

Adaptation du modèle à la cellule BESTlab

Le modèle implémenté à partir des considérations théoriques détaillées dans le chapitre 1 a dû être adapté à la configuration de la cellule BESTlab. La bonne connaissance de sa constitution a permis de synthétiser de façon précise son enveloppe dans HEAT3 (Blomberg, 1996), notamment grâce à la bibliothèque de matériaux du logiciel éventuellement complétée par nos soins.

Cependant, le modèle initial, dont les conditions limites étaient déterminées en termes de flux, a dû être adapté pour intégrer des conditions aux limites de natures différentes, tantôt des flux (rayonnements solaires incidents), tantôt des températures. D'ailleurs, certaines entrées du modèle, les apports solaires en l'occurrence, ont dû être traitées ou recalculées afin d'être correctement appliquées. Ensuite, certains paramètres optiques, dont les émissivités des peintures et des matériaux en particulier, ont été déterminés spécifiquement pour cette modélisation. Enfin, une optimisation du maillage a été réalisée, en vue de prendre en compte le plus fidèlement possible les fluctuations des conditions environnementales tout en minimisant le temps de calcul.

3.1 Températures en conditions aux limites

Les conditions aux limites définissent l'environnement dans lequel le bâtiment est modélisé. Dans le cadre de notre étude, elles sont exprimées soit en termes de températures à partir desquelles sont calculés des flux d'énergie, soit en termes de flux eux-mêmes (Fig. III.13).

Dans le cas de la modélisation de la cellule BESTlab, les températures de garde constituent les conditions aux limites extérieures des parois Est (E), Nord (N), et Sud (S). Celles-ci sont régulées et constamment gardées à 20 °C (Fig. III.14). Aucun flux solaire ne pénètre au niveau des gardes. Seuls les flux convectifs sont donc déterminés à partir des températures des mailles situées à l'extérieur des parois et des températures de garde.

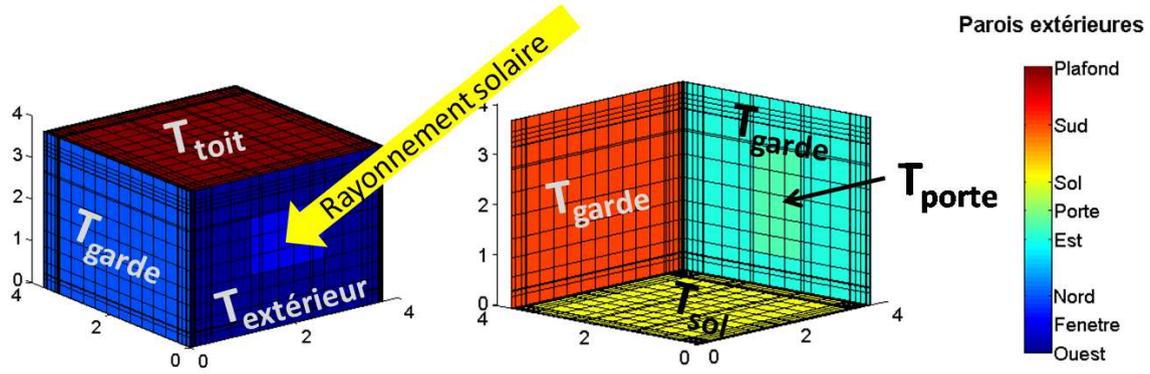


FIGURE III.13 – Schéma présentant les conditions aux limites utilisées dans le cadre de BESTlab

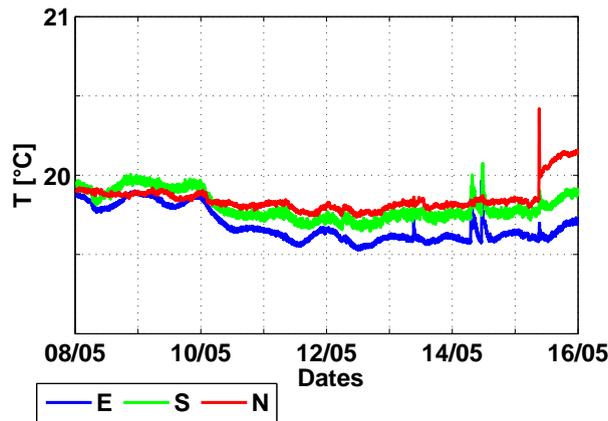


FIGURE III.14 – Températures des gardes à l'Est (E), au Nord (N) et au Sud (S)

Le sol, le plafond et la porte ont subi un traitement particulier :

- au niveau du sol, des mesures réalisées par les sondes fixées entre l'isolant et les panneaux en CTBH (Fig. III.8) sont interpolées spatialement et appliquées symétriquement pour constituer des conditions limites (Fig. III.15).

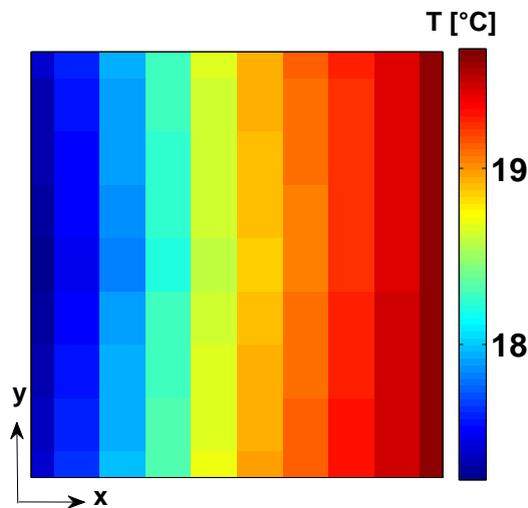
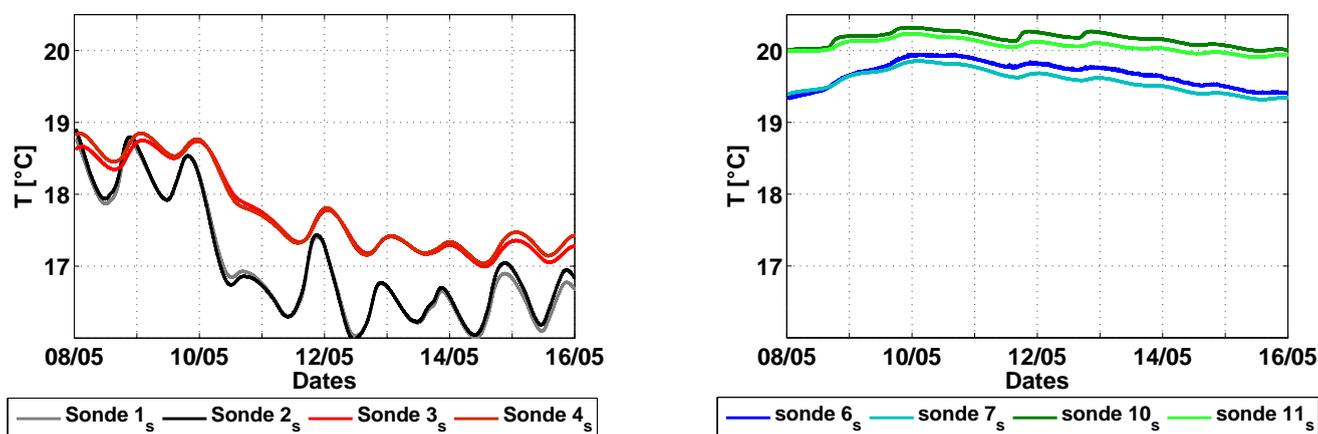


