Modélisation couplée intérieur et extérieur pour l'étude des ambiances vécues en période de surchauffe urbaine

Flavia Barone *[12], Lucie Merlier[12], Frédéric Kuznik[12], Mathias Bouquerel[23]

[1]Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France
[2] BHEE Bâtiment Haute Efficacité Energétique, Laboratoire en commun entre EDF R&D et le CETHIL, Villeurbanne, France
[3]EDF R&D, Moret-Loing-et-Orvanne, France

***flavia.barone@insa-lyon.fr**

RESUME

Cette contribution s'inscrit dans un contexte d'accentuation des surchauffes urbaines et vise à caractériser les ambiances thermiques à l'échelle d'une résidence et son environnement extérieur proche. Dans ce but elle décrit une méthode de modélisation des interactions thermo-aérauliques entre logement et extérieur en couplant un modèle zonal de canopée urbaine (MZCU) avec un modèle de simulation thermique dynamique (STD) du bâtiment. La méthodologie de modélisation repose sur une étape de pré-calcul du flux solaire et des lois d'écoulement à partir de simulations de mécanique des fluides (CFD) et une étape de simulation dynamique des échanges advectifs, convectifs, conductifs et solaires entre le bâtiment et son environnement. En première approche, la méthode est appliquée à un cas d'étude théorique composé de deux bâtiments et de leur environnement extérieur proche. Les premiers résultats mettent en évidence l'effet du rayonnement solaire et de l'advection sur les températures extérieures de surface et d'air et la répercussion dans le logement.

MOTS-CLÉS : microclimat urbain, simulation thermique dynamique du bâtiment, couplage thermo-aéraulique

In a context of increasing urban overheating, this paper aims at characterizing the thermal ambiences at the scale of a residence and its close external environment. It provides a method to model thermal interaction between indoor dwellings and the outdoor surrounding by coupling a zonal urban canopy model (ZUCM) with a building energy simulation (BES) model. The coupling method is based on a first step where solar radiation and CFD airflow are precomputed and on a second step where dynamic simulation of advection, convection and solar radiation between the building and the ZUCM is performed. As a first approach, the method is applied to a theoretical study case composed of two buildings and their close external environment. The first results highlight the effect of solar radiation and advection on the outdoor air and surface temperatures as well as the effect of the latters on the temperature in the dwelling.

KEY WORDS : urban microclimate, building energy simulation, thermal airflow coupling

1. INTRODUCTION

L'accroissement en intensité et fréquence des vagues de chaleur combiné à l'urbanisation croissante induit une surchauffe urbaine et en conséquence une hausse du stress thermique subi par les habitants. Les indicateurs utilisés pour évaluer le stress thermique s'appuient en totalité ou en partie sur la température de l'air T_a, la température radiante moyenne T_{mr}, humidité relative HR et vitesse de l'air v_a (Wölki et al., s. d.; Höppe 2002; Freivalds 1987). Le niveau de stress thermique est également évalué au regard de la durée d'exposition faisant intervenir des mécanismes d'acclimatation ou une altération du système de thermorégulation (Deng et al. 2018). Enfin, lorsque plusieurs ambiances thermiques existent au sein du périmètre d'exposition étudié, il est intéressant de les caractériser afin de différentier le stress thermique qui en découle et donc de pouvoir prioriser des stratégies d'adaptation à fine échelle

et suggérer des pratiques adaptées aux habitants. Le périmètre d'étude est alors déterminant dans le choix de l'approche de modélisation.

Dans notre cas, le périmètre retenu est celui d'une résidence d'habitations, où plusieurs ambiances thermiques existent à l'extérieur et intérieur du logement. L'échelle d'analyse couvre la période estivale avec une résolution horaire. L'enjeux réside ici non seulement dans la caractérisation des ambiances thermiques dans le bâtiment et son environnement proche et mais aussi dans la prise en compte de leur interaction.

Concernant la caractérisation des ambiances thermiques dans le bâtiment, les modèles de STD les plus utilisés pour couvrir des périodes de simulations de plusieurs mois sont des modèles nodaux à des pas de temps horaires tels que TRNSYS (University of Wisconsin), EnergyPlus (US Department of Energy Building Technologies Office), ou infra horaires, tels que BuildSysPro (Plessis, Kaemmerlen, et Lindsay 2014). Concernant la caractérisation des ambiances thermiques extérieures, les modèles zonaux avec une discrétisation spatiale des températures et des lois d'écoulement simplifiées tels que le modèle de Liang (Liang et al. 2018) ou envibatE intégrant également un modèle simplifié de bâtiment (Gros, Bozonnet, et Inard 2014), sont les plus adaptés à une période d'analyse de plusieurs mois. Couplant les deux approches, et dans l'optique de caractériser les interactions entre l'intérieur du logement et son environnement extérieur proche, cette contribution décrit une méthode de modélisation mise en place pour coupler un MZCU avec un modèle de STD du bâtiment.

