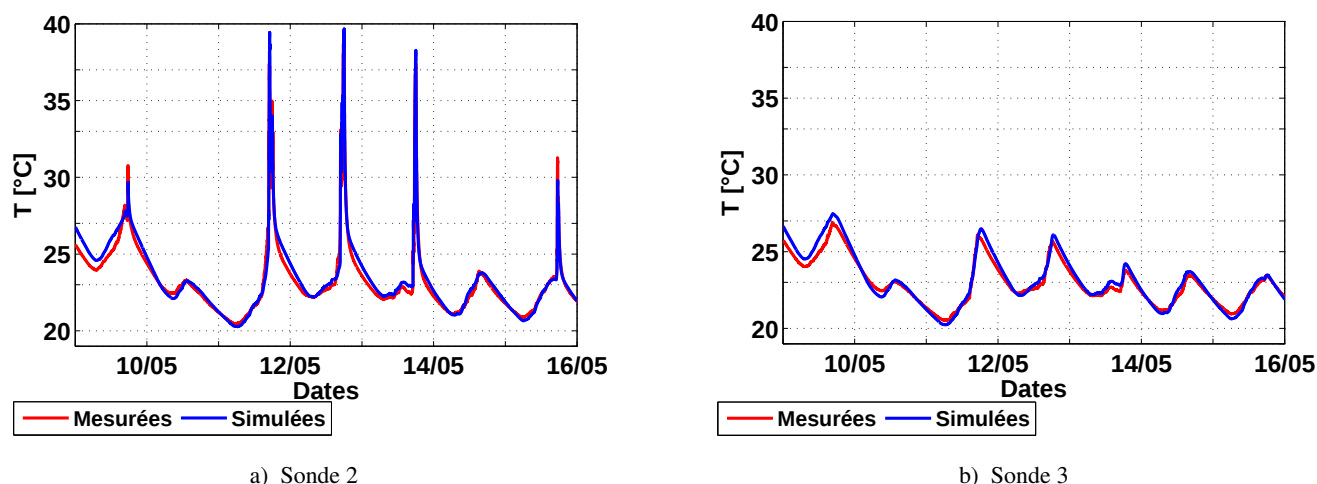


FIGURE III.41 – Températures mesurées par les sondes 2 et 3 et simulées au niveau des mailles correspondantes (du 08 au 16 Mai 2013)

Enfin en été, la sonde 2 est toujours touchée par la tache solaire en après-midi alors que la sonde 3 n'est jamais atteinte par le rayonnement direct. A l'instar des observations faites en mi-saison, nous pouvons constater que les pics de température liés au passage de la tache solaire au niveau de la sonde 2 sont reproduits par le modèle sans décalage temporel mais légèrement surévalués (Fig.III.42.a). D'un autre côté, les températures simulées au niveau de la sonde 3 qui ne reçoit que du rayonnement diffus sont bien retranscrites mais elles sont toujours surévaluées en journée et sous évaluées la nuit (Fig.III.42.b). Ces constats demeurent donc similaires à ceux réalisés pour les simulations de Mai.

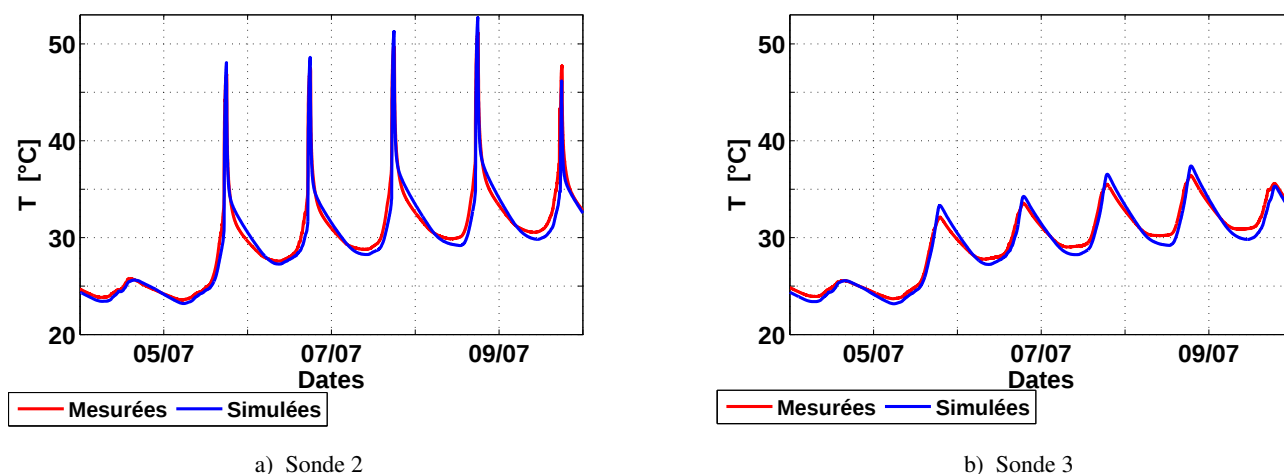


FIGURE III.42 – Températures mesurées par les sondes 2 et 3 et simulées au niveau des mailles correspondantes (du 03 au 10 Juillet 2013)

En résumé, les comparaisons entre les températures mesurées des sondes placées en surface des parois et les températures calculées au niveau des mailles correspondantes, pour les deux périodes étudiées, nous donne trois informations principales :

1. les mailles ayant des températures proches de celles mesurées par les sondes ne coïncident par toujours

exactement aux mailles incluant ces sondes : les incertitudes de localisation de la tache solaire peuvent induire des décalages vers les mailles voisines ;

2. en journée, les températures calculées tendent à être surévaluées, que les mailles étudiées soient frappées par la tache solaire ou non : les rayonnements solaires incidents, globaux ou seulement diffus semblent surestimés ;
3. la nuit, les températures calculées sont inférieures aux températures mesurées : les flux déperditifs paraissent donc surestimés à ces instants.

	N° Sondes Paroi TS	1 Ouest Non	2 Est Oui	3 Est Non	4 Sud Oui	5 Sud Non	6 Nord Non	7 Nord Non	8 Sol Oui	9 Sol Non	10 Plafond Non
08 au 16 Mai 2013	RMSE [°C]	0,59	0,67	0,40	0,49	0,63	0,66	0,55	0,57	0,71	0,62
03 au 10 Juillet 2013	RMSE [°C]	0,54	0,57	0,36	0,68	0,54	0,58	0,55	-	0,58	0,64

TABLE III.13 – RMSE entre les températures mesurées par sondes placées en surfaces des différents parois et les calculs des mailles correspondantes. La ligne **TS** du tableau permet de préciser si les sondes sont touchées ou non la tache solaire

Finalement, les erreurs moyennes, exprimées en termes de RMSE, sont recensées dans le tableau III.13. Nous pouvons tout d’abord remarquer qu’elles restent du même ordre de grandeur, variant entre 0,4 °C et 0,7 °C quel que soit la sonde considérée et pour les deux périodes d’étude. Par ailleurs, il ne semble pas exister de corrélation entre l’importance de l’erreur et la présence ou non de la tache solaire : en Mai par exemple, les simulations au niveau des sondes 2 et 4 frappées par la tache solaire présentent des erreurs moyennes respectivement de 0,67 °C et 0,49 °C alors que les sondes 3 et 5, non touchées par la tache solaire, présentent des RMSE de 0,40 °C et 0,63 °C.

4.2.3 Champs de température des surfaces intérieures

Les comportements temporels de température de paroi ont été étudiés ici grâce à des mesures ponctuelles réalisées par des sondes. Afin de compléter les mesures des sondes placées en surface et de représenter les champs de température des parois de la cellule, nous avons opté pour un outil thermographique infrarouge.

L’utilisation des images obtenues par les caméras infrarouges nécessitent, avant comparaison avec les calculs, un traitement particulier.

Une caméra IR ne détecte pas une température directement mais un rayonnement. Ce sont donc bien les lois de rayonnement qui vont conditionner la mesure. Idéalement, la densité de flux émise par rayonnement Φ_{IR} par un corps à température T , exprimé en K, est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi_{IR} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{III.21})$$

Avec $\sigma = 5,6710^{-8} \text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ la constante de Stefan-Boltzmann et ε l'émissivité du corp considéré, traduisant le rapport entre l'énergie émise par le corps en question et l'énergie qui serait émise par un corps noir à la même température.

Outre l'émission d'un rayonnement IR, l'objet en question peut aussi absorber, transmettre ou réfléchir une partie du rayonnement incident. Dans le cadre de la thermique du bâtiment est considéré que :

- la valeur d'absorptivité IR est égale à l'émissivité ;
- les parois sont considérées opaques aux IR : la transmission des IR est donc négligée.

