

Un modèle d'enveloppe de bâtiment fin a été développé et validé dans cette thèse. Ce modèle présente deux innovations notables :

- il présente l'intérêt de traiter les échanges de flux de façon tridimensionnelle, tenant compte des apports solaires de façon très précise en localisant la tache solaire.
- les équations différentielles régissant les températures d'air et de surfaces des parois de l'enveloppe sont résolues par un solveur spécifique, à pas de temps variable, parfaitement adapté pour tenir compte des fluctuations des conditions aux limites.

La validation du modèle, par confrontation des sorties du modèle à des mesures réalisées dans une cellule de BESTLab d'EDF R&D, a permis de montrer des performances intéressantes de celui-ci : le modèle permet d'obtenir les températures d'air de la cellule avec une erreur de l'ordre de 0,5 °C, comparable aux performances d'autres logiciels commerciaux, tandis que les champs de températures des surfaces des parois sont obtenues avec une précision du même ordre. La tache solaire est bien localisée et les hétérogénéités des températures des parois sont bien reproduites.

Dans cette partie, nous avons cherché à démontrer l'intérêt et les plus-values des innovations, en termes de précision de calcul d'un côté mais aussi pour des applications spécifiques d'un autre.

L'intérêt d'un échantillonnage à court pas de temps et de l'utilisation du solveur à pas de temps variable a été démontré dans un premier temps dans deux cas : lorsque la température de la cellule BESTLab est laissée en évolution libre et lorsque la cellule est chauffée. Dans les deux cas, des différences notables ont pu être constatées entre les simulations utilisant des entrées échantillonnées à différentes fréquences.

En évolution libre, les erreurs moyennes des températures d'air augmentaient très sensiblement lorsque les pas d'échantillonnage des entrées s'accroissaient :

- en mi-saison, elles passaient de 0,5 °C à 0,84 °C pour des entrées respectivement à la minute et à l'heure ;
- en été, elles passaient de 0,5 °C à 1,51 °C pour des entrées respectivement à la minute et à l'heure ;

Il a d'ailleurs été remarqué que pour les températures d'air, un échantillonnage des entrées à 10 minutes pouvaient suffire pour les retranscrire précisément.

De la même façon, les erreurs au niveau des températures de surfaces, mesurées par l'ensemble de sondes positionnées sur les parois, s'accroissaient avec le pas d'échantillonnage. Il a cependant été noté cette fois que des données à 10 minutes semblaient moins pertinentes pour suivre l'évolution de certaines températures de parois : les fluctuations de températures, liées en particulier aux variations de rayonnement solaire de la tache solaire, n'étaient pas bien reproduites.

Lorsque la pièce est chauffée pour suivre une consigne en température, grâce à un chauffage régulé, l'augmentation de l'échantillonnage a un impact non seulement sur les températures, mais aussi sur les puissances de chauffage calculées. Il a en effet été observé que les températures d'air de la cellule oscillaient avec plus d'amplitude autour de la consigne quand le pas d'échantillonnage était plus long. De la même façon, les puissances prédites oscillaient elles aussi autour de valeurs moyennes. Ainsi, au niveau du régulateur, l'allongement du pas d'échantillonnage a pour conséquence de simuler un régulateur mal réglé, loin de la réalité des mesures.

Nous avons pu ainsi observer dans ces tests que l'allongement du pas d'échantillonnage des entrées du modèle a deux conséquences sur le fonctionnement et la précision du modèle :

- les entrées, moyennées et lissées, altèrent la précision intrinsèque des simulations qui retranscrivent moins les fluctuations ;
- les entrées et les sorties, moins fluctuantes, entraînent un allongement des pas de temps d'intégration ce qui diminue les points de calculs.

L'intérêt de la modélisation tridimensionnelle et de la prise en compte de la tache solaire ont par la suite été mis en évidence en comparant les performances du modèle 3D à celles de deux modèles unidimensionnels plus classiques.

Nous pouvons retenir de cette étude que s'il s'agit de calculer la température d'air seule, les deux modèles 1D peuvent suffire, ceux-ci donnant des résultats comparables au modèle 3D. Par contre, s'il s'agit de connaître les champs de températures des surfaces des parois, pour des cartographies précises d'indices de confort par exemple, le modèle 3D est le seul adapté. D'ailleurs, une application de ce modèle pour la cartographie de la température opérative dans la pièce illustre l'intérêt du modèle 3D.

On a pu observer que le modèle 3D demeure de loin le modèle le plus précis, qu'il s'agisse d'évaluer la température d'air ou les champs de températures de paroi. Il génère ainsi une erreur moyenne de l'ordre de 0,5 °C pour les températures d'air contre des erreurs moyennes de l'ordre de 0,8 °C obtenues avec les deux modèles 1D. Au niveau des températures de surfaces, touchées ou non par la tache solaire, le modèle 3D donne des erreurs d'environ 0,6 °C pour l'ensemble des sondes étudiées quand les modèles 1D produisent des résultats moins précis, dont les erreurs restent entre 1 °C et 2 °C et dépassent régulièrement 1,5 °C.

A cette même période d'étude, les écarts résiduels entre la prédiction de température d'air du modèle 3D et $M_{1D,sol}$ peuvent dépasser 1 °C. Aussi, les résidus entre les températures de surface maximales prédites par le modèle 3D et le $M_{1D,sol}$ peuvent atteindre 22 °C pour la paroi Est, 15 °C pour la paroi sud et 5 °C pour le sol. Pour les parois ne recevant que du diffus les résidus sont de l'ordre de 1 °C.

En conditions contrôlées l'hiver, nous avons pu constater des écarts de prédiction importants entre les modèles. Si le modèle 3D permet de mieux appréhender la température d'air et les surchauffes, c'est surtout au niveau des puissances et des énergies pour le chauffage que les écarts sont notables : le modèle 3D surestime en effet les mesures de consommation de chauffage de 6,5 % quand $M_{1D,parois}$ les surestime de 11 % et $M_{1D,sol}$ de 22 %.

Enfin, l'intérêt du modèle 3D a été démontré pour trois autres cellules de dimensions identiques mais d'inerties différentes. Nos tests ont permis de montrer, lorsque ces cellules étaient orientées Ouest, des différences notables entre températures d'air prédites par le modèle 3D et par $M_{1D,sol}$, en particulier au niveau de la cellule 2, pour laquelle des écarts entre modèles atteignaient 2,5 °C. Ces différences s'expliquent par le fait que le rayonnement solaire direct était projeté sur des parois différentes d'un modèle à l'autre : le modèle 3D considère la localisation réelle de la tache solaire alors que $M_{1D,sol}$ dilue ce rayonnement sur le sol seulement. Le comportement thermique global de la cellule est alors d'autant plus différencié que les compositions et les comportements thermiques des parois considérées par l'un ou l'autre des modèles différent.

Au niveau des températures de surface, les hétérogénéités au sein d'une même paroi, non reproduites par $M_{1D,sol}$, sont très importantes quand sa couche superficielle est en bois ou en plâtre, si bien que $M_{1D,sol}$ présente des écarts pouvant atteindre 20 °C avec les sorties du modèle 3D. Par contre, des hétérogénéités moins importantes et donc des écarts moindres, ne dépassant pas 5 °C, sont observés pour la cellule 3.

Par ailleurs, l'impact de l'orientation des cellules sur les performances comparées des deux modèles a été observé. Il a ainsi été noté que les différences entre températures d'air simulées par les deux modèles sont plus petites lorsque les cellules étaient orientées Sud : elles atteignent marginalement 2 °C et restaient sinon de l'ordre de 1 °C pour la cellule 1 peu inerte, dépassaient rarement 0,5 °C au niveau de la cellule 2 et 0,1 °C pour la cellule 3. Dans ce cas précis, la tache solaire reste plus souvent localisée au sol si bien que le rayonnement solaire concerne particulièrement le sol et marginalement les parois. Les différences de composition des parois n'expliquent plus les différences entre $M_{1D,sol}$ et le modèle 3D. Les différences observées sont alors liées aux différences de distribution du rayonnement solaire d'un modèle à l'autre : ces différences engendrent des écarts importants pour une cellule dont les matériaux constituant les couches superficielles intérieures des parois et du sol chauffent plus. Alors une cellule peu inerte est plus impactée que des cellules plus inertes. Finalement, dans cette configuration, $M_{1D,sol}$ peut suffire pour le calcul de températures d'air.

Cinquième partie

CONCLUSION GÉNÉRALE

Principaux résultats

L'efficacité énergétique, en particulier dans le secteur du bâtiment, est un enjeu de premier ordre dans la lutte contre le bouleversement climatique, si bien que l'amélioration des performances énergétiques des nouvelles constructions est devenue une problématique importante. Dans ce contexte, de nouveaux concepts de bâtiments performants sont développés, favorisant l'utilisation des apports solaires d'un côté, améliorant la qualité de leur isolation d'un autre, tandis que le comportement des occupants et leur confort sont étudiés pour garantir la viabilité des solutions envisagées.

La modélisation numérique fournit des outils pour concevoir ces nouveaux bâtiments et permet d'appréhender les comportements thermiques et énergétiques de ces concepts. Cependant, la conception des Bâtiments Basse Consommation les rend très sensibles aux sollicitations internes et aux sollicitations climatiques : le moindre apport énergétique a un impact important sur sa dynamique thermique. Le besoin de précision et la complexité des couplages et interactions du bâtiment avec son environnement rendent donc indispensables des simulations dynamiques toujours plus réalistes. Cette thèse s'inscrit donc dans le contexte du développement des BBC et se focalise particulièrement sur la modélisation fine de l'impact des sollicitations sur le comportement dynamique thermique de tels bâtiments.

Les outils de thermique du bâtiment existants, souvent unidimensionnels, ne permettant pas de prendre en compte avec suffisamment de précision les apports énergétiques, un modèle a été développé dans le cadre de cette thèse. Celui-ci présente la particularité de considérer l'enveloppe d'un bâtiment en trois dimensions, calculant les échanges thermiques et les sollicitations aussi bien climatiques que du système de chauffage de façon dynamique. Le comportement thermique de l'enveloppe est alors déterminé par l'équation de la chaleur exprimée en 3D, la conduction régissant les échanges à l'intérieur même des murs tandis que les flux convectifs et radiatifs Courtes Longueurs d'Onde et Grandes Longueurs d'Onde définissent les conditions aux limites en surface des parois. Par ailleurs, un bilan sensible permet d'évaluer la température de l'unique nœud d'air considéré à l'intérieur de la pièce.