2. METHODE ET OUTILS

2.1. LES PHENOMENES PHYSIQUES REPRESENTES

Les phénomènes physiques caractérisés par le modèle présenté (*Figure 1*) sont :

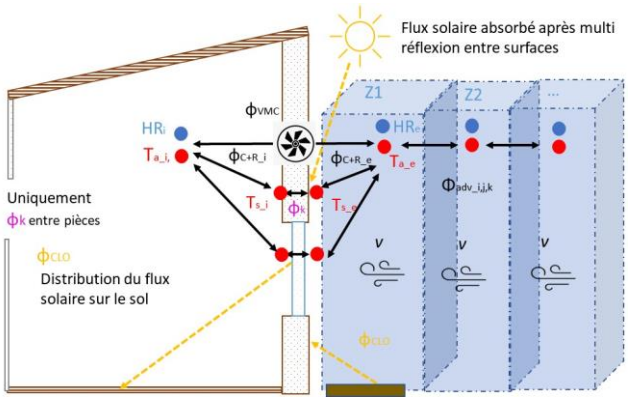

Figure 1 : Phénomènes physiques modélisés

- Le flux radiatif solaire reçu par la surface extérieure du bâtiment (ϕ_{CLO}) en intégrant les multi-réflexions liées aux autres surfaces. A l'intérieur du logement le φ_{CLO} est distribué au sol.
- Les flux radiatifs de grande longueur d'onde (GLO) et les flux convectifs (φ_{C+R}) aux surfaces du bâtiment.
- Les flux conductifs à travers les surfaces du bâtiment (φ_k).
- Les flux sensible advecté (φ_{adv}) entre les zones d'air calculé pour le MZCU.
- Le flux sensible lié aux échanges d'air par ventilation mécanique contrôlée (VMC) entre le bâtiment et les zones d'air adjacentes (φ_{VMC}).
- Les écoulements à l'extérieur du bâtiment correspondent à un régime de convection forcée. Les effets de la flottabilité ne sont pas pris en compte.

Les grandeurs physiques en sortie sont T_a, HR, la température de surface T_s et la v_a.

2.2. APPROCHE DE MODELISATION

Le couplage entre MZCU et le modèle STD de bâtiment s'appuie sur la chaine de modélisation MyBEM (logiciel EDF) (Schumann et al. 2017) comportant la STD du bâtiment (modules 1, 2, 3, 6a et 7a) à laquelle a été intégré un couplage avec le MZCU (modules 4, 5, 6b et 7b) (*Figure 2*). L'architecture globale repose sur :