FIGURE III.15 – Températures interpolées à partir des mesures réalisées par les sondes placées entre l'isolant et un panneau CTBH

L'enveloppe synthétisée sous HEAT3 s'arrête alors au niveau de la couche d'isolant en contact avec les panneaux en CTBH. On considère alors qu'aucun flux ne vient conditionner le comportement thermique des couches du sol considérées et seule la conduction entre ces couches, initialisée par les températures de l'interface entre l'isolant et les panneaux CTBH, est considérée.

Le comportement temporel des températures mesurées par les différentes sondes diffère (Fig. III.16), montrant ainsi des hétérogénéités importantes dans le champ de températures à un instant donné au sol.



a) Températures mesurées par les sondes 1_s, 2_s et 3_s, 4_s

b) Températures mesurées par les sondes 6_s, 7_s et 10_s, 11_s

FIGURE III.16 – Températures des différentes sondes situées au sol, entre l'isolant et le panneau de CTBH

Ceci justifie la prise en compte des différentes températures pour établir un champ de températures comme conditions aux limites. Par ailleurs, nous pouvons observer que les températures mesurées par les sondes 1_s et 2_s, ainsi que par le couple de sondes 3_s et 4_s, sont presque identiques (Fig. III.16.a). Il en est de même pour les températures mesurées au niveau des couples de sondes 6_s et 7_s et enfin 10_s et 11_s qui ne diffèrent au plus que de 0,2 °C (Fig. III.16.b). Les lignes isothermes du champ de températures semblent donc suivre l'axe \vec{Oy} , justifiant notre choix selon lequel les températures mesurées par les sondes au sol seront appliquées au côté opposé de façon symétrique suivant un axe \vec{Ox} (Fig. III.15).

- Concernant le plafond, une seule sonde PT-100 mesure une température entre la dalle du plancher et la forme de pente. Elle constitue donc l'unique condition limite applicable au niveau de cette paroi III.17. Le plafond de l'enveloppe synthétisée sous HEAT3 s'arrête donc au niveau de la dalle plancher et, à l'instar de ce qui est fait pour le sol, la température mesurée par l'unique sonde est appliquée dans le calcul de la conduction.
- Comme la porte est séparée de la garde par un sas, la condition aux limites utilisée au niveau de la porte est une température mesurée à la surface extérieure de celle-ci III.17 et non la température de la garde. De la même façon que pour le sol et le plafond, cette température régira la conduction dans la porte, tandis qu'aucun autre flux ne sera considéré. Cette température surfacique résulte en effet déjà d'échanges de flux entre la surface de la porte et son environnement extérieur.

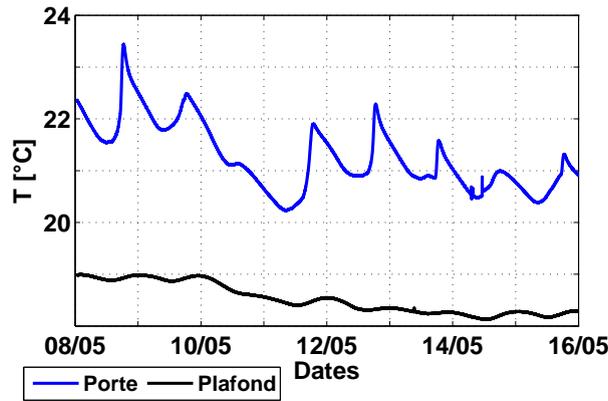


FIGURE III.17 – Températures mesurées au plafond entre la dalle et la forme de pente et température en surface extérieure de la porte

3.2 Traitement du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une des entrées météorologiques du modèle déterminant l'environnement dans lequel baigne l'enveloppe du bâtiment. Il s'agit d'une entrée de premier ordre tant elle influe sur son comportement thermique.

3.2.1 Eclairage solaire horizontal et vertical

Dans le cadre de notre modélisation de la cellule BESTlab, nous disposons d'un ensemble de mesures réalisées par des pyranomètres installés au niveau de la station météorologique du site des Renardières (Fig. III.12.a) et sur la paroi Ouest de notre cellule de tests (Fig III.12.b). Certains de ces pyranomètres, placés sur plans horizontaux ou équipés de trackers, sont équipés d'anneaux d'obstruction permettant de mesurer la composante diffuse du rayonnement seule. Le rayonnement direct horizontal $I_{b,0}$ est alors calculé à partir des éclairagements globaux horizontaux $I_{g,0}$ et diffus mesurés $I_{d,0}$:

$$I_{b,0} = I_{g,0} - I_{d,0} \quad (\text{III.2})$$

Le rayonnement solaire global transmis dans la cellule peut frapper, selon la position de la tache solaire, l'ensemble de ses parois excepté la paroi accueillant la fenêtre. Concernant le flux incident arrivant au sol (et accessoirement le plafond), les rayonnements horizontaux de la station météorologique seront directement utilisés. Pour les parois verticales intérieures, il est nécessaire de calculer les rayonnements incidents, excepté pour la paroi Est qui reçoit le rayonnement vertical Ouest mesuré par le seul pyranomètre vertical. Il s'agit donc de projeter les rayonnements direct et diffus mesurés sur les parois Nord et Sud et de les assortir d'un rayonnement diffus réfléchi par le sol.