Le modèle présente la particularité de localiser la tache solaire sur la surface des parois, permettant de distribuer sur les murs le rayonnement direct pénétrant dans la pièce avec précision. Les flux CLO reçus par chaque facette du maillage sont alors déduits, considérant aussi le rayonnement diffus et les multiréflexions des faces considérées diffusantes, prises en compte via l'application de la méthode des radiosités. Enfin, un

solveur utilisant un pas de temps d'intégration adaptatif a été sélectionné pour résoudre les équations différentielles mises en jeu. Le modèle ainsi implémenté permet de décrire le comportement thermique du bâtiment de façon dynamique avec précision et tenant compte des dynamiques des sollicitations qui l'impactent.

L'application de ce modèle requiert au préalable une phase de validation qui a été réalisée en deux étapes suivant la procédure BESTEST :

- une première étape d'intercomparaison des résultats de simulations avec des sorties de logiciels existants éprouvés, permettant de confirmer la cohérence du modèle ;
- une seconde étape de la validation passe par des confrontations avec des mesures réalisées en conditions réelles.

Dans cette optique, un protocole expérimental a été mis en place dans une des cellules de BESTLab d'EDF R&D. L'enceinte utilisée de dimensions $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ est fortement isolée et s'apparente à un BBC. Elle est équipée d'une paroi amovible munie d'une unique fenêtre, orientée Ouest tandis que les autres parois la séparent du laboratoire, une garde thermique y étant assurée. La pièce a été entièrement instrumentée de manière à suivre son comportement thermique : des sondes en température dispersées sur l'ensemble des parois, en surface et en leur sein, ont été complétées par une caméra infrarouge visant tantôt le sol, tantôt la paroi Est, pour permettre de cartographier les champs de températures surfaciques avec précision. Par ailleurs, des caméras dans le visible ont été installées pour suivre la tache solaire, tandis que d'autres sondes en températures, protégées du rayonnement solaire, ont été placées au milieu de la pièce, à trois hauteurs différentes afin de mesurer la température d'air en tenant compte d'une éventuelle stratification. Enfin des globes noirs ont permis de mesurer les températures radiantes en plein centre de la pièce. A l'extérieur, les données environnementales sont fournies par la station météorologique de BESTLab suppléée par la station météorologique du site des Renardières et un pyranomètre placé verticalement sur la paroi amovible de la cellule. L'ensemble de ces données sont utilisées soit pour les comparaisons, soit pour déterminer les conditions aux limites du modèle.

Cette validation a été réalisée en évolution libre pour deux périodes d'une semaine environ, en mi-saison et en été et en ambiance contrôlée en décembre :

- Les images dans le visible ont montré la bonne localisation de la tache solaire, sur les trois périodes, malgré de légers décalages liés aux dimensions des mailles et à des incertitudes dans la géométrie du bâtiment ;
- En évolution libre, nous avons pu constater que les champs de températures de surface des parois simulés coïncident bien avec les mesures réalisées par la caméra infrarouge, les différences repérées étant de l'ordre de $0,5\text{ °C}$ à 2 °C , confirmant ainsi la bonne prise en compte des flux radiatifs CLO hors et dans la tache solaire. Cependant des erreurs plus importantes, marginales, ont pu être observées, liées aux décalages de la tache solaire préalablement observés. Le comportement temporel des températures

de surface mesurées par les sondes placées sur les parois sont bien retranscrites par le modèle. Celui-ci tend cependant à surestimer ces températures en journée, en particulier lorsqu'il y a tache solaire et à les sous-estimer la nuit, pour des erreurs moyennes, en termes de RMSE, de 1 °C. Finalement, en ce qui concerne les températures d'air, des constats similaires ont pu être faits : elles sont surestimées par le modèle la journée et sous-estimées la nuit pour une erreur moyenne de 0,5 °C ;

- Lorsque la pièce est chauffée, le modèle d'enveloppe du bâtiment couplé à un système de chauffage régulé par un PID présente des performances intéressantes : en termes de températures d'air, les erreurs 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 évaluée à quelques Watts près. Le biais global est de 5 W et l'erreur quadratique atteint 15,9 W, représentant 20 % de la puissance moyenne injectée chaque heure, celle-ci étant accrue par des erreurs marginales plus importantes.

Les erreurs observées sont attribuables à des incertitudes liées au modèle thermique lui-même : certains flux, en particulier les flux convectifs, demeurent sensibles à calculer et emprunts d'erreurs, ceux-ci découlant de corrélations empiriques obtenues dans des conditions expérimentales spécifiques. Ensuite, certains paramètres du modèle demandent des précisions accrues, qu'il s'agisse de l'orientation exacte du bâtiment, des caractéristiques optiques de chaque verre du double vitrage ou de la localisation détaillée des infiltrations d'air dans la cellule. Enfin, la taille des mailles demeure un artéfact important dans la localisation de la tache solaire et donc dans la précision spatiale des champs de températures.

Malgré ces incertitudes, notre modèle donne des résultats satisfaisants. Par la suite, la pertinence du traitement 3D et de la prise en compte de la tache solaire, ainsi que celle de l'utilisation d'un solveur à pas de temps variable sont démontrés dans une quatrième partie.

L'utilisation d'un pas d'échantillonnage a l'intérêt de permettre de retranscrire les dynamiques réelles des conditions environnementales dont certaines, telles que le rayonnement solaire, varient rapidement. Le rallongement des pas d'échantillonnage a alors une double conséquence sur la précision des calculs :

- tout d'abord, les entrées lissées, altèrent la qualité intrinsèque des simulations qui disposent de conditions aux limites moins détaillées. Les résultats reproduisent alors moins les fluctuations observées ;
- ensuite, l'utilisation d'entrées moyennées entraîne un rallongement des pas de temps d'intégration et diminue donc le nombre de points de calcul.

Conséquemment, des différences sensibles sont notables lorsqu'on utilise des données d'entrées plus ou moins échantillonnées et les erreurs s'accroissent avec l'allongement des pas d'échantillonnage. Ainsi, en mi-saison, les erreurs sur les températures d'air passent de 0,5 °C à 0,84 °C lorsque l'échantillonnage passe de 1 minute à 1h, tandis qu'elles passent de 0,5 °C à 1,51 °C l'été, dans les mêmes conditions. D'ailleurs, il a pu être remarqué que s'il s'agit de calculer les températures d'air intérieur de la cellule, les entrées à 10 minutes peuvent suffire tandis que celles-ci ne sont pas assez précises pour permettre de retranscrire correctement les

fluctuations des températures de surface des parois.

Par ailleurs, dans le cas où la pièce est chauffée, il a été observé que l'allongement du pas d'échantillonnage a des conséquences importantes sur le fonctionnement du régulateur du système de chauffage. Ainsi, plus le pas d'échantillonnage est long, plus les amplitudes d'oscillation de la température de la pièce autour de la consigne sont importantes, alors que les appels de puissance oscillaient fortement autour de valeurs moyennes, laissant penser que le régulateur est mal réglé.

Par la suite, l'intérêt de la modélisation tridimensionnelle avec prise en compte de la tache solaire a été montré en comparant les sorties du modèle 3D aux sorties de deux modèles unidimensionnels :

- un modèle 1D, noté $M_{1D,sol}$ dans lequel le rayonnement solaire direct est dilué sur le sol seul ;
- un modèle 1D, noté $M_{1D,parois}$ dans lequel le rayonnement solaire direct est dilué de façon homogène sur chaque paroi, au *pro rata* de la taille de la tache solaire censée la frapper.

Nous avons alors pu montrer que, dans le cas de BESTLab, ces deux modèles 1D présentent des résultats, en terme de température d'air, très proches et des performances légèrement moins intéressantes que celles du modèle 3D : sur la période d'étude, en Juillet, les RMSE de $M_{1D,sol}$ sont de $0,85\text{ °C}$ contre $0,77\text{ °C}$ pour $M_{1D,parois}$ et $0,50\text{ °C}$ pour le modèle 3D. Ces deux modèles présentent des résidus similaires, évoluant entre $-1,8\text{ °C}$ et $1,8\text{ °C}$ alors que les résidus du modèle 3D restent entre -1 °C et 1 °C .

D'un autre côté, ces deux modèles unidimensionnels ne sont pas adaptés pour calculer des températures de surfaces, pour lesquelles les erreurs moyennes étaient entre 1 °C et $2,2\text{ °C}$ selon les sondes considérées. D'ailleurs, concernant $M_{1D,sol}$, des résidus pouvant ponctuellement dépasser 19 °C au niveau de la paroi Est, 12 °C au niveau de la paroi Sud et 3 °C au niveau du sol ont pu être notés. Quant-à $M_{1D,parois}$, ce modèle engendre des résidus comparables au niveau du sol et toujours élevés mais moins importants au niveau de la paroi Est et Sud, atteignant respectivement $15,4\text{ °C}$ et $10,2\text{ °C}$.

Nous avons aussi constaté des écarts importants entre les sorties des 3 modèles en hiver : si le modèle 3D permet de mieux appréhender la température d'air et les surchauffes, c'est en particulier au niveau des puissances et des énergies de chauffage qu'on peut noter ses performances. Il permet en effet de légèrement surestimer les mesures d'énergie de chauffage de $6,5\%$ quand $M_{1D,parois}$ les surestime de 11% et $M_{1D,sol}$ de 22% .

Notons par ailleurs que l'intérêt d'une connaissance précise des champs de températures de surfaces a d'ailleurs été ensuite montré, au travers d'une application focalisée sur la cartographie d'un indice de confort : la température opérative.

Finalement, l'intérêt de la modélisation tridimensionnelle avec prise en compte de la tache solaire est prospecté dans le cas de trois cellules d'inerties différentes. Nous avons d'abord pu montrer que le modèle 3D avait un intérêt particulier pour une cellule de faible inertie. Ainsi :

- pour les cellules dont les parois étaient en plâtre ou en bois, les apports solaires tendaient à fortement

chauffer leurs surfaces, entraînant des différences de températures importantes en leur sein, pouvant dépasser 20 °C ;

- pour les cellules dont les parois étaient en béton, l'impact des apports solaires est moins important sur les températures des mailles touchées : les écarts de températures restaient alors de l'ordre de 5 °C.

Il a par ailleurs été démontré que les différences entre les températures d'air obtenues par le modèle 3D et $M_{1D,sol}$ évoluaient en fonction de l'inertie de la cellule et des différences de composition des parois. Lorsque les fenêtres des cellules étaient orientées Ouest, les différences les plus importantes, atteignant 2,5 °C, étaient observables au niveau de la cellule 2 dont les parois étaient en plâtre et le sol en béton. Ces écarts entre les deux modèles sont liés au fait que le modèle 3D considérait la tache solaire réelle projetée sur les parois touchées alors que $M_{1D,sol}$ diluait le rayonnement direct au sol. Les différences de comportement thermiques des parois et du sol impliquent alors d'importants écarts de restitution de l'énergie au niveau du nœud d'air.