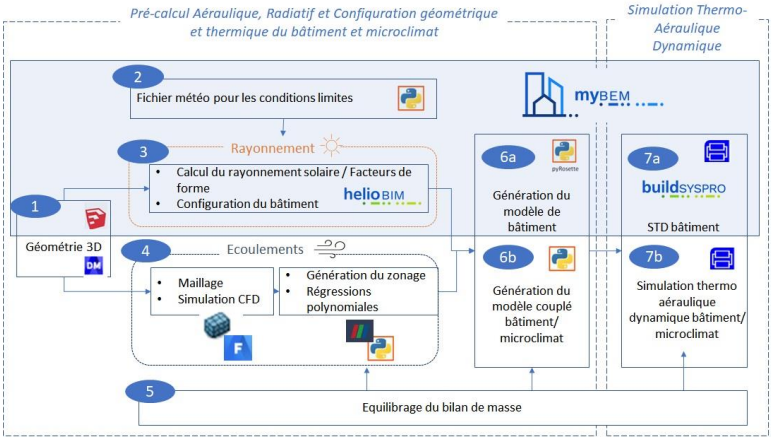

Figure 2 Architecture du modèle couplé MZCU – STD bâtiment

(1) La définition de la géométrie 3D du cas d'étude. L'échelle spatiale est celle d'une résidence.
(2) L'affectation du fichier météo pour les conditions limites.
(3) Le paramétrage des propriétés thermiques du bâtiment (parois, baies, toit, plancher…), des ponts thermiques, des systèmes, des usages (ventilation, éclairage, chauffage, apports internes) et le précalcul du rayonnement solaire reçu par l'enveloppe des bâtiments après multi réflexions au pas de temps horaire, en appliquant la méthode de lancer de rayon (Monte Carlo) avec le logiciel HelioBIM (Bouquerel et al. 2021). Ces informations sont exportées dans un fichier gbXML et des fichiers CSV utilisés pour la génération du modèle de STD du bâtiment.
(4) Le prétraitement pour le modèle thermo-aéraulique comprenant 4 étapes (i) Le précalcul des écoulements d'air par simulation CFD RANS avec Fluent pour la géométrie 3D du problème considéré et pour des vitesses et orientations de vent correspondant aux plages du fichier météo utilisé pour la simulation couplée. (ii) Le passage du maillage fin de la CFD à un zonage parallélépipède plus large permettant de créer des nouveaux volumes d'air se superposant aux zones thermiques du bâtiment (*Figure 3*). (iii) Le calcul sur les surfaces du zonage, du débit massique ($\dot{m}$), le calcul sur les faces du bâtiment du coefficient d'échange convectif (*hc*) extérieur moyen et du coefficient de pression (c_p) moyen à partir des résultats de la CFD. (iv) Pour chaque surface du zonage, la détermination de régressions polynomiales multiples (scikit-learn) pour prédire les $\dot{m}$, les *hc* extérieurs et les c_p correspondants à une vitesse et orientation de vent données dans la limite de la plage retenue.
(5) L'équilibrage des bilans de masse dans les zones thermiques pour corriger les déséquilibres générés lors de la transformation du maillage de la CFD au zonage parallélépipède, ainsi que les déséquilibres générés par l'application des régressions polynomiales.

Le principe d'équilibrage consiste à imposer les débits calculés sur le contour des faces amont $\dot{m}_{n_up}$ du zonage et à corriger les débits des faces aval $\dot{m}_{n_dwn}$ si le bilan de masse $\Delta\dot{m}$ dans le volume d'air n'est pas nul (*Figure 4*). En cas de déséquilibre, la correction sur les $\dot{m}_{n_dwn}$ se fait en appliquant un coefficient de pondération calculé de la manière suivante :

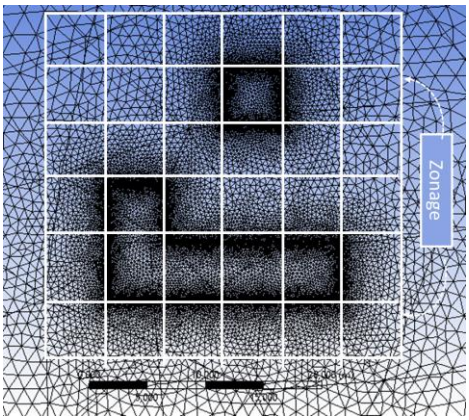

Figure 3 Passage du maillage au zonage

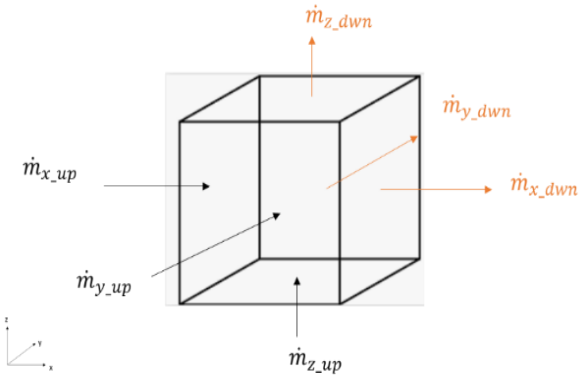

Figure 4 Faces amont/aval du cube

$$c_n = \frac{|\dot{m}_{n_dwn}|}{\sum_{i=x,y,z}|\dot{m}_{i_{dwn}}|} \qquad n = x, y, z \tag{1}$$

Les nouveaux débits massiques $\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{n}_{dwn_bal}}$ sur les faces aval sont alors calculés de la manière suivante :

$$\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{n}_{dwn_bal}} = \dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{n}_{dwn}} + \Delta\dot{\boldsymbol{m}} \times \boldsymbol{c}_{\boldsymbol{n}} \tag{2}$$

où

$$\Delta\dot{m} = \sum_{i=x,y,z}\dot{m}_{i_{up}} - \sum_{i=x,y,z}\dot{m}_{i_{dwn}} \tag{3}$$