Par conséquent, seules deux grandeurs sont nécessaires pour décrire les échanges radiatifs dans les infra-rouges : l'émissivité ε et la réflectivité ρ_{IR} . Elles sont liées par la loi :

$$\rho_{\text{IR}} + \varepsilon = 1 \quad (\text{III.22})$$

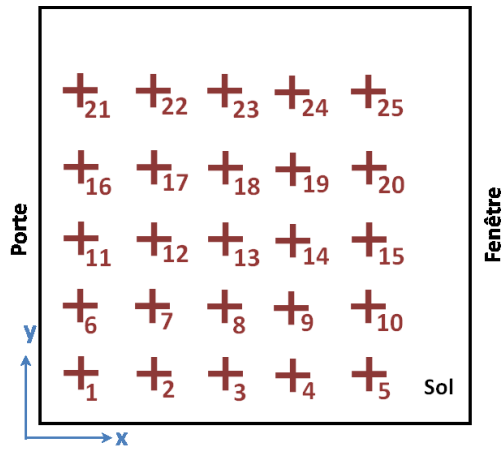
En thermographie, la densité du flux de chaleur radiatif émise par un objet visé et reçue par la caméra infrarouge s'exprime par [Buchlin \(2002\)](#) :

$$\Phi_{\text{IR}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 + \rho_{\text{IR}} \sigma \cdot T_{\text{env}}^4 \quad (\text{III.23})$$

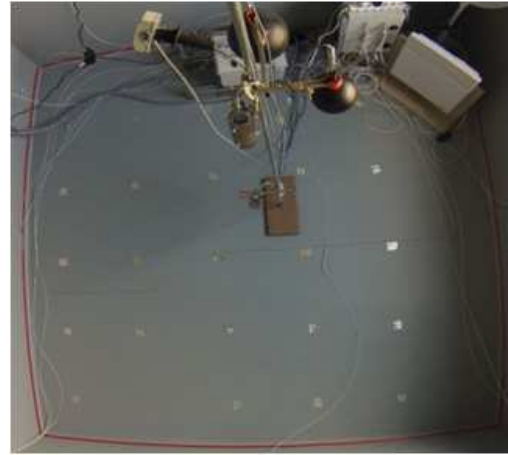
La mesure réalisée par les caméras IR amalgame donc le flux émis par le matériau visé à température T ainsi que le flux réfléchi par celui-ci et issu de son environnement, à température T_{env} . Ainsi, tous les corps présents à proximité de la surface mesurée sont des sources potentielles de rayonnement IR perturbant la mesure. Pour avoir la température réelle de l'objet, il est donc nécessaire d'apporter une correction à la mesure en calculant la température de l'environnement nommée aussi la Température Apparente Réfléchie (TAR). Cette correction est implémentée dans l'algorithme de prétraitement de conversion flux/température de la caméra qui calcul la température de l'objet à partir du flux capté et d'une valeur de TAR fixée par l'utilisateur. Cependant, cette TAR peut être très hétérogène lorsque l'objet visé est une paroi complète de 9 m^2 . Par ailleurs, la TAR fixée par le manipulateur est approximative et peut être l'origine d'erreurs de mesures importantes.

Une bonne mesure nécessite donc la connaissance des caractéristiques du matériau (valeur de son émissivité) ainsi que la maîtrise de l'environnement ou du moins une connaissance suffisante. Il convient alors d'effectuer en parallèle de la mesure de température du matériau une mesure de la température de l'environnement (bâtiment voisins, voûte céleste, etc.) afin de retraiter les mesures *a posteriori*.

Dans notre cas, la TAR a été fixée à 25°C pour le traitement de la caméra, mais elle a été ré-estimée à différents endroits de la surface visée par la caméra, tenant ainsi compte d'une éventuelle hétérogénéité spatiale, à partir des températures de feuilles d'aluminium réparties sur le sol (Fig. [III.43](#) et Tab. [III.14](#)) selon la procédure détaillée par [Datcu et al. \(2005\)](#).



a) Photographie du sol



b) Disposition des feuilles d'aluminium sur le sol

FIGURE III.43 – Localisation des feuilles d'aluminium utilisées pour calculer la TAR

N° feuille d'aluminium	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X [m]	0,30	0,80	1,35	1,82	2,32	0,30	0,80	1,35	1,82	2,32
Y [m]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,80	0,80	0,80	0,80	0,8
N° feuille d'aluminium	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X [m]	0,30	0,80	1,30	1,80	2,30	0,30	0,80	1,30	1,80	2,25
Y [m]	1,30	1,30	1,28	1,28	1,29	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
N° feuille d'aluminium	21	22	23	24	25					
X [m]	0,30	0,80	1,30	1,80	2,20					
Y [m]	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30					

TABLE III.14 – Coordonnées des feuilles d'aluminium dispersées sur le sol

Nous pouvons observer que les températures mesurées sur les 25 feuilles d'aluminium diffèrent spatialement et varient dans le temps (Fig. III.44) :

- les valeurs de température des feuilles d'aluminium évoluent considérablement au cours de l'expérience variant entre 24 °C vers 10h et 41 °C peu avant 18h ;
- l'écart entre les températures des différentes feuilles d'aluminium mesurées à un instant donné peuvent atteindre 12 °C. Ces écarts sont d'ailleurs d'autant plus importants en après-midi, lorsque la tache solaire atteint les feuilles d'aluminium 6, 16 et 25 alors qu'elle ne touche pas les feuilles 1, 2 et 11 : les températures des premières montent jusqu'à 37 °C à 41 °C alors que les secondes restent entre 30 °C et 32 °C.

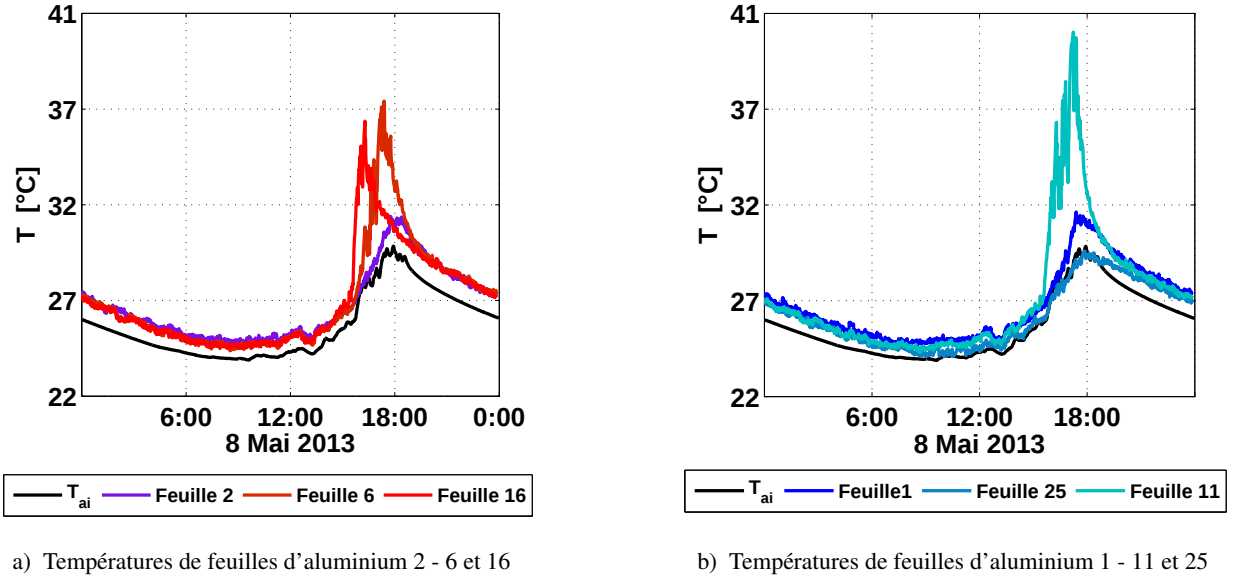


FIGURE III.44 – Températures des feuilles d'aluminium mesurées par thermographie le 08 Mai 2013

Nous pouvons d'ailleurs noter que les températures des feuilles d'aluminium sont presque toujours supérieures à la TAR de la caméra. Or l'émissivité de l'aluminium étant quasi nulle, les feuilles d'aluminium font office de réflecteur parfait : $\rho_{IR,Alu} \approx 1$, le flux perçu à ces endroits par la caméra est alors lié directement à la TAR et les températures mesurées sont donc assimilables à la TAR elle-même. Dans ces cas, l'équation III.23 devient

$$\Phi_{IR,Alu} = \sigma \cdot T_{env}^4 \quad (III.24)$$

Ainsi, une fois les TAR réelles déterminées, celles-ci peuvent être prises en compte dans les températures mesurées au sol par thermographie. La sortie de la caméra étant un champ de températures, nous remontons dans un premier temps aux densités de flux $\Phi_{IR,mes}$ perçus par celle-ci. Dans le cadre des mesures, l'émissivité ayant été fixée à 1,

$$\Phi_{IR,mes} = \sigma \cdot T_{mes}^4 \quad (III.25)$$

Le champ de températures T_{corr} corrigées est alors obtenu par :

$$T_{corr} = \sqrt[4]{\frac{\Phi_{IR,mes} - \Phi_{IR,Alu}}{\epsilon \cdot \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{T_{mes}^4 - (1 - \epsilon \cdot T_{env}^4)}{\epsilon}} \quad (III.26)$$

Les corrections apportées sont de l'ordre de 1 °C pour des différences de 15 °C entre la température environnante implémentée dans la caméra et température environnante mesurée. Elle est de l'ordre de 0,3 °C pour des différences de 5 °C. Le post-traitement a donc plus d'impact pour les grandes différences, lorsque les températures de surface sont élevées, dans la tache solaire par exemple.

Finalement, les mesures thermographiques peuvent être ponctuellement comparées aux mesures de sondes PT-100 réparties sur les parois visées. Au niveau du sol, les mesures de sondes 8 et 9 ont ainsi permis d'évaluer les différences entre les deux modes de mesures (Fig. III.45).