Enfin, nous avons pu observer l'impact de l'orientation des cellules sur les différences de températures d'air calculées par $M_{1D,sol}$ et par le modèle 3D, montrant qu'elles s'atténuaient lorsque les pièces étaient orientées Sud. Dans ce cas, la tache solaire se localise le plus souvent sur le sol et seulement marginalement sur les parois. Les apports solaires globaux considérés par $M_{1D,sol}$ et le modèle tridimensionnel sont alors très proches.

Cette thèse a donc permis le développement et la validation précise d'un modèle de thermique du bâtiment fin présentant les spécificités

1. d'utiliser un pas de temps d'intégration variable et adaptatif ;
2. d'être tridimensionnel ;
3. de prendre en compte de façon détaillée la distribution des apports solaires par localisation de la tache solaire.

Ce modèle a servi de prototype pour démontrer l'intérêt de ces innovations, dont chacune s'est d'ailleurs avérée pertinente à la fois du point de vue de la précision des calculs, mais aussi pour divers applications. Ce type de modèle pourrait donc devenir un standard et être développé pour devenir à terme une brique de logiciel de simulation détaillée de thermique de bâtiment utilisée dans les cas où une description thermique tridimensionnelle à pas de temps réduit est indispensable.

Perspectives

Ce travail de thèse est focalisé sur la modélisation tridimensionnelle d'enveloppe de bâtiment avec prise en compte précise des apports énergétiques et des sollicitations climatiques. Nous pouvons maintenant envisager deux types de perspectives : les travaux à venir pourraient être dédiés à l'amélioration du modèle lui-même alors que des nouvelles applications du modèle pourraient être recherchées.

1. L'amélioration de la précision du modèle passe par l'optimisation du maillage : si la taille des mailles ont été l'objet d'une étude de sensibilité dans cette thèse, la discrétisation selon les plans des parois doit être optimisée : il s'agit de mieux localiser la tache solaire pour mieux appréhender la distribution des températures de surface, tout en limitant le temps de calcul. Cette optimisation ne peut passer par un affinement basique du maillage seul, car l'opération aurait pour conséquence d'accroître le temps de calcul de façon importante. D'ailleurs, le mailleur de HEAT 3D semble inadapté : celui-ci traitant la cellule comme un parallélépipède, les discrétisations de deux parois face à face sont les mêmes, alors qu'il semblerait intéressant d'adapter le maillage pour chaque paroi indépendamment des autres, regroupant par patching les mailles adjacentes subissant des mêmes sollicitations, constituant des macro-mailles et évitant certaines petites mailles superflues que nous avons actuellement.
2. La recherche de meilleures performances en termes de temps de calcul. Le nombre de maille pouvant être toujours important selon l'épaisseur des murs, l'optimisation du mailleur ne demeure pas la seule réponse possible pour résoudre cette problématique : des méthodes de réduction modales ou d'autres approches numériques innovantes devront être envisagées. Aussi, l'application de la parallélisation des calculs et l'utilisation de processeurs graphiques (GPU) (Obrecht, 2012) peut permettre d'accélérer les calculs.
3. Il s'agirait ensuite d'améliorer certains calculs dans le modèle. Celui des coefficients convectifs sur lesquels s'appuient les calculs d'échanges convectifs et qui sont obtenus à partir de corrélations empiriques plus ou moins pertinentes. Aussi, les corrélations d'échanges convectifs extérieurs nécessiteraient une prise en compte plus fine de l'environnement extérieur et de la géométrie du bâtiment. Notons cependant que pour des bâtiments basse consommation, fortement isolés, les échanges au niveau des surfaces extérieures des parois ont une incidence modérée sur la dynamique thermique à l'intérieur du

bâtiment. Les incertitudes inhérentes semblent donc moins importantes au niveau des parois opaques mais pourraient être non négligeables au niveau des vitrages.

4. Enfin, le modèle développé ne considère qu'un seul nœud d'air et néglige les différences de température dans le volume de la cellule ainsi que les mouvements d'air liés à la convection naturelle ou à l'effet dynamique des systèmes de chauffages et de ventilation. Les champs de température de surface des parois pouvant être très hétérogènes, les échanges de chaleur entre l'air intérieur et parois peuvent être très différents d'une maille à l'autre. Par ailleurs, si les températures d'air à proximité de parois sont directement liées aux températures de surface de celles-ci, celles du milieu de la pièce sont moins directement corrélées avec les températures des parois et donc différentes. Ainsi, en présence d'une tache solaire, les températures de surface sont plus élevées, les échanges convectifs sont accentués et un panache se crée. Les températures d'air sont localement plus élevées et globalement, elles sont très hétérogènes. Dans les perspectives de ce travail, il s'agirait donc de se rapprocher d'avantage de conditions réelles dans l'habitat en couplant le modèle d'enveloppe du bâtiment avec un modèle aérodynamique, considérant les équations de la dynamique des fluides dans un modèle zonal ou en appliquant la méthode de Lattice-Boltzmann (Obrecht, 2012).

Concernant les nouvelles applications de notre modèle, celui-ci pourrait permettre une étude approfondie des effets de ponts thermiques sur la dynamique thermique des bâtiments. Si pour les bâtiments basse consommation, un effort est fait pour éviter les ponts thermiques, pour d'autres types de constructions plus classiques, il pourrait être intéressant d'analyser de plus près leur prise en compte dans un modèle tridimensionnel.

Par ailleurs, il semble intéressant d'utiliser notre modèle d'enveloppe de bâtiment afin d'intégrer des matériaux à changement de phase dans la structure des parois des bâtiments de façon optimale. Les simulations d'intégration de ce type de matériau étaient jusqu'à maintenant basées sur des modèles unidimensionnels, sans prise en compte de tache solaire, ne permettant de localiser avec précision les endroits des parois sujettes à leur intégration. Le modèle permettrait ainsi de dimensionner et de connaître avec précision leur effet sur l'inertie thermique bâtiment d'un côté, et sur son confort thermique d'un autre.

A plus long terme, l'objectif serait de pouvoir faire des calculs représentant des bâtiments entiers, au travers d'une modélisation multizone, afin d'étudier l'impact des innovations traitées dans cette thèse sur une échelle plus réaliste. Il sera alors envisageable de réaliser une modélisation précise et complète de bâtiment, tenant compte de son comportement thermique, de son environnement climatique et son intégration urbaine, du confort et du comportement de ces occupants.

Références

- AFNOR. (1995). AFNOR. NF EN ISO 7730 : Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique.
- Alamdari, F., & Hammond, G. P. (1983). Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. *Building Services Engineering Research and Technology*, 4(3), 106–112.
- ASHRAE. (1997). ASHRAE Fundamentals Handbook, Part I : Heat Transfer, American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers.
- Aude, P., Tabary, L., & Depecker, P. (2000). Sensitivity analysis and validation of buildings' thermal models using adjoint-code method. *Energy and buildings*, 31(3), 267–283.
- Awbi, H. B., & Hatton, A. (1999). Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*, 30.
- Barnaud, G. (1987). Optimisation de l'implantation d'une double cellule expérimentale dans le site EDF des Renardières (Rapport technique). EDF R&D.
- Beausoleil-Morrison, I. (2001). An algorithm for calculating convection coefficients for internal building surfaces for the case of mixed flow in rooms. *Energy and Buildings*, 33(4), 351–361.
- Beausoleil-Morrison, I. (2002). The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces. *Building and Environment*(37), p. 791–806.
- Belleudy, C. (2014). Démarche pour l'étude de l'impact des transferts d'air liés aux défauts d'étanchéité sur le comportement de l'enveloppe des bâtiments à ossature bois. *IBPSA France - Arras, France*.
- Birdsall, B., Buhl, W. F., Ellington, K. L., Erdem, A. E., & Winkelmann, F. C. (1990). Overview of the DOE-2 building energy analysis program, version 2.1 (Rapport technique N° LBL-19735). Berkeley, CA, USA : Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Blomberg, T. (1996). Heat conduction in two and three dimensions Computer Modelling of Building Physics Applications (Thèse de doctorat). Lund University, Lund Institute of Technology Department of Building Technology, Building Physics.
- Boukhris, Y., Gharbi, L., & Ghrab-Morcos, N. (2014). Coupling the building simulation tool ZAER with a sunspot model. case study in tunis. *Energy and Buildings*, 70, 1 - 14.
- Boyer, H., Bastide, A., & Lauret, A. J. P. (2005). CODYRUN, outil de simulation et d'aide à la conception thermo-aéraulique de bâtiments. *Journée Thématique IBPSA/SFT Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment*.
- Bretagnon, P. (1982). Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. solution VSOP82. *Astronomy and Astrophysics*, 114, 278–288.
- Bretagnon, P., & Francou, G. (1988). Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions. *Astronomy and Astrophysics*, 202, 309–315.

- Brun, A., Spitz, C., Wurtz, E., & Mora, L. (2009). Behavioural comparison of some predictive tools used in a low energy building. *11th international IBPSA conference - Glasgow, Ecosse*.
- Buchlin, J. M. (2002). Convective heat transfer in a channel with perforated ribs. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 3(4), 332–340.
- CENERG-ARMINE, G. (2000). Pleiades Tutorial pour PLEIADES 2.1 et COMFIE 5.0 pour Windows 95/98/NT (Rapport technique).
- CEREN. (2013). Données statistiques du CEREN (Rapport technique). Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie (CEREN).
- Chesné, L., Duforestel, T., Roux, J. J., & Rusaouën, G. (2012). Energy saving and environmental resources potentials : Toward new methods of building design. *Building and Environment*, 58, 199–207.
- Chlela, F. (2008). Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie (Thèse de doctorat). Université de La Rochelle.
- Churchill, S. W., & Usagi, R. (1974). A standardized procedure for the production of correlations in the form of a common empirical equation. *School of Chemical Engineering, University of Pennsylvania*.
- CIBSE. (1986). CIBSE guide, chartered institute of building services engineers.
- Clarke, D. W., Mohtadi, C., & Tus, P. S. (1987). Generalized predictive control - part i. the basic algorithm. *Automatica*, 23(2).
- Crawley, D. B., Hand, J. W., & Lawrie, L. K. (1999). Improving the weather information available to simulation programs. *Proceedings of Building Simulation'99*, 2, 529–536.
- Crawley, D. B., Hand, W., Kummert, M., & Griffith, T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43, 661–673.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., ... and others (2001). ENERGYPLUS : creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331.
- CSTB. (2000). Réglementation Thermique. Paris : CSTB.
- Datcu, S., Ibos, L., Candau, Y., & Matteï, S. (2005). Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 46(6), 451–467.
- Dautin, S. (1997). Réduction de modèles thermiques de bâtiments : amélioration des techniques par modélisation des sollicitations météorologiques (Thèse de doctorat). Université de Provence.
- David, D. (2010). Etude expérimentale de la convection naturelle aux abords de parois contenant des matériaux à changement de phase (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Defraeye, T., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces : Existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 512–522.
- Delcroix, B., Kummert, M., Daoud, A., & Hiller, M. (2012). Conduction transfer functions in TrnSys multizone building model : current implementation, limitations and possible improvements. *5th National Conference of IBPSA - USA*.
- de Villiers, J. P., Leuschner, F. W., & Geldenhuys, R. (s. d.). Centi-pixel accurate real-time inverse distortion correction. *Optomechatronic Technologies*, 7266, 1-8.