Il est à noter que $\dot{m}$>0 si orienté dans le sens positif des axes *x,y,z*. Aussi, l'affectation des faces amont et aval est faite en référence au sens des axes *x,y* et *z* et non au sens d'écoulement de l'air. Enfin, les corrections effectuées sur les faces aval se répercutent sur les faces amont des zones successives. Cette méthode d'équilibrage comporte donc une propagation de la correction pouvant engendrer des corrections de débit là où il n'en est pas nécessaire. Il est donc important d'évaluer les effets de cette correction à l'échelle spatiale d'intérêt afin d'évaluer l'impact sur l'écoulement global. Par ailleurs cette stratégie d'équilibrage vérifie que les $\dot{m}$ sur les faces d'air adjacentes aux surfaces solides soient bien nuls et les corrige le cas échéant.

(6) La génération du modèle Modelica de bâtiment basé sur BuildSysPro (Plessis, Kaemmerlen, et Lindsay 2014) et du modèle Modelica de MZCU.

(7) La simulation thermo- aéraulique dynamique au pas de temps de la seconde de ces 2 modèles couplés réalisée sous Dymola, en utilisant une méthode de discrétisation temporelle implicite, et pour la conduction, une discrétisation spatiale 1D et la méthode des volumes finies.

2.3. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

L'objectif de ce cas d'étude est de mettre en lumière l'influence réciproque du bâtiment et de l'environnement proche sur les T_a et les T_s à l'extérieur du logement et les T_a à l'intérieur, ainsi que d'évaluer les effets de l'approche d'équilibrage des bilans de masse. Pour ce faire, deux simulations sont réalisées : une STD simple du bâtiment (S1) et une STD du bâtiment, couplée au modèle de microclimat (S2). Ces deux cas présentent la même configuration de bâtiments et les mêmes conditions limites aux bords du domaine.

2.3.1. Configuration des bâtiments

Le cas d'étude est composé de 2 logements de 7 étages avec des propriétés constructives des bâtiments des années 1990 incluant une façade en bêton et une isolation intérieure (*Figure 6*). Le bâtiment A présente 5 zones thermiques par étage et le bâtiment B en présente une par étage. Les Tableau 1 et Tableau 2 détaillent les usages, les propriétés constructives des bâtiments et des zones thermiques. A

l'intérieur, des coefficients d'échange convectifs et radiatif GLO intérieur de 10, 7,69 et 5,88W.m^{-2}. K^{-1} ont été retenus respectivement pour le plafond, les murs et le sol (norme ISO 6946 et RT française).

2.3.2. Configuration du modèle zonal de canopée urbaine

L'extérieur du bâtiment est modélisé par un sol auquel est attribuée une valeur d'albédo de 20% et par un sous domaine (*Figure 5*) découpé en 6 x 6 x 8 volumes d'air de longueur d'arrêtes de 5mx5mx3m, respectivement le long des axes *x*, *y*, et *z*. Les $\dot{m}$ aux surfaces du zonage sont dérivés des simulations CFD en appliquant une régression polynomiale multiple de degré 6. Le set de données comprend 24 simulations CFD pour 6 vitesses de vent à z=10m de 0,5, 3, 5, 7, 9 et 14 ms^{-1} et 4 orientations de vent de 240°, 270°, 285° et 300° par rapport au Nord.

Le modèle utilisé pour la simulation CFD est le modèle RANS k-epsilon Realizable. La fonction de parois est la Scalable Wall Function avec une hauteur de rugosité K_s de 0 m. Le maillage appliqué est tétraédrique de 0.1 m aux parois des bâtiments avec un taux de croissance de 1,1. Le profil de vitesse, de turbulence et de dissipation de l'énergie cinétique turbulente utilisés sont issus de (Tominaga et al. 2008) avec une hauteur de rugosité au sol K_s de 10^{-3}m.

2.3.3. Conditions limites

Les conditions limites aux surfaces des bâtiments sont le rayonnement solaire reçu par multireflexions, un coefficient d'échange radiatif GLO (*hr*) et un *hc* avec *hr* + *hc* =25 W.m^{-2}. K^{-1} et une T_s du sol à l'interface du bâtiment qui varie de 2°C à 22°C le long de l'année. Par ailleurs un fichier météo Meteonorm Lyon (aéroport Satolas) avec des T_a adaptées au milieu urbain avec UWG (Bueno et al. 2013) est mis en conditions limites des bâtiments pour le S1 et en conditions limites du domaine du zonage pour le S2, qui ne présente donc pas de modèle de sol. Enfin, l'orientation du vent du fichier météo est comprise entre 240° et 300° par rapport au Nord.

