



HAL
open science

Caractérisations numérique et expérimentale du comportement thermo-aéraulique d'une double-fenêtre active

Mike Coillot

► **To cite this version:**

Mike Coillot. Caractérisations numérique et expérimentale du comportement thermo-aéraulique d'une double-fenêtre active. Réhabilitation. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSET011 . tel-02927776

HAL Id: tel-02927776

<https://theses.hal.science/tel-02927776>

Submitted on 2 Sep 2020

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

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



N°d'ordre NNT : 2019LYSET011

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

Ecole Doctorale N° accréditation 162
MEGA (Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique)

Spécialité / discipline de doctorat : Energétique

Soutenue publiquement le 25/11/2019, par :
Mike Coillot

**Caractérisations numérique et
expérimentale du comportement thermo-
aéraulique d'une double-fenêtre active**

Devant le jury composé de :

Dumortier, Dominique	HDR, ICTPE	ENTPE	Président
Musy, Marjorie	HDR	CEREMA Ouest	Rapporteuse
Da Silva, Manuel Carlos Gameiro	Professeur	Université de Coimbra	Rapporteur
Kherrouf, Samira	Docteur	ADEME	Examinatrice
Buseyne, Serge	Ingénieur	ALDES	Examineur
Giroux, Stéphanie	MCF, HDR	Université Lyon 1	Examinatrice
El Mankibi, Mohamed	HDR	ENTPE	Directeur de thèse
Cantin, Richard	HDR, IDTPE	ENTPE	Co-directeur de thèse

Caractérisations numérique et
expérimentale du comportement
thermo-aéraulique d'une double-fenêtre
active

Résumé

La double-fenêtre est une solution de rénovation qui répond aux problématiques énergétique et architecturale de préservation des façades du bâti ancien. Elle constitue un système basé sur la pose de deux fenêtres, l'une derrière l'autre, la nouvelle fenêtre étant le plus souvent, posée du côté intérieur de l'habitat ancien. Ce système se différencie des doubles vitrages puisqu'ici il s'agit d'ajouter une fenêtre entière (dormant et ouvrant). A l'origine utilisés dans des régions où les hivers sont froids, ces dispositifs se sont ensuite démultipliés en différentes variantes et sous différents climats. L'étude approfondie de la littérature scientifique a mis en avant les propriétés et les problématiques de recherche autour de la double-fenêtre. Elle inclut la caractérisation thermique, l'étude de la récupération de la chaleur lorsqu'elle est ventilée en insufflation, le confort estival ou encore les problèmes de condensation entre les vitres. Les études sur le sujet couvrent une large plage de dimensions, de débit de ventilation et de type de vitrage. En revanche, les épaisseurs considérées sont pour la plupart assez faibles (inférieures à 100 mm) et les menuiseries sont modernes ne reprenant pas les caractéristiques des fenêtres et façades historiques. Ainsi, aucune considération n'a été apportée à l'application de ce dispositif à des bâtiments historiques alors que cela modifie fortement sa conception et son fonctionnement.

Le système étudié dans ce travail de thèse est une double-fenêtre par l'intérieur, adaptée aux bâtis historiques du XIX^e siècle, ventilée mécaniquement en insufflation rendant cet élément de façade actif. Il s'agit d'un dispositif innovant que ce soit par son domaine d'application ou par ses propriétés techniques. La double-fenêtre « classique », c'est-à-dire fermée, est considérée depuis peu dans les textes réglementaires. Mais il n'existe à l'heure actuelle, ni de caractérisation ni d'outil pour caractériser la double-fenêtre innovante étudiée dans cette thèse. Par conséquent, ce travail de thèse vise à caractériser son comportement et ses performances thermiques et permettre de dégager des recommandations quant à sa conception et son utilisation.

Pour atteindre ces objectifs, deux approches ont été mises en place. La première, expérimentale, a consisté en l'élaboration et l'utilisation de prototypes multi-échelle. La veille scientifique et l'état de l'art ont guidé et orienté nos choix pour développer les prototypes de double-fenêtre et mettre en place un protocole expérimental adapté à leurs

usages et respectant les contraintes architecturales spécifiques aux bâtiments anciens. Les dispositifs expérimentaux existants à l'ENTPE étant développés pour d'autres usages, un effort d'adaptation et de mise en adéquation avec les phénomènes thermiques et aérauliques qu'engendre la double-fenêtre a été fourni. Ainsi deux types de dispositifs expérimentaux ont été mis au point afin de mener des tests en conditions contrôlées (Boîte Chaude Gardée) et in situ (cellule expérimentale HYBCELL).

Plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées et ont fourni une base de données expérimentale conséquente. Grâce à ce travail expérimental, nous avons pu décrire le comportement thermo-aéraulique de la double-fenêtre en diverses situations de fonctionnement et montrer le caractère dynamique de ses performances. En revanche, il s'est avéré que la caractérisation du comportement thermique de ce dispositif par les nombreux tests expérimentaux n'a pu être complète. Par conséquent, nous avons décidé d'utiliser une seconde approche, numérique.

Cette seconde approche a constitué, dans un premier temps, en l'élaboration d'un modèle numérique dynamique et rapide d'utilisation. L'outil numérique créé a été confronté et validé à l'aide des données expérimentales. Une méthode originale et critique de validation a été mise au point lors de cette étape. Cette dernière a mis en lumière les forces et faiblesses du modèle numérique qui ont été prises en compte lors de son exploitation. Dans un second temps, l'approche numérique s'est portée sur la caractérisation paramétrique de la double-fenêtre ventilée afin d'appuyer et compléter les observations expérimentales. Cette approche paramétrique a également permis de fournir une méthode de détermination dynamique des performances thermiques.

Remerciements

Je souhaite adresser mes remerciements les plus profonds à mes directeurs de thèse, Mohamed El Mankibi et Richard Cantin. Je serai toujours reconnaissant de la confiance qu'ils m'ont témoignée et de leur soutien continu qui m'ont permis de réaliser cette thèse.

Je suis également reconnaissant envers Marjorie Musy et Manuel Carlos Gameiro Da Silva d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail. J'exprime également ma gratitude à Samira Kherrouf, Stéphanie Giroux, Serge Buseyne et Dominique Dumortier de prendre part à mon jury de thèse.

Ce travail faisant partie intégrante du projet REACTIVE, je tiens à remercier l'ADEME par l'intermédiaire de Samira Kherrouf pour avoir soutenu ce projet ainsi que tous les autres partenaires qui ont permis sa réalisation, et auprès de qui j'ai pu échanger, travailler et apprendre, en particulier Yves Belmont, Nathalie Sandt, Jean-Christophe Vernay, Gilbert Storti et Florence Delomier-Rollin.

Enfin, je remercie tous les membres du laboratoire et de l'école qui m'ont aidé ou que j'ai pu côtoyer. Je souhaite remercier chaleureusement Letizia, Myriam, Carlos, Gabriel, Aiman et Yousra, qui, par leur soutien et leur convivialité quotidienne ont rendu agréables ces trois années.

Sommaire

Résumé.....	4
Remerciements.....	6
Sommaire	7
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	17
Chapitre I. Introduction générale.....	1
I.1. L'importance de la rénovation énergétique des fenêtres	2
I.1.1. La rénovation énergétique	2
I.1.2. L'importance des fenêtres dans la rénovation énergétique.....	4
I.2. Actes internationaux puis nationaux pour la protection du patrimoine architectural	6
I.2.1. Au niveau international : pas de jonction entre rénovation énergétique et patrimoine architectural.....	6
I.2.2. Législation française à propos du patrimoine architectural	7
I.2.3. Cas du patrimoine architectural lyonnais	8
I.3. Caractéristiques du bâti ancien ciblé dans cette thèse.....	10
I.3.1. Caractéristiques des enveloppes du bâti lyonnais du XIX ^e siècle	10
I.3.2. La façade urbaine lyonnaise du XIX ^e siècle	11
I.3.3. Conception bioclimatique du bâti lyonnais du XIX ^e siècle	12
I.3.4. Les coûts du remplacement des fenêtres	13
I.4. Problématique et objectifs de la thèse	14
I.4.1. La double-fenêtre comme solution	14
I.4.2. Objectifs et verrous scientifiques à lever	15
I.5. Démarche scientifique employée	17
I.6. Enoncé du plan.....	19
Chapitre II. Présentation des doubles-fenêtres et retours de connaissances scientifiques	20
II.1. Présentation du dispositif	21
II.1.1. Un dispositif adaptable.....	21
II.1.2. Différentes désignations	22
II.1.3. Des similitudes physiques avec d'autres dispositifs.....	23
II.1.4. Une utilisation multi-climat	25
II.2. Analyse de l'état-de-l'art au regard des impacts multi-physiques de la double-fenêtre.....	26
II.2.1. Comportements et performances thermiques en configuration hivernale	26
II.2.1.a. Influences sur ses propriétés thermiques « classiques ».....	26
II.2.1.b. Comportement de la récupération de chaleur dans le cas d'une double-fenêtre ventilée en insufflation	28
II.2.2. Impact sur le bâtiment en période estivale	29

II.2.3. Différents modèles numériques pour mieux comprendre le comportement aéraulique	31
II.2.4. Pathologies liées à la double-fenêtre et retours d'utilisateurs	33
II.2.4.a. Problèmes liés à la condensation.....	33
II.2.4.b. Retours d'utilisateurs	35
II.2.5. Bilan de la littérature scientifique	36
II.3. Conclusion.....	41
Chapitre III. Prototypage, plateforme et protocoles expérimentaux.....	42
III.1. Dispositif de test en conditions contrôlées.....	43
III.1.1. Conception et mise en œuvre du porte-échantillon et de l'échantillon boîte chaude gardée	44
III.1.2. Chaîne de mesure et de contrôle commande.....	48
III.1.3. Conditions de test communes des protocoles expérimentaux.....	50
III.2. Plateforme expérimentale in situ	51
III.2.1. Conception et mise en œuvre des prototypes pour les tests in situ.....	52
III.2.1.a. Adaptation de la façade.....	52
III.2.1.b. Système de ventilation mécanique pour une double-fenêtre active.....	53
III.2.2. Chaîne de mesure et de contrôle commande.....	54
III.2.3. Protocole expérimental et campagnes de mesures	56
III.2.3.a. Calibration de la cellule HYBCELL	56
• Calibration de la cellule pour la campagne estivale	57
• Calibration de la cellule pour la campagne hivernale	59
III.2.3.b. Calibration des systèmes de ventilation.....	64
III.2.3.c. Protocoles et scénarios expérimentaux pour les tests in situ	71
Chapitre IV. Caractérisation expérimentale de la double-fenêtre active.....	74
IV.1. En conditions contrôlées.....	75
IV.1.1. Comportement thermique de la double-fenêtre en conditions stationnaires .75	
IV.1.1.a. Comportement dynamique des températures de soufflage	75
• Influence du débit de ventilation.....	76
• Influence de l'écart de température des caissons.....	77
• Influence de l'écart entre les fenêtres	77
IV.1.1.b. Comportement dynamique de l'effet de paroi lié à la menuiserie intérieure	78
• Influence du débit de ventilation.....	79
• Influence de l'écart de température des caissons.....	79
• Influence de l'écart entre les fenêtres	80
IV.1.2. Caractérisation des performances thermiques de la double-fenêtre active....	80
IV.1.2.a. Comportement dynamique des coefficients de transmission thermique..	82
IV.1.2.b. Comportement dynamique de l'efficacité de préchauffage d'air.....	86
IV.1.2.c. Répartition des flux de chaleur transférés	87

IV.2. En conditions in situ.....	90
IV.2.1. Comportement thermique estival.....	90
IV.2.1.a. Comportement dynamique du gradient thermique vertical dans la double-fenêtre et de l'effet de paroi froide	91
IV.2.1.b. Comportement dynamique de la température de soufflage et de la température ambiante	93
IV.2.1.c. Comportement dynamique paramétrique de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé	94
IV.2.2. Comportement thermique hivernal.....	98
IV.2.2.a. Comportement dynamique du gradient thermique vertical dans la double-fenêtre et de l'effet de paroi froide	98
IV.2.2.b. Comportement dynamique de la température de soufflage et de la puissance de chauffage.....	99
IV.2.2.c. Comportement dynamique paramétrique de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé	103
IV.3. Conclusion	105
 Chapitre V. Développement et validation d'un modèle numérique.....	 108
V.1. Structure du modèle numérique et géométrie utilisée	109
V.2. Modèle conductif multi-parois	111
V.2.1. Méthode numérique appliquée.....	111
V.2.2. Description de la méthode des différences finies en schéma implicite	113
V.2.2.a. Décomposition en série de Taylor par rapport aux variables d'espace....	113
V.2.2.b. Décomposition en série de Taylor par rapport aux variables de temps...113	
V.2.3. Application aux nœuds à l'intérieur d'un matériau	114
V.2.4. Application aux nœuds à l'interface de deux matériaux	114
V.2.5. Application aux nœuds aux limites.....	115
V.2.6. Modèle conductif des vitrages	115
V.2.7. Conditions initiales et conditions aux limites utilisées.....	116
V.2.8. Expression matricielle du système d'équations	118
V.3. Modèle thermo-aéraulique.....	120
V.3.1. Bilan d'énergie appliqué aux volumes d'air ventilés	120
V.3.2. Coefficients de transferts convectifs	121
V.3.2.a. Coefficients d'échanges convectifs intérieur et extérieur.....	121
V.3.2.b. Coefficients d'échanges convectifs au sein de la double-fenêtre	122
V.3.2.c. Coefficient d'échange convectif au sein du double vitrage	124
V.4. Modèle radiatif.....	125
V.4.1. Rayonnement par courtes longueurs d'onde (CLO).....	125
V.4.1.a. Détermination du flux direct CLO sur la vitre extérieure.....	127
V.4.1.b. Détermination du flux diffus CLO sur la vitre extérieure.....	128
V.4.1.c. Détermination du flux CLO reçu par chacune des surfaces de la double-fenêtre.....	129
V.4.1.d. Echanges radiatifs CLO avec l'environnement et la cellule HYBCELL..	130
V.4.2. Rayonnement par grandes longueurs d'onde (GLO)	131