- dos Santos, G. H., & Mendes, N. (2004). Analysis of numerical methods and simulation time step effects on the prediction of building thermal performance. *Applied thermal engineering*, 24(8), 1129–1142.
- Duforestel, Bouia, H., Hartmann, O., Roux, J. J., & Krauss, G. (2008). Les outils de modélisation énergétique des bâtiments très basse consommation. *IBPSA France*.
- Escudero, A. (1989). Etude du comportement thermique des batiments. Proposition d'un modele a deux dynamiques. (Thèse de doctorat). INSA de Lyon, Lyon.
- ESRU. (1997). The ESP-r System for Building Energy Simulation : User Guide Version 9.
- Evseev, E. G., & 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(3), 377–388.
- Feist, W. (2006). Passive House Measured Results.
- Flory-Celini, C. (2008). Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant (Thèse de doctorat). Université Claude Bernard Lyon.
- Fryer, J. G. (1986). Lens distortion for close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(1), 51-58.
- Gao, Y., Roux, J. J., Teodosiu, C., & Zhao, L. H. (2004). Reduced linear state model of hollow blocks walls, validation using hot box measurements. *Energy and Buildings*, 36(11), 1107 – 1115.
- Gharbi, L. (2005). Modélisation des échanges thermo-aérauliques dans les bâtiments en régime dynamique (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis.
- Giuliani, M., Avesani, S., & Oberegger, U. F. (2013). Quantitative comparison of massive walls thermal response among commercial software. *IBPSA Building Simulation - Chambéry, France*.
- Hazyuk, I., Ghiaus, C., & Penhouet, D. (2012). Optimal temperature control of intermittently heated buildings using model predictive control : Part i - building modeling. *Building and Environment*, 51, 379-387.
- Hittle, D. C. (1979). Building loads analysis and system thermodynamics (BLAST) users manual (version 2.0) (Rapport technique N^{os} E-153, vol. 1 and 2). Champaign, IL, USA : U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory (USA-CERL).
- Howell, R. (1982). A catalog of radiation configuration factors (Mc Graw-Hill éd.). New York.
- Inard, C. (1988). Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Rapport technique).
- Jayamaha, S. E. G., Wijesundera, N. E., & Chou, S. K. (1996). Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*, 31(5), 399-407.
- Jensen, S. O. (1995). Validation of building energy simulation programs : a methodology. *Energy and Buildings*, 22, 133–144.
- Judkoff, R. D. (1988). Validation of building energy analysis simulation programs at the solar energy research institute. *Energy and Buildings*, 10(3), 221–239.
- Kajiya, J. T. (1986). The rendering equation. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20, 143–150.
- Khalifa, A. J. N., & Marshall, R. H. (1990). Validation of heat transfer coefficients on interior building

surfaces using a real-sized indoor test cell. *International Journal Heat Mass Transfer*, 33(10), 2219–2236.

- Kosny, J., & Kossecka, E. (2002). Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 34(5), 445–454.
- La Gennusa, M., Nucara, A., Rizzo, G., & Scaccianoce, G. (2005). The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation : a generalised algorithm. *Building and Environment*, 40(3), 367 - 375.
- Liu, B. H. Y., & Jordan, R. C. (1961). Daily insolation on surfaces tilted towards to equator. *Trans ASHRAE*, 67, 526–541.
- Manuel d'ENERGYPLUS. (2012). ENERGYPLUS engineering reference. The reference to EnergyPlus calculations.
- Manuel Dymola. (2015). Dymola : Environment for Object-oriented Modeling of Physical Systems. Dassault Systèmes AB.
- Manuel TRNSYS. (1996). TRNSYS Mathematical Reference. Solar Energy Laboratory Madison, United States, University of Wisconsin.
- Manz, H., Loutzenhiser, P., Frank, T., Strachan, P. A., Bindi, R., & Maxwell, G. (2006). Journal of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes Experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis. *Building and Environment*, 41(12), 1784–1797.
- McAdams. (1954). Heat Transmission, McGraw-Hill Kogakusha.
- Min, T. C., Schutrum, L. F., Parmelee, G. V., & Vouris, J. D. (1956). Natural convection and radiation in a panel heated room. *ASHRAE Transactions* 62.
- Moujalled, B. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Lyon et ENTPE, Lyon.
- Mudry, F. (2002). Ajustage des paramètres d'un régulateur PID. Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud - Département d'électricité et informatique.
- Narçon, S. (2001). Caractérisation des perception thermiques en régime transitoire. Contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielle sur le confort (Thèse de doctorat). Ecole Pratique des Hautes Etudes.
- Neymark, J., Judkoff, R., Knabe, G., Le, H. T., Dürig, M., Glass, A., & Zweifel, G. (2002). Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 34(9), 917–931.
- Noel, J., Virgone, J., & Roux, J. J. (2005). Présentation et perspectives du logiciel CoDyBa.
- Obrecht, C. (2012). High performance lattice Boltzmann solvers on massively parallel architectures with applications to building aerualics (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Page, J. (2007). Simulating Occupant Presence and Behaviour in Buildings (Thèse de doctorat). Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- Peiponen, K. E., Hartikainen, T., & Hämäläinen, R. M. K. (1989). Visualization of leakage flow in buildings.

- Peuportier, B. L. P. (2001). Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the french context. *Energy and buildings*, 33(5), 443–450.
- Plessis, G., Kaemmerlen, A., & Lindsay, A. (2014). Buildsyspro : a modelica library for modelling buildings and energy systems. *10th International Modelica Conference*, 1161-1169.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394 - 398.
- Raffenel, Y. (2008). Optimisation du contrôle thermique dans une habitation multi source (Thèse de doctorat). Ecole Centrale de Lyon.
- Reda, I., & Andreas, A. (2004). Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, 76(5), 577–589.
- Reda, I., & Andreas, A. (2008). Solar position algorithm for solar radiation applications. (Technical report). Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory.
- Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L., & Papon, J. (1978). Model predictive heuristic control : Applications to industrial processes. *Automatica*, 14(5).
- Richieri, F. (2008). Développement et paramétrage de contrôleurs d'ambiance multicritères (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Rodler, A., Roux, J. J., Virgone, J., Castet, H., Le Berre, R., Baranzini, M., & Hubert, J. L. (2014a). Expérimentation in situ sur la cellule bestlab pour la validation d'un modèle prenant en compte la tache solaire. *IBPSA France - Arras, France*.
- Rodler, A., Roux, J. J., Virgone, J., Eui-Jong, K., & Hubert, J. L. (2013). Are 3D heat transfer formulations with short time step and sun patch evolution necessary for building simulation ? *IBPSA Building Simulation - Chambéry, France*.
- Rodler, A., Virgone, J., & Roux, J. J. (2014b). Sun patch impact for the evaluation of operative temperatures distributions. *Study of Civil Engineering and Architecture*, 3, 130–134.
- Rodler, A., Virgone, J., Roux, J. J., & Hubert, J. L. (2015). Development and validation of a three dimensional thermal transient numerical model with sun patch : Application to a low energy cell. *Energy and Buildings*, 87, 425–435.
- Roux, J. J. (1984). Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Seem, J. E. (1987). Modeling of heat transfers in buildings (Thèse de doctorat (Mechanical Engineering)). University of Wisconsin - Madison.
- Serres, L. (1997). Etude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique. (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- Shampine, L. F., & Reichelt, M. W. (1997). The matlab ode suite. *SIAM J. Sci. Comput.*, 18(1), 1–22.
- Shampine, L. F., Reichelt, M. W., & Kierzenka, J. A. (1999). Solving index-1 daes in matlab and simulink. *SIAM Rev.*, 41(3), 538–552.
- Spitz, C. (2012). Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments (Thèse de doctorat). Université de Grenoble.

- Strachan, P. A., Kokogiannakis, G., & Macdonald, I. A. (2008). History and development of validation with the ESP-r simulation program. *Building and Environment*, 43(4), 601–609.
- Sturrock, N. S. (1971). Localised boundary layer heat transfer from external building surfaces (Thèse de doctorat). Université de Liverpool.
- Suleiman, A. (2002). Evaluation par méthode inverse de la distribution de flux de chaleur parietaux d'une plaque plane verticale en présence d'une perturbation radiative (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- Theulier, F., Monchoux, F., Bonnis-Sassi, M., & Lartigue, B. (2008). Modeling additional solar constraints on a human being inside a room. *Solar Energy*, 82(4), 290–301.
- Tittlein, P. (2008). Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation (Thèse de doctorat). Université de Savoie, Université de Savoie.
- Trombe, A., Serres, L., & Moisson, M. (1999). Solar radiation modelling in a complex enclosure. *Solar energy*, 67(4), 297–307.
- Trombe, A., Suleiman, A., & Le Maoult, Y. (2003). Use of an inverse method to determine natural convection heat transfer coefficients in unsteady state. *Journal of Heat Transfer*, 125, 1017–1026.
- Wall, M. (1997). Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. a comparison of simulation programs. *Energy and Buildings*, 26(2), 129–135.
- Wemhoff, A. P. (2012). Calibration of HVAC equipment PID coefficients for energy conservation. *Energy and Buildings*, 45, 60-66.

Sixième partie

ANNEXES

Annexe A

Angles solaires

La position du Soleil sur la voûte céleste est déterminée par deux angles (Fig. VI.1) :

1. son élévation ou sa hauteur, $h_{\text{sun}} \in [-90; 90]$, qui est l'angle exprimé en degré, formé par la direction du Soleil et le plan horizontal au lieu d'observation. Il s'agit de l'angle complémentaire à l'angle zénithal θ_{sun} : $h_{\text{sun}} = 90 - \theta_{\text{sun}}$;
2. son azimut γ_{sun} qui est l'angle compris entre le méridien du lieu considéré et le plan vertical passant par le Soleil. γ_{sun} varie entre 0° et 360° à partir du nord dans le sens anti-trigonométrique : l'est est à 90° , le sud à 180° et l'ouest à 270° .