Il existe dans la littérature de nombreux modèles de projection d'un rayonnement global horizontal sur des plans inclinés, dont certains ont été étudiés par [Evseev et Kudish \(2009\)](#). Le rayonnement global incliné

$I_{g,\beta}$ selon un angle β est alors donné par :

$$I_{g,\beta} = I_{b,\beta} + I_{d,\beta} + I_{r,\beta} \quad (\text{III.3})$$

- Le rayonnement direct incliné $I_{b,\beta}$ y est toujours calculé selon des considérations géométriques menant à la relation

$$I_{b,\beta} = R_b \cdot I_{b_0} \quad (\text{III.4})$$

Avec R_b le facteur de projection du rayonnement direct donné, en fonction de l'angle d'incidence des rayonnements du soleil θ et sa hauteur par

$$R_b = \max\left(\frac{\cos(\theta)}{\sin(h_{\text{sun}})}, 0\right) \quad (\text{III.5})$$

- le rayonnement diffus incliné $I_{d,\beta}$ a été calculé par

$$I_{d,\beta} = R_d \cdot I_{d_0} \quad (\text{III.6})$$

Le facteur de projection R_b sera déterminé selon le modèle simple de [Liu et Jordan \(1961\)](#) :

$$R_d = \cos^2(\beta/2) \quad (\text{III.7})$$

Dans notre cas, les parois étant verticales, $\beta = 90^\circ$ et alors $R_d = 0,5$. Nous considérons selon ce calcul que chaque paroi n'est exposée qu'à la moitié de la voûte céleste qui émet un rayonnement diffus isotrope, tandis qu'une surface horizontale est exposée à l'hémisphère de la voûte céleste au complet. Ainsi, logiquement dans ce cas, le rayonnement diffus reçu par une paroi verticale est la moitié du diffus reçu par une surface horizontale.

- Enfin, le rayonnement diffus réfléchi $I_{r,\beta}$ par le sol environnant la paroi est donné par la relation isotrope de [Liu et Jordan \(1961\)](#) :

$$I_{r,\beta} = I_{g,0} \cdot \text{Alb}_{\text{sol}} \cdot \sin(\beta/2) \quad (\text{III.8})$$

Le sol est dans ce modèle considéré comme un réflecteur diffus isotropique ([Evseev & Kudish, 2009](#)) d'albédo $\text{Alb}_{\text{sol}} = 0,15$

Ces modèles de projection sont assortis d'erreurs importantes pouvant atteindre 30 % du rayonnement ([Evseev & Kudish, 2009](#)). Ces erreurs sont particulièrement liées aux incertitudes de calcul du rayonnement diffus pour lequel des hypothèses simplificatrices sont posées, telles que l'isotropie du rayonnement ou l'indifférence à l'existence d'un masque lointain.

3.2.2 Distribution du rayonnement diffus dans la cellule

La distribution du rayonnement diffus dans la pièce est inhomogène : il dépend en effet de la position de la facette considérée par rapport à la fenêtre.

Si nous considérons une facette (i, j) à l'intérieur de la cellule, située sous le niveau de la fenêtre, elle n'est exposée au ciel qu'au travers de la celle-ci. Le rayonnement diffus est alors dans ce cas fonction de l'angle solide $\omega_{i,j}$ sous lequel la fenêtre est vue par maille :

$$\begin{cases} I_{d,90,i,j} = \omega_{i,j} \cdot \tau_d \cdot I_{d,90} & \text{pour une facette située sur une paroi verticale} \\ I_{d,0,i,j} = \omega_{i,j} \cdot \tau_d \cdot I_{d,0} & \text{pour une facette située sur une paroi horizontale} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Concernant une facette intérieure (i, j) située en vis-à-vis ou au-dessus de la fenêtre, celle-ci est frappée par le rayonnement réfléchi de façon diffuse par le sol en face de la fenêtre. Pour ce type de mailles particulières, le rayonnement diffus est donnée par :

$$I_{d,i,j} = \omega_{i,j} \cdot \tau_d \cdot I_r \quad (\text{III.10})$$

Avec I_r le rayonnement diffus réfléchi calculé en fonction de l'albédo du sol $\text{Alb}_{\text{sol}} = 0,15$ par la relation [III.8](#)

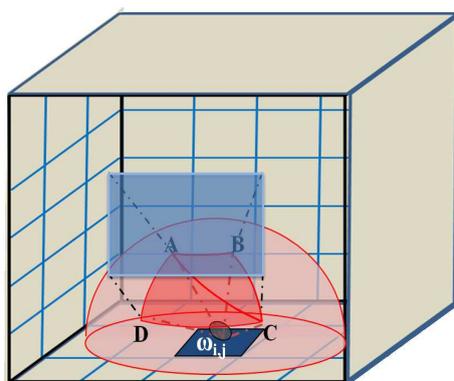
Pour chaque maille du cube, l'angle solide que représente la fenêtre du point de vue de la maille est calculé suivant 2 étapes :

1. Projection de la fenêtre sur un hémisphère unité centré sur la maille, obtenant un quadrilatère sphérique ABCD (Fig. [III.18](#)) ;
2. Calcul de l'aire de cette projection : l'aire du quadrilatère sphérique est la somme des aires des triangles sphériques ABC et CDA, respectivement notées A_{ABC} et A_{CDA} . L'aire du triangle ABC est par exemple donnée par la relation issue de la trigonométrie sphérique :

$$\tan^2\left(\frac{A_{ABC}}{4}\right) = \tan\left(\frac{s}{2}\right) \tan\left(\frac{s - \bar{AB}}{2}\right) \tan\left(\frac{s - \bar{BC}}{2}\right) \tan\left(\frac{s - \bar{CA}}{2}\right) \quad (\text{III.11})$$

posant $s = (\bar{AB} + \bar{BC} + \bar{CA})/2$ le demi-périmètre du triangle ABC

On obtient alors une distribution hétérogène du rayonnement diffus liée à la perception de la fenêtre par la maille considérée. Une maille éloignée de la fenêtre mais formant un angle important avec celle-ci recevra plus de rayonnement diffus qu'une maille plus proche dont l'angle est proche de zéro.