V.4.2.a. Echanges radiatifs GLO au sein de la double-fenêtre.....	131
V.4.2.b. Echanges radiatifs GLO avec l'environnement.....	132
V.4.3. Facteurs de forme.....	133
V.5. Validation expérimentale du modèle numérique.....	134
V.5.1. Description de la méthode de validation.....	134
V.5.2. Résultats de la validation.....	136
V.5.2.a. Validation du modèle DF/SV.....	136
• Analyse des températures de surfaces et des températures d'air.....	136
• Analyse du gradient thermique.....	139
V.5.2.b. Validation du modèle DF/DV.....	141
• Analyse des températures de surfaces et des températures d'air.....	141
V.6. Conclusion.....	143
Chapitre VI. Caractérisation numérique de la double-fenêtre active.....	144
VI.1. Recherche des paramètres d'influences.....	145
VI.1.1. Panel de paramètres testés, scénarisation et valeurs choisies.....	146
VI.1.2. Grandeurs de sortie, et influence du panel de paramètre testé.....	148
VI.2. Caractérisation des sorties par régression linéaire multiple.....	150
VI.2.1. Recherche d'un modèle de régression adapté.....	150
VI.2.2. Résultats du modèle de régression linéaire multiple et analyse de ses sorties.....	151
VI.2.2.a. Résultat des coefficients de régression.....	151
VI.2.2.b. Analyses statistique et graphique des formulations trouvées.....	152
VI.3. Conclusion.....	155
Conclusions, améliorations et perspectives.....	157
Références.....	163
Annexe A. Graphiques du comportement thermique estival.....	ii
Annexe B. Graphiques du comportement thermique hivernal.....	vi
Annexe C. Résultats de la validation de DF/SV.....	xii
Annexe D. Résultats de la validation de DF/DV.....	xiv
Annexe E. Résultats des paramètres d'influences sur les grandeurs de sortie.....	xv
Annexe F. Résultats de la régression linéaire multiple.....	xix

Liste des figures

Figure I-1. Partage des régions considérées dans l'étude d'Economidou et al. [3].	2
Figure I-2. Catégories d'âge des bâtiments résidentiels en Europe selon Economidou et al. [3].	3
Figure I-3. Limites du secteur UNESCO à Lyon (en rouge) et son périmètre de protection (en vert) [22].	9
Figure I-4. Rue Victor Hugo, à Lyon. A noter la densité du bâti, la hauteur des constructions, l'effet de masque, le pourcentage d'ouverture et la relative uniformisation de l'architecture. Crédits : Nathalie Sandt.	12
Figure I-5. Double-fenêtre intérieure accolée. Orangerie du château de Versailles. Crédits : Luc Goupil.	14
Figure I-6. Double-fenêtre extérieure à guillotine à l'Hôtel de Biron. Crédits : Luc Goupil.	15
Figure I-7. Double-fenêtre du monastère de la Grande Chartreuse. Crédits : Luc Goupil.	15
Figure I-8. Photos d'une double-fenêtre dans un bâti XIX ^e siècle lyonnais. Crédits: Nathalie Sandt.	15
Figure I-9. Démarche scientifique appliquée pendant la thèse.	18
Figure II-1. Trois types d'installation de la seconde fenêtre (en cas de pose par l'intérieur).	21
Figure II-2. Différents régimes de ventilation dans une double-fenêtre [27].	22
Figure II-3. Différentes désignations des doubles-fenêtres [45].	23
Figure II-4. Dispositif de fenêtre ventilée étudié par Onur et al. [48].	24
Figure II-5. Dispositif de fenêtre amovible étudié par Etzion et Erell [49].	24
Figure II-6 – Fenêtre à double flux étudié par Gosselin et Chen [39,65].	31
Figure II-7 – Fenêtre ventilée naturellement sur le côté extérieur étudiée par Chow et al. [63].	31
Figure II-8. Triple vitrage ventilé étudié par Gloriant et al. [35] et Kim et Yang [67].	33
Figure II-9. Double-fenêtre à cadre métallique avec rupteur thermique étudiée par Sasaki [69].	35
Figure III-1. Schéma de la boîte chaude gardée.	44
Figure III-2. Photo du prototype de la BCG durant son assemblage.	46
Figure III-3. Photo du prototype de la BCG sans l'isolation latérale et supérieure.	46

Figure III-4. Photo des fenêtres extérieures en simple vitrage.	47
Figure III-5. Photo de l'un des deux exemplaires de menuiserie intérieure.	47
Figure III-6. Instrumentation de la boîte chaude gardée sur une coupe longitudinale. ...	49
Figure III-7. Plan de la cellule HYBCELL.	52
Figure III-8. Schéma de l'intérieur de la cellule.	52
Figure III-9. Mise en place des caissons en bois avec renfort au niveau des linteaux.	53
Figure III-10. Vue intérieure avant la pose de la fenêtre intérieure et de la peinture blanche.	53
Figure III-11. Détail sur le raccord menuiserie et la bavette en métal.	53
Figure III-12. Photo de la façade extérieure de la cellule expérimentale HYBCELL.	53
Figure III-13. Vue du ventilateur visible depuis la double-fenêtre.	54
Figure III-14. Vue de la section de soufflage visible depuis l'intérieur de la pièce.	54
Figure III-15. Vue de la face latérale.	54
Figure III-16. Positions des capteurs dans la double-fenêtre.	55
Figure III-17. Evolutions des températures d'air mesurées aux centres des pièces A et B.	57
Figure III-18. Evolutions des températures de globe noir mesurées aux centres des pièces A et B.	58
Figure III-19. Variations des écarts de températures d'air et de globe noir entre les pièces A et B.	58
Figure III-20. Moyennes et extrémum des répartitions horaires des écarts de températures d'air entre les pièces A et B.	58
Figure III-21. Températures d'air moyennes mesurées lors de la phase sans chauffage.	60
Figure III-22. Températures de globe noir mesurées lors de la phase sans chauffage.	60
Figure III-23. Différences de températures de globe noir mesurées lors de la phase sans chauffage.	60
Figure III-24. Températures d'air et de globe noir mesurées lors de la phase avec chauffage.	61
Figure III-25. Puissances électriques délivrées aux radiateurs lors de la phase avec chauffage.	63
Figure III-26. Relevés des concentrations en CO ₂ mesurés lors de la phase avec chauffage.	64
Figure III-27. Débits de ventilation moyennés de chaque prototype en fonction de sa tension d'alimentation pour la campagne estivale.	65

Figure III-28. Débits de ventilation moyennés de chaque prototype en fonction de sa tension d'alimentation pour la campagne hivernale.....	66
Figure III-29. Mesures de vitesse de soufflage du ventilateur #1, de vitesse du vent et du gradient de température au sein de la double-fenêtre pour une tension d'alimentation de 6 V pour le ventilateur #1 uniquement.	67
Figure III-30. Mesures de vitesse de soufflage du ventilateur #1, de vitesse du vent et du gradient de température au sein de la double-fenêtre pour une tension d'alimentation de 6 V pour les ventilateurs #1 et #2.....	68
Figure III-31. Vitesses de soufflage moyennes en fonction du gradient de température arrondi au dixième.....	69
Figure III-32. Evolution de la variation de la vitesse de soufflage et celle de la variation corrélée en fonction de la variation du gradient de température.	69
Figure IV-1. Evolutions des températures de soufflage en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.....	76
Figure IV-2. Températures des surfaces latérales et de la température de soufflage lors de chaque test.	78
Figure IV-3. Evolutions des gradients de températures entre l'air du caisson chaud et la vitre intérieure et le soubassement en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.....	79
Figure IV-4. Schéma du bilan thermique utilisé pour le calcul du coefficient de transmission thermique.....	84
Figure IV-5. Evolutions du coefficient U_{w1} en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.....	85
Figure IV-6. Evolutions du coefficient U_{w2} en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.....	86
Figure IV-7. Evolutions de l'efficacité de la récupération de chaleur en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.....	86
Figure IV-8. Décomposition du flux de chauffage traversant le prototype de la double-fenêtre sur sa limite du côté froid.....	88
Figure IV-9. Parts de $Flux_{vent}$ et $Flux_{w,ext}$ selon le débit de ventilation pour chaque configuration.	89
Figure IV-10. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 3.....	91
Figure IV-11. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 3.	93

Figure IV-12. Evolutions de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFA.	95
Figure IV-13. Evolutions de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFB.	96
Figure IV-14. Evolutions estivales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA et la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur en l'absence de rayonnement solaire.....	97
Figure IV-15. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 8.....	98
Figure IV-16. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 8.....	99
Figure IV-17. Evolutions hivernales de la température de soufflage en fonction de la différence de température intérieur/extérieur selon l'écart entre les fenêtres, le débit de ventilation en période nocturne.....	100
Figure IV-18. Evolutions hivernales de la température de soufflage en fonction de la différence de température intérieur/extérieur selon l'écart entre les fenêtres, le débit de ventilation en période nocturne.....	101
Figure IV-19. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFA.	103
Figure IV-20. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFB.	103
Figure V-1. Principe de couplage des différents modes de transferts thermiques.....	109
Figure V-2. Géométrie utilisée dans le modèle numérique.....	110
Figure V-3. Représentation des schémas explicite et implicite de la méthode des différences finies.	112
Figure V-4. Représentation de la discrétisation d'une des parois (5) à (8).....	117
Figure V-5. Schéma récapitulatif de la modélisation des échanges thermiques au sein de la double-fenêtre.	126
Figure V-6. Fréquence des oppositions de signe des gradients thermiques mesuré et simulé pour tous les tests de DF/SV.....	140
Figure A-1. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 4.....	ii
Figure A-2. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 5.....	ii

Figure A-3. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 6.....	iii
Figure A-4. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 7.....	iii
Figure A-5. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 4.....	iii
Figure A-6. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 5.....	iv
Figure A-7. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 6.....	iv
Figure A-8. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 7.....	iv
Figure A-9. Evolutions estivales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA et la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur avec un rayonnement solaire compris entre 0 et 100 W/m ²	v
Figure B-1. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 9.....	vi
Figure B-2. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 10.....	vi
Figure B-3. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 11.....	vii
Figure B-4. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 12.....	vii
Figure B-5. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 9.....	vii
Figure B-6. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 10.....	viii
Figure B-7. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 11.....	viii
Figure B-8. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 12.....	ix
Figure B-9. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur en l'absence de rayonnement solaire.....	ix
Figure B-10. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur en l'absence de rayonnement solaire.....	x

Figure B-11. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur avec un rayonnement solaire compris entre 0 et 100 W/m ²	x
Figure B-12. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur avec un rayonnement solaire compris entre 0 et 100 W/m ²	xi
Figure C-1. Allures de ST2 et ST3 du test 7.	xii
Figure C-2. Allures de ST2 et ST3 du test 8.	xii
Figure C-3. Allures des températures d'entrée et de sortie du test 3.....	xiii
Figure C-4. Allures des températures d'entrée et de sortie du test 12.....	xiii
Figure F-1. Evolutions de la température de sortie en fonction des PI pour chaque scénario.	xix
Figure F-2. Evolutions de la température d'entrée en fonction des PI pour chaque scénario.	xix
Figure F-3. Evolutions de la température de vitre extérieure en fonction des PI pour chaque scénario.....	xx
Figure F-4. Evolutions de la température du soubassement en fonction des PI pour chaque scénario.	xx
Figure F-5. Evolutions de la température de vitre intérieure en fonction des PI pour chaque scénario.....	xxi
Figure F-6. Evolutions de la température d'allège en fonction des PI pour chaque scénario.	xxi
Figure F-7. Comparaison des températures de sortie simulées (bleu) et estimées (rouge).	xxii
Figure F-8. Comparaison des températures d'entrée simulées (bleu) et estimées (rouge).	xxii
Figure F-9. Comparaison des températures de la vitre extérieure (bleu) et estimées (rouge).	xxiii
Figure F-10. Comparaison des températures du soubassement (bleu) et estimées (rouge).	xxiii
Figure F-11. Comparaison des températures de la vitre intérieure (bleu) et estimées (rouge).	xxiv
Figure F-12. Comparaison des températures de l'allège extérieure (bleu) et estimées (rouge).	xxiv

Liste des tableaux

Tableau I-1. Extrait de l'arrêté du 22 mars 2017 relatif aux performances thermiques pour la rénovation d'un élément vitrée [6].	4
Tableau II-1. Récapitulatif des articles scientifiques sur les doubles-fenêtres ou fenêtres ventilées*.....	40
Tableau III-1. Propriété des matériaux du prototype de double-fenêtre.....	47
Tableau III-2. Caractéristiques métrologiques des capteurs utilisés pour les tests en conditions contrôlées.....	49
Tableau III-3. Conditions des tests menés en conditions contrôlées.....	50
Tableau III-4. Caractéristiques métrologiques des capteurs utilisés dans la cellule HYBCELL.....	56
Tableau III-5. Consommations énergétiques des radiateurs électriques lors de la phase avec chauffage.....	62
Tableau III-6. Taux de renouvellement d'air calculés lors de la phase avec chauffage. ...	64
Tableau III-7. Caractéristiques métrologiques du ballomètre FlowFinder.....	65
Tableau III-8. Débits mesurés avec le FlowFinder pour plusieurs tensions d'alimentation et pour le test en BCG.....	71
Tableau III-9. Scénario des débits de ventilation pour chaque campagne expérimentale.	72
Tableau III-10. Conditions des tests in situ lors de la campagne expérimentale d'été.....	72
Tableau III-11. Conditions des tests in situ lors de la campagne expérimentale d'hiver.	73
Tableau IV-1. Fréquences des refroidissements pour chaque test en fonction des conditions de test.....	92
Tableau IV-2. Consommations énergétiques surfaciques de chauffage de chaque pièce lors des tests hivernaux.....	101
Tableau IV-3. Consommations énergétiques surfaciques et par degré de chauffage de chaque pièce en période nocturne lors des tests hivernaux.....	102
Tableau V-1. Composantes des matrices du modèle conductif des parois opaques.....	118
Tableau V-2. Composantes des matrices du modèle conductif des parois opaques.....	119
Tableau V-3. Résultats de la validation statistique de DF/SV.....	137
Tableau V-4. Moyennes et écarts-types des différences entre les gradients thermiques mesuré et simulé pour tous les tests de DF/SV.....	139