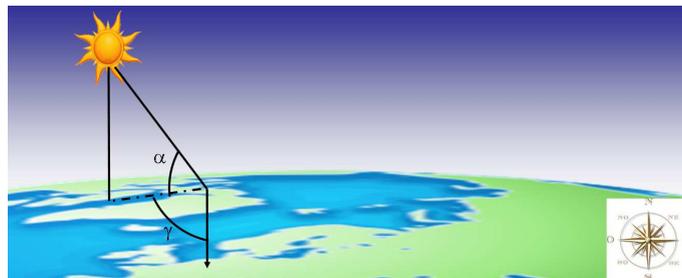


FIGURE VI.1 – Définition des angles solaires : α l'élévation du Soleil et γ son azimut.

Ces angles dépendent de la position géographique du lieu d'observation définie par sa latitude φ , sa longitude λ et le temps. Il existe des modèles de calculs de ces angles plus ou moins précis. Etant donné leur importance dans la détermination des effets de masque, nous avons opté pour la fonction `sun_position.m`¹ implémentée sous Matlab par Reda et Andreas (2004, 2008). L'algorithme, basé sur la théorie séculaire des orbites planétaires développée par Bretagnon (1982) et précisée par Bretagnon et Francou (1988), permet de calculer les angles solaires avec une incertitude de $\pm 0,0003^\circ$ sur une période s'étalant de l'année -2000 à l'année 6000. Par ailleurs cette procédure a l'intérêt de calculer les élévations et azimuts topocentriques, i.e du point de la surface de la Terre considéré, tenant compte de son altitude.

1. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4605-sunposition-m>

L'élévation topocentrique est donnée par la relation :

$$h'_{\text{sun}} = \arcsin(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta') + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta') \cdot \cos(\omega')) \quad (\text{VI.1})$$

où δ' désigne la déclinaison solaire topocentrique résultant de la déclinaison solaire géocentrique² corrigée et ω' est l'angle de l'heure locale topocentrique. Le calcul de ces angles est détaillé par Reda et Andreas (2004, 2008).

Par ailleurs, l'élévation topocentrique est corrigée tenant compte de la réfraction atmosphérique, donnant l'élévation apparente h_{sun} :

$$h_{\text{sun}} = h'_{\text{sun}} + \Delta e \quad (\text{VI.2})$$

Δe quantifiant la réfraction atmosphérique, calculée en fonction de la pression P moyenne annuelle (en millibar) et de la température moyenne annuelle T (en °C) par :

$$\Delta e = \frac{P_{\text{atm}}}{1010} \frac{283}{273 + T_{\text{atm}}} \frac{1,02}{60 \tan\left(\alpha + \frac{10,3}{\alpha + 5,11}\right)} \quad (\text{VI.3})$$

Enfin l'azimut topocentrique γ_{sun} est donné par³ :

$$\gamma_{\text{sun}} = \arctan 2\left(\frac{\sin(\omega')}{\cos(\omega') \sin(\varphi) - \tan(\delta') \cos(\varphi)}\right) \quad (\text{VI.4})$$

Les azimuts et élévations calculés pour périodes étudiées sont présentés dans la figure suivante (Fig. VI.2)

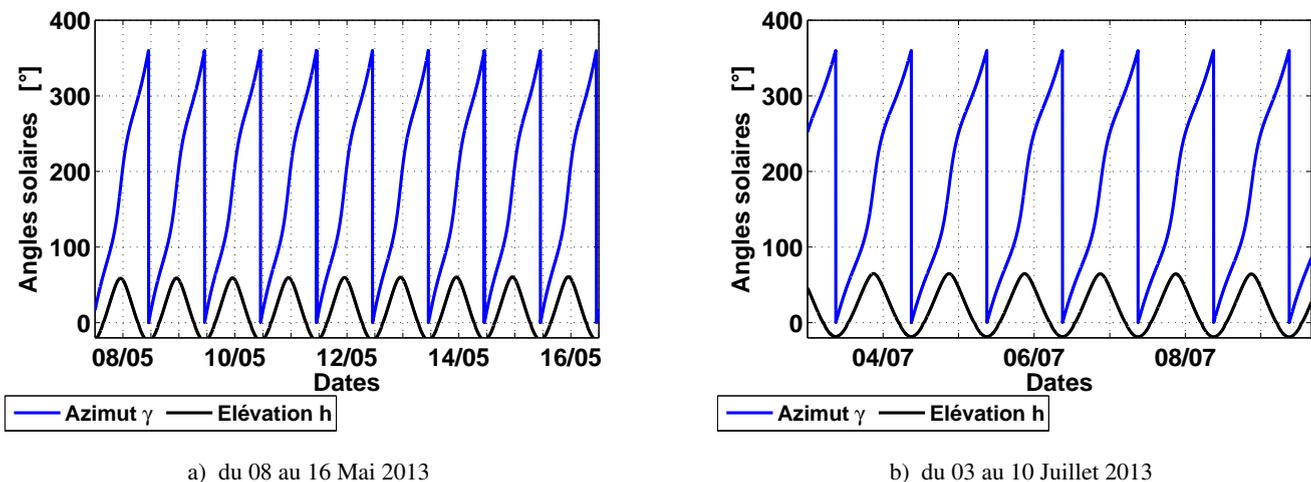


FIGURE VI.2 – Azimuts et élévations du soleil pour les deux périodes d'études (du 08 au 16 Mai 2013 et du 03 au 10 Juillet 2013)

2. **Géocentrique** : qui se rapporte à un système de référence centré au centre de la Terre.

3. Précisons que la fonction trigonométrique $\arctan 2$ donne l'angle entre la partie positive de l'axe des abscisses d'un plan, et le point considéré.

Annexe B

Méthode de détermination des propriétés optiques des matériaux

Les mesures de réflectivité de matériaux reposent sur l'utilisation d'un spectromètre muni d'une sphère intégrante constituée d'une cavité sphérique dont l'intérieur revêt une peinture fortement réfléchissante. La sphère comporte trois orifices pour le placement de l'échantillon, le passage du faisceau lumineux et le détecteur de rayonnement (Fig. VI.3).

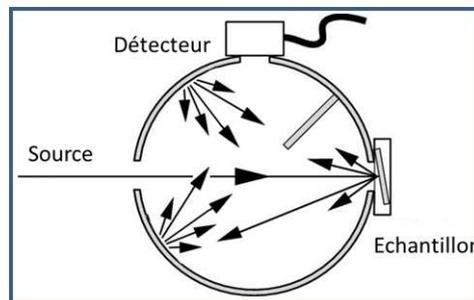


FIGURE VI.3 – Principe de la sphère intégrante (source : www.newport.com/Notes-techniques-Mesure-de-puissance-optique/)

Un faisceau lumineux incident est uniformément réfléchi et diffusé à l'intérieur de la sphère afin que la lumière collectée en sortie forme un champ radiatif diffus dont l'intensité est mesurée en fonction de la longueur d'onde λ . La mesure de référence $I_{R,\lambda}$ est obtenue par réflexion du faisceau dans la sphère intégrante. La mesure de l'échantillon résulte de la réflexion du faisceau sur la surface de l'échantillon, $I_{E,\lambda}$. La réflectivité de l'échantillon est alors donné par la relation suivante :

$$\rho_{\lambda} = \frac{I_{E,\lambda}}{I_{R,\lambda}} \quad (\text{VI.5})$$

Dans le cadre de notre étude, les réflectivités des matériaux composant l'intérieur de la cellule et de l'ARMAFLEX ont été déterminés dans le domaine des courtes longueurs d'ondes ainsi que dans l'infrarouge

proche et les grandes longueurs d'ondes.

Des mesures de réflectivité spectrale ont été effectuées par le CETHIL pour les CLO et par la société de mesure de propriétés thermiques INFLUTHERMtm, dans le cadre d'une collaboration entre le CETHIL, pour les GLO. Elles ont été réalisées sur des échantillons de placoplâtre, de contreplaqué et de bois, représentatifs des matériaux constitutifs respectivement des murs, de la porte et du sol, recouverts d'une couche de peinture gris mât. Nous avons ainsi pu constater que les courbes de réflectivités sur les longueurs d'ondes $\lambda \in [0, 220, 2, 300] \mu\text{m}$ étant identiques pour les trois échantillons, les mêmes caractéristiques de réflectivité pour les CLO sur les parois internes revêtues de peinture grise mate ont donc été appliquées.

Chaque échantillon a été positionné selon sa verticale et son horizontale afin de quantifier l'influence de l'orientation des fibres constitutives du matériau sur la mesure. Nous avons ainsi pu noter que pour chacun des échantillons, les réflectivités obtenues pour les positions horizontales et verticales restaient sensiblement les mêmes.

Les mesures de réflectivité présentées dans les figures VI.4.a et VI.4.b.

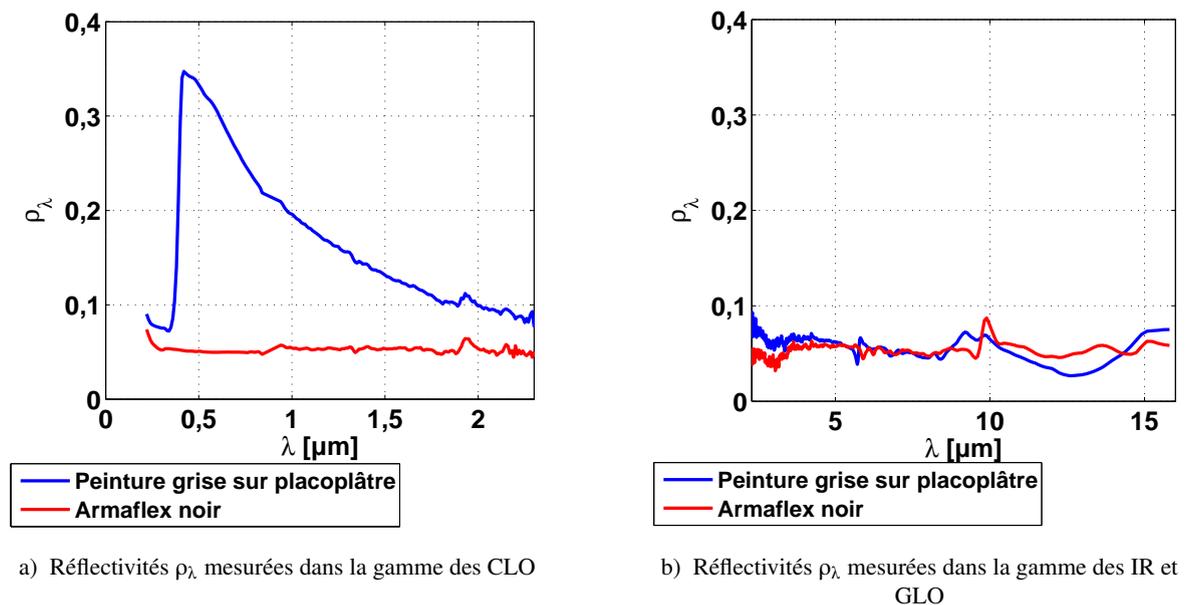


FIGURE VI.4 – Mesures spectrales des réflectivités ρ_λ

A partir de ces mesures nous pouvons déterminer l'émissivité totale directionnelle epsilon (T, \vec{u}) d'une surface à température T et dans la direction \vec{u} pour les trois domaines des longueurs d'ondes étudiés (CLO - IR et GLO). Celle-ci est calculée selon la relation :

$$\varepsilon(T, \vec{u}) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \rho_\lambda(T, \vec{u})) L_\lambda^0(T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda^0(T) d\lambda} \quad (\text{VI.6})$$