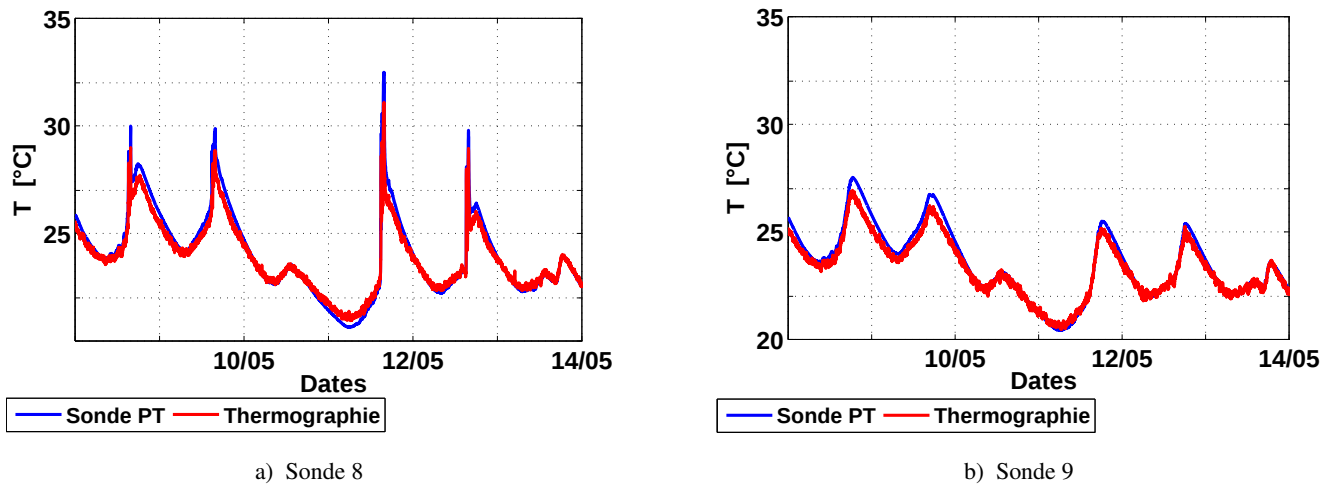


FIGURE III.45 – Températures mesurées par les sondes 8 et 9 comparées aux mesures de températures par thermographie (du 08 au 14 Mai 2013)

Nous pouvons tout d'abord constater que les températures obtenues par thermographie varient beaucoup plus que celles des sondes PT-100 : le signal est ainsi plus bruité. Par ailleurs, des différences pouvant atteindre 0,5 °C sont observables. Les mesures des caméras infrarouges, même traitées, sous-estiment les températures de surface en journée et tendent à les surestimer la nuit.

Nous avons étudié les images infrarouges traitées à plusieurs instants de la journée du 11/05/2013, alors que les prises de vue se focalisent au niveau du sol. Notons que le mât de mesures de températures d'air ainsi que le globe noir apparaissent en bas à gauche sur ces images et masquent les parties du sol qu'ils surplombent. Les températures mesurées à ces endroits sont alors celles du mât et des instruments qu'il supporte, et non les températures réelles du sol.

A 11h, les températures du sol restent assez homogènes, qu'elles soient modélisées ou mesurées (Fig. III.46). La cellule étant orientée vers l'Ouest, la tache solaire n'apparaît pas encore et par conséquent, seul du rayonnement diffus illumine la pièce et chauffe ses parois à cet instant. On peut observer cependant que les températures sont légèrement plus basses quand on s'approche de la paroi Ouest. Ces températures plus basses peuvent être liées au pont thermique de la paroi Ouest en contact avec l'environnement extérieur. Les écarts entre modèle et mesures restent assez faibles, atteignant au maximum 0,5 °C pour les mailles les plus proches de l'Ouest. Le pont thermique semble être sous-évalué par notre modèle, celui-ci ne tenant pas compte du support sur lequel repose la paroi amovible et d'éventuels défauts au niveau de la jonction entre cette paroi et le reste de la cellule.

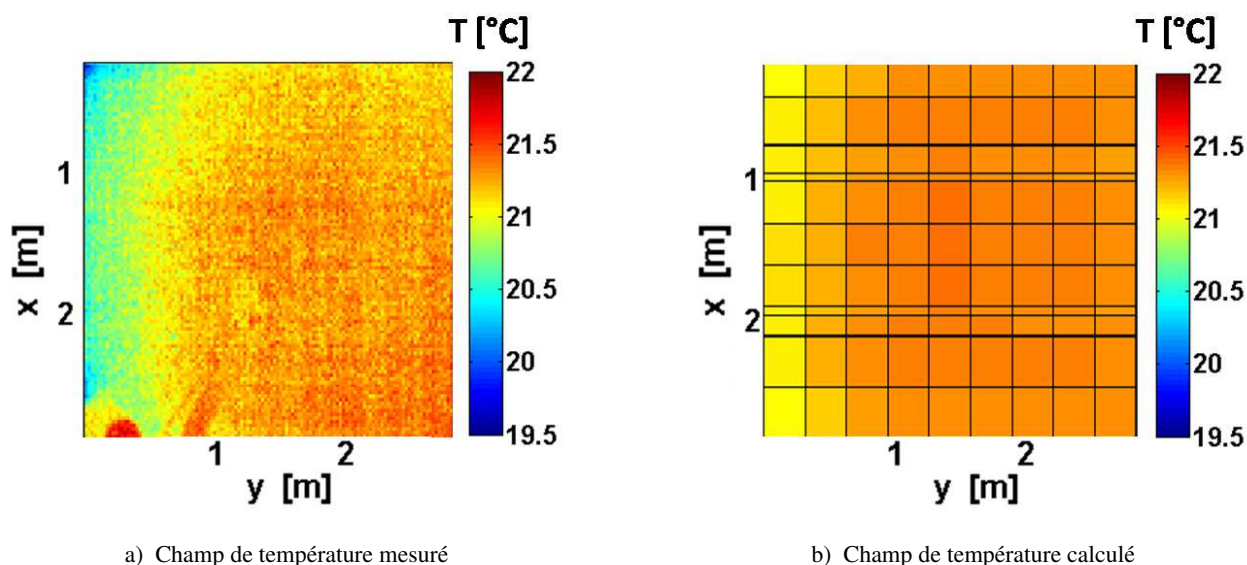


FIGURE III.46 – Champ de température mesuré et calculé au niveau du sol le 11 Mai 2013 à 11h

A 14h au niveau du sol, une tache solaire est observable au niveau du champ de températures : il s'agit de mailles où les températures sont plus élevées. Cependant, ici les différences de températures entre les points frappés par la tache solaire et les points hors de celle-ci restent faibles, de l'ordre 1 °C, les points de la tache solaire étant touchés par un rayonnement solaire composé majoritairement de rayonnement diffus. Sur l'image infrarouge (Fig. III.47.a) la tache solaire n'apparaît donc que de façon nuancée.

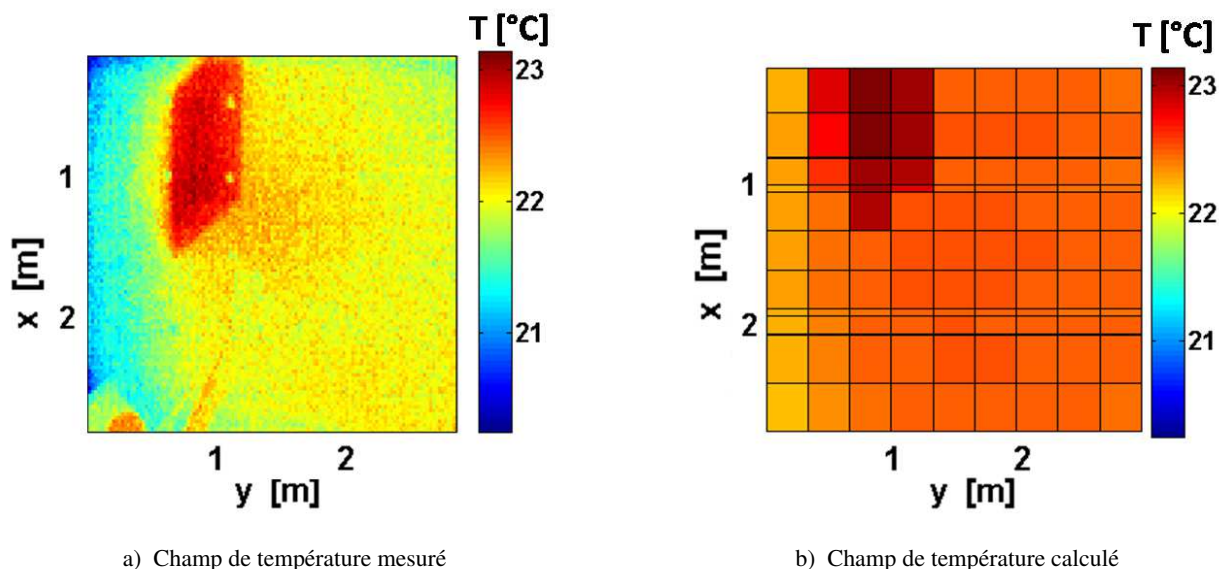


FIGURE III.47 – Champ de température mesuré et calculé au niveau du sol le 11 Mai 2013 à 14h

Ensuite, nous pouvons constater que les températures données par le modèle sont globalement plus élevée que la mesure. Par ailleurs, la tache solaire est placée au même endroit que celle de l'image infrarouge, mais nous constatons que les mailles voisines à gauche sont aussi plus chaudes (Fig. III.47.b). Ces trois mailles

ne semblent pas indiquer la tache solaire actuelle, mais une empreinte de la tache solaire obtenue à 13h : celles-ci, chauffées par une tache solaire marquée par un rayonnement solaire direct important à 13h, sont restées chaudes.

A 16h, la tache solaire, toujours sur le sol, s'est déplacée vers la paroi Est, du côté de la porte. A cet instant, l'hétérogénéité des températures de surface est assez importante : les températures maximales atteignent 32 °C au niveau de la tache solaire tandis qu'elles ne dépassent pas 25 °C à certains endroits (Fig. III.48).