 FIGURE III.18 – Angle solide $\omega_{i,j}$ de la fenêtre du point de vue d'une maille (i, j)

3.3 Impact de la fenêtre

3.3.1 Encastrement de la fenêtre

La fenêtre est légèrement encastrée dans le mur de la paroi Ouest de notre cellule de test. Il est indispensable de considérer cet encastrement pour le positionnement de la tache solaire, celui-ci influençant particulièrement sa taille. Dans cette optique, la taille réelle de la fenêtre a été modulée en fonction de la profondeur d'encastrement et de la position du soleil (Fig. III.19).

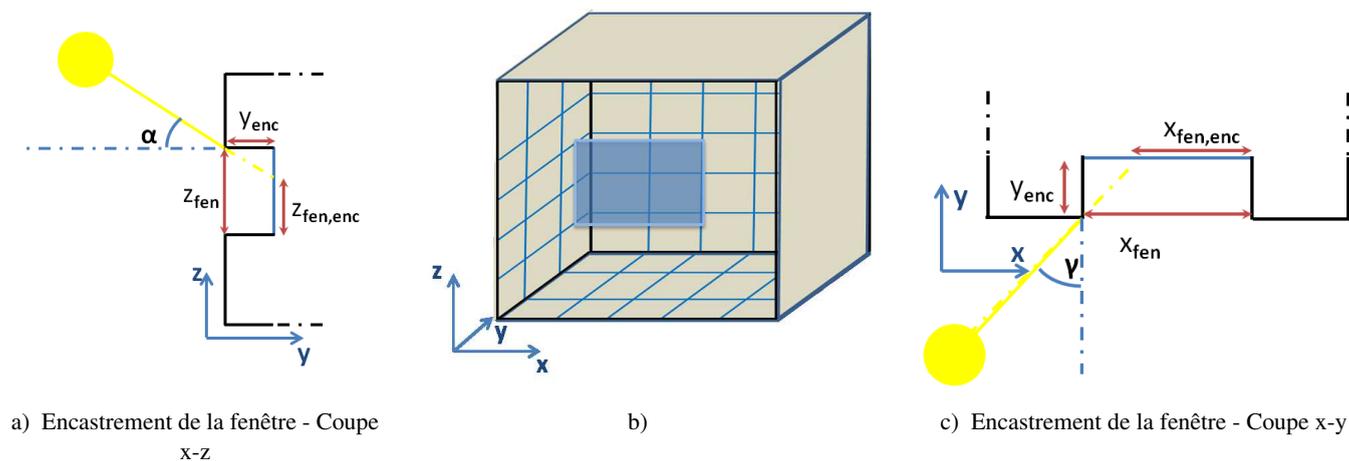


FIGURE III.19 – Prise en compte de l'encastrement pour le calcul de la tache solaire

Les coordonnées des coins de la fenêtre non obstrués par les contours de l'encastrement sont alors données par les relations :

$$\begin{cases} x_{fen,enc} = x_{fen} - y_{enc} \cdot \tan(\gamma_{sun}) \\ y_{fen,enc} = y_{fen} \\ z_{fen,enc} = z_{fen} - y_{enc} \cdot \tan(h_{sun}) \end{cases} \quad (III.12)$$

3.3.2 Transmission de l'éclairage solaire

Le flux CLO extérieur reçu par les surfaces extérieures de la cellule est déterminé directement à partir du pyranomètre vertical installé sur cette même paroi, tandis que les flux CLO reçus par les surfaces intérieures nécessitent l'ensemble des mesures de rayonnement réalisées sur le site. Tout d'abord, une connaissance précise des composantes directes et diffuses du rayonnement incident sont nécessaires afin de calculer les flux transmis par la vitre, les coefficients de transmission étant différents pour les deux types de composantes. On calcule ainsi τ_b et τ_d les coefficients de transmissions respectivement du rayonnement direct et diffus selon les relations :

$$\begin{cases} \tau_b(\theta) = \tau_{b,0} & \text{si } 0 \leq \theta \leq \arccos(0,8) \\ \tau_b(\theta) = \tau_{b,0} \cdot \cos(\theta) \cdot (2,5 - 1,56 \cdot \cos(\theta)) & \text{si } \arccos(0,8) < \theta < \pi/2 \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

θ étant l'angle d'incidence des rayons directs du soleil, $\tau_{b,0}$ désigne le coefficient de transmission du direct à 0° lorsque le rayonnement est perpendiculaire au vitrage. $\tau_{b,0} = 0,54$ selon le fabricant de la vitre (Tab. III.4). Par ailleurs,

$$\tau_d = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tau_d(\theta) \sin(2\theta) d\theta \quad (\text{III.14})$$

τ_b évolue donc avec l'angle d'incidence θ (Fig. III.20) tandis que le coefficient de transmission du rayonnement diffus reste constant.

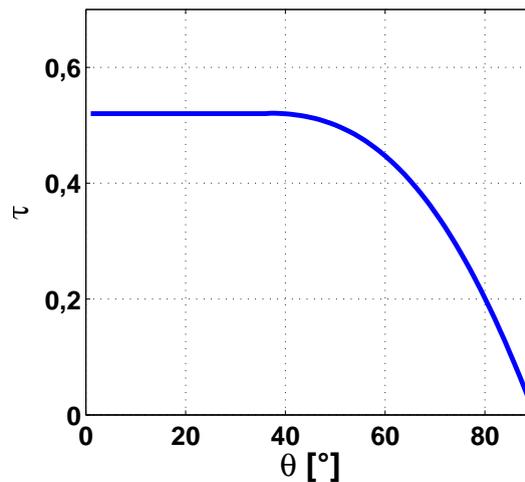


FIGURE III.20 – Evolution du coefficient de transmission du rayonnement direct τ_b en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement direct θ

Un dispositif provisoire a été installé dans le but de vérifier cette valeur de $\tau_{b,0}$. Dans cette optique, des mesures de rayonnement global vertical devant et derrière le vitrage ont été réalisées sur deux jours. Les rayonnements globaux verticaux ont dans un premier temps été décomposés en leurs composantes directes et

diffuses à partir d'un modèle simple : la part diffuse du rayonnement k_d a été calculée à partir des rayonnements horizontaux globaux $I_{d,0}$ et diffus $I_{g,0}$ mesurés au niveau de la station météorologique :

$$k_d = \frac{I_{d,0}}{I_{g,0}} \quad (\text{III.15})$$

Nous considérons alors que cette part diffuse est la même dans le rayonnement global vertical $I_{g,90}$ mesuré par le pyranomètre installé sur la façade Ouest. Le rayonnement diffus vertical est donné par la formule :

$$I_{d,90} = k_d \cdot I_{g,90} \quad (\text{III.16})$$

Tandis que le rayonnement direct vertical sur la façade Ouest est directement déduit selon la relation III.2. Finalement, le rayonnement global vertical transmis à un instant précis est donné par

$$I_{g,90,\tau}(t) = \tau_b(\theta) \cdot I_{b,90}(t) + \tau_d \cdot I_{d,90}(t) \quad (\text{III.17})$$

L'optimisation des coefficients de transmission, en testant différentes valeurs de $\tau_{b,0}$ et de τ_d , permet d'obtenir les rayonnements de la figure III.21.