Tableau VI-1. Liste des paramètres testés, leurs plages de valeurs et leurs valeurs de référence (en gras) en fonction des différents scénarios.	147
Tableau VI-2. Synthèse des PI pour chaque sortie.	150
Tableau VI-3. Coefficients de corrélation r entre les PI.....	151
Tableau VI-4. Résultats statistiques de coefficients de régression trouvés.	152
Tableau D-1. Résultats de la validation statistique de DF/DV.	xiv
Tableau E-1. Résultats des IC pour les scénarios 1.	xv
Tableau E-2. Résultats des IC pour les scénarios 2.	xvi
Tableau E-3. Résultats des IC pour les scénarios 3.	xvii
Tableau E-4. Résultats des IC pour les scénarios 4.	xviii

Chapitre I. Introduction générale

I.1. L'importance de la rénovation énergétique des fenêtres

I.1.1. La rénovation énergétique

La loi française de transition énergétique pour la croissance verte cible une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40% pour 2030 et de 75% pour 2050 (par rapport aux émissions de 1990) [1]. Elle vise aussi à diminuer de 20% la consommation d'énergie finale pour 2030 et de moitié pour 2050 (basée sur la consommation de 2012). En 2017, le secteur du bâtiment (résidentiel + tertiaire) représentait 23% des émissions directes de CO₂ et 42% de la consommation d'énergie française [2]. Par conséquent, ce secteur constitue l'un des plus importants leviers pour atteindre ces objectifs de la transition énergétique.

Plusieurs mesures ont été mises en place afin d'améliorer le bilan énergétique des bâtiments neufs au travers notamment des différentes réglementations thermiques. Cependant, les constructions neuves ne représentent qu'une faible part du parc de bâtiments. En effet, selon une étude d'Economidou et al. de 2011 [3], la part des bâtiments résidentiels construits entre 1991 et 2010 s'élève à 19% du parc entier des pays d'Europe du nord et d'ouest dont la France. Les bâtiments antérieurs à 1960 représentent quant à eux 42%. Dans les autres zones européennes dressées par Economidou et al., les bâtiments construits avant 1960 représentent entre 35 et 42% (cf. Figure I-1 et Figure I-2).

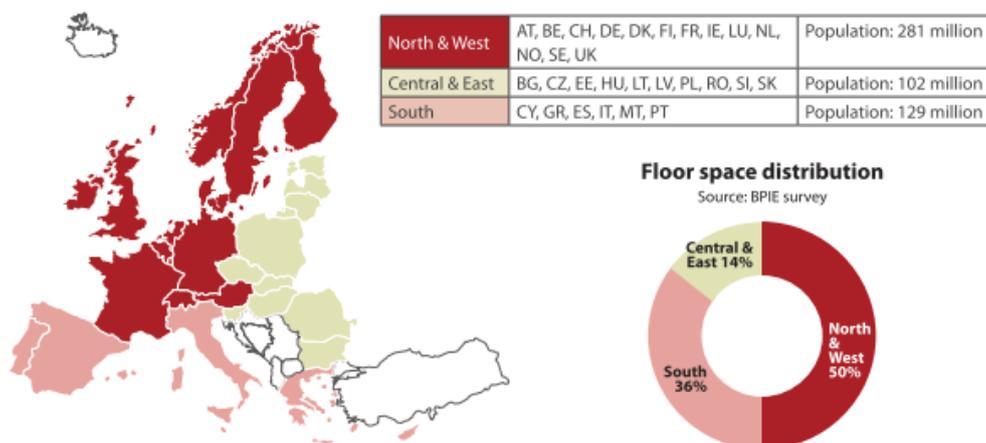


Figure I-1. Partage des régions considérées dans l'étude d'Economidou et al. [3].

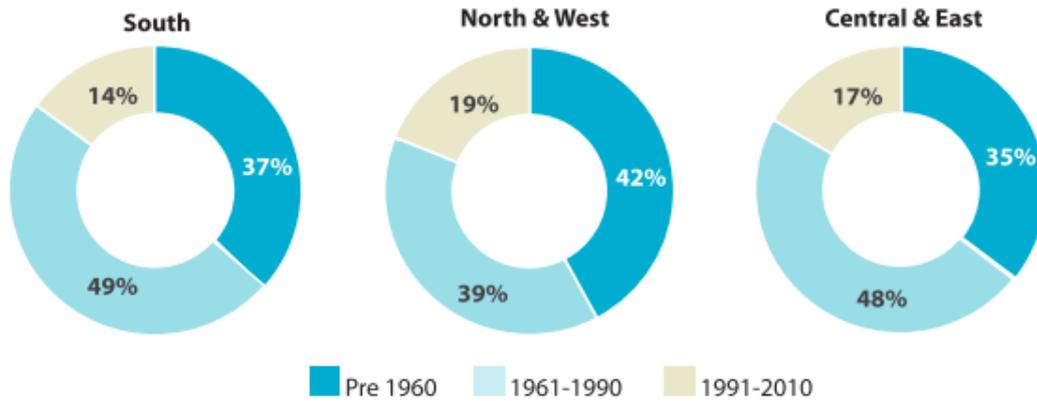


Figure I-2. Catégories d'âge des bâtiments résidentiels en Europe selon Economidou et al. [3].

Ces données varient selon que l'on considère un parc urbain ou rural. Un recensement effectué sur le parc de bâtiments français montre que pour les communes de plus de 100 000 habitants, 30% des bâtiments sont antérieurs à 1915 et 65% antérieurs à 1967 [4].

Depuis le 13 juin 2008, la loi prévoit aussi des exigences énergétiques et environnementales pour les bâtiments existants. En cas de rénovation globale et sous certaines conditions définies dans l'article R. 131-26 du Code de la construction et de l'habitation [5], le bâtiment doit satisfaire à un objectif de performance énergétique. Dans les cas de rénovation d'éléments du bâtiment, ces derniers doivent également satisfaire des critères de performances thermiques minimales qui ont été fixés à l'origine par l'arrêté du 3 mai 2007 et redéfinis dans l'arrêté du 22 mars 2017 [6]. C'est depuis ce dernier arrêté qu'apparaît une exigence de performance pour les doubles-fenêtres. Comme le montre le Tableau I-1, un coefficient de transmission surfacique U_w maximal de $1,9 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, déterminé conformément aux règles Th-Bât, s'applique aux doubles-fenêtres.

Type de paroi vitrée	Performance thermique
Fenêtres de surface supérieure à 0,5 m ² , portes fenêtres, doubles-fenêtres , façade rideaux	$U_w \leq 1,9 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Porte d'entrée de maison individuelle donnant sur l'extérieur	$U_d \leq 2 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Verrière	$U_{cw} \leq 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Véranda	$U_{véranda} \leq 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

Tableau I-1. Extrait de l'arrêté du 22 mars 2017 relatif aux performances thermiques pour la rénovation d'un élément vitrée [6].

Ces évolutions législatives et réglementaires traduisent une volonté de miser sur la rénovation énergétique pour atteindre les objectifs de la transition énergétique. C'est ainsi que la rénovation énergétique des bâtiments est devenue une priorité nationale et que sa massification est entreprise aussi bien pour les logements que pour les bâtiments tertiaires. Ainsi, le Plan rénovation énergétique des bâtiments [7], vise notamment à :

- rénover 500 000 logements par an,
- réduire la consommation d'énergie finale de 15% d'ici 2023,
- rénover tous les bâtiments privés dont la consommation d'énergie primaire est actuellement supérieure à 330 kWh/(m².an) d'ici 2025,
- réduire la consommation énergétique finale des bâtiments de 28% d'ici 2030,
- rénover l'ensemble du parc de bâtiments pour atteindre une consommation d'énergie primaire inférieure ou égale à 80 kWh/(m².an) modulée selon la zone climatique et l'altitude d'ici 2050.

I.1.2. L'importance des fenêtres dans la rénovation énergétique

Malgré des climats avec des hivers doux, les consommations d'énergie des pays du sud de l'Europe tels que le Portugal et l'Italie restent élevées [3]. Une part importante des déperditions thermiques a lieu au niveau des fenêtres. Par exemple, pour un bâtiment de deux étages avec 30% de sa façade composée de fenêtre, les pertes thermiques de

l'enveloppe provenant de ces menuiseries peuvent atteindre 60% [8]. Ces pertes baissent de 45% si la surface des ouvrants est réduite de 20%.

Ces sources de déperditions thermiques que sont les fenêtres deviennent aussi des causes de surchauffe en saison chaude. Or, l'utilisation récurrente de système d'air conditionné, mêlée à l'augmentation des températures extérieures, va rendre la consommation énergétique des bâtiments de plus en plus dépendante de celle de la climatisation.

Cependant, étant donnés les chiffres liés à l'âge des bâtiments français présentés précédemment, ce besoin et ce projet de rénover massivement et rapidement le parc de bâtiments existants, et donc plus particulièrement les fenêtres, peut soulever des problématiques vis-à-vis du patrimoine architectural.

I.2. Actes internationaux puis nationaux pour la protection du patrimoine architectural

L'efficacité énergétique et le confort thermique dans les bâtiments historiques ont gagné en importance ces dernières années, comme l'attestent plusieurs projets de recherche et initiatives entreprises [9]. Différentes méthodes et approches ont été utilisées démontrant les difficultés à conserver la valeur patrimoniale des bâtiments historiques tout en améliorant leur efficacité énergétique [10]. Une de ces difficultés est de considérer le bâtiment et sa façade comme appartenant à un paysage historique urbain. Afin d'aider à la reconnaissance et à la préservation de l'héritage architectural, plusieurs conférences se sont tenues et diverses conventions et textes réglementaires ont été rédigés.

I.2.1. Au niveau international : pas de jonction entre rénovation énergétique et patrimoine architectural

Sur le plan international, la Convention de l'UNESCO de 1972, concernant la protection de l'héritage culturel mondial et naturel, définit les contours de l'héritage culturel. Sont inclus notamment dans cet héritage les bâtiments qui, par leur homogénéité ou leur position dans le paysage ont une valeur universelle d'un point de vue historique, artistique ou scientifique. Cette convention renvoie à chacun de ses signataires la responsabilité de l'identification et la définition de son héritage. Les signataires s'engagent également à mettre en place les moyens nécessaires à la protection et à la conservation de ce patrimoine.

Depuis, plusieurs conférences ont eu lieu sur le sujet de la préservation et de la gestion de l'héritage. La convention pour la sauvegarde du patrimoine architectural de l'Europe signée en 1985 annonce les principes de conservation et reprend les mêmes objectifs que la convention de l'UNESCO [11].

Le 10 novembre 2011, à la conférence générale de l'UNESCO, a été adoptée la Recommandation sur le paysage urbain historique (HUL). Ce dernier se définit comme *« un territoire urbain conçu comme la résultante d'une stratification historique de valeurs et d'attributs culturels et naturels, dépassant les notions de « centre historique » ou d'« ensemble historique » pour inclure le contexte urbain plus large ainsi que son*

environnement géographique.» [12,13]. Le HUL est une approche « *basée sur la reconnaissance et l'identification de superpositions et d'interconnexions naturelles ou culturelles, tangibles ou non, internationales ou locales* » [14]. Ainsi dans chaque ville, les bâtiments, les rues et les façades font partie d'un ensemble qui définit les différentes valeurs de ce paysage urbain. Cela inclut l'esthétisme, l'identité culturelle et la notion d'héritage. L'attention au paysage urbain requiert une reconnaissance de la ville conduisant à reconnaître la complexité de la morphologie urbaine [15].

Malgré ces dispositions, la question de la rénovation des bâtiments historiques n'a pas encore été clarifiée. En effet, Mazzarella dresse un bilan de ces différents textes et législations concernant la conservation des héritages architecturaux [16]. Tout comme Litti et al. [17], il en conclut qu'il y a un manque d'homogénéité sur ces questions ne serait-ce qu'au niveau européen. Le fait de laisser à chaque pays le soin de préserver son héritage entraîne des différences de traitement. En effet, aucun traité sur la rénovation énergétique des bâtiments historiques n'a été ratifié par l'UE. La Directive du parlement européen et du conseil sur la performance énergétique des bâtiments du 19 mai 2010 [18] ou encore la Directive du parlement européen et du conseil relative à l'efficacité énergétique du 25 octobre 2012 [19], laissent clairement le choix aux états membres de ne pas fixer ou de ne pas appliquer les exigences contenues dans ces textes pour les bâtiments historiques au travers respectivement des articles 4.2.a et 5.2.a. La Directive du parlement européen et du conseil du 30 mai 2018 modifiant les deux directives susmentionnées ne comprennent pas de modification pour ces deux articles [20]. De plus, Mazzarella puis Litti et al. Ont mis en avant l'absence de différenciation entre les bâtiments historiques et les bâtiments contemporains dans les réglementations énergétiques. A ce sujet, des protocoles de solutions de rénovation énergétique adaptées aux bâtiments historiques manquent.