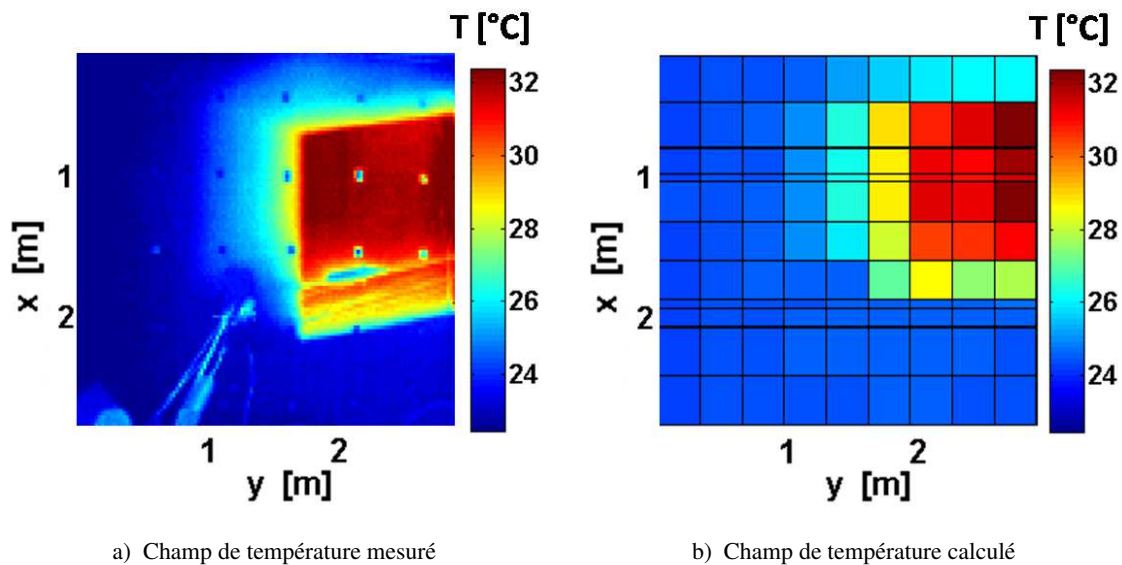


FIGURE III.48 – Champ de température mesuré et calculé au niveau du sol le 11 Mai 2013 à 16h

La paroi au niveau de la tache solaire, à cet instant, est donc surchauffée par le rayonnement solaire important qu'elle reçoit. Par ailleurs, un gradient de température est observable entre les parties de la paroi assez éloignées de la tache solaire restée froide et la tache solaire elle-même, retraçant sa trajectoire de la partie centre-Nord du sol vers le centre-Est. Ce gradient de température témoigne de l'empreinte de la tache solaire au sol, les endroits ayant été frappés de rayonnement direct étant restés plus chauds à cause de l'inertie du plancher.

Il apparait par ailleurs que la tache solaire calculée dans notre modèle est décalée vers le Nord par rapport à celle repérable sur les mesures. Conséquemment, des écarts de température de l'ordre de 4 °C sont notables au niveau des mailles concernées par ce décalage, tandis qu'en dehors de ces décalages, les températures des mailles de la tache solaire simulées sont sensiblement les mêmes que les mesures. Nous pouvons par ailleurs deviner, à l'instar des observations faites sur les mesures, l'empreinte des taches solaires successives ayant frappé le sol auparavant, du centre-Nord du sol vers l'Est. Enfin, nous constatons que le modèle attribue des températures plus importantes au niveau des mailles hors tache solaire, où les écarts sont de 1,5 °C en moyenne, montrant que le rayonnement diffus reçu par ces mailles semble toujours surestimé.

Pendant la seconde campagne de mesure, en Juillet, les prises de vue infrarouges ont été réalisées sur la

paroi Est. Sur ces images apparaissent les températures réfléchies par le cylindre placé sur le mât, constituant de nouveau un artéfact sur la mesure sur la gauche de l'image.

Nous pouvons observer, sur les deux exemples montrés ici (Fig. III.49 et Fig. III.50) que les mailles touchées par les taches solaire sont beaucoup plus chaudes que les mailles ne recevant que le rayonnement diffus : les températures y atteignent 52 °C à 55 °C contre 37 °C environ hors tache solaire.

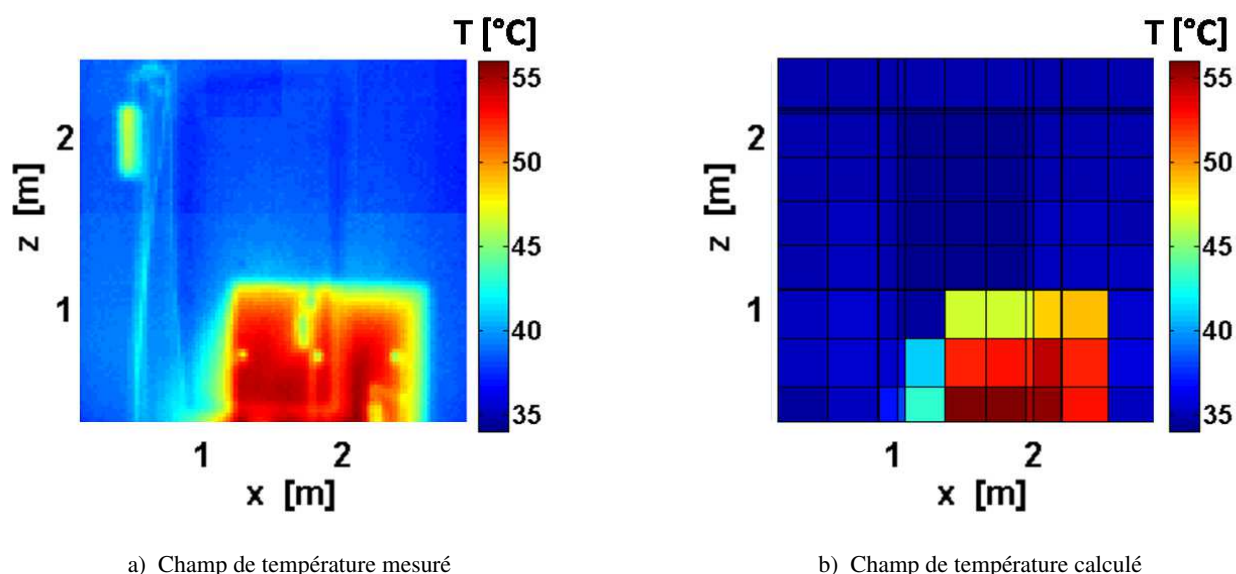


FIGURE III.49 – Champ de température mesuré et calculé sur la paroi Est le 08 Juillet 2013 à 17h23

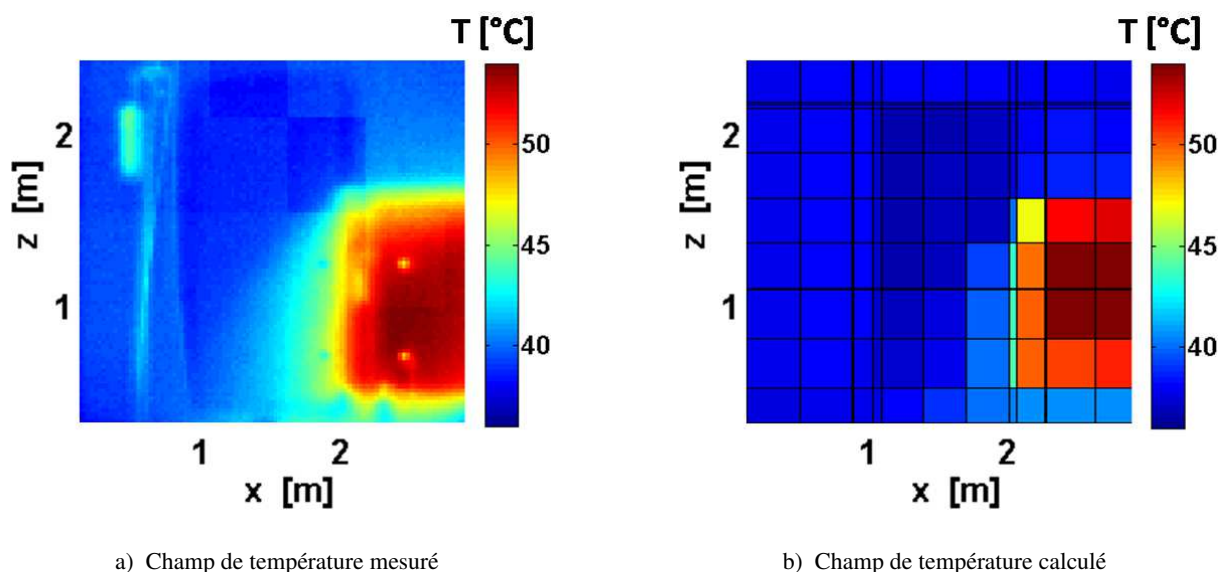


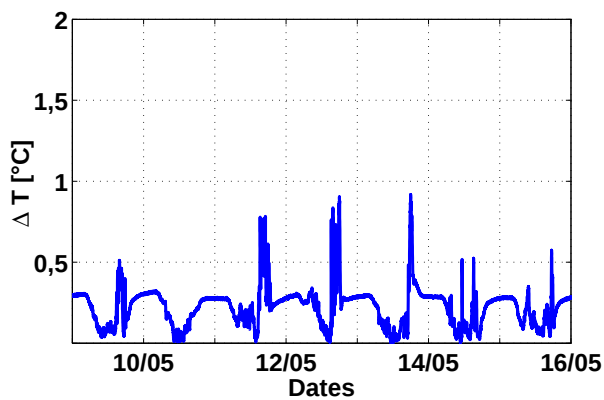
FIGURE III.50 – Champ de température mesuré et calculé sur la paroi Est le 08 Juillet 2013 à 18h23

Les taches solaires sont bien localisées dans notre modèle : elles correspondent effectivement aux endroits les plus chauds sur les images infrarouges. D'ailleurs, les températures calculées à ces endroits concordent complètement avec les températures mesurées, ce qui n'est pas exactement le cas hors tache solaire : les

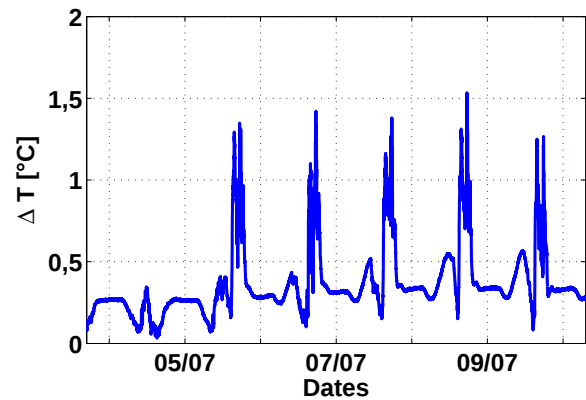
températures y sont sous-estimées par notre modèle d'environ 2 °C.