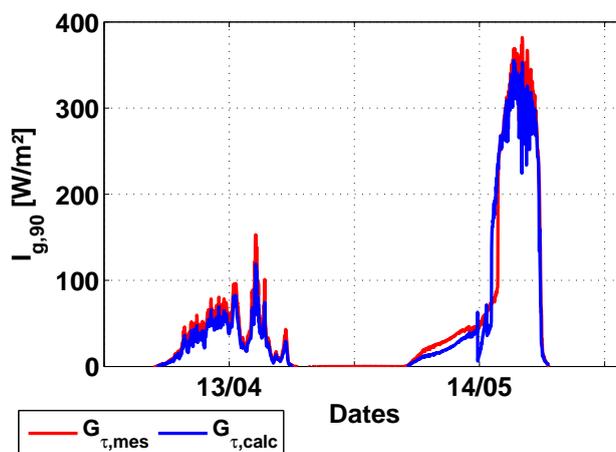


FIGURE III.21 – Rayonnement vertical transmis mesuré et rayonnement vertical transmis calculé

On observe tout d'abord que le rayonnement global le premier jour de mesure, ainsi que la matinée du second présente une composante diffuse prépondérante voire totale (Fig. III.21). Ces deux séries de mesures ont été utilisées pour valider le calcul de τ_d . En imposant $\tau_d = 0.35$ on retrouve le rayonnement global transmis mesuré avec une erreur moyenne de l'ordre de 9 W.

Les données de rayonnement de l'après-midi du second jour ayant une composante directe plus importante (Fig. III.21), elles ont été utilisées pour valider le calcul de la valeur de τ_b . L'erreur moyenne du rayonnement global transmis est de 17 W en fixant $\tau_{b,0} = 0,5$.

Ces valeurs de coefficients de transmission des rayonnements directs et diffus seront donc appliquées pour la suite de la modélisation de la cellule.

3.4 Réflectivités des peintures

Les propriétés optiques des matériaux percevant les flux radiatifs sont des paramètres à connaître de façon précise tant l'absorption, la réflexion et l'émission de ces flux influencent les bilans thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Les propriétés réflexives et émissives des peintures recouvrant les surfaces intérieures des parois de la cellule, ainsi que celles des enduits et de l'ARMAFLEX n'étant pas précisées par le fabricant, elles ont été l'objet d'une étude approfondie. La méthode appliquée pour déterminer ces coefficients optiques est présentée dans l'annexe B. Il en a découlé les coefficients optiques résumés dans le tableau III.12 :

	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 III.12 – Coefficient d'absorption et d'émissivité de la peinture, des enduits et de l'ARMAFLEX

Ces coefficients seront utilisés pour les calculs de flux Courtes et Grandes longueurs d'onde absorbés ou émis dans l'enceinte de la cellule. Nous pouvons noter, d'ailleurs, que les flux GLO intérieurs et extérieurs ont été calculés directement selon les relations non linéarisées II.59 et II.63.

3.5 Choix de la corrélation pour les coefficients convectifs

Les flux convectifs demeurent compliqués à calculer, en particulier à cause des incertitudes de détermination des coefficients convectifs. Une multitude de modèles, révélés dans la section 1.3, sont envisageables, justifiant une étude de sensibilité spécifique.

Dans notre cas, les corrélations de Trombe et al. (2003) appliquées aux parois verticales et combinées aux relations d'Alamdari et Hammond (1983) pour le sol et le plafond, celles d'Alamdari et Hammond (1983) seules ainsi que les corrélations d'Awbi et Hatton (1999) ont été implémentées à notre modèle en configuration BESTlab, pour un test de sensibilité.

Nous pouvons observer que les différences de températures d'air calculées en appliquant chacun de ces corrélations restent très modérées puisqu'elles ne dépassent pas 0,2 °C (Fig. III.22). On montre ainsi que si les coefficients convectifs calculés par les différentes corrélations peuvent être relativement importants (Fig. II.2), ces différences ne sont pas suffisantes pour influencer de façon importante sur les températures d'air calculées.

Par la suite, nous garderons les relations d'Awbi et Hatton (1999) qui semblent théoriquement les plus adaptées à notre adaptation : cette corrélation a en effet été mise en place expérimentalement pour des surfaces complètement ou partiellement chauffées et à faible inertie. Elle semble donc plus adaptée dans le cadre de notre modèle, où les surfaces sont soumises ou non à la présence d'une tache solaire.

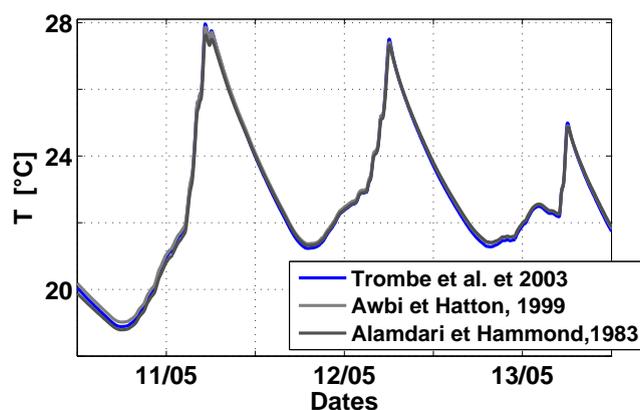


FIGURE III.22 – Impact du choix de corrélation de calcul du coefficient convectif sur les calculs de température d'air intérieure de la cellule

Pour les jours du test réalisé ici, la plage de valeurs prises par les coefficients convectifs pour l'ensemble des mailles de la cellule s'étend de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ à $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ la plupart du temps, mais elle s'élargit à certains moments des journées étudiées, de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ à $2,56 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (Fig. III.23).