Définissant $\rho_\lambda(T, \vec{u})$ la réflectivité monochromatique totale directionnelle mesurée, λ_1 et λ_2 les longueurs

d'ondes délimitant le domaine d'intégration et $L_{\lambda}^0(T)$ la luminance spectrale donnée par :

$$L_{\lambda}^0(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1\right)} \quad (\text{VI.7})$$

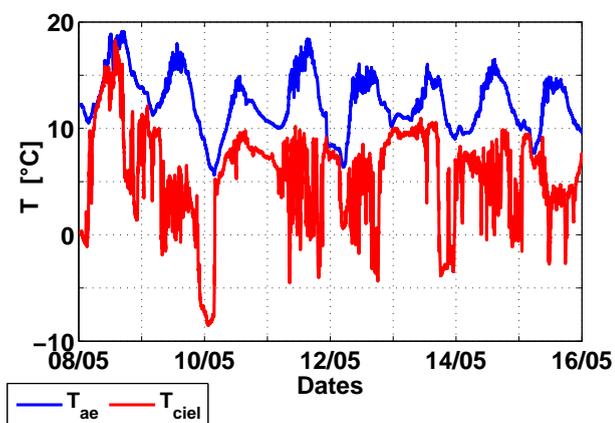
Avec $C_1 = 1,19 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ et $C_2 = 14388 \mu\text{mK}$. Il en découle les coefficients optiques résumés dans le tableau VI.1 :

	α_{clo}	ε
Peinture grise mâte	0,7732	0,9335 ($\lambda \in [(2; 16] \mu\text{m})$) 0,9486 ($\lambda \in [7, 5; 13] \mu\text{m})$)
Enduits	0,290	0,700
ARMAFLEX	0,9487	0,9502

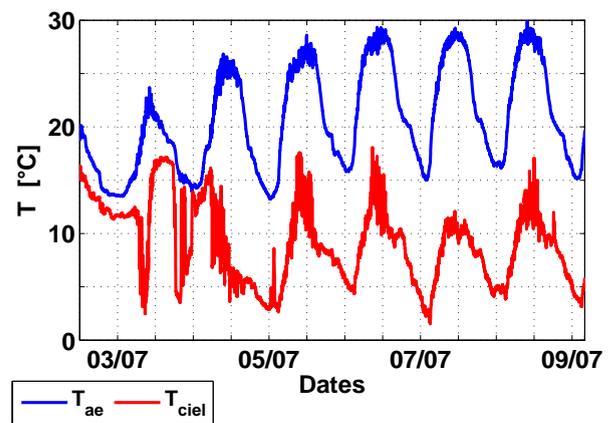
TABLE VI.1 – Coefficient d'absorption et d'émissivité de la peinture, des enduits et de l'ARMAFLEX

Annexe C

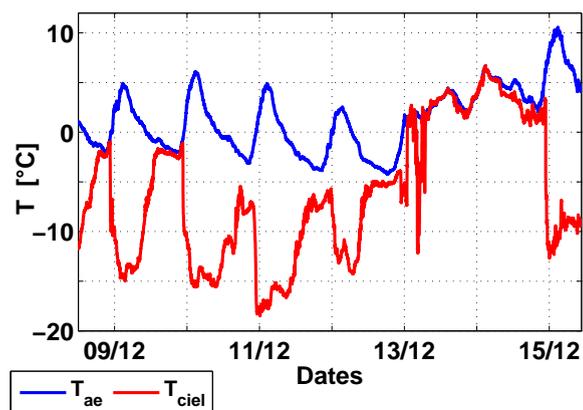
Entrées du modèle de BESTLab



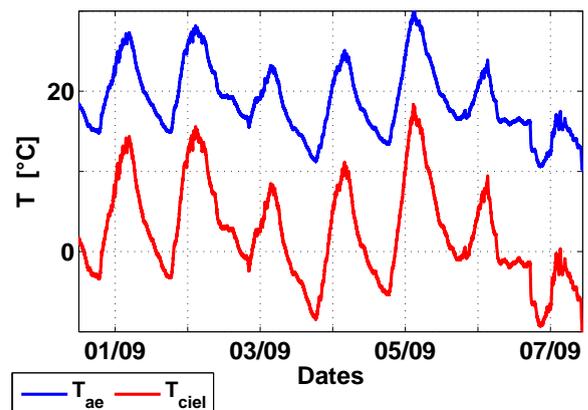
a) du 08 au 16 Mai 2013 (



b) du 03 au 10 Juillet 2013

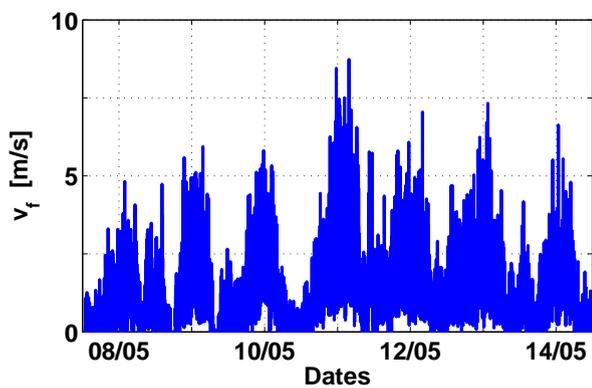


c) du 09 au 16 Décembre 2013

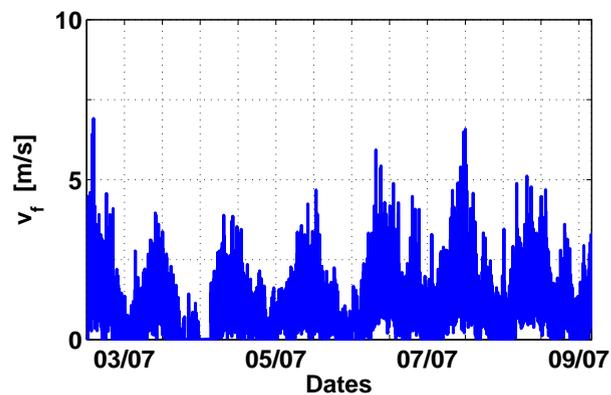


d) du 02 au 09 Septembre 2013 (Station Vaulx en Velin)

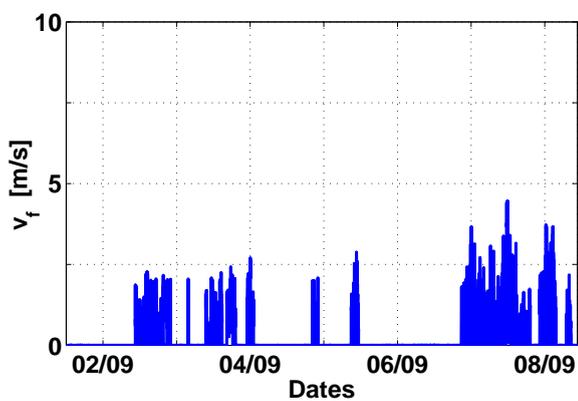
FIGURE VI.5 – Températures extérieures et températures de ciel pour les quatre périodes d'étude sur le site de BESTlab et de la station météorologique de Vaulx-En-Velin



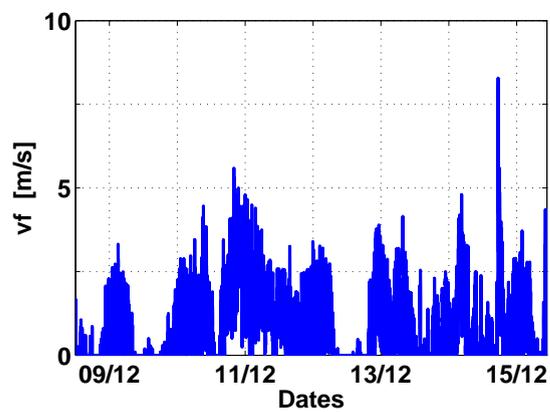
a) du 08 au 16 Mai 2013 (BESTlab)



b) du 03 au 10 Juillet 2013 (BESTlab)

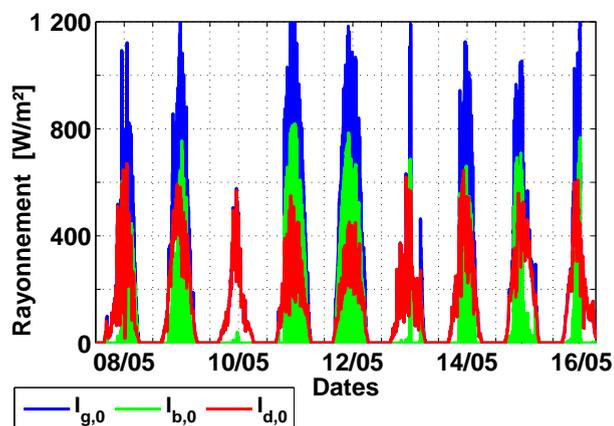


c) du 09 au 16 Décembre 2013 (BESTlab)

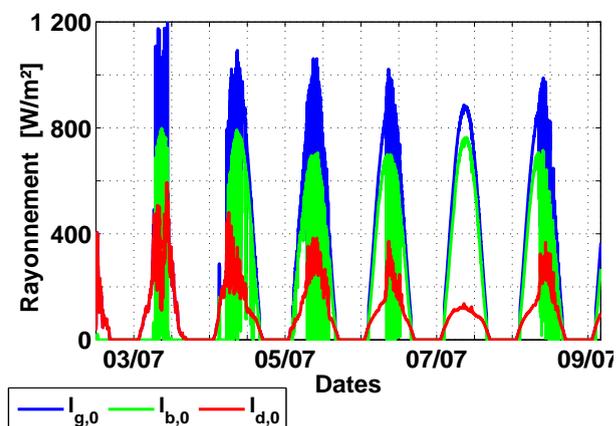


d) du 02 au 09 Septembre 2013 (Station Vaulx en Velin)