4.2.4 Températures d'air

Les mesures de température d'air de la cellule sont réalisées par trois sondes placées à différentes hauteurs sur le mât. Cette disposition a été prise afin de tenir compte des différences de températures liées à la stratification de l'air au sein du volume. Nous pouvons en effet constater qu'il existe des écarts importants entre les mesures des différentes sondes, atteignant 0,9 °C et 1,5 °C au milieu des journées de Mai et de Juillet respectivement (Fig. III.51.a). Plus globalement, en mi-saison, les différences moyennes entre températures d'air mesurées par les trois capteurs reste modérées : 0,22 °C. Ces écarts entre les trois sondes du mât, en été, sont légèrement plus importants, l'écart moyen atteignant 0,40 °C .



a) Différences de température entre sondes entre le 08 et le 16 Mai



b) Différences de température entre sondes entre le 03 et le 10 Juillet

FIGURE III.51 – Différences de température constatées entre les 3 sondes placées sur le mât

Cependant, contrairement à ce qui était envisagé initialement, ces différences de température d'air ne sont pas systématiquement liées à une stratification verticale de l'air. Nous pouvons en effet observer que la sonde du milieu, située à environ 1,3 m du sol, mesure le plus souvent des températures d'air supérieures aux deux autres (Fig. III.52).

D'ailleurs, des profils de température d'air ont été réalisés à plusieurs instants de la journée du 08 Mai en utilisant les températures mesurées par les sondes placées au niveau du mât de mesures complétées par celles mesurées par les sondes surfaciques placées au sol et au plafond (Fig. III.53). Ces profils abondent dans le sens de l'observation précédente : les températures mesurées ne sont pas toujours plus élevées en haut de la pièce et plus froides en bas. Ainsi, à 9h12, la température d'air semble tout à fait homogène dans la pièce, restant à 24 °C $\pm$ 0,1 °C. A 15h06, la température surfacique au niveau du sol est 4 ° à 5 °C supérieures aux températures d'air mesurées par les capteurs situés au-dessus. A cet instant, la tache solaire frappe le capteur surfacique dont la température monte. Nous pouvons alors anticiper que la température d'air à proximité du sol sera elle aussi plus élevée que les températures d'air au-dessus, influencée par la proximité de la tache

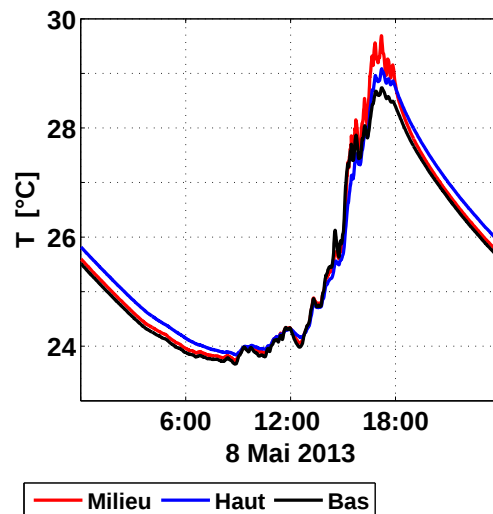
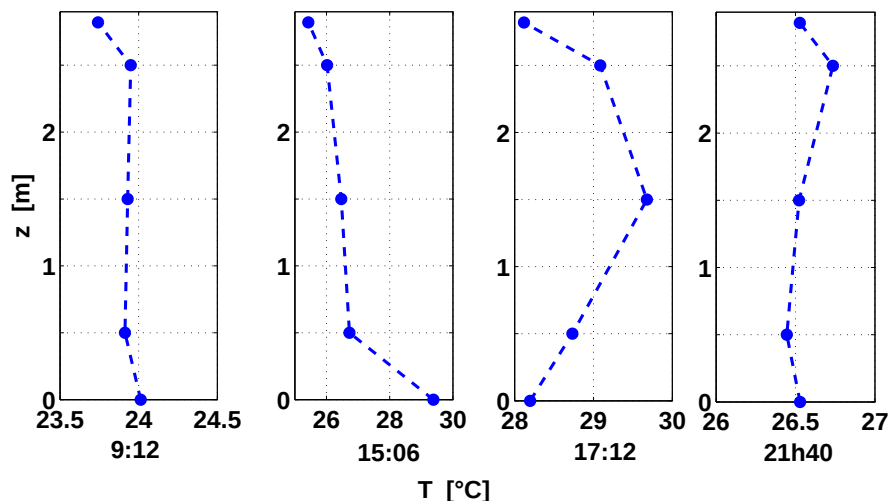


FIGURE III.52 – Températures mesurées par les 3 sondes du mât le 08 Mai 2013

solaire. Ensuite, à 17h12, la température de la sonde placée au milieu du mât de mesure est la plus importante. Il est probable que celle-ci soit augmentée sous l'influence du rayonnement solaire frappant le cylindre censée l'isoler. Enfin, en soirée, la sonde du haut est plus chaude. Cette fois nous pouvons imaginer que l'effet de la stratification est observable : aucun apport d'énergie extérieur ne perturbe la mesure. Notons cependant que les écarts de température sont très faibles, de l'ordre de 0,2 °C.

FIGURE III.53 – Profils de température d'air en fonction de la hauteur z à différents instants de la journée du 08 Mai 2013

Les calculs de température d'air étant effectués en ne considérant qu'un seul volume d'air dans la cellule, aucun effet de stratification n'est pris en compte. Les comparaisons ici se feront en considérant les températures mesurées par les trois sondes sous forme d'une aire entre température basse et haute, représentant l'incertitude de mesure. Par ailleurs, les écarts entre mesures et simulations représentés dans les figures sont donnés par

$$\Delta T = T_{\text{mes}} - T_{\text{calc}} \quad (\text{III.27})$$

En mai, nous observons que les températures d'air simulées et les mesures suivent les mêmes tendances, avec des différences avec la sonde du milieu ne dépassant pas 1,2 °C, légèrement au-dessus des incertitudes de mesures (Fig. III.54). En journée, le modèle tend à surestimer les températures d'air et plus les apports solaires sont plus élevés, plus les différences sont importantes. Ces écarts peuvent être expliqués soit par une sous-estimation d'un flux déperditif, rayonnement GLO ou flux conductif ; soit par la surestimation des flux CLO, ou encore par le fait que des supports de la paroi ouest, à l'origine de ponts thermiques, ne sont 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 déperditifs (GLO ou convectifs) semblent donc surestimés.

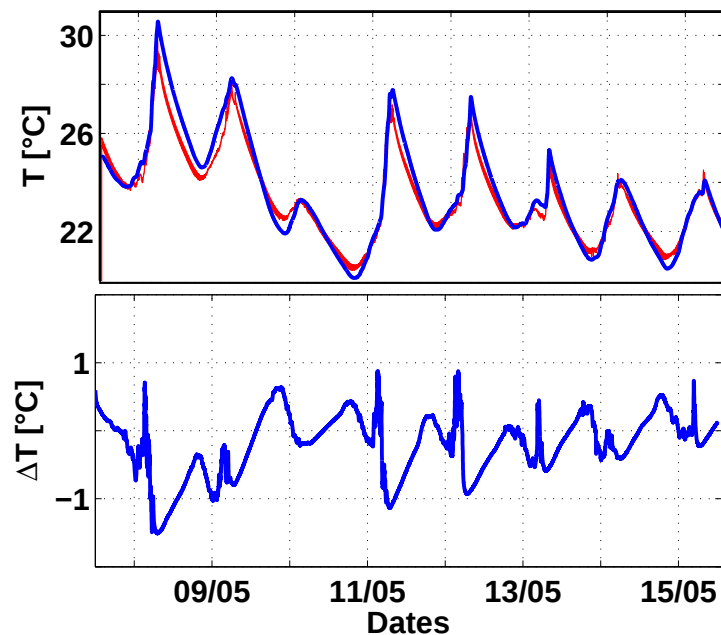


FIGURE III.54 – Comparaisons entre modèle et mesures en mi-saison (du 08 au 16 Mai 2013)

L'été, les constats sont les mêmes, à savoir, les températures élevées en journée sont surévaluées tandis que les températures la nuit sont toujours sous-évaluées III.55. Si les différences remarquées en journées semblent cependant plus importantes qu'en mi-saison, celles observées la nuit le sont moins.