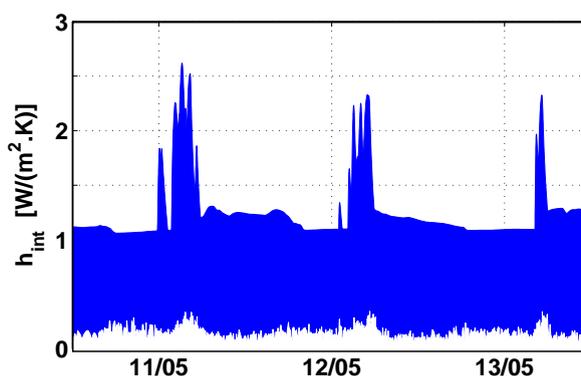


FIGURE III.23 – Plages de valeurs des coefficients convectif pour les trois jours de tests

Les coefficients convectifs étant calculés à chaque instant pour chacune des mailles en fonction de leur température, l'élargissement de la plage de valeurs témoigne des différences de flux convectifs dans la pièce liés à des d'hétérogénéités de température entre mailles. Les mailles les plus chaudes, alors touchées par la tache solaire, sont assorties de coefficients convectifs les plus élevés.

3.6 Optimisation du maillage

L'optimisation de la discrétisation spatiale du bâtiment pour sa modélisation est une tâche importante, sachant que plus le maillage est fin, plus les calculs seront précis et les dynamiques seront fidèles à la réalité, mais plus le temps de calcul sera important. Il s'agira donc dans un premier temps d'établir le maillage spatial de meilleur compromis entre temps de calcul et précision des résultats.

Si la taille des mailles en surface des parois a été définie de façon à localiser le plus justement possible

la tache solaire tout en limitant le temps de calcul, l'épaisseur des mailles discrétisant les murs a été l'objet d'une étude particulière. Il existe un rapport étroit entre la discrétisation temporelle du problème thermique et la finesse de sa discrétisation spatiale qui s'exprime au travers de la diffusivité thermique du matériau, c'est-à-dire la relation entre l'épaisseur sollicitée et le temps de diffusion de la chaleur en son sein. Le pas de temps des données d'entrées ainsi que le temps de diffusion imposeront alors une certaine finesse dans la discrétisation spatiale et réciproquement. En effet, en cas de variations brusques des sollicitations, les parties des murs les plus proches des surfaces sont plus vite perturbées que les mailles centrales des parois, justifiant la mise en place d'un maillage progressif suivant l'épaisseur du mur : il semble légitime d'utiliser des mailles plus épaisses pour les couches centrales des murs alors que les mailles superficielles en contact avec l'environnement à l'intérieur de la cellule et à l'extérieur seront plus fines (Escudero, 1989). Notons que HEAT3 permet de faire un maillage progressif dans une des directions souhaitées. Il est d'ailleurs conseillé que le coefficient d'expansion se situe entre 0,8 et 1,2 afin d'éviter d'éventuelles instabilités dans la résolution numérique du problème au niveau de mailles trop petites.

Nous nous sommes donc focalisés ici sur l'influence de l'épaisseur des mailles sur les calculs de températures d'air et des surfaces. Dans cette optique, nous avons réalisé des simulations avec notre modèle, sur la journée du 8 Mai 2013, pour quatre types de maillages possibles : m_0 , m_1 , m_2 et m_3 ; le nombre de mailles discrétisant chacune des parois selon leur épaisseur étant multiplié par deux entre m_i et m_{i+1} . Les sorties de chacune des simulations avec m_0 , m_1 et m_2 ont alors été comparées aux sorties de m_3 , modèle dont le maillage est le plus fin et donc considéré comme référence. Les différences ont alors été quantifiées pour les températures de chacune des parois et la température d'air en termes de distances euclidiennes moyennes données par

$$d_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_T} (T_{m_i} - T_{m_3})^2}}{N_T} \quad (\text{III.18})$$

Nous pouvons observer que pour BESTLab, m_0 reste proche de la référence, les différences maximales observées pour le sol et la paroi Ouest étant respectivement de 0,18 °C et 0,16 °C, alors que les températures des autres parois diffèrent de 0,1 °C (Fig. III.24). Les écarts au niveau du sol et de la paroi Ouest sont liés au fait qu'elles sont plus touchées par les flux extérieurs que les autres : le sol seul reçoit le rayonnement CLO tandis que la paroi Ouest est en contact direct avec l'extérieur. Le maillage m_3 permet de mieux prendre en compte ces différents flux. Les différences tendent à baisser à 0,08 °C pour le maillage m_1 , excepté pour la paroi Ouest où elles atteignent 0,13 °C. Enfin les températures calculées par m_2 convergent vers les températures obtenues avec m_3 . Ceci montre que le maillage m_2 semble suffisamment fin et présente l'intérêt de permettre des calculs plus rapides. Une discussion peut cependant être menée sur l'intérêt de maillage plus fin que m_0 tant les différences demeurent faibles, même pour ce maillage. En effet, la succession des couches de

différents matériaux rend les maillages de toute façon très fines sans qu'elles aient besoin d'être redoublées.

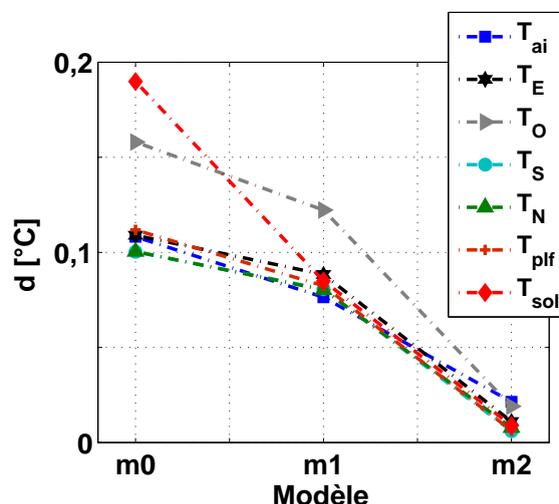


FIGURE III.24 – Evolution des températures en fonction du maillage pour BESTlab

Cependant, les écarts moyennés commentés ici ne permettent pas de situer les différences entre les résultats des simulations. En se focalisant sur l'évolution des températures d'air (Fig. III.25) et au sol (Fig. III.26) avec le temps, nous pouvons constater le modèle de référence m_3 , plus maillé, permet de mieux appréhender les dynamiques que le modèle peu maillé m_0 . Les fluctuations des températures, liées aux variations de rayonnement solaire, sont alors mieux prises en compte. Les écarts peuvent atteindre ponctuellement $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température d'air et $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température surfacique du sol, au-delà de l'erreur de mesure.