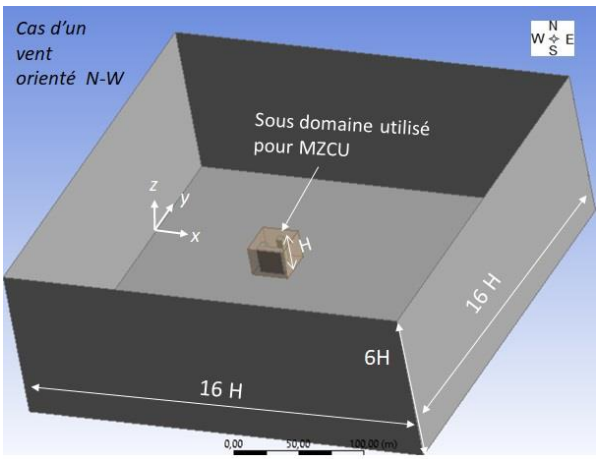

Figure 5– Domaine de calcul CFD

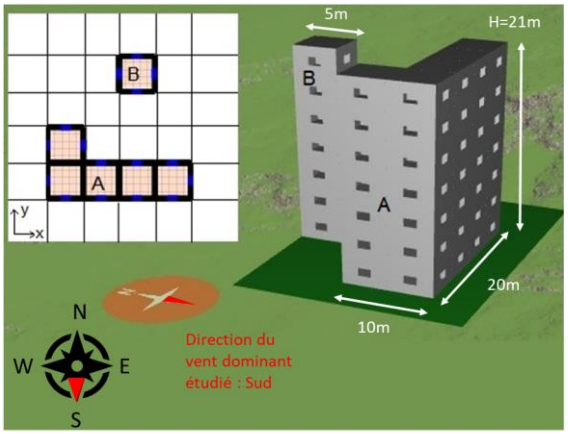

Figure 6– Géométrie 3D des bâtiments

Taux de ventilation – en continu (V/h)	0,55
Apports internes – en continu (W/m^2)	5
Occultation des baies – du 01/06 au 21/09	50%
Volume (m^3)	75
Surface sol (m^2)	25
Surface vitrée (m^2)	1,19 x 112

Tableau 1 - Usages et Propriété des zones thermiques des bâtiments

	Paroi intérieure	Façade	Toiture	Plancher bas	Plancher intermédiaire	Baies
U ($Wm^{-2}K^{-1}$)	5,147	0,354	0,457	0,421	9,722	2,1
Facteur solaire						66,6%
Albédo solaire			0,7			

Tableau 2 – Propriétés thermiques des surfaces

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE DE L'EQUILIBRAGE

La *Figure 7* affiche les déséquilibres de masse dans chaque zone après la création du zonage pour le plan de coupe (*x*,*y*) avec *z* compris entre 0m et 3m (niveau de zone au sol). La vitesse et l'orientation du vent étudiées correspondent ici à un point de calcul issu d'une simulation CFD pour une orientation du vent de 285° et vitesse de 0.5 m/s. Cette analyse se concentre uniquement sur l'impact de l'équilibrage sur l'écoulement initial, l'effet de la régression polynomiale sur le $\dot{m}$ n'est pas étudié ici. Les déséquilibres sont particulièrement marqués aux interfaces du bâtiment et aux endroits où le maillage CFD est plus large.

Figure 7 Déséquilibres des bilans de masse par zone à la création du zonage plan de coupe (xy), z[0m,3m]

La *Figure 8* affiche, pour le même plan de coupe que la *Figure 7*, la correction relative du $\dot{m}$ sur chaque surface du zonage liée à l'équilibrage, par rapport au $\dot{m}$ calculé par CFD. L'application de l'équilibrage montre que les corrections relatives sont plus importantes aux interfaces et aux extrémités du domaine, là où les déséquilibres étaient initialement plus importants. Lorsque les écarts relatifs sont mis au regard du $\dot{m}$ global sur chaque face (*Figure 9*), on constate que toute correction >1% concerne des $\dot{m}$ très faibles (< 1.5kg/s). Il est alors possible de conclure que la propagation des déséquilibres associée à la méthode d'équilibrage appliquée ne perturbe par l'écoulement d'origine.