Les performances de notre modèle, en termes de RMSE déterminées suivant l'équations III.20, sont résumées dans le tableau III.15.

Nous pouvons noter que les erreurs quadratiques moyennes demeurent de l'ordre de 0,5 °C, en mi-saison comme en juillet. Les erreurs sont légèrement plus élevées en Juillet, quel que soit la sonde de mesure.

Par ailleurs, les caméras dégagent de la chaleur qui influence la température d'air du local. Ainsi, la

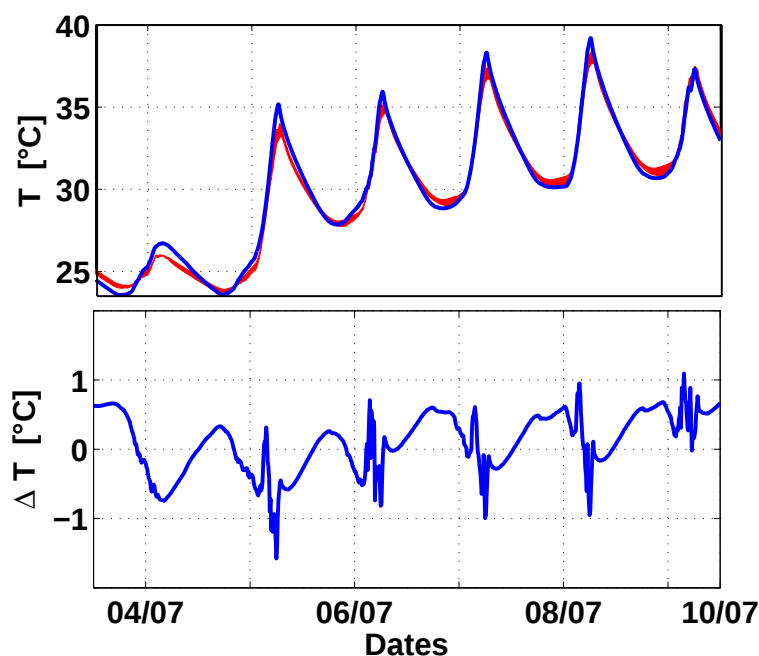


FIGURE III.55 – Comparaisons entre modèle et mesures en été (du 03 au 10 Juillet 2013)

	Sondes	Bas	Milieu	Haut
08 au 16 Mai 2013	RMSE [°C]	0,555	0,495	0,472
03 au 10 Juillet 2013	RMSE [°C]	0,612	0,531	0,516

TABLE III.15 – RMSE entre les températures d’air mesurées par les différentes sondes placées sur le mât.

puissance qu’elles dégagent, estimée à 15 W, a été rajoutée comme charge interne constante au bilan de flux sur le nœud d’air. Cette disposition a permis de mieux recaler notre modèle. Aussi, la masse de l’ensemble de l’appareillage, des instruments de mesure ainsi que du mât de mesure a été évaluée et prise en compte dans le calcul dans la température du nœud d’air en ajoutant leur capacité thermique massique équivalente à celle de l’air.

4.3 Validation avec une consigne en température imposée

Le dispositif expérimental de la cellule de BESTLab a été reconduit jusqu’en hiver afin d’étudier la précision de notre modèle tridimensionnel d’enveloppe de bâtiment dans le cas où la cellule est chauffée et suit une température de consigne fixée. Dans cette optique, le modèle tridimensionnel de bâtiment a été couplé avec un chauffage régulé présenté dans cette section. La validation du modèle complet a alors été réalisée directement par confrontation de résultats de simulation avec des mesures obtenues du 09 au 16 décembre 2013 dans la cellule BESTLab chauffée. Dans le cadre de cette expérience, la consigne en température d’air intérieur est fixée à 20 °C. Un ventilateur a été installé afin de garantir l’homogénéité des températures d’air

dans la pièce. Notons que la chaleur qu'il dégage, de l'ordre de 6 W, sera à considérer comme charge interne supplémentaire dans notre modèle.

4.3.1 Régulateur PID - Théorie et implémentation

En général, les systèmes de chauffage ne fonctionnent pas en tout ou rien mais sont couplés à des thermostats électroniques afin d'assurer une température de consigne tout en atténuant les variations trop intenses de température et en limitant la puissance consommée. Une régulation bien maîtrisée permet alors d'optimiser la consommation énergétique des systèmes chauffants tout en garantissant un bon niveau de confort aux occupants. [Hazyuk et al. \(2012\)](#) ont démontré l'importance d'un régulateur dans un dispositif de chauffage de bâtiment. Ils ont en effet montré que sans régulation, en injectant exactement les puissances nécessaires pour atteindre une consigne, celles-ci sont trop élevées pour des petits pas de temps de simulation alors que la consigne n'est pas forcément respectée, en particulier lorsque les apports solaires sont importants. Ils ont d'ailleurs développé un modèle prédictif de contrôle³ ([Richalet et al., 1978](#) ; [Clarke et al., 1987](#)) afin d'anticiper les gains solaires pour évaluer les besoins de chauffage. Leur modèle semble bien anticiper l'impact des charges sur la température d'air calculée et réguler le chauffage pour atteindre précisément la consigne.

Le principe de base d'un régulateur consiste à prélever la température ambiante de la pièce, la comparer avec la température de consigne afin d'ajuster, en réaction, la puissance du chauffage adéquate. Il existe de nombreux systèmes de régulation pour le chauffage, allant des plus communs, le PI (Proportionnel Intégral) et le PID (Proportionnel Intégral Dérivé) aux plus complexes impliquant par exemple des règles de logique floue ([Raffenel, 2008](#) ; [Richieri, 2008](#)).

Le système de chauffage de la cellule BESTLab est un radiateur avec régulation électronique PID. Ce type de régulateur se décompose en trois fonctions ([Mudry, 2002](#)) :

- Il calcule une valeur de commande $u(t)$ en fonction de l'écart entre un signal de sortie mesuré $y(t)$ et la consigne $w(t)$.
- Il élimine l'erreur statique qui désigne l'erreur résiduelle lorsque le système est en régime stationnaire, grâce à son terme intégrateur.
- Il anticipe les dépassements et variations du signal de sortie grâce à la dérivée.

Un PID classique relie directement le signal de commande $u(t)$ à l'écart $\varepsilon(t) = y(t) - w(t)$ entre la sortie et consigne selon la relation temporelle :

$$u(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t \varepsilon(t).dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right) \quad (\text{III.28})$$

K_p , K_i et K_d représentant respectivement les coefficients de proportionnel, d'intégrale et de dérivée du système. Dans le domaine de Laplace, la fonction de transfert G_{pid} d'un tel régulateur, dont le schéma fonc-

3. MPC : model predictive control

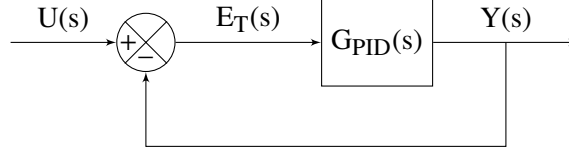


FIGURE III.56 – Schéma bloc d'un système régulé simple

tionnel est montré dans la figure III.56, est :

$$G_{pid}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sK_d \right) \quad (\text{III.29})$$

Dans le cas de notre couplage, le modèle du PID a été complètement intégré au modèle de bâtiment. L'équation temporelle III.28 a donc été résolue dans le même temps que les équations de la chaleur II.1 régissant les températures des parois et le bilan enthalpique II.32 permettant le calcul de la température d'air dans la cellule. Ainsi, le calcul de la commande en termes de puissance $P_w(t)$ [W], gouvernée par la différence $\varepsilon_T(t) = T - T_{\text{consig}}$ entre température de la pièce T et la température de consigne T_{consig} , passe par l'intégration par l'ODE23t de sa dérivée.

$$\frac{dP_w(t)}{dt} = K_p \left(\frac{\varepsilon_T(t)}{dt} + \frac{1}{K_i} \varepsilon_T(t) + K_d \frac{d^2 \varepsilon_T(t)}{dt^2} \right) \quad (\text{III.30})$$

Numériquement, nous calculons alors dans l'ODE23t de Matlab :

$$\frac{P_w^n - P_w^{n-1}}{\Delta t} = K_p \left(\frac{\varepsilon_T^n - \varepsilon_T^{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{K_i} \varepsilon_T^n + K_d \frac{\varepsilon_T^n - 2\varepsilon_T^{n-1} + \varepsilon_T^{n-2}}{\Delta t^2} \right) \quad (\text{III.31})$$

Les exposants n , $n-1$ et $n-2$ représentant numériquement les instants t , $t-dt_{-1}$ et $t-dt_{-1}-dt_{-2}$, dt_{-1} et dt_{-2} désignant les pas de temps d'intégration aux instants précédents. L'implémentation de cette équation nécessite donc la mémorisation des événements aux deux pas de temps précédents. Cette nécessité a été satisfaite en modifiant le programme de l'ODE de Matlab. Notons par ailleurs que l'intégration étant à pas de temps variables, $dt_{-1} \neq dt_{-2}$, ce qui a pour incidence de devoir considérer $\Delta t^2 = dt_{-1} \times dt_{-2}$ ou $\Delta t^2 = (dt_{-1} + dt_{-2})^2$.

La valeur $P_w(t)$ obtenue par intégration est alors injectée dans le bilan enthalpique donné par l'équation II.32, intégrée dans le terme CI_s qui désigne les charges internes sensibles.