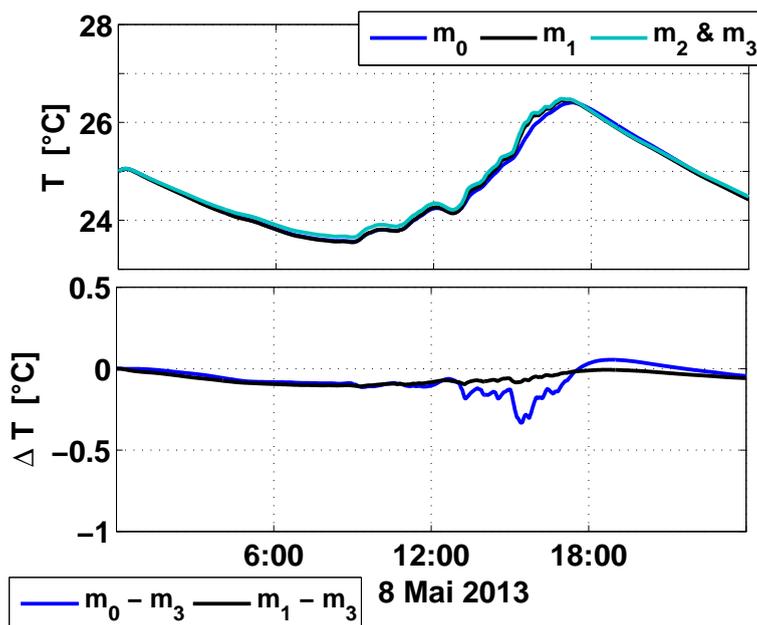


FIGURE III.25 – Impact du maillage sur l'évolution temporelle des températures d'air

La figure III.27 présente les densités de flux conductifs au niveau du sol, de la première maille vers la seconde maille (Fig. III.27.a) et de la dernière maille vers la maille suivante dont la température est fixée en

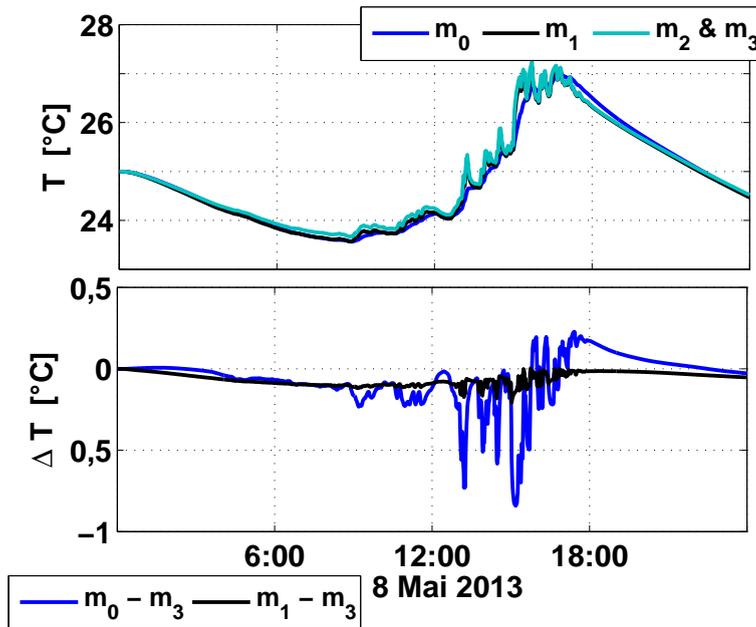
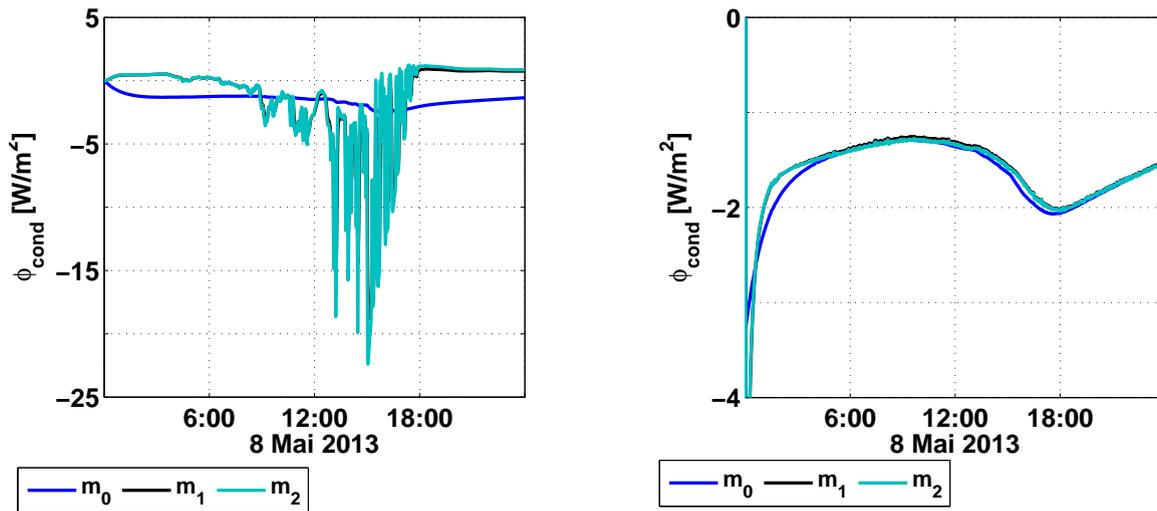


FIGURE III.26 – Impact du maillage sur l'évolution temporelle des températures au sol

tant que conditions limites (Fig. III.27.b).