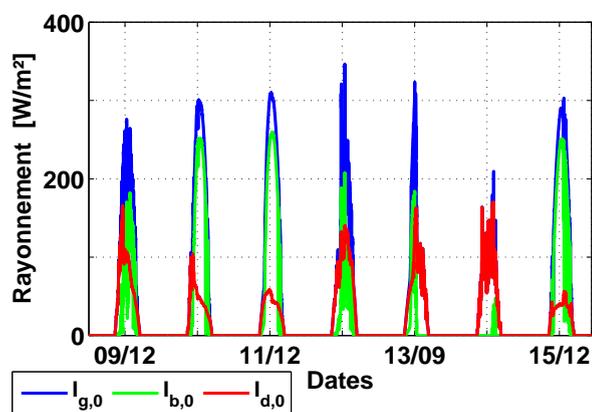
FIGURE VI.6 – Vitesses de vent mesurées pour les quatre périodes d'étude sur le site de BESTLab et de la station météorologique de Vaulx-En-Velin



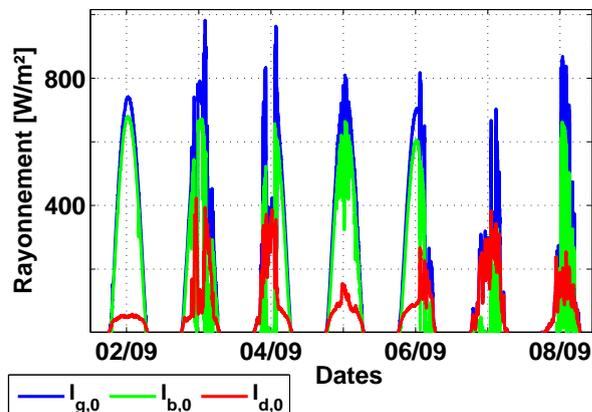
a) du 08 au 16 Mai 2013 (BESTlab)



b) du 03 au 10 Juillet 2013 (BESTlab)



c) du 09 au 16 Décembre 2013 (BESTlab)



d) du 02 au 09 Septembre 2013 (Station Vaulx en Velin)

FIGURE VI.7 – Rayonnement solaire global horizontal et ses composantes directes et diffuses pour les quatre périodes d'étude sur le site de BESTlab et de la station météorologique de Vault En Velin

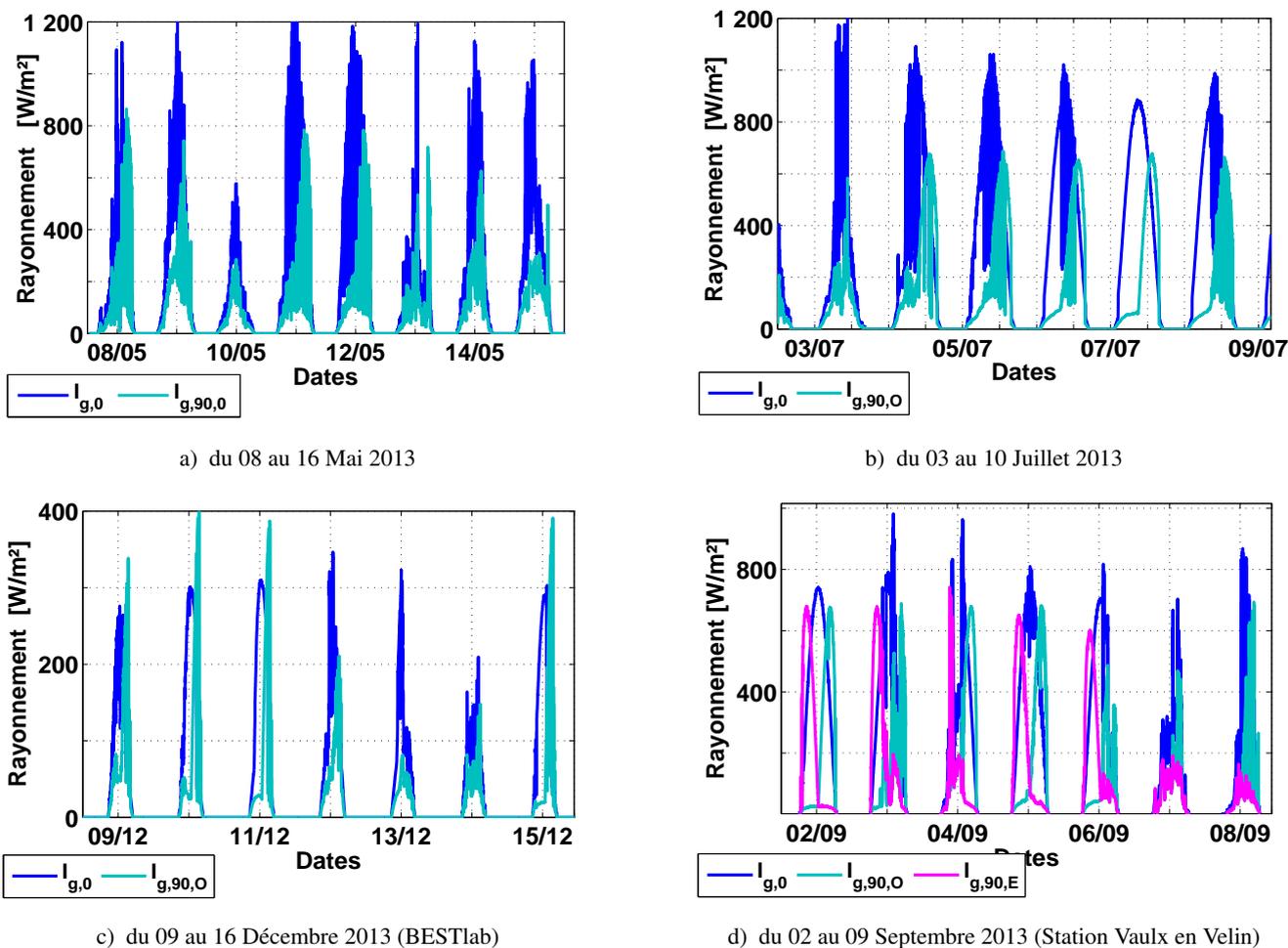


FIGURE VI.8 – Rayonnement solaire global horizontal et reçu par un plan vertical orienté Ouest pour les trois périodes étudiées sur BESTLab et à la station de Vaulx-En-Velin (rayonnement global vertical Est et Ouest)

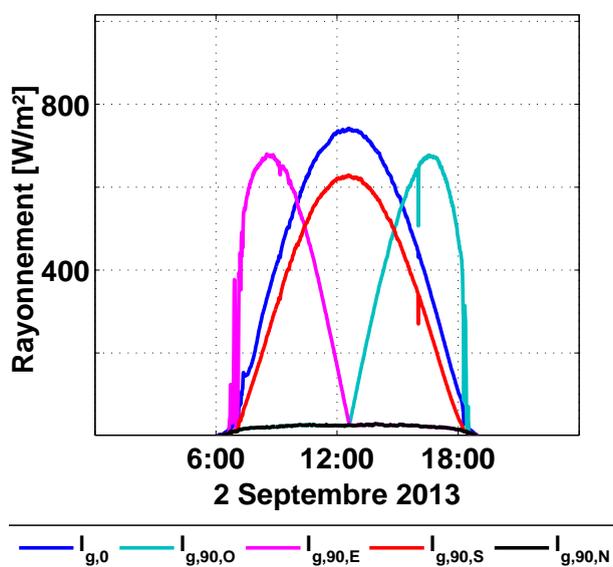


FIGURE VI.9 – Rayonnement solaire global horizontal et reçu par un plan vertical orienté Ouest et Est le 02 Septembre 2013 à la station de Vaulx-en-Velin

Annexe D

Traitement des images dans le visible

La caméra *Gopro* permettant les prises de vue dans le visible est équipée d'un objectif grand-angle afin de couvrir complètement la surface du sol. Cependant, ce type d'objectif à l'inconvénient de produire des images distordues. On observe en effet que les arêtes entre le sol et les autres parois sont courbes, ni parallèles, ni rectilignes (Fig. VI.10)

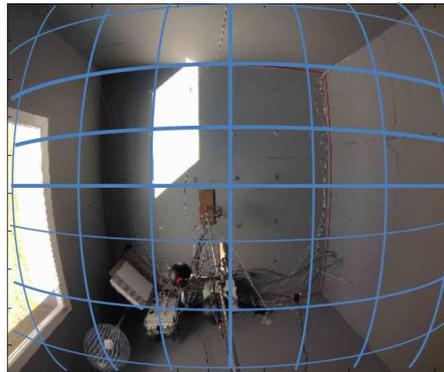


FIGURE VI.10 – Distorsion des images dans le visible de type barillet

Une procédure de correction de l'image a été mise en place sur la base d'une transformation appliquée aux coordonnées $(x_{\text{dist}}, y_{\text{dist}})$ localisant les pixels de l'image initiale. La distorsion observée étant de type barillet radiale centrée sur le centre de l'image (x_c, y_c) (Fig. VI.10), les nouvelles coordonnées $(x_{\text{cor}}, y_{\text{cor}})$ des pixels sont données par la relation (de Villiers et al., s. d.) et (Fryer, 1986) :

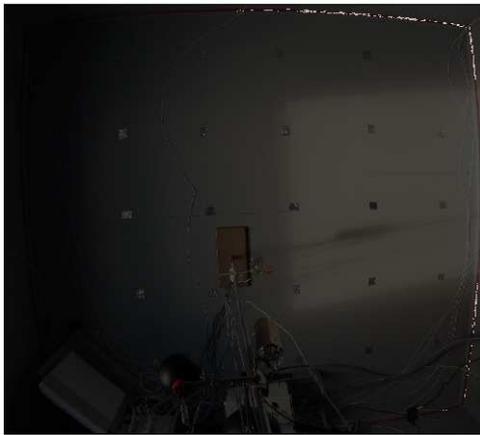
$$\begin{cases} x_{\text{cor}} = x_{\text{dist}} + (x_{\text{dist}} - x_c) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} K_i \cdot r^{2i} \\ y_{\text{cor}} = y_{\text{dist}} + (y_{\text{dist}} - y_c) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} K_i \cdot r^{2i} \end{cases} \quad (\text{VI.8})$$

Définissant K_i les coefficients de distorsion et $r = \sqrt{(x_{\text{dist}} - x_c)^2 + (y_{\text{dist}} - y_c)^2}$.

La série $\sum_{i=1}^{\infty} K_i \cdot r^{2i}$ est théoriquement infinie. Cependant, on s'est contenté dans le cadre de notre étude de ne considérer que les deux premiers termes, tronquant cette série à partir du terme $K_3 \cdot r^6$.