4.3.2 Paramétrage du PID de BESTLab

Les paramètres Proportionnel, Intégral et Dérivée d'un régulateur PID peuvent être réglés facilement par l'occupant ou l'installateur. Par contre, l'ajustement de ces trois paramètres du PID est une tâche extrêmement sensible sachant que cette calibration a un impact sur le dépassement de la consigne et au final sur la consommation du système et le confort de l'occupant (Wemhoff, 2012). Il existe diverses méthodes de calibration dont la méthode de Ziegler-Nichols qui semble la plus commune. Elle est basée sur l'étude du graphique

de la réponse indicielle du système (Fig. III.57).

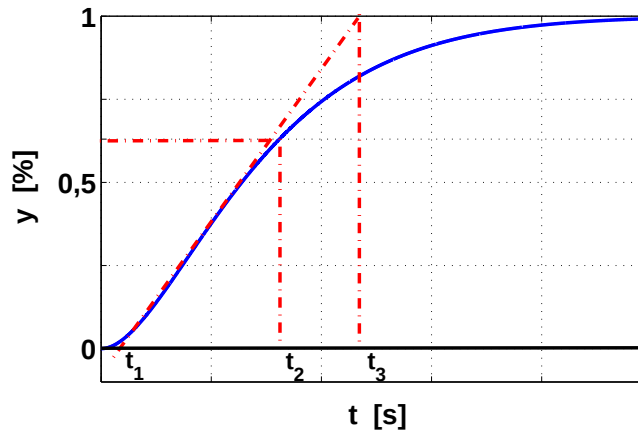


FIGURE III.57 – Réponse indicielle d'un régulateur PID et définition des temps t_1 , t_2 et t_3

On y met en évidence les instants t_1 directement lié au retard apparent L :

$$L = t_1 \quad (\text{III.32})$$

t_2 qui est liée à la constante de temps τ_t par la relation :

$$\tau_t = t_2 - t_1 \quad (\text{III.33})$$

et t_3 qui permet de calculer la pente de la tangente au point d'inflexion p :

$$p = \frac{y_\infty}{t_3 - t_1} = \frac{a}{L} \quad (\text{III.34})$$

On définit par ailleurs le gain statique K_0 par le rapport entre la valeur asymptotique en sortie y_∞ et la valeur E de l'indice injecté en entrée :

$$K_0 = \frac{y(\infty)}{E} \quad (\text{III.35})$$

La méthode de Ziegler-Nichols relie alors ces constantes aux paramètres du PID :

$$\begin{cases} K_p = 1,2/p.L.K_0 = 0,9/a.K_0 \\ K_i = 2.L \\ K_d = 0,5.L \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Notons que généralement, les gains K_p calculés selon la méthode de Ziegler-Nichols sont trop élevés et peuvent conduire à des dépassements supérieurs à 20 %. Il ne faut donc pas hésiter à réduire K_p voir le diviser par 2 pour obtenir un régulateur bien paramétré.

Dans notre cas, un test a été mené *in situ* en conditions réelle dans la cellule BESTlab. Une puissance équivalent à 20 % de la puissance de la batterie (200 W) a été injectée en continue pendant 24 h, permettant d’obtenir la réponse indicielle attendue jusqu’à la stationnarité (Fig. III.58).

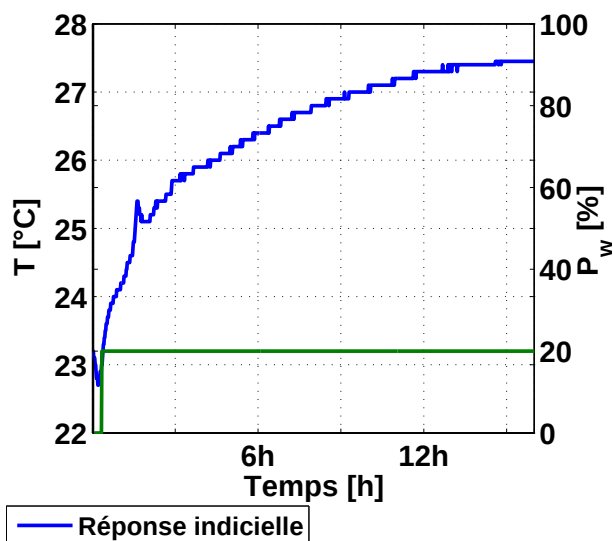


FIGURE III.58 – Réponse indicielle de la cellule BESTlab à un échelon de 20 % de puissance de la batterie

A partir de cette courbe et de la méthode de Ziegler-Nichols, les paramètres ont été déterminés (Tab. III.16). Ces coefficients ont été implémentées dans le régulateur du système de chauffage de la cellule BEST-Lab mais aussi utilisés dans le modèle.

K_p [$^{\circ}\text{W}/^{\circ}\text{C}$]	K_i [s]	K_d [$\text{s}/^{\circ}\text{C}$]
25	240	60

TABLE III.16 – Valeurs des paramètres du régulateur PID implémentés dans le modèle et le régulateur du système de chauffage de BESTLab

4.3.3 Résultats de la validation

Les mesures de température réalisées par la métrologie de BESTLab sont complétées par des relevés de puissance obtenus sur un compteur Hager EC 010 - EC 011 dont chaque impulsion enregistrée correspond à une consommation de 1 Wh.

Finalement, les confrontations mesures/simulations concerneront

- les températures au niveau des sondes en surface des parois ;
- la température d’air intérieur ;
- les puissances de chauffage.

Sur nos premières simulations, considérant les infiltrations nulles, nous pouvons tout d’abord constater qu’à l’instar des mesures, la consigne est respectée à 0,1 $^{\circ}\text{C}$ près, excepté pendant les après-midis de presque

toutes les journées, moments auxquelles elle est dépassée de 0,5 à 0,7 °C (Fig. III.59). Ces instants correspondent aux passages de la tache solaire dans la cellule : le rayonnement incident chauffe alors la pièce au-delà de la température de consigne. D’ailleurs, à ces instants, la puissance de chauffage diminue jusqu’à devenir nulle (Fig. III.60).

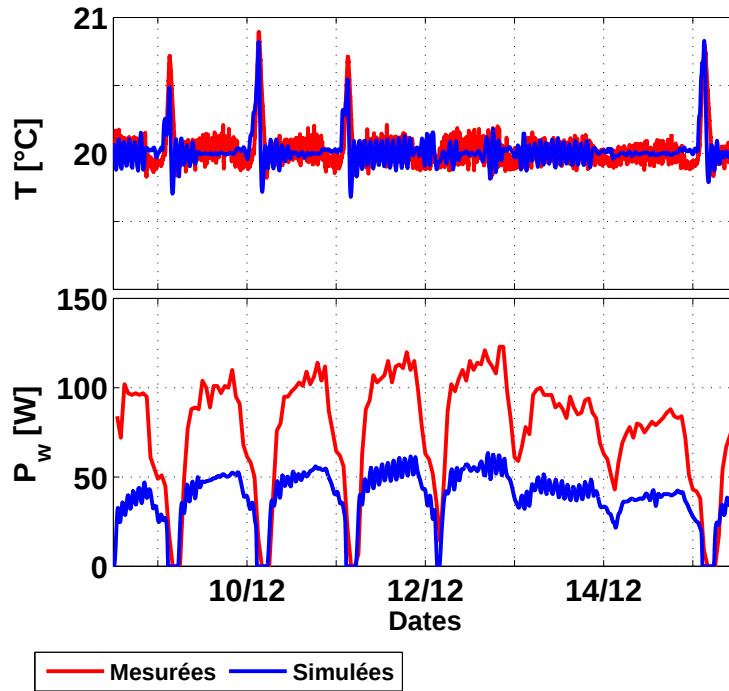


FIGURE III.59 – Températures d’air et puissances mesurées et simulées en conditions contrôlées du 09 au 15 décembre 2013, avec un débit d’infiltration nul

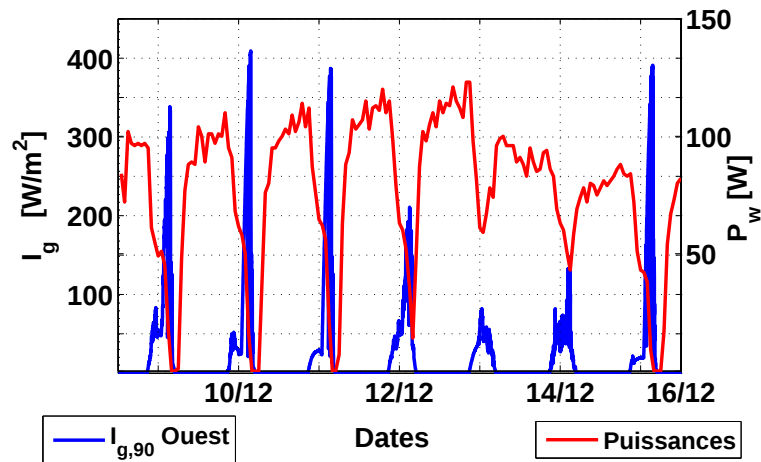


FIGURE III.60 – Corrélation entre le rayonnement solaire incident sur la paroi Ouest et la puissance de chauffage consommée

Le modèle semble donc en bon accord avec les mesures en ce qui concerne les températures d’air intérieur. Nous pouvons cependant noter que les oscillations autour de la température de consigne semblent généralement moins importantes pour notre modèle qu’en réalité : le régulateur PID semble donc « mieux

réagir » aux sollicitations et changements de conditions ambiantes que celui de la cellule BESTLab (Fig. III.59).

En ce qui concerne les puissances de chauffage, nous pouvons constater que celles injectées sur le nœud d'air lors de nos simulations restent bien en-deçà des puissances relevées par le compteur (Fig. III.59).