I.2.2. Législation française à propos du patrimoine architectural

En France, les textes législatifs se trouvent dans le Code du patrimoine. Il prévoit notamment le classement des bâtiments faisant partie du patrimoine ainsi que la procédure pour leur inscription. Y sont stipulés les droits et devoirs des propriétaires de bâtiments classés. Plus précisément, la modification d'aspect d'une façade (dont l'intervention sur les fenêtres) relève de deux types de réglementation [21] :

- la réglementation d'ordre privé : le changement de fenêtre devra être fait en conformité avec le règlement de copropriété notamment en ce qui concerne le maintien de l'harmonie de l'immeuble.
- les réglementations d'ordre public, le Plan local d'urbanisme (PLU) et les réglementations patrimoniales : toute modification de façade nécessite une demande d'autorisation de travaux qui sera déposée en mairie après accord de la copropriété.

Cette autorisation dépend de plusieurs réglementations :

- le PLU définit les règles générales d'urbanisme selon les zones, en général, dans l'article 11.
- les règles architecturales et patrimoniales sont fondées sur la loi du 31 décembre 1913 et définies par de nombreux textes :
 - o la définition du périmètre de 500 m aux abords des monuments historiques (25 février 1943),
 - o la loi du 4 août 1962 qui crée la notion de secteur sauvegardé,
 - o la loi de décentralisation du 7 janvier 1983 qui crée les Zones de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager (ZPPAUP) remplacée par les Aires de mise en Valeur de l'Architecture et du Patrimoine (AVAP) par la loi Grenelle II du 12 juillet 2010.
- la loi LCAP qui depuis le 1^{er} avril 2017 définit le régime de travaux applicables aux immeubles situés dans le périmètre délimité des abords de monuments historiques et dans celui des sites patrimoniaux remarquables.

I.2.3. Cas du patrimoine architectural lyonnais

Environ 60% de la superficie de Lyon est comprise dans des secteurs dans lesquels l'avis de l'Architecte des Bâtiments de France est requis car appartenant au patrimoine national [21]. Le débordement sur le domaine public est soumis au règlement de voirie du Grand Lyon. Le centre-ville, les pentes de la Croix Rousse et le vieux Lyon font l'objet de protections architecturales et urbaines et en particulier de protections liées au classement de ces quartiers au patrimoine mondial par l'UNESCO en 1998 ou à la définition de

ZPPAUP. L'ampleur du territoire couvert par la convention de l'UNESCO est représentée en Figure I-3. Il faut y ajouter les périmètres de protection existant autour des monuments historiques de la ville.

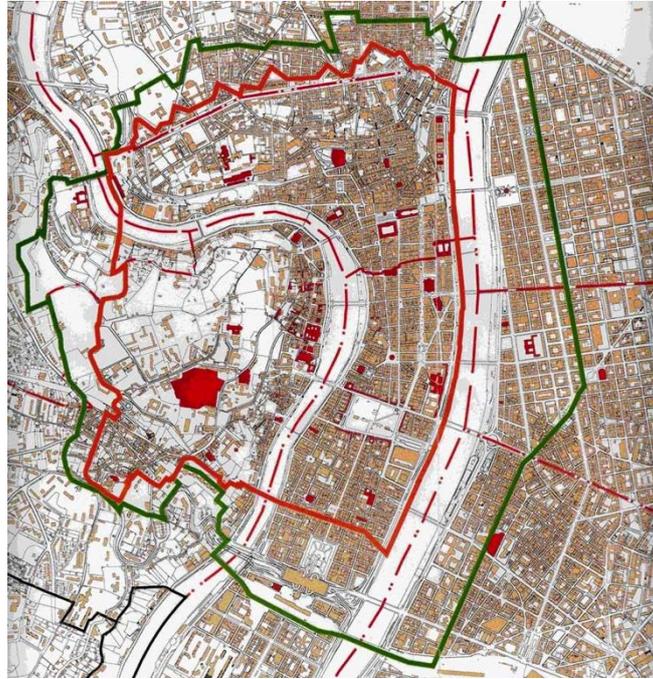


Figure I-3. Limites du secteur UNESCO à Lyon (en rouge) et son périmètre de protection (en vert) [22].

I.3. Caractéristiques du bâti ancien ciblé dans cette thèse

Le contexte architectural nécessite de considérer les caractéristiques du bâti ancien. Cela ne concerne pas seulement les fenêtres et les menuiseries mais aussi les parois opaques ainsi que le comportement général du bâtiment. En effet, chaque composant va influencer les autres. De plus, la connaissance du comportement des bâtiments historiques permet de définir le rôle des fenêtres dans ces types de construction. De cette manière cela permet aussi de prévoir quelques impacts des doubles-fenêtres sur le reste du bâtiment et sur l'ambiance intérieure. Ces points sont développés dans les sections suivantes.

I.3.1. Caractéristiques des enveloppes du bâti lyonnais du XIX^e siècle

La composition des murs anciens a fait l'objet de plusieurs études à travers l'Europe. Par exemple, un travail de classification des structures et des maçonneries dans les différentes régions d'Italie a été réalisé par Binda et al. [23]. Les parts de mortier, de pierre et d'air, qui sont les trois composants principaux des bâtiments étudiés, sont fournies. En Grèce, on peut trouver des constructions vernaculaires composées de terre, d'eau et d'adobe [24]. En France suivant les régions la pierre, la brique, le bois et l'argile sont les matériaux les plus utilisés dans les bâtiments anciens [25].

A Lyon, la majorité de la zone présentée en Figure I-3 est composée de bâtiments datant du XIX^e siècle. C'est donc la typologie des bâtiments de cette époque qui a été ciblée dans ce travail de recherche. Cette époque est marquée par l'industrialisation de taille de la pierre, l'évolution des modes de transport ainsi que l'explosion de la demande qui modifient radicalement les modes de construction et l'organisation des chantiers [21]. On assiste à une rationalisation des tâches, à une forme de standardisation des éléments et des plans et à la production en séries pour construire plus et plus économique tout en restant solide. C'est pour cela que de nombreux bâtiments du XIX^e siècle présentent des élévations soit en pierre de taille soit en moellons avec enduits de façades et décors rapportés.

La pierre lyonnaise, considérée d'excellente qualité, est à l'époque utilisée de façon massive, en blocage ou sous forme standardisée ou monolithique de très grandes

dimensions qui peuvent autoriser de très grandes portées en un seul bloc. Cet usage de la pierre massive dans les structures se justifie par son apport d'inertie thermique et permet de constituer des trumeaux (partie d'un mur compris entre deux ouvertures) réduits libérant ainsi de grandes surfaces vitrées. En revanche, ils forment des ponts thermiques au niveau des encadrements de fenêtres. Ainsi pour diminuer l'effet de paroi froide, des lambris et des plâtres ont été utilisés.

I.3.2. La façade urbaine lyonnaise du XIX^e siècle

La composition de la façade urbaine du XIX^e siècle résulte de la politique de spéculation qui apparaît dans la deuxième moitié du XVIII^e siècle. Celle-ci impose d'une part le développement de réglementation visant à cadrer les largeurs de rue, les alignements, les ouvertures, la qualité des constructions et d'autre part une rationalisation du système de production (préfabrication, optimisation) pour construire plus et plus vite, qui contribue fortement à l'uniformisation du bâti et de la composition de la façade [21].

Le bâti lyonnais se caractérise par une forte densité d'immeubles de grande hauteur, établis sur des parcelles étriquées dictée par les contraintes du site, le long de rues très étroites. Au milieu du XIX^{ème} siècle, les immeubles du centre lyonnais pouvaient atteindre 7 à 8 étages soit 26 m de haut [21].

Pour favoriser l'éclairage naturel depuis les rues étroites, les élévations présentent un pourcentage important de vitrage. Le nombre ainsi que les proportions des fenêtres sont remarquables. Elles peuvent atteindre 3 m de haut pour 1,60 m de large. De nombreuses façades du XIX^{ème} siècle comportent environ 50% de vitrages. La façade en photo sur la Figure I-4 illustre bien les particularités des façades du XIX^{ème} siècle.



Figure I-4. Rue Victor Hugo, à Lyon. A noter la densité du bâti, la hauteur des constructions, l'effet de masque, le pourcentage d'ouverture et la relative uniformisation de l'architecture. Crédits : Nathalie Sandt.

I.3.3. Conception bioclimatique du bâti lyonnais du XIX^e siècle

Bien que les techniques n'étaient pas aussi développées qu'aujourd'hui, les notions de santé et d'hygiène étaient tout de même considérées. Ainsi, le bâti XIX^e est conçu suivant des dispositions judicieuses favorisant la ventilation naturelle, le chauffage et l'accès à la lumière et au soleil pour les pièces de vie et une meilleure gestion des pièces de services regroupées autour de courettes de ventilation placées dans les parties les moins bien exposées.

Les appartements étaient le plus souvent traversant. Cela permet de créer un flux d'air efficace pour renouveler et/ou rafraîchir l'air du logement. Enfin, par leur disposition, les arrière-cuisines, les caves, celliers, combles, etc. constituaient des espaces tampons, qui sur le plan thermique, offraient des zones tempérées limitant les transferts de chaleur avec l'extérieur.

Ces dispositions conçues en fonction des échanges naturels avec l'environnement et les propriétés hygrothermiques du bâti restent très sensibles aux modifications du contexte immédiat (régulation des apports solaires, transfert d'humidité, gestion de la ventilation naturelle). Une modification a priori anodine d'un élément environnant du bâtiment peut entraîner des effets importants sur le comportement thermique du bâtiment.

I.3.4. Les coûts du remplacement des fenêtres

S'agissant des menuiseries, elles participent à l'esthétisme de la rue et à l'esthétisme intérieur. Leur rôle dans le bâti est central puisqu'elles font le lien entre les deux environnements. Elles revêtent différentes fonctions comme l'éclairage, la vue et la ventilation. C'est pourquoi le remplacement des anciennes menuiseries a un coût qui n'est pas toujours financier et qui peut, comme le décrivent Sedovic et Gotthelf [26], être lié à :

- l'authenticité car aucune fenêtre neuve ne peut remplacer une fenêtre historique peu importe le niveau d'imitation,
- l'esthétisme, porté sur certains éléments des fenêtres et qui, pour des raisons économiques peuvent disparaître lors d'un remplacement (ornements, poignée décorée, ...),
- la préservation d'un savoir-faire artisanal.

Ces coûts constituent des inconvénients pour les techniques de remplacement usuelles, que l'on ne peut quantifier et qui revêtent autant d'importance que des critères quantifiables tels que la performance énergétique ou le retour sur investissement. Ceci souligne l'importance de considérer l'ensemble du bâtiment comme un groupe de sous-systèmes interagissant entre eux et constituant la complexité et la dynamique du bâti historique [25].

I.4. Problématique et objectifs de la thèse

I.4.1. La double-fenêtre comme solution

Ce double contexte, énergétique et patrimonial, amène une double problématique qui est celle de la rénovation du bâti historique et de la nécessité de le préserver. La double-fenêtre est une solution de rénovation des fenêtres qui répond à ces deux exigences. En effet, ce système est basé sur l'ajout d'une seconde fenêtre que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur d'une fenêtre existante. A noter que ce système se différencie des doubles vitrages puisqu'ici il s'agit d'ajouter une fenêtre entière (dormant et ouvrant).

Les doubles-fenêtres ne sont pas un dispositif nouveau. En effet, utilisées depuis plusieurs siècles, on en retrouve par exemple au monastère de la Grande Chartreuse à Saint-Pierre-de-Chartreuse (Isère) datant du XVII^e siècle (cf. Figure I-7). Il s'agissait alors d'un système que l'on pouvait monter en hiver et démonter en été. On en trouve aussi dans des bâtiments luxueux d'époque tels qu'à l'Orangerie du château de Versailles (XVII^e siècle) (cf. Figure I-5) ou à l'Hôtel de Biron à Paris (XVIII^e siècle) (cf. Figure I-6). A l'origine, il s'agissait d'une solution isolante pour faire face aux conditions hivernales. C'est pourquoi ce système était très répandu dans les pays scandinaves ou au Canada. Mais il est courant de rencontrer des cas de pose de double-fenêtre dans les rues historiques de ville comme Lyon, comme en témoignent les photos d'une double-fenêtre dans un bâti lyonnais du XIX^e siècle en Figure I-8.



Figure I-5. Double-fenêtre intérieure accolée. Orangerie du château de Versailles. Crédits : Luc Goupil.



Figure I-6. Double-fenêtre extérieure à guillotine à l'Hôtel de Biron. Crédits : Luc Goupil.



Figure I-7. Double-fenêtre du monastère de la Grande Chartreuse. Crédits : Luc Goupil.



Figure I-8. Photos d'une double-fenêtre dans un bâti XIX^e siècle lyonnais. Crédits: Nathalie Sandt.

I.4.2. Objectifs et verrous scientifiques à lever

Le système étudié dans ce travail de thèse est une double-fenêtre par l'intérieur, adaptée aux bâtis historiques du XIX^e siècle, ventilée mécaniquement en insufflation. Il s'agit d'un ensemble innovant que ce soit par son domaine d'application ou ses propriétés techniques.

Comme expliqué en I.1.1, la double-fenêtre « classique », c'est-à-dire fermée, est considérée depuis peu dans les textes règlementaires. A l'heure actuelle, il n'existe ni de caractérisation ni d'outil pour caractériser la double-fenêtre innovante étudiée dans ce

rapport. Par conséquent, ce travail de thèse vise à caractériser son comportement thermo-aéraulique et ses performances thermiques afin de dégager des recommandations quant à sa conception et son utilisation.