Les coefficients K_1 et K_2 ont alors été déterminés par tests de performances successifs dont le principe est de calculer la courbure des arêtes entre sol et autre parois. Dans cette optique, ces arêtes ont été repérées sur l'image grâce à un ruban rouge que l'on voit sur la figure VI.10. Les points dessinant ces arêtes sont alors mathématiquement reliés selon une fonction polynômiale du second degré $y = a.x^2 + b.x + c$. L'objectif de la transformation étant de limiter la courbe des arêtes, il s'agit alors de calculer K_1 et K_2 tels que $a \rightarrow 0$, de telle sorte que les arêtes dessinent une droite d'équation $y = b.x + c$.

Les résultats de cette procédure montrent que la correction est optimale pour $K_1 = 135$ et $K_2 = 0,425$. Nous obtenons alors une fonction polynômiale de second degré avec $a \approx 10^{-6}m^{-2}$ contre $a \approx 10^{-3}m^{-2}$ sans correction. La distorsion est alors quasiment corrigée : les arêtes qui apparaissent en blanc semblent redressées (Fig. VI.11.a et VI.11.b).



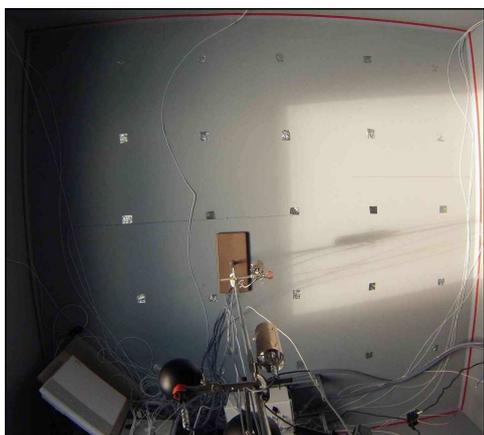
a) Courbure observée sur les images



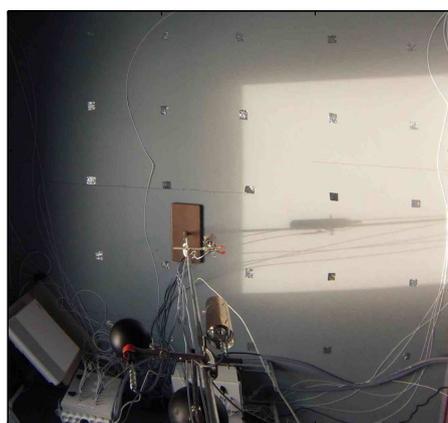
b) Correction de la courbure des images

FIGURE VI.11 – Impact du traitement de correction de la courbure des images

Nous avons cependant remarqué une autre déformation de l'image liée au niveau et l'assiette approximative de la caméra. Il apparait effectivement un effet de perspective : les arêtes des parois de côtés, censées être parallèles, semblent se rejoindre si elles sont prolongées (Fig. VI.11.b). Une correction de perspective, dont le principe est d'allonger progressivement les distances entre points de même ordonnées, a été appliquée afin de garder constante la distance entre points censés être parallèles. Il en résulte des images beaucoup moins distordues, dont les arêtes semblent bien parallèles (Fig VI.12).



a) Image initiale



b) Image finale (corrigée et centrée)

FIGURE VI.12 – Résultat final du traitement et du recadrage des images dans le visible

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : **RODLER**

DATE de SOUTENANCE : 25 Novembre 2014

Prénoms : **Auline Marie**

TITRE : **MODÉLISATION DYNAMIQUE TRIDIMENSIONNELLE AVEC TACHE SOLAIRE POUR LA SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT BASSE CONSOMMATION**

NATURE : **Doctorat**

Numéro d'ordre : 2014ISAL0106

Ecole doctorale : **Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique (MÉGA)**

Spécialité : **Génie Civil**

RESUME : Cette thèse s'inscrit dans le contexte du développement de Bâtiments Basse Consommation. La conception de telles constructions les rend sensibles aux sollicitations internes liées à l'occupation ou au chauffage, et aux sollicitations climatiques. Aussi, les outils de thermique du bâtiment existants ne sont pas adaptés pour simuler assez fidèlement ce type de bâtiments, si bien qu'un modèle tridimensionnel et dynamique a été développé ici. Celui-ci présente plusieurs particularités : il s'appuie sur une discrétisation spatiale optimisée des parois, la tache solaire y est localisée et l'intégration des dynamiques des conditions environnementales est assurée par un solveur numérique à pas de temps adaptatif et un seul nœud d'air est considéré.

La validation du modèle s'est faite par inter-comparaison avec des logiciels existants et suivant une confrontation avec des mesures en conditions réelles réalisées dans une cellule de BESTlab d'EDF R&D. Un suivi visuel de la tache solaire a permis de confirmer sa bonne localisation par notre modèle. Des mesures de température en surface complétées par des cartographies thermographiques ont été comparées aux champs de températures simulés, montrant une bonne concordance. Les comparaisons de températures d'air mesurées et simulées ont montré des résidus ne dépassant pas 1,5 °C, pour des erreurs moyennes de 0,5 °C.

La pertinence des deux principales innovations du modèle a été ensuite démontrée : l'utilisation d'entrées échantillonnées à la minute associées à un solveur à pas de temps adaptatif permet de minimiser les erreurs de simulation : en mi-saison, les résidus maximaux sont respectivement de 1 °C et 2 °C pour des entrées à la minute et à l'heure, pour des erreurs moyennes de 0,5 °C et 0,84 °C. Des erreurs plus importantes sont constatées en été, alors qu'en hiver, les températures d'air simulées tendent à plus osciller autour de la consigne quand le pas d'échantillonnage des entrées s'allonge.

Deux modèles unidimensionnels, représentatifs de modèles courants, $M_{1D,soil}$ diluant le rayonnement solaire sur le sol seul et $M_{1D,parois}$ le distribuant de façon homogène sur les parois au *pro rata* de la taille de la tache solaire censée les frapper, ne dégradent que légèrement la précision des calculs de température d'air. Cependant, ces modèles 1D ne permettent pas de calcul des champs de températures sur les parois si bien qu'ils présentent des erreurs locales dépassant 20 °C aux endroits touchés par la tache solaire. Enfin en hiver, le modèle 3D permet de prédire des consommations de chauffage surestimées de 6,5 % quand $M_{1D,parois}$ les surestime de 11 % et $M_{1D,soil}$ de 22 %. Les améliorations apportées par notre modèle ont été confirmées pour d'autres types de cellules. D'ailleurs des écarts plus importants entre $M_{1D,soil}$ et le modèle 3D ont été observés pour une cellule dont parois et sol ont des compositions très différentes, alors que l'orientation a aussi un impact.

Ce travail confirme la nécessité de représenter finement les phénomènes physiques pour des locaux basse consommation. Des améliorations sont à intégrer, comme la description de l'anisothermie de l'air intérieur.

MOTS-CLES : **modélisation, transferts de chaleurs tridimensionnels, tache solaire, validation, bâtiment basse consommation, sollicitations rapides, confort, inertie**

Laboratoire (s) de recherche : **CETHIL (CETHIL (Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon, UMR 5008)**

Directeur de thèse : **Joseph VIRGONE**

Président de jury : **Christian INARD**

Composition du jury : **Marjorie MUSY, Harry BOYER, Christian INARD, Pierre TITTELEIN, Jean-Luc HUBERT, Mathieu SCHUMANN, Joseph VIRGONE, Jean-Jacques ROUX**

MODÉLISATION DYNAMIQUE TRIDIMENSIONNELLE AVEC TACHE SOLAIRE POUR LA SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT BASSE CONSOMMATION

CETTE THÈSE s'inscrit dans le contexte du développement de Bâtiments Basse Consommation. La conception de telles constructions les rend sensibles aux sollicitations internes liées à l'occupation ou au chauffage, et aux sollicitations climatiques. Aussi, les outils de thermique du bâtiment existants ne sont pas adaptés pour simuler assez fidèlement ce type de bâtiments, si bien qu'un modèle tridimensionnel et dynamique a été développé ici. Celui-ci présente plusieurs particularités : il s'appuie sur une discrétisation spatiale optimisée des parois, la tache solaire y est localisée et l'intégration des dynamiques des conditions environnementales est assurée par un solveur numérique à pas de temps adaptatif et un seul nœud d'air est considéré.

La validation du modèle s'est faite par inter-comparaison avec des logiciels existants et suivant une confrontation avec des mesures en conditions réelles réalisées dans une cellule de BESTlab d'EDF R&D. Un suivi visuel de la tache solaire a permis de confirmer sa bonne localisation par notre modèle. Des mesures de température en surface complétées par des cartographies thermographiques ont été comparées aux champs de températures simulés, montrant une bonne concordance. Les comparaisons de températures d'air mesurées et simulées ont montré des résidus ne dépassant pas 1,5 °C, pour des erreurs moyennes de 0,5 °C.

La pertinence des deux principales innovations du modèle a été ensuite démontrée : l'utilisation d'entrées échantillonnées à la minute associées à un solveur à pas de temps adaptatif permet de minimiser les erreurs de simulation : en mi-saison, les résidus maximaux sont respectivement de 1 °C et 2 °C pour des entrées à la minute et à l'heure, pour des erreurs moyennes de 0,5 °C et 0,84 °C. Des erreurs plus importantes sont constatées en été, alors qu'en hiver, les températures d'air simulées tendent à plus osciller autour de la consigne quand le pas d'échantillonnage des entrées s'allonge.

Deux modèles unidimensionnels, représentatifs de modèles courants, $M_{1D,sol}$ diluant le rayonnement solaire sur le sol seul et $M_{1D,parois}$ le distribuant de façon homogène sur les parois au *pro rata* de la taille de la tache solaire censée les frapper, ne dégradent que légèrement la précision des calculs de température d'air. Cependant, ces modèles 1D ne permettent pas de calcul des champs de températures sur les parois si bien qu'ils présentent des erreurs locales dépassant 20 °C aux endroits touchés par la tache solaire. Enfin en hiver, le modèle 3D permet de prédire des consommations de chauffage surestimées de 6,5 % quand $M_{1D,parois}$ les surestime de 11 % et $M_{1D,sol}$ de 22 %. Les améliorations apportées par notre modèle ont été confirmées pour d'autres types de cellules. D'ailleurs des écarts plus importants entre $M_{1D,sol}$ et le modèle 3D ont été observés pour une cellule dont parois et sol ont des compositions très différentes, alors que l'orientation a aussi un impact.

Ce travail confirme la nécessité de représenter finement les phénomènes physiques pour des locaux basse consommation. Des améliorations sont à intégrer, comme la description de l'anisothermie de l'air intérieur.