En évolution libre, en mi-saison et en été, les infiltrations d'air extérieur semblent avoir peu d'incidence sur les résultats, tant l'étanchéité de la cellule est importante d'un côté, et les températures d'air extérieur et intérieur suivent les mêmes tendances et restent relativement proches d'un autre côté : le flux convectif lié à un débit d'air extérieur entrant dans la cellule demeure faible. En hiver, ces infiltrations ont plus d'incidence, la température à l'intérieur de la pièce étant imposée par une consigne : si le débit d'air extérieur reste petit, les différences entre températures ambiantes extérieures et intérieures peuvent être importantes, dépassant parfois 20 °C (Fig. III.61). Le flux lié aux infiltrations est alors d'autant plus important et non négligeable.

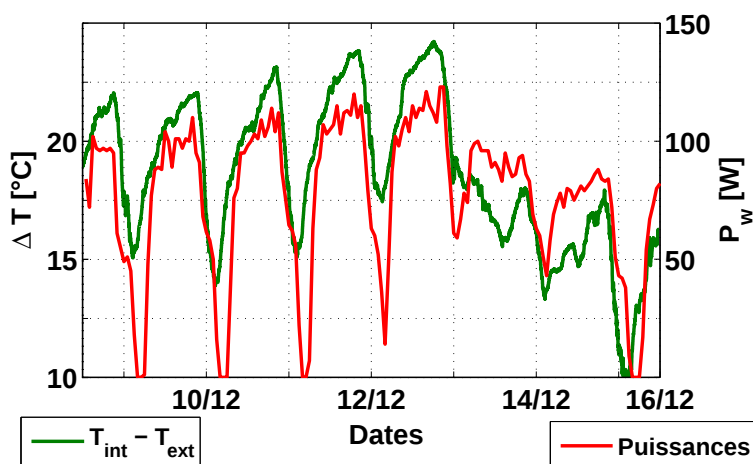


FIGURE III.61 – Corrélation entre différence de température d'air intérieur et extérieur et la puissance de chauffage consommée

Nous constatons d'ailleurs une corrélation entre l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur et la puissance de chauffage (Fig. III.61) : les courbes de différences de températures et de puissances de chauffage suivent les mêmes tendances, les instants pendant lesquels les puissances de chauffage sont le plus élevées correspondent en effet aux moments où les différences de température sont les plus importantes, et le chauffage est minimum lorsque les écarts de température sont plus petits.

Sur cette semaine de mesures, nous observons qu'avec un débit volumique d'air de 7,2 m³/h, déterminé en section 2.1, les puissances de chauffage simulées sont proches des puissances relevées (Fig. III.62). Nous obtenons un biais de 5 W et une erreur quadratique (RMSE), non compensée, de 15,9 W entre la mesure de la puissance de chauffage et le modèle, représentant une erreur relative de 20 % pour une puissance moyenne d'environ 100 W. Notons que la plupart du temps, les puissances sont calculées avec un écart de l'ordre de 5 W avec la mesure, mais l'erreur moyenne est accrue par des erreurs marginales importantes. Les températures d'air, quant-à elles, ont toujours les mêmes tendances : elles oscillent autour de 20 °C tout au long de la

journée, sauf en après-midi, où, régies par l'intensité de la tache solaire, elle dépasse la température de consigne de 0,5 °C environ.

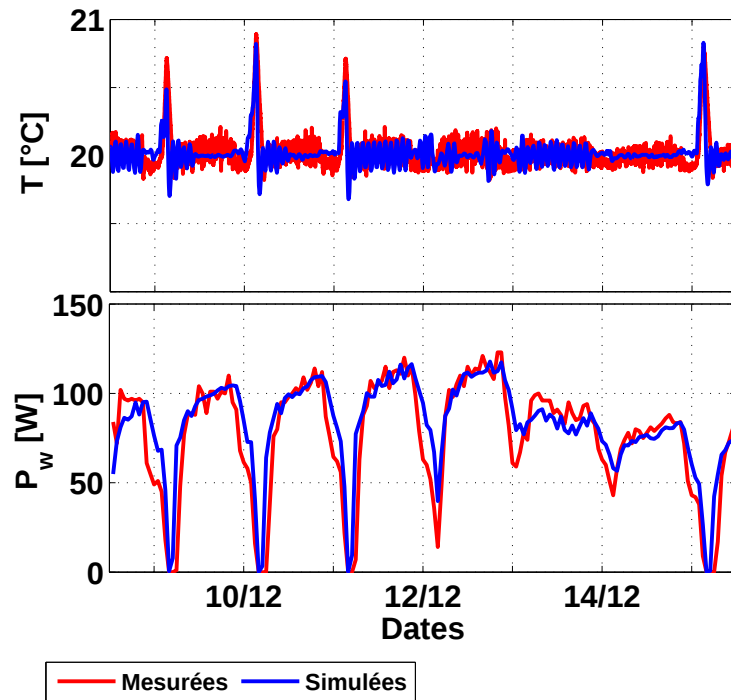


FIGURE III.62 – Températures d'air et puissances mesurées simulées en conditions contrôlées du 09 au 15 décembre 2013

Enfin, au niveau des sondes 2 et 9 ici (Fig. III.63), nous pouvons constater tout d'abord que les températures mesurées comme simulées sont la plupart du temps légèrement inférieures à 20 °C. On peut aussi repérer, chaque jour, les moments pendant lesquels le passage de la tache solaire réchauffe globalement la pièce : les températures, aux instants coïncidants, atteignent 20,2 °C pour la sonde 9, et dépasse 20,6 °C au niveau de la sonde 2, sans qu'aucune des deux sondes ne soit frappée directement par le rayonnement direct.

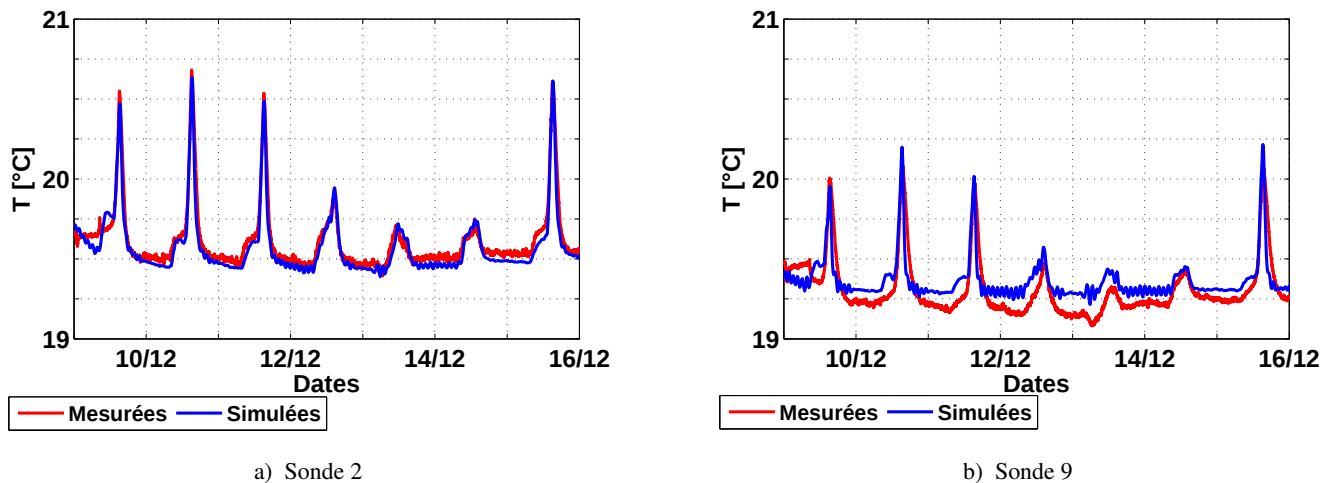


FIGURE III.63 – Températures mesurées par les sondes 2 et 9 et simulées au niveau des mailles correspondantes en hiver (du 09 au 16 Décembre 2013)

Nous constatons finalement que les températures simulées au niveau de la sonde 2 ont tendance à être sous-estimées de moins de 0,1 °C et au contraire surestimées d'environ 0,1 °C au niveau de la sonde 9. D'ailleurs, les erreurs quadratiques moyennes de nos simulations ne sont que 0,06 °C pour la sonde 2 contre 0,11 °C pour la sonde 9 (Tab. III.17).

	N° Sondes Paroi TS	1 Ouest Non	2 Est Non	3 Est Non	4 Sud Non	5 Sud Non	6 Nord Non	7 Nord Oui	8 Sol Non	9 Sol Non	10 Plafond Non
1 min	RMSE [°C]	0,31	0,06	0,12	0,13	0,13	0,30	0,26	-	0,11	0,97

TABLE III.17 – RMSE entre les températures mesurées par sondes placées en surfaces des différentes parois et les calculs des mailles correspondantes en hiver

Concernant les erreurs observées au niveau des autres sondes, celles-ci demeurent modérées, entre 0,1 °C et 0,3 °C, sauf au niveau de la sonde de plafond, où l'erreur quadratique moyenne atteint 1 °C. Cette erreur plus importante peut être attribuée aux incertitudes de calcul des flux, en particulier de la convection.

Pour conclure, nous pouvons confirmer le bon fonctionnement de notre modèle de thermique de bâtiment fin couplé à un modèle de chauffage régulé grâce à un PID. Les erreurs de ce modèle, en termes de températures d'air, demeurent de l'ordre de 0,1 °C à 0,3 °C, pour une RMSE globale de 0,12 °C, alors que la puissance de chauffage est toujours évaluée à 10 - 20 W près, pour une RMSE de 15,9 W, représentant 20 % de la puissance moyenne injectée chaque heure et un biais global de 5 W.