Ces objectifs et ce travail de thèse s'inscrivent dans le projet REACTIVE soutenu par l'ADEME. Son but principal est l'élaboration de solutions pour la réhabilitation des bâtiments anciens, en particulier ceux appartenant au patrimoine architectural. Ces solutions sont basées sur le principe de la double-fenêtre ventilée étudiée dans cette thèse. Le projet se base sur une méthode systémique en intégrant différents partenaires et sur des études numériques et expérimentales à différentes échelles.

I.5. Démarche scientifique employée

Pour atteindre cet objectif de caractérisation, une démarche scientifique comprenant plusieurs tâches a été entreprise. Ces tâches sont :

- l'exécution de plusieurs campagnes de caractérisations expérimentales afin de collecter des données sur le comportement thermique du prototype. Réalisés à plusieurs échelles (composant, bâtiment) sur deux périodes de l'année (été et hiver), ces tests ont permis la caractérisation de la double-fenêtre selon un grand panel de paramétrage et d'utilisation.
- la réalisation d'un modèle numérique simulant le comportement thermique à l'échelle du composant. Ce modèle numérique a eu pour finalité d'être précis, rapide, mais surtout de considérer l'ensemble des transferts thermiques et aérauliques sur l'ensemble des parois constituant le dispositif. Ce modèle numérique est basé en partie sur des modèles déjà utilisés au laboratoire et sur des hypothèses originales liées soit aux caractéristiques du prototype soit à l'environnement des tests expérimentaux. Le modèle de double-fenêtre a été validé grâce aux nombreuses données expérimentales collectées.
- la caractérisation numérique des performances énergétiques. Ce travail, basé sur une méthode de régression, a été rendu possible grâce à la justesse du modèle numérique. Ce travail comprend l'établissement d'une liste de facteurs environnants influant les performances thermiques et la quantification de cette influence conduisant à une caractérisation paramétrique des performances thermiques de la double-fenêtre ventilée.

La démarche scientifique employée est schématisée en Figure I-9. Ce schéma permet de visualiser les connexions entre l'approche expérimentale et les tâches numériques donnant au lieu aux deux caractérisations de la double-fenêtre active.

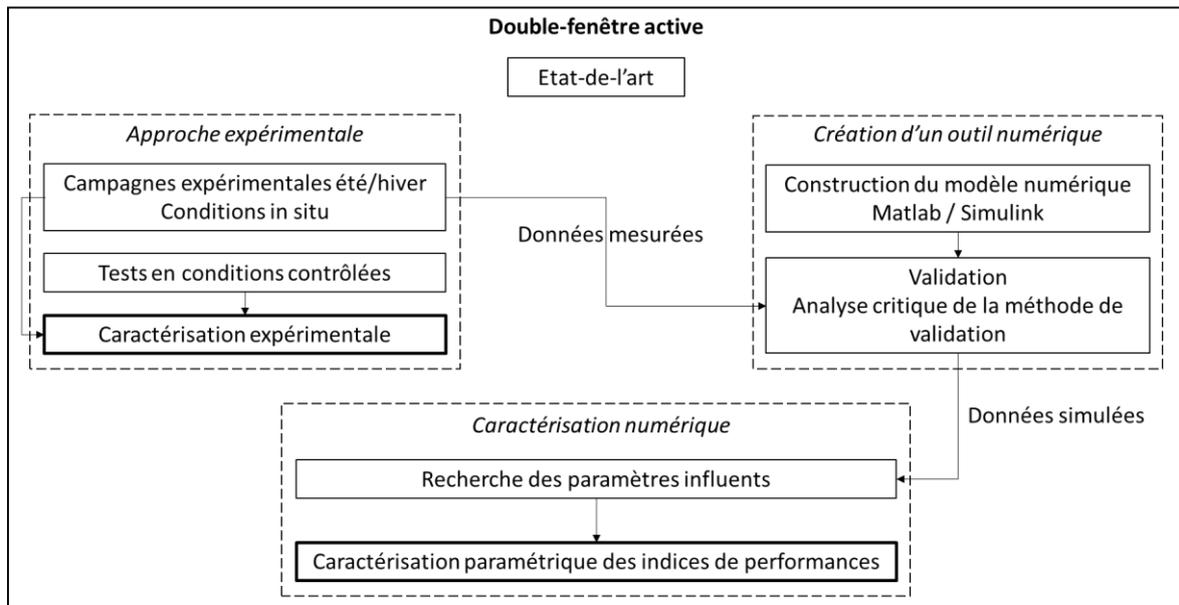


Figure I-9. Démarche scientifique appliquée pendant la thèse.

I.6. Enoncé du plan

Ce document est composé de six chapitres. Le premier chapitre a présenté l'importance de la rénovation énergétique des fenêtres, les actes internationaux et nationaux pour la protection du patrimoine architectural ainsi que les caractéristiques du bâti ancien ciblé dans cette thèse. Cela a mis en évidence la problématique de la rénovation du patrimoine architectural, nous conduisant à présenter la double-fenêtre comme solution et à évoquer les verrous scientifiques soulevés par ce travail de thèse.

Le deuxième chapitre présente les doubles-fenêtres puis effectue une revue de la littérature scientifique. Ce bilan multi-physique des connaissances positionne le dispositif étudié dans le paysage scientifique et par extension met en évidence l'intérêt et les originalités de ce travail.

Le troisième chapitre détaille l'approche expérimentale. Il y est décrit le prototypage, l'aménagement des deux plateformes expérimentales, leur calibration ainsi que les différents protocoles développés.

Le quatrième chapitre relate la caractérisation, en conditions contrôlées et in situ, de la double-fenêtre étudiée, grâce aux nombreuses données expérimentales récoltées offrant ainsi une compréhension de son comportement thermo-aéraulique et de ses performances dynamiques.

Le cinquième chapitre détaille le développement d'un modèle numérique et de sa validation. Le modèle comprend un volet conduction, un volet radiatif et un volet thermo-aéraulique, couplés les uns aux autres. La méthode de validation, mise au point spécialement pour ce travail, et ses résultats sont présentés et critiqués.

Pour terminer, le sixième chapitre expose le travail effectué à l'aide du modèle numérique, afin de caractériser paramétriquement les performances dynamiques de la double-fenêtre. Dans un premier temps, la recherche des paramètres les plus influents a été effectuée, pour dans un second temps, exprimer les performances thermiques en fonction de ces paramètres à l'aide d'une méthode de régression.

Ce travail de thèse s'achève par les conclusions et les améliorations possibles puis ouvre la voie à la poursuite des travaux sur le sujet.

Chapitre II. Présentation des doubles-fenêtres et retours de connaissances scientifiques

Les doubles-fenêtres sont des dispositifs pouvant s'adapter à beaucoup de typologies de façade et différents besoins énergétiques. C'est pour cette raison que l'on peut leur attribuer différentes dénominations que l'on retrouve dans la littérature scientifique. L'état-de-l'art de cette dernière met en avant ses différentes propriétés et performances. Ce chapitre permet de montrer la singularité et les partis pris dans les orientations de ce travail de thèse.

II.1. Présentation du dispositif

II.1.1. Un dispositif adaptable

L'ajout de la deuxième fenêtre offre de nombreux types d'installation et de dispositions possibles permettant d'adapter la solution double-fenêtre selon le cas de rénovation. L'ajout peut se faire côté intérieur ou extérieur de la fenêtre existante. L'ajout côté intérieur est le plus souvent mis en place et étudié car étant moins contraignant et n'impactant pas l'architecture de la façade. Ensuite, la seconde fenêtre peut être installée de trois différentes manières (cf. Figure II-1) :

- sur la même allège (a),
- sur une tablette aménagée pour l'occasion en cas d'allège trop petite (b),
- sur le plancher (c).

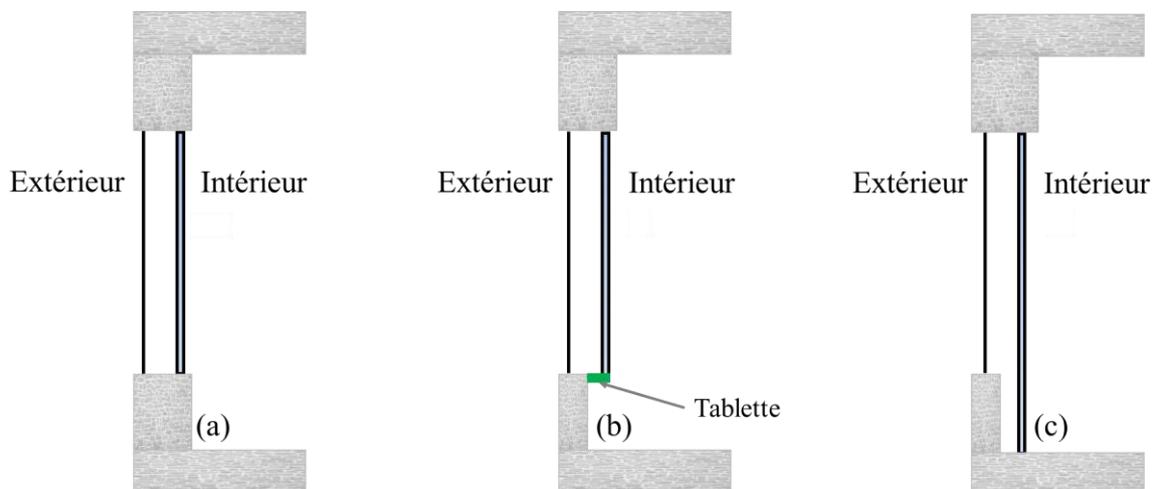


Figure II-1. Trois types d'installation de la seconde fenêtre (en cas de pose par l'intérieur).

Il est également possible de faire varier les types et caractéristiques des vitrages (simple, double, peu émissif, ...) pour obtenir des performances et effets différents. Enfin, il est possible d'utiliser la double-fenêtre comme système fermé ou ouvert à une ventilation. Cette ventilation peut se faire suivant dix modes différents illustrés sur la Figure II-2 où l'ambiance intérieure est considérée à droite et l'ambiance extérieure à gauche [27]. Dans les modes (1), (2), (3) et (4) la circulation de l'air ne se fait que d'un seul côté. Dans les modes (5), (6) la ventilation est traversante et en extraction d'air alors que dans les modes (7) et (8) la ventilation fonctionne en insufflation d'air. Ce dernier mode permet à l'air circulant dans la cavité de récupérer la chaleur transmise à travers la fenêtre. Le mode (9) correspond à un cas de double circulation dont les sens d'écoulement dépendent fortement des conditions ambiantes. Enfin, le mode (10) correspond à une double-fenêtre fermée sans ventilation.

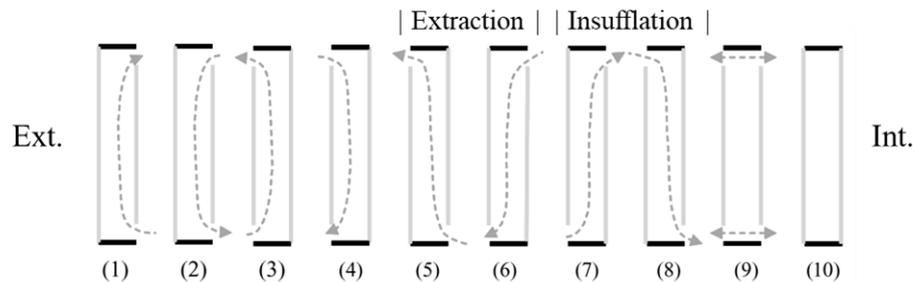


Figure II-2. Différents régimes de ventilation dans une double-fenêtre [27].

II.1.2. Différentes désignations

La grande adaptabilité de ce dispositif a donné lieu à plusieurs dénominations. On peut les classer en deux catégories : les doubles-fenêtres fermées et les doubles-fenêtres ventilées. Les dispositifs fermés se trouvent aussi sous les désignations « storm window » ou « secondary glazing » par exemple [28–31]. Pour les configurations ventilées on retrouve les désignations « supply air window » ([32–37] par exemple) et « air flow window » ([38–40] par exemple) quand le flux d'air traverse la double-fenêtre et « ventilated window » ou bien « ventilated double window » lorsque la ventilation n'est pas traversante ([41–44] par exemple). L'ensemble des différentes désignations trouvées dans la littérature de 1960 à 2015 sont regroupées dans la Figure II-3.

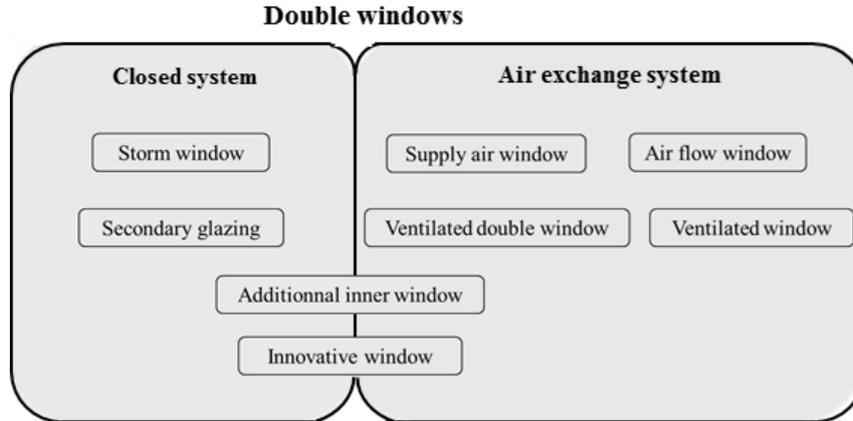


Figure II-3. Différentes désignations des doubles-fenêtres [45].