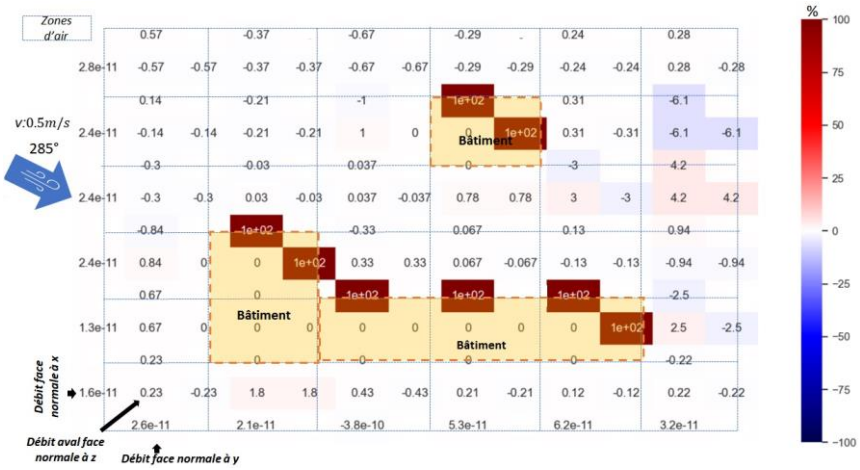

Figure 8 Correction en relatif (%): ṁ corrigé sur le ṁ avant équilibrage plan de coupe (xy), z[0m,3m]

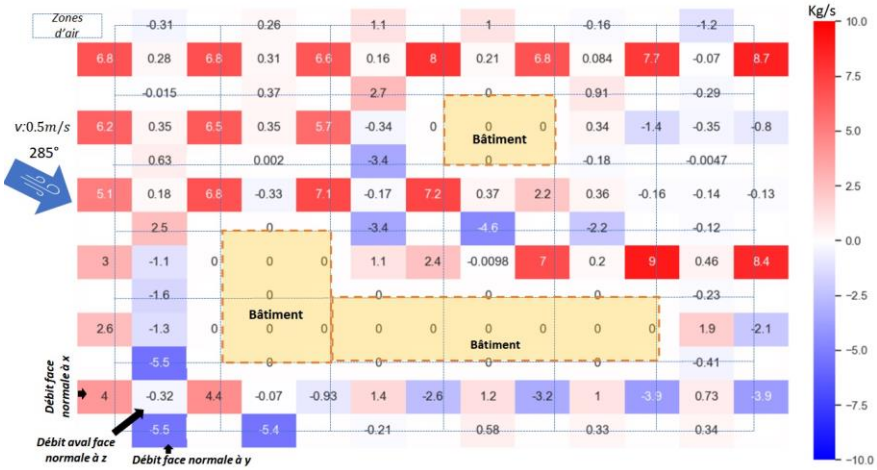

Figure 9–ṁ (kg/s) après équilibrage plan de coupe (xy), z[0m,3m]

3.2. ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION DES CAS D'ETUDE

La *Figure 10* affiche les T_a dans le bâtiment et à l'extérieur selon une coupe horizontale et verticale pour le 20 juillet à 17h, une journée où la vitesse du vent v= 0.5m/s. Dans cette configuration les T_a des zones d'air sont légèrement supérieures à la T_a du fichier météo. L'écart est accentué dans les périodes de l'année et de la journée où le flux solaire incident sur les parois est le plus important et lorsque l'advection entre zones d'air est la plus faible. Ainsi, les zones adjacentes aux parois ont des T_a faiblement plus élevées que les autres zones (de l'ordre de 0.8°C) et suivent la même évolution que les T_s des parois (*Figure 11 (a)*). Cela s'explique par l'effet des échanges convectifs avec les parois. Les écarts de T_a entre zones d'air s'expliquent par le faible niveau d'advection. Il est à noter que les résultats sont biaisés par la non prise en compte de la convection naturelle. Cela explique pourquoi dans la configuration particulière de la *Figure 10*, où la vitesse du vent est à 0,5m/s et le rayonnement solaire est important, la T_a de la zone adjacente au toit du bâtiment A est anormalement élevée. Le fait qu'elle soit supérieure à la T_a de la zone adjacente au toit du bâtiment B s'explique par une T_s du toit du bâtiment A plus élevée que celle du bâtiment B. Dans le logement la variation des écarts de T_a entre S1 et S2 est

encore moins prononcée que à l'extérieur (de l'ordre de 0.2°C) (*Figure 11* (b)). Cela s'explique par l'isolation de la façade et l'inertie du bâtiment.