a) maille à l'interface paroi/intérieur de la pièce

b) maille à l'interface paroi/conditions limites du sol

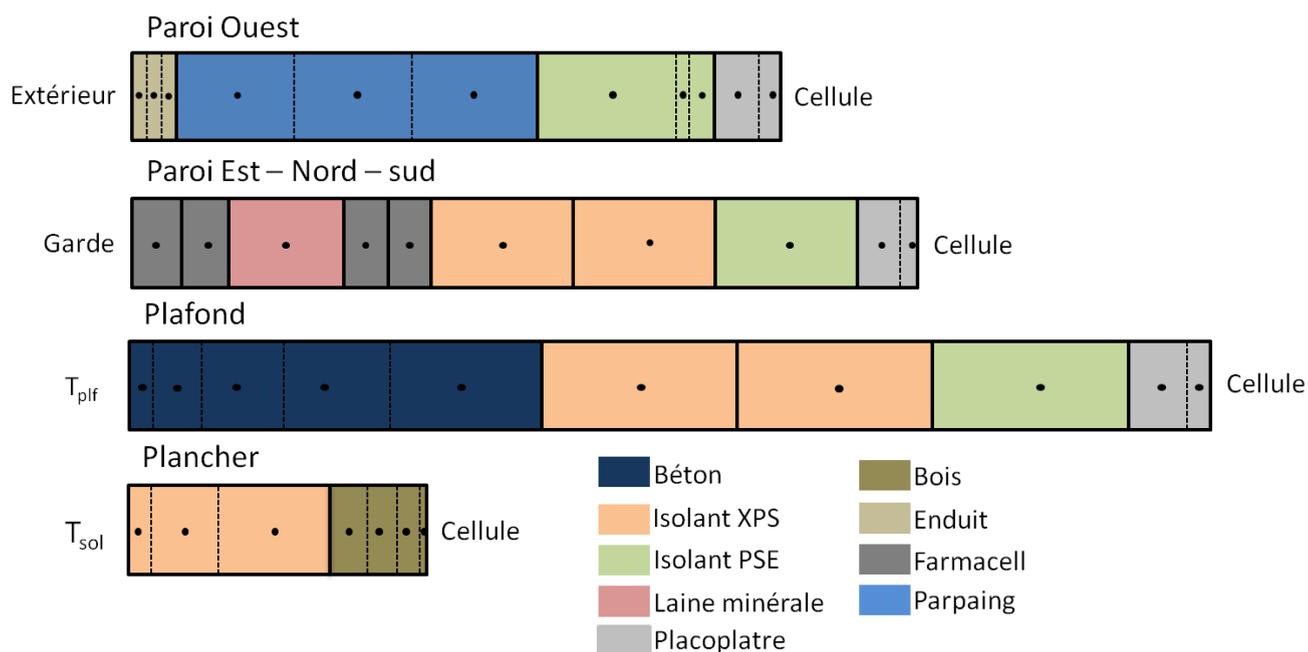
FIGURE III.27 – Flux conductif au niveau des premières et dernières mailles, au niveau du sol (le 08 Mai 2013)

Dans le premier cas (Fig. III.27.a), nous pouvons observer que les densités de flux obtenues avec le maillage m_0 sont bien inférieures à celle obtenues avec m_1 et m_2 , atteignant -5 W/m^2 contre environ 22 W/m^2 pour les maillages plus fins. Nous constatons surtout que les densités de flux varient beaucoup plus pour les maillages plus fins m_1 et m_2 , reproduisant et transmettant donc les variations des sollicitations externes arrivant sur les mailles placées en surface. En ce qui concerne les densités de flux conductif de la dernière maille vers la maille extérieure, celles-ci ont les mêmes tendances et ont quasiment les mêmes valeurs quel que soit le maillage. Ces constats confirment l'intérêt d'un maillage progressif, l'épaisseur des

mailles augmentant lorsqu'on avance vers le cœur de la paroi.

L'épaisseur des mailles a une incidence sur la diffusivité thermique. Les pas de temps mis en jeu, de l'ordre de quelques minutes en général, imposent les épaisseurs des mailles en contact avec l'environnement extérieur de l'ordre du millimètre, sous peine de trop approximer les transferts par conduction dans le matériaux et les différentes couches des parois.

Finalement, la discrétisation optimale des parois de la cellule BESTlab selon leur épaisseur, déduit de notre étude de sensibilité pour la cellule BESTlab, correspond au maillage m_2 présenté dans les figures III.28 et III.29.



Comme recommandé précédemment, le mode de maillage est progressif : les mailles superficielles des parois, qui subissent directement les sollicitations externes, sont plus fines que les mailles des couches centrales. Il en découle un maillage tridimensionnel comptant 24700 volumes de contrôle constituant les parois du cube, alors que seul un nœud est utilisé pour le calcul de la température de l'air intérieur de la cellule. Ainsi, en tout, la résolution du problème thermique ainsi défini nécessite l'intégration de 24701 équations différentielles à chaque pas de temps.

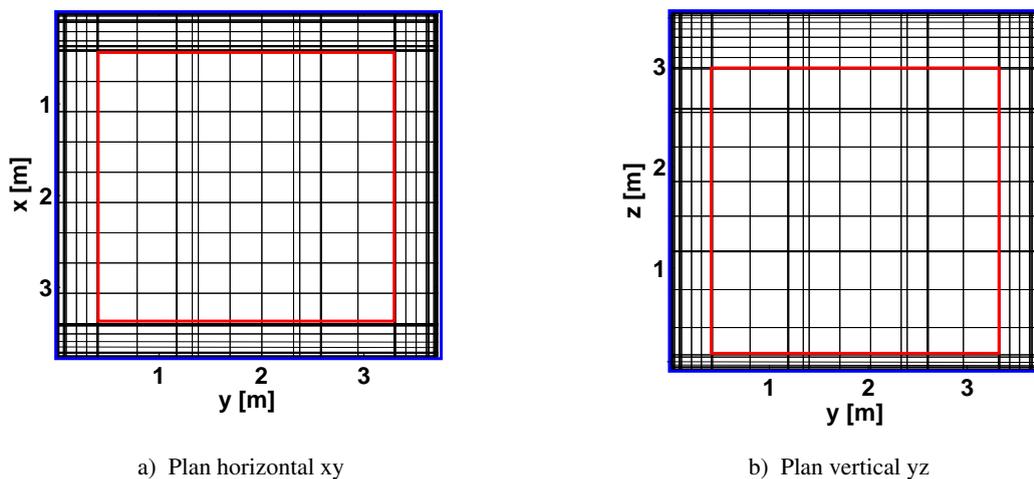


FIGURE III.29 – Maillage final optimisé pour la cellule de BESTLab. Le contour rouge délimite les surfaces des parois vers l’intérieur de la cellule, le contour bleu délimite les surfaces des parois vers l’extérieur