II.1.3. Des similitudes physiques avec d'autres dispositifs

En termes de physique on peut faire le parallèle avec les façades double-peau transparentes. Tout comme les doubles-fenêtres, ces façades consistent en deux surfaces transparentes séparées par une zone tampon entraînant ainsi des similarités dans le comportement thermo-aéraulique. La différence se fait principalement au niveau de la taille du dispositif. Les façades sont beaucoup plus grandes évidemment ce qui a pour effet de diminuer l'influence des parois latérales. A propos des façades ventilées, Quesada et al. ont effectué un état-de-l'art détaillé des dix dernières années [46]. Ils notent que ces dispositifs ont gagné une reconnaissance en tant qu'élément architectural dans les bâtiments de bureaux et qu'au-delà de l'esthétisme, ces façades ventilées permettent de réduire la demande en chauffage en hiver et la demande en climatisation en été. A l'instar des doubles-fenêtres, une attention spéciale est donnée à l'étude des systèmes d'occultations intégrés dans la zone tampon dans le but de réduire les apports solaires du bâtiment.

Un autre dispositif contenant des similarités est désigné comme une fenêtre ventilée a été étudié par Ismail et al. [47] ainsi qu'Onur et al [48]. Ce dispositif, montré en Figure II-4 diffère des doubles-fenêtres de par l'épaisseur de la cavité d'air et du fait qu'il consiste uniquement en deux panneaux de verre, le rapprochant plutôt d'un double vitrage.

En outre, un système de fenêtre avec vitre amovible a été étudié par Etzion et Erell [49] montré en Figure II-5. Ils ont créé un cadre rotatif à deux vitrages : l'un transparent

et l'autre absorbant très proche du premier. L'intérêt est de pouvoir utiliser ce système avec un mode estival et un mode hivernal. En été, le vitrage absorbant se positionne à l'extérieur de manière à absorber le rayonnement courte longueur d'onde et à le dissiper en grande longueur d'onde. Le vitrage transparent étant opaque à ces radiations grande longueur d'onde, elles ne peuvent pas être transmises à l'intérieur. En hiver, les deux vitrages s'inversent de manière à piéger le rayonnement courte longueur d'onde dans le gap d'air. Ces deux modes permettent donc de réduire la surchauffe estivale et la demande de chauffage hivernale.

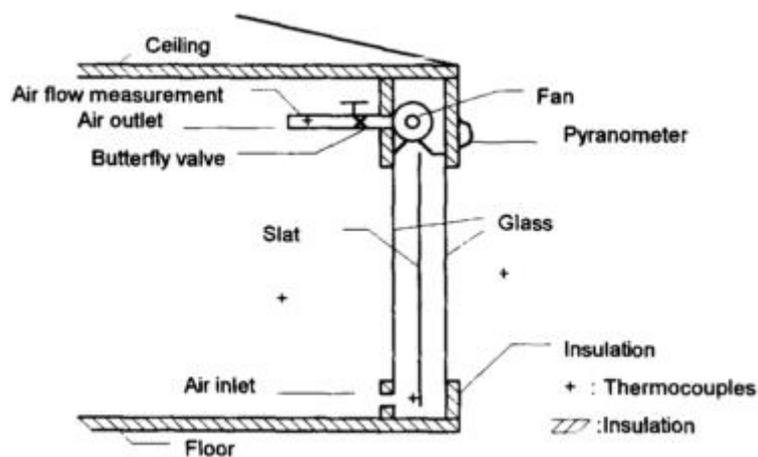


Figure II-4. Dispositif de fenêtre ventilée étudié par Onur et al. [48].

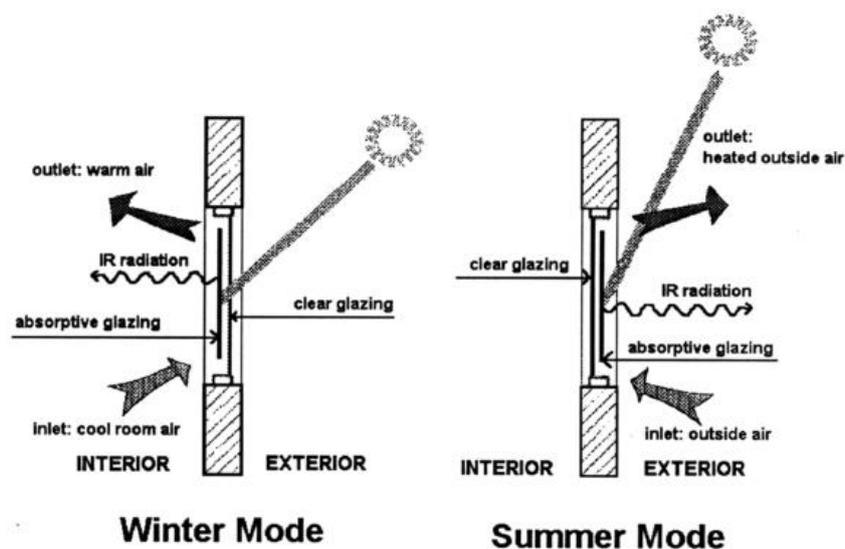


Figure II-5. Dispositif de fenêtre amovible étudié par Etzion et Erell [49].

II.1.4. Une utilisation multi-climat

Les doubles-fenêtres sont des dispositifs connus depuis longtemps et dont les premières études scientifiques remontent aux années 1960. A l'origine, le double vitrage n'étant pas encore généralisé, les doubles-fenêtres sont utilisées dans les pays nordiques en Scandinavie ou au Canada pour leur meilleure isolation thermique comparée à des simples vitrages. Christensen et al. ont mis au point une des premières expérimentations [50]. Il s'agissait d'étudier les facteurs physiques influençant les caractéristiques thermiques d'une double-fenêtre non ventilée et plus particulièrement la résistance thermique et les températures de surface internes.

Malgré l'essor du double vitrage, l'intérêt de la double-fenêtre n'a pas disparu. Plusieurs études ont suivi, dont une aux Etats-Unis dans les années 1980 qui a montré l'intérêt d'utiliser des doubles-fenêtres ventilées [38]. Dans cette étude, Boehm et Brandle précisent notamment que des généralités comparatives entre des doubles-fenêtres sont très complexes en raison de la grande adaptabilité du dispositif démontré en II.1.1. Par conséquent, pour l'ensemble des applications et des problématiques (été, hiver, éclairage, chauffage, refroidissement, ...) les solutions diffèrent.

Lors des décennies suivantes, on constate que l'intérêt des doubles-fenêtres a dépassé les climats nordiques initiaux. Par exemple, Carlos et al ont mené une série d'études dans un contexte climatique portugais [51][43][52-54]. De leur côté Baker, McEvoy et Southall ont aussi mené une série d'études concernant une double-fenêtre ventilée pour le climat britannique [36,55-58]. De nos jours les doubles-fenêtres sont étudiées dans plusieurs pays : France [59,60], Nouvelle-Zélande [31], Japon [61], Corée du sud [62], Chine [63] et Afrique du sud [33] par exemple.

Ainsi l'intérêt des doubles-fenêtres, sous quelle configuration que ce soit, suscite un intérêt mondial pour la communauté scientifique, qui utilise l'adaptabilité du système pour l'appliquer à différentes contraintes météorologiques.

II.2. Analyse de l'état-de-l'art au regard des impacts multi-physiques de la double-fenêtre

Dans un bâtiment, les impacts des doubles-fenêtres sont multi-physiques. La présente section vise donc à les expliquer en s'appuyant sur la littérature scientifique et des retours d'expérience. Les propriétés thermiques, le comportement aérodynamique, les différentes pathologies liées à l'utilisation de double-fenêtre ou encore les impacts sur le confort thermique, acoustique ou sur l'éclairage sont abordés. Pour clôturer, un bilan général est dressé afin de situer le système de double-fenêtre étudié et de montrer la singularité de ce travail de thèse.

II.2.1. Comportements et performances thermiques en configuration hivernale

Les propriétés thermiques des doubles-fenêtres peuvent se scinder en deux catégories : la première dite « classique » qui correspond aux caractéristiques thermiques que l'on retrouve pour chaque élément de façade telles que le coefficient de transmission surfacique U . La seconde est liée à la particularité de récupération de la chaleur propres aux doubles-fenêtres ventilées en insufflation.

II.2.1.a. Influences sur ses propriétés thermiques « classiques »

Les propriétés thermiques des doubles-fenêtres peuvent dépendre de plusieurs paramètres de conception, de fonctionnement ou météorologiques. Ainsi, de nombreuses études paramétriques ont été publiées sur ce sujet. L'une des premières publiées en 1964 par Christensen et al. [50], concernant une double-fenêtre fermée, traite de sa performance thermique et plus particulièrement de l'influence de la géométrie sur la résistance thermique et les températures des surfaces du dispositif. Un test expérimental a alors été effectué en conditions contrôlées. Utilisant une approche paramétrique, les auteurs ont observé que les conditions de température dans la cavité d'une double-fenêtre fermée dépendent du type de régime de flux de chaleur. Ce régime est fonction du rapport

hauteur/épaisseur et du nombre Grashof basé sur l'épaisseur. L'influence de l'épaisseur de la cavité sur la conductance a alors été observée.

L'influence de la géométrie a également été étudiée pour des doubles-fenêtres ventilées. Il résulte d'une étude pour des doubles-fenêtres en insufflation que la surface vitrée a une corrélation beaucoup plus forte avec le coefficient de transmission surfacique U que le rapport largeur/longueur [58]. Cependant, à des tailles de fenêtre étroites, ce rapport géométrique commence à influencer la valeur U de manière significative grâce à la turbulence accrue causée par une vitesse d'écoulement plus élevée. Il a été démontré que les effets opposés du rétrécissement de la fenêtre et de l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air (réduction de la valeur U) et de l'allongement de la fenêtre (augmentation de la valeur U) s'annulent.

En outre, selon une autre étude sur les doubles-fenêtres ventilées [54], les simples vitrages sur le côté intérieur induisent un coefficient U plus élevé que les doubles vitrages. De plus, la performance thermique du vitrage extérieur n'a pas d'influence significative sur la performance de l'ensemble du système. Des revêtements spéciaux pour les fenêtres et leurs influences sur les doubles-fenêtres ont aussi été étudiés. Drumheller a comparé la performance de doubles-fenêtres fermées à faible émittance avec des doubles-fenêtres fermées à vitrage clair standard dans un climat froid [29]. Au-delà de l'intérêt de favoriser une double-fenêtre à une simple, cette étude révèle que le verre avec un revêtement d'émittance faible permet une réduction plus élevée des charges de chauffage que le verre transparent. La réduction des charges thermiques par rapport à une seule unité était de 13% avec le verre transparent et de 21% avec les fenêtres à faible émittance. Concernant ces revêtements, son emplacement a aussi une importance. En effet, pour une double-fenêtre ventilée en insufflation, lorsque le revêtement à faible émission est positionné sur le double vitrage en faisant face à la cavité, la valeur U est deux fois plus élevée que lorsque le revêtement est positionné à l'intérieur de l'entrefer du double vitrage [57]. Ainsi, le type et les caractéristiques de vitrage ont une incidence sur les performances thermiques et viennent donc compléter la liste des paramètres à considérer.

Enfin, une des difficultés rencontrées quand il s'agit des performances thermiques de dispositifs ventilés est que leur performance thermique est aussi dynamique que les conditions aux limites. En effet, la présence d'un débit d'air peut altérer fortement la résistance thermique [64]. C'est pour cette raison que les conditions de fonctionnement tel

que le débit de ventilation ou les conditions météorologiques sont autant de sources d'influence que les paramètres de conception énoncés précédemment.

II.2.1.b. Comportement de la récupération de chaleur dans le cas d'une double-fenêtre ventilée en insufflation

Une des caractéristiques des doubles-fenêtres ventilées en insufflation est la récupération de l'énergie solaire. L'air circulant dans la cavité va, lorsqu'il est plus froid que l'air intérieur, se réchauffer. Il récupère ainsi une partie des déperditions thermiques de la menuiserie intérieure. En journée, il peut également être préchauffé par l'irradiation solaire. Cette propriété, importante, a aussi fait l'objet de plusieurs études puisqu'elle peut influencer sur les performances thermiques de la double-fenêtre mais aussi être impactée par des facteurs extérieurs. En hiver, cette propriété permet de réduire les charges de chauffage d'un bâtiment. Une enquête a été faite au Portugal par Carlos et al. pour caractériser la réduction des charges thermiques de deux doubles-fenêtres ventilées avec un volet solaire intégré [51]. Elles ont été utilisées comme dispositifs de préchauffage de l'air et comparées à un seul vitrage sans préchauffage de l'air. La réduction de la perte de chaleur peut atteindre 59% sans rayonnement solaire et avec le volet ouvert, 63% sans rayonnement solaire mais avec le volet fermé et 134% avec rayonnement solaire. Cela montre le fort potentiel de préchauffage de cette double-fenêtre notamment en climat méditerranéen. Par ailleurs, cette étude montre également que le fait de placer un double vitrage sur le côté intérieur au lieu d'un vitrage simple, en ayant un simple vitrage côté extérieur, ne présente pas d'intérêt significatif en termes de réduction des charges de chauffage en hiver dans cette zone climatique.

La caractérisation de la récupération de chaleur suscite donc un fort intérêt, de par son caractère « gratuit » et plusieurs auteurs ont cherché à évaluer son comportement en fonction de certaines conditions. C'est le cas de Baker et McEvoy qui ont établi une corrélation linéaire entre l'intensité de l'énergie solaire incidente et le gradient de température dans une double-fenêtre en insufflation équipée d'un simple vitrage à l'extérieur et d'un double vitrage à l'intérieur [36,55]. Ce qui explique qu'une corrélation directe très faible existe entre l'irradiance solaire et le débit d'air naturel selon Carlos et al. [51].