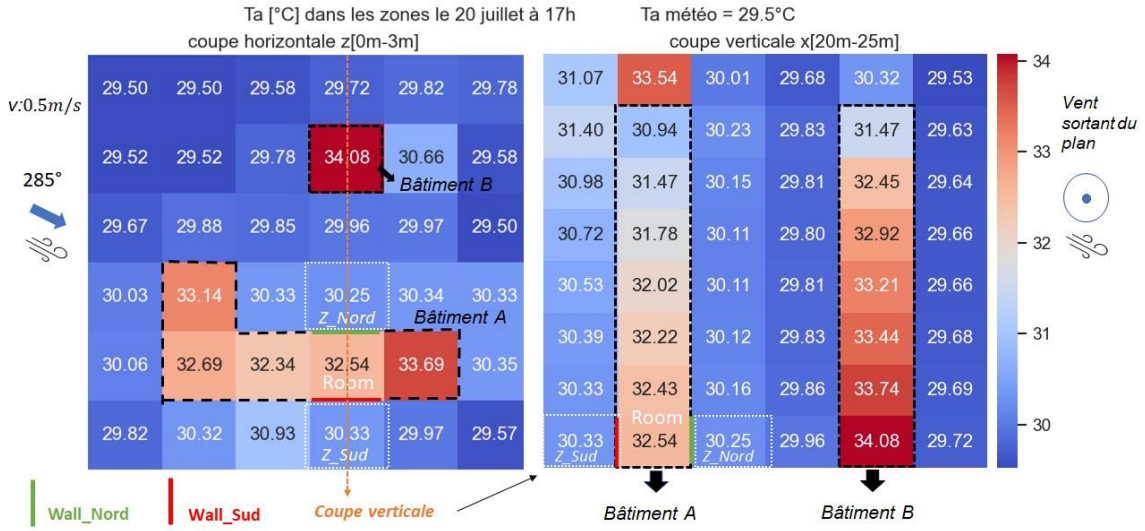

Figure 10 Spatialisation horizontale et verticale des T_a pour le 20 juillet à 17h

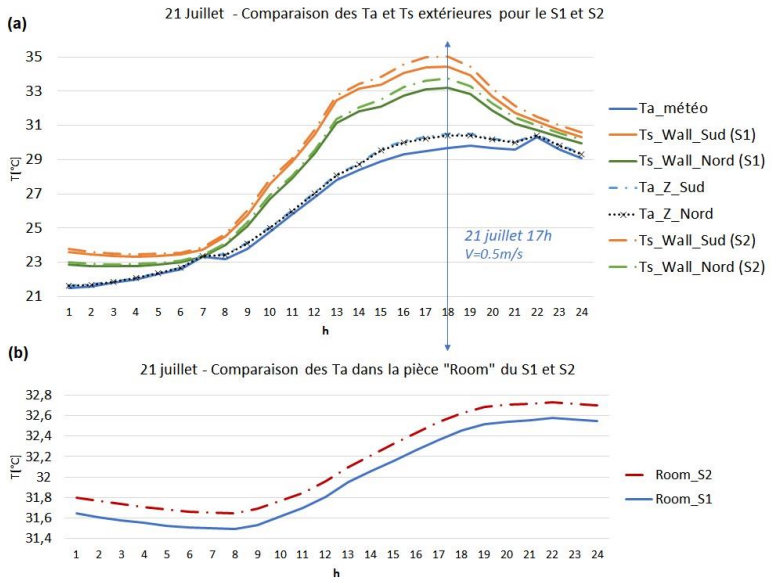

Figure 11 20 Juillet (a) Evolution des T_a dans 2 zones extérieures (S2) et de la T_a du fichier météo (S1). Evolution des T_s sur 2 parois Sud / Nord pour les modèles S1 et S2. (b)Evolution des T_a dans le logement pour le S1 et S1

4. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Cette contribution décrit une méthode de couplage de modèle MZCU avec un modèle de STD de bâtiment. En particulier, sur la base d'un cas d'étude, a été discutée l'approche d'équilibrage des bilans de masse et les résultats d'un couplage du modèle MZCU avec un modèle de STD de bâtiment.