Ces derniers auteurs ont également montré que pour le climat d'hiver doux portugais, l'orientation de la fenêtre affecte le gain de chaleur par la récupération d'énergie solaire. En effet, la modification de la double-fenêtre ventilée de la façade sud à la façade nord peut diminuer la récupération de chaleur par ventilation jusqu'à 22% [52]. Testée dans une région plus froide, la différence trouvée entre les orientations sud et nord peut avoir une importance relative amoindrie car la récupération de chaleur dépend également du gradient thermique intérieur/extérieur. Ceci est également dû à un rayonnement solaire moins disponible dans cette zone froide. En effet, la même différence entre le nord et le sud n'est que de 6% à Munich. En fait, la plupart des rayonnements incidents sont transmis directement à travers les vitrages transparents [53]. Alors qu'à Lisbonne avec une irradiation élevée, les élévations moyennes de la température de l'air ventilé sont de 2,0 °C en orientation nord et de 4,6 °C en orientation sud. A Oslo, où l'irradiation est plus faible, l'élévation moyenne de la température de l'air atteint respectivement de 5,3 °C et 5,5 °C. Par conséquent, le gradient de température intérieur/extérieur peut être prépondérant comparé au rayonnement solaire et donc à l'orientation. En outre, l'importance de l'orientation est plus importante pour les climats où l'irradiation solaire est plus élevée.

Le débit de ventilation est également un paramètre qui peut impacter la récupération de chaleur. En effet, Appelfeld et Svendsen ont mis au point un protocole expérimental en conditions contrôlées [42]. Les tests sous plusieurs débits de ventilation différents ([1,3 ; 8] l/s) ont montré que la récupération augmente avec le débit mais que les performances thermiques n'augmentent plus à partir de 6 l/s. L'explication est qu'au-delà de ce débit, les déperditions thermiques sont supérieures aux gains. Ainsi, augmenter les gains thermiques de la ventilation en augmentant le débit ne garantit pas une amélioration des performances thermiques de la double-fenêtre.

II.2.2. Impact sur le bâtiment en période estivale

Les doubles-fenêtres ventilées en insufflation peuvent fonctionner comme un système de préchauffage de l'air en période hivernale. Dans certaines configurations, la double-fenêtre peut aussi être un moyen de rafraichir l'air intérieur en période estivale. En effet, à partir de 1980, Boehm et Brandle ont étudié les performances estivales des fenêtres ventilées. Sous le climat de Salt Lake City, ils ont comparé une fenêtre ventilée

sur l'intérieur et une autre ventilée en extraction (respectivement configurations (1) et (5) sur Figure II-2) à une simple fenêtre en double vitrage [38]. Au cours du mois de juillet avec une exposition ouest, les gains de chaleur de la fenêtre de référence ont été environ deux fois plus élevés que ceux de la fenêtre en extraction ou en ventilation externe, tandis que les pertes de chaleur en hiver ont été relativement similaires pour les trois fenêtres. Cela signifie que la surchauffe est réduite en utilisant une fenêtre ventilée.

Gosselin et Chen ont montré que des conditions extérieures comme la température de l'air, la vitesse du vent ou le rayonnement solaire peuvent influencer ces performances de rafraîchissement. En effet, pour une fenêtre ventilée comme illustrée en Figure II-6, l'efficacité de l'échange de chaleur entre l'air intérieur et l'air extérieur peut varier de 19,8% pour un jour d'été ensoleillé et venteux à 27,7% pour un jour d'été nuageux et calme. La température extérieure étant maintenue à 37 °C et la température intérieure à 24 °C [39]. Cependant, il a été constaté que la double-fenêtre ventilée était moins efficace qu'une fenêtre avec des stores intégrés pour la demande de refroidissement sous cinq climats chinois [65]. De plus, par rapport à une fenêtre à faible émissivité, bien que la double-fenêtre ventilée soit plus efficace, la différence de réduction du refroidissement entre ces deux dispositifs n'était que de 11 à 21%. D'autre part, il existe une fenêtre ventilée efficace pour réduire les charges de refroidissement. C'est le cas d'une fenêtre à ventilation naturelle où l'air ne circule que d'un côté (configuration (1) ou (2) de la Figure II-2). Ce type de dispositif est illustré en Figure II-7. En utilisant ce système dans un climat subtropical comme à Hong Kong, les charges de refroidissement peuvent alors être réduites de 60% par rapport à un vitrage absorbant [63]. Dans un climat tempéré comme à Pékin, la réduction des charges de refroidissement peut atteindre 75% par rapport à un double vitrage.

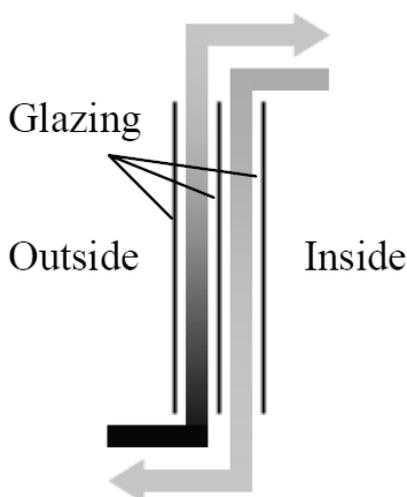


Figure II-6 – Fenêtre à double flux étudié par Gosselin et Chen [39,65].

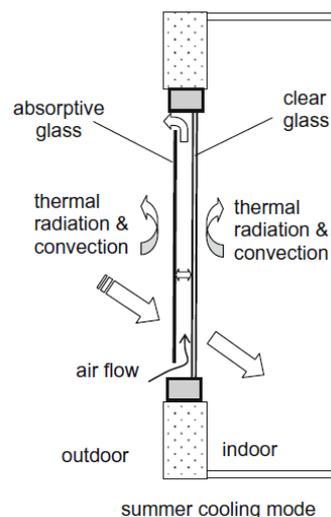


Figure II-7 – Fenêtre ventilée naturellement sur le côté extérieur étudiée par Chow et al. [63].

II.2.3. Différents modèles numériques pour mieux comprendre le comportement aéraulique

La cavité des doubles-fenêtres est le centre de flux d'air complexes qui, dans certains cas, peuvent être utilisés pour fournir de l'air aux bâtiments comme montré sur la Figure II-2. En conséquence, les flux d'air ont fait l'objet d'études numériques afin de caractériser le comportement aéraulique. Ces études traitent de l'utilisation de différents outils numériques. Par exemple, McEvoy et Southall ont concentré leur étude sur une double-fenêtre ventilée en insufflation [56]. Ils ont construit un modèle 2D CFD (Computational Fluid Dynamics) validé selon les calculs standards de l'époque et des mesures obtenues de leur prototype. Ce type d'outil est selon eux, très précis en régime permanent pour tout un panel de scénario de variables telles que les débits d'air, les écarts de température, les types de vitrages, l'écart entre les fenêtres. Néanmoins, ils mettent en évidence une source d'erreur importante concernant les débits dans la cavité en cas de convection naturelle. Un autre modèle 3D CFD d'une double-fenêtre en insufflation est proposé par Bhamjee et al. Il leur a permis d'enquêter sur le champ de vitesse sous régime forcé et naturel. Selon ces auteurs, le régime naturel offre de meilleures performances thermiques que le régime forcé en raison d'une vitesse plus faible et des effets de flottabilité dominants [33].

Outre le régime d'écoulement des paramètres météorologiques ou de conception ont été étudiés numériquement. Une autre fenêtre, illustrée en Figure II-8, en triple vitrage ventilée a été étudiée. Un modèle a été proposé par Gloriant et al. [35]. Il montre les influences des températures, de l'épaisseur de la cavité, des revêtements à faible émissivité et de la zone de vitrage sur les performances des fenêtres. Plus récemment une thèse a été réalisée sur ce même système appelé aussi fenêtre pariéto-dynamique [66]. Le modèle numérique réalisé a permis une étude paramétrique. Cette dernière a notamment mis en exergue que la température d'air extérieur, le flux solaire et le débit d'air sont les paramètres les plus influents sur le comportement thermique de la fenêtre. En outre, les performances thermiques sont améliorées pour des cavités d'air plus épaisses. Il souligne également que le cadre est la partie la plus déperditive et est responsable à 75% des pertes thermiques. Parallèlement, Kim et Yang ont étudié les caractéristiques d'écoulement de cette même fenêtre avec une méthode de volume fini [67]. Ils ont montré que les gains de chaleur étaient considérablement réduits lorsque le débit d'air augmentait. Ils ont suggéré un débit d'air d'extraction optimal grâce à un nombre de Reynolds de 600 et un rapport d'aspect de largeur/hauteur de 0,05. Selon ces auteurs, au-delà d'un nombre de Reynolds de 600, l'effet du rapport d'aspect est négligeable sur le gain de chaleur spatiale.

Les fenêtres à triple vitrage ventilée peuvent être utilisées différemment, comme étudié par Gosselin et Chen. La différence ici est l'utilisation d'un double flux croisé à l'intérieur de la fenêtre (Figure II-6). L'un des flux évacue l'air tandis que l'autre fournit de l'air à l'intérieur. Ils ont suggéré d'utiliser un faible débit d'air et un large espace d'air pour améliorer les performances. Ils ont trouvé une conception optimale comprenant un débit de 10 l/s et d'une largeur d'espace aérien de 0,009 m [39].

En outre, des simulations ont eu lieu au Portugal et en Norvège au sujet d'une double-fenêtre ventilée [53]. Dans ce type de fenêtre, le débit d'air obtenu dépend de la vitesse du vent, des coefficients de pression de l'entrée et de la sortie ainsi que de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. À Oslo, où la vitesse de vent moyenne était plus basse qu'à Lisbonne, le débit d'air dans la double-fenêtre a été plus constant et parfois plus élevé en considérant les orientations nord et sud. Cela révèle l'importance de l'effet de pesanteur car la différence de température intérieure / extérieure est beaucoup plus élevée à Oslo qu'à Lisbonne. Au cours de la même période, Oslo et Lisbonne ont respectivement une température de l'air extérieur moyenne de 2,4°C et 13,0°C. Pourtant, à Lisbonne, le débit d'air moyen à travers la fenêtre est de 32,9 m³/h avec une fenêtre face aux vents dominants. Alors qu'à Oslo, le débit d'air moyen atteint

32,4 m³/h avec une fenêtre orientée vers le sud, pour laquelle la fréquence du vent dans cette direction ne représente que 14%. Ainsi en contrôlant l'évent intérieur, l'utilisateur peut réduire ou augmenter le débit d'air entrant. À Oslo, une réduction du débit d'air peut être intéressante pour obtenir une température d'air plus élevée. À Lisbonne, les bouches d'aération peuvent être agrandies afin d'augmenter le débit d'air.

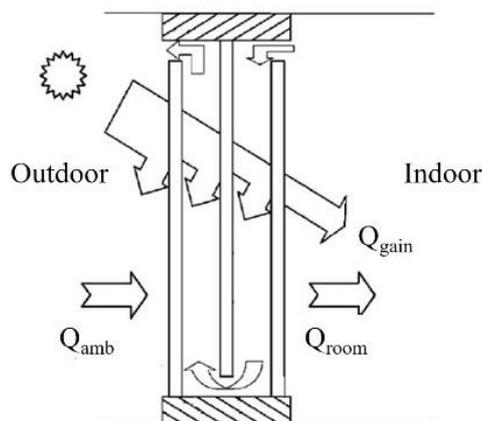


Figure II-8. Triple vitrage ventilé étudié par Gloriant et al. [35] et Kim et Yang [67].

II.2.4. Pathologies liées à la double-fenêtre et retours d'utilisateurs

II.2.4.a. Problèmes liés à la condensation

L'utilisation d'une double-fenêtre peut avoir certains effets néfastes pour l'occupant ou le bâtiment. C'est le cas de la condensation dans la cavité par exemple. En effet, la formation de gouttelettes à l'intérieur de la cavité des doubles-fenêtres fermées est un phénomène parfois observé et un problème lorsqu'elles commencent à entraver la vue à travers les vitres. Cela a été identifié à partir de 1960 par Wilson et Nowak [68]. Les transferts de vapeur d'eau proviennent de deux forces. Soit à travers des matériaux et des fissures par diffusion en raison des différences de pression partielle de la vapeur d'eau, soit par les flux d'air. Les transferts de diffusion sont directement proportionnels à la différence de pression de part et d'autre des menuiseries. Cette différence de pression dépend des températures intérieure et extérieure. En configuration hivernale, il a été démontré que la différence de pression de vapeur à travers la menuiserie intérieure est plusieurs fois supérieure à celle de la menuiserie extérieure. L'écart augmente avec la diminution de la température extérieure. Par conséquent, pour maintenir l'écoulement et

l'entrée de vapeur d'eau égale, la menuiserie intérieure doit avoir une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau plusieurs fois plus élevée à celle de la menuiserie extérieure.

Les transferts de vapeur d'eau sont également dus à l'arrivée d'air dans des doubles-fenêtres. Les différences de pression totales qui apportent des flux d'air résultent de plusieurs facteurs. Le vent est l'un d'entre eux. L'étude de Wilson et Nowak a montré que la ventilation en extraction est majoritairement responsable de l'apparition de condensation comparée aux autres modes de ventilation. En effet, le gain net de vapeur dans la cavité de la double-fenêtre est plus élevé. Un deuxième facteur important contribuant aux différences de pression totale est l'effet de cheminée induit par les différences de température. Dans un cas de ventilation naturelle dans un bâtiment à étage, l'air entre les fenêtres inférieures est extrait par les fenêtres supérieures. Il y a alors plus de risques de condensation dans les fenêtres situées en étage puisque l'air passe de l'intérieur à l'extérieur.