4.1. SUR LA STRATEGIE D'EQUILIBRAGE DES BILANS DE MASSE

La stratégie d'équilibrage combinée aux corrections des $\dot{m}$ aux interfaces des parois permet de préserver la conservation de la masse au sein de chaque zone d'air. Lorsqu'appliquée à des points de calcul issus de la simulation CFD, elle donne des résultats cohérents par rapport à l'écoulement calculé par la CFD, avec une perturbation du flux négligeable face à l'intensité du $\dot{m}$ qui traverse les surfaces.

La suite des travaux consistera valider l'approche de prévision des débits massiques par application d'une régression polynomiale multiple.

4.2. SUR LES RESULTATS DES 2 SCENARIOS ETUDIES

Les premiers résultats mettent en lumière l'effet combiné des échanges convectifs et des phénomènes advectifs entre zones d'air induisant des variations horizontales et verticales des T_a. Ils montrent l'intérêt d'une approche spatialisée par rapport à une approche moyennée des températures. Pour pouvoir caractériser plus amplement le stress thermique il est cependant nécessaire de prendre en compte d'autres phénomènes physiques tels que l'évolution du rayonnement solaire direct reçu par l'individu, les échanges des surfaces avec le sol extérieur, la ventilation naturelle qui viendrait impacter plus amplement la température dans le logement et la convection naturelle dans la prévision des déplacements d'air. Les perspectives à court terme portent sur l'intégration dans le modèle du calcul des échanges radiatifs GLO par la méthode des radiosités, du calcul des coefficients de convection à partir des résultats de la CFD et de la prise en compte de la ventilation naturelle.

Remerciements :

Nous remercions Emmanuel Bozonnet du laboratoire LaSIE pour sa contribution méthodologique et l'INSA de Lyon pour la participation au financement des travaux de thèse.

5. BIBLIOGRAPHIE

Bouquerel, Mathias, Kevin Ruben Deutz, Benoit Charrier, Thierry Duforestel, Mickael Rousset, Bart Erich, Gerrit-Jan van Riessen, et Thomas Braun. 2021. « Application of MyBEM, a BIM to BEM Platform, to a Building Renovation Concept with Solar Harvesting Technologies », *Proceedings of Building Simulation 2021*, Bruges, Belgique, 1-3 Septembre, 2021.

Bueno, Bruno, Leslie Norford, Julia Hidalgo, et Grégoire Pigeon. 2013. « The Urban Weather Generator ». *Journal of Building Performance Simulation* 6 (4): 269-81. https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797.

Deng, Qihong, Jinping Zhao, Weiwei Liu, et Yuguo Li. 2018. « Heatstroke at Home: Prediction by Thermoregulation Modeling ». *Building and Environment* 137 (juin): 147-56. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.017.

Freivalds, A. 1987. « Development of an Intelligent Knowledge Base for Heat Stress Evaluation ». *International Journal of Industrial Ergonomics* 2 (1): 27-35. https://doi.org/10.1016/0169-8141(87)90005-9.

Gros, Adrien. s. d. « Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier », 169.

Gros, Adrien, Emmanuel Bozonnet, et Christian Inard. 2014. « Cool Materials Impact at District Scale—Coupling Building Energy and Microclimate Models ». *Sustainable Cities and Society* 13 (octobre): 254-66. https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.02.002.

Höppe, Peter. 2002. « Different Aspects of Assessing Indoor and Outdoor Thermal Comfort ». *Energy and Buildings* 34 (6): 661-65. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8.

Liang, Weihui, Jianxiang Huang, Phil Jones, Qun Wang, et Jian Hang. 2018. « A Zonal Model for Assessing Street Canyon Air Temperature of High-Density Cities ». *Building and Environment* 132 (mars): 160-69. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.035.

Plessis, Gilles, Aurelie Kaemmerlen, et Amy Lindsay. 2014. « BuildSysPro: A Modelica Library for Modelling Buildings and Energy Systems ». In , 1161-69. https://doi.org/10.3384/ecp140961161.

Schumann, M., T. Duforestel, H. Bouia, M. Bouquerel, M. Brun, A. Ribault, T. Leduc, et al. 2017. « Interdisciplinary around design tools for new buildingsand districts: the ANR MERRUBI project, Proceedingof PLEA, SCRIBD,pp 2148-2155. »

Tominaga, Yoshihide, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie, Hiroto Kataoka, Tsuyoshi Nozu, Masaru Yoshikawa, et Taichi Shirasawa. 2008. « AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (10-11): 1749-61. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058.

Wölki, D, M A Brüntjen, C Schmidt, et C van Treeck. s. d. « A DYNAMIC INDEX FOR TRANSIENT THERMAL COMFORT PREDICTION », 10.