Ainsi, la ventilation naturelle étant le seul moyen utilisé dans les bâtiments historiques pour renouveler l'air, l'étude du comportement aérodynamique des bâtiments est devenue essentielle pour prévenir les risques de condensation. Wilson et Nowak ont défini la ventilation de la cavité comme solution efficace pour minimiser les risques de condensation entre les vitres. En contrepartie, les échanges thermiques entre la cavité et l'extérieur diminuent la résistance thermique de la double vitre. Une autre étude confirme qu'une double-fenêtre ventilée peut empêcher totalement la condensation sauf avec un cadre en aluminium [62]. Autrement, au lieu de minimiser le gain net de vapeur d'eau dans la cavité, une augmentation de la température de cette dernière peut limiter indirectement le risque de condensation. Ainsi, si la température de la cavité est supérieure à la température du point de rosée, la condensation ne se produira pas. De ce point de vue, Sasaki a étudié l'impact du cadre sur la température de la cavité [69]. Des cadres métalliques ont été testés ainsi que l'utilisation de ruptures thermiques pour limiter les transferts de conduction dans cette partie de la fenêtre. L'appareil étudié est présenté en Figure II-9. Une de ses conclusions est, qu'en cas d'une menuiserie métallique, un rupteur thermique permet d'obtenir des températures de surface intérieures aussi élevées qu'en cas d'un cadre à faible conductivité tel que ceux en bois. Compte-tenu des matériaux des bâtiments historiques dont la conductivité thermique est inférieure à celle du métal, comme la pierre ou les lambris, le risque de condensation est alors réduit et la nécessité d'un rupteur thermique est moindre. Au-delà des résultats, cette étude souligne le rôle du cadre des menuiseries dans le comportement hygrothermique de la double-fenêtre.

En définitive, les problèmes liés à la condensation ont conduit à l'utilisation de la ventilation dans la double-fenêtre à l'origine fermée. En revanche, cela a pour contre effet de diminuer la résistance thermique.

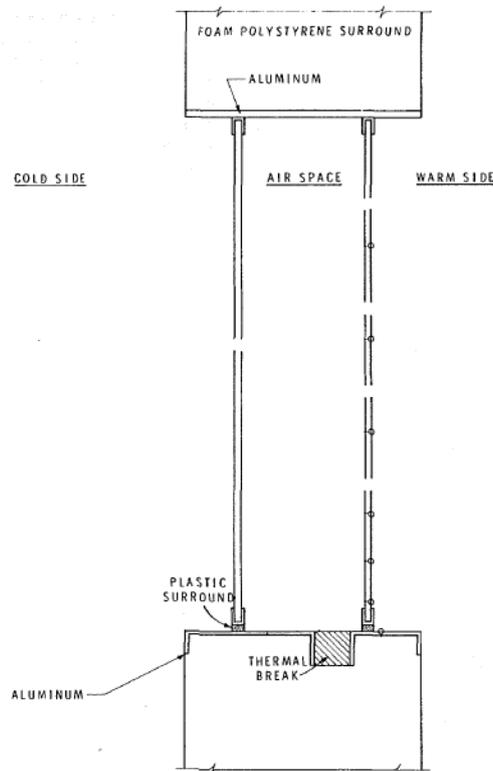


Figure II-9. Double-fenêtre à cadre métallique avec rupteur thermique étudiée par Sasaki [69].

II.2.4.b. Retours d'utilisateurs

Suite à des échanges avec l'architecte du patrimoine du projet, Nathalie Sandt [21], nous avons pu bénéficier de plusieurs retours d'utilisateurs concernant d'autres thématiques, telles que l'acoustique ou l'éclairage du bâtiment, ainsi que la maintenance du dispositif. Cela concerne uniquement des doubles-fenêtres fermées. Ces retours d'utilisateurs nous apprennent que, pour une installation de la double-fenêtre par l'extérieur ou par l'intérieur :

- le dispositif peut apporter un confort acoustique dans les zones très exposées au bruit extérieur mais peut également augmenter l'inconfort acoustique en accentuant les bruits intérieurs (voisinage, système de ventilation).

- la manipulation est plus contraignante, en particulier lorsqu'il y a des volets intérieurs ou extérieurs.
- par définition le système implique un double entretien pour le nettoyage ou pour la réparation.
- la double-fenêtre peut provoquer une perte de lumière liée, selon les dimensions, au double cadre et à la multiplication des vitrages, ce qui est accentué s'ils sont encrassés.
- la vision simultanée des deux fenêtres n'est pas agréablement ressentie par les usagers tout comme le reflet des croisillons (petite boiserie décomposant parfois des vitres) dans les doubles vitrages.

Alors que les articles scientifiques se concentrent sur les propriétés thermo-aérodynamiques, ces retours d'expérience permettent de compléter la compréhension de la double-fenêtre et de ses impacts. Ils mettent en avant la multidisciplinarité des avantages et des inconvénients de ce dispositif.

II.2.5. Bilan de la littérature scientifique

Afin de clore ce chapitre et démontrer la singularité de ce travail de thèse, un tableau récapitulatif des articles scientifiques portant sur les doubles-fenêtres est dressé (cf. Tableau II-1). Il permet de visualiser le type d'étude menée selon certains paramètres tels que le type de double-fenêtre, sa géométrie, le type de vitrage, le mode de ventilation ou encore le type de modèle numérique.

A partir de ce tableau, nous pouvons faire plusieurs observations :

- Premièrement, on remarque que la majorité des études concerne des doubles-fenêtres en insufflation (26/41). Ce mode permet de faire de la double-fenêtre un organe de ventilation avec un préchauffage de l'air intégré. La plupart de ces cas d'étude concernent une insufflation avec une entrée d'air en bas de la fenêtre et le soufflage en haut. Cela permet de profiter des effets de convection naturelle lorsque l'air se réchauffe dans la cavité et crée un tirage thermique naturel. Cet effet se renforce en hiver et accentue alors le débit de ventilation.

- Les dimensions des menuiseries étudiées sont comprises entre 0,465 x 0,965 et 2,170 x 1,625 m (largeur x hauteur) ce qui est une plage assez large et variée. En revanche, les épaisseurs des cavités ne dépassent pas les 152 mm si l'on exclut Janssens et Bosschaerts [70] ainsi que Tanimoto et Kimura [61]. Ces derniers ont respectivement étudié des doubles-fenêtres de 0,3 et 0,2 m d'épaisseur. Cependant, ces deux valeurs peuvent être considérées comme des minimales pour une application dans des façades de 0,5 m d'épaisseur. Ainsi, le comportement thermique n'a pas été étudié pour des épaisseurs aussi grandes que celles rencontrées dans les bâtiments ciblés par cette thèse.
- Par ailleurs, les types de vitrage utilisés sont aussi variés. Cela va du simple au triple avec pour certains des revêtements à basse émissivité. Les débits de ventilation recouvrent également une large gamme qui s'étend de 1,8 à 95 m³/h voire jusqu'à 195 m³/h pour Janssens et Bosschaerts.
- 17 études sur 41 traitent de modèles numériques. Ces derniers sont aussi bien des modèles de type CFD ou des modèles analytiques construits par les auteurs à partir d'équations générales d'écoulement ou de thermiques, quand ils se concentrent sur la double-fenêtre uniquement. Il existe également des modèles dynamiques à l'échelle du bâtiment. Tous les modes de convection ont été étudiés (forcée, naturelle, mixte). A noter que la plupart des modèles numériques assimilent le dispositif à deux surfaces parallèles, le plus souvent uniquement vitrées. Cela se justifie par les faibles épaisseurs utilisées. Cependant, les transferts thermiques considérés comme unidimensionnels ne sont pas étudiés entre l'air et les faces latérales de la cavité par exemple. Seuls Baker et al. [57], Wei et al. [71], Carlos [72], Greffet [66], Michaux et al. [34] considèrent le cadre de la fenêtre dans leur modélisation et les échanges thermiques avec des surfaces latérales.

Un complément important à ce tableau est que la plupart des fenêtres sont constituées de PVC ou d'aluminium. Ce sont toutes des menuiseries modernes dont les propriétés thermiques des matériaux sont éloignées de celles du bois qui est utilisé dans les doubles-fenêtres ciblées pour cette thèse telle que présentée en Figure I-8. C'est également le cas pour les paramètres présentés dans le Tableau II-1. L'application aux bâtiments historiques et ses conséquences sur la géométrie ou les matériaux n'ont donc pas été considérées jusqu'alors.

Auteurs	Réf.	Année	Double-fenêtre (ventilée ou non)	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Gap d'air [mm]	Vitrage (int vers ext)	Débit [m³/h]	Type de modèle numérique		Mode de convection
Appelfeld et Svendsen	[42]	2011	Ventilée en insufflation	1230	1480	83	Double / Simple	3,6 : 28,8			
Baker et McAvoy	[36]	1999	En insufflation de bas en haut	1050	1050	[21 ; 41 ; 50]	Double / Simple	[1,8 ; 3 ; 8,6 ; 24]			
Baker et McAvoy	[55]	2000	En insufflation de bas en haut	1050	1050	[21 ; 41 ; 50]	Double / Simple	[1,8 ; 3 ; 8,6 ; 24]			
McEvoy et Southall	[56]	2000	En insufflation de bas en haut	1050	1050	[21 ; 41 ; 50]	Double / Simple	-	2D CFD	Thermo-aéraulique	Forcée
McEvoy et al.	[57]	2003	En insufflation de bas en haut	1200	1200	[10 ; 20 ; 30]	Double / Simple	20,6 : 50,4			
Southall et McEvoy	[73]	2005	En insufflation de bas en haut	[500 ; 1500]	[500 ; 1500]	[10 ; 20 ; 30]	Double / Simple	[21,6 ; 32,4 ; 50,4]	CFD	Thermo-aéraulique	
Barakat	[32]	1987	En insufflation de bas en haut	2170	1625	66	Double / Simple	41,4			
Bhamjee et al.	[33]	2013	En insufflation de bas en haut	1030	1000	13	Double / Double	-	3D CFD ; turbulent	Aéraulique	Forcée et naturelle
Boehm et Brandle	[38]	1980	En extraction et en insufflation	-	1800	-	Simple / Double	22			
Carlos et al.	[51]	2010	En insufflation de bas en haut	1430	1000	90	Simple ou Double / Simple	13 : 29			
Carlos et al.	[43]	2011	En insufflation de bas en haut	1430	1000	90	Simple ou Double / Simple	13 : 29	2D analytique	Thermo-aéraulique	Naturelle
Carlos et al.	[52]	2012	En insufflation de bas en haut	1430	1000	90	Simple ou Double / Simple	[15 ; 30 ; 45]			
Carlos et Corvacho	[53]	2013	En insufflation de bas en haut	1430	1000	70	Simple / Simple	5 : 95			
Carlos et Corvacho	[54]	2014	En insufflation de bas en haut	1430	1000	73	Simple ou Double / Simple	5 : 95			
Carlos et Corvacho	[74]	2015	En insufflation de bas en haut	1430	1000	73	Simple ou Double / Simple	5 : 95			
Carlos	[72]	2017	En insufflation de bas en haut	1430	1000	90	Simple ou Double / Simple	5 : 95			
Chow et al.	[63]	2009	Ventilée sur l'intérieur ou l'extérieur	1950	880	35	Simple / Simple	< 21,6	2D analytique	Thermo-aéraulique	Naturelle
Christensen et al.	[50]	1964	Fermée	910	1520	6 : 152	Simple / Simple	-			
Diomidov et al.	[64]	2002	Ventilée	465	965	12 : 40	Simple / Double	4 : 26			

Auteurs	Réf.	Année	Double-fenêtre (ventilée ou non)	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Gap d'air [mm]	Vitrages (int vers ext)	Débit [m ³ /h]	Type de modèle numérique	Mode de convection
Gloriant et al.	[75]	2013	En insufflation	600	1200	40	Triple vitrage*	10		
Gloriant et al.	[35]	2015	En insufflation	600	1200	40	Triple vitrage*	10	2D analytique	Thermo-aéraulique Naturelle
Gloriant et al.	[60]	2015	En insufflation	600	1200	10 : 50	Triple vitrage*	10		
Gosselin et Chen	[76]	2008	En insufflation ou en extraction	900	1200	15	Simple / Simple / Simple	[36 ; 54]	3D CFD + un analytique	Thermo-aéraulique Forcée et naturelle
Gosselin et Chen	[39]	2008	En insufflation ou en extraction	900	1200	[9 ; 15]	Simple / Simple / Simple	36 : 72		
Haddad et Elmahdy	[77]	1998	En insufflation	-	1000	-	Simple / Simple / Simple	0,00433 kg/s	Analytique	Thermo-aéraulique Forcée laminaire
Greffet	[66]	2016	En insufflation	1600	1200	42	Triple vitrage*	-	Analytique	Thermo-aéraulique Naturelle
Michaux et al.	[34]	2018	En insufflation	1600	1200	42	Triple vitrage*	-	Analytique	Thermo-aéraulique Naturelle
Janssens et Bosschaerts	[70]	2015	Ventilée sur l'extérieur	-	2500	300	Simple / Simple	195	2D CFD ; turbulent	Thermo-aéraulique Forcée
Klems	[78]	2002	Fermée	908	1210	;	Simple / Simple	-		
Kim et Yang	[67]	2002	En extraction	[27 ; 90]	900	[22 ; 54]	Simple / Simple / Simple	-	2D ; analytique	Thermo-aéraulique Mixte
Leal et al.	[79]	2003	Ventilée sur l'intérieur ou l'extérieur	1100	1130	[20 ; 41]	Simple / Double	-		
Leal et al.	[44]	2004	En insufflation	1100	1130	[20 ; 41]	Simple / Double	-	Analytique	Thermo-aéraulique Naturelle
Leal et Maldonado	[80]	2008	Ventilée sur l'intérieur ou l'extérieur	1100	1130	[20 ; 41]	Simple / Double	-		
Raffnsoe	[40]	2007	Ventilée (cavité uniquement)	1000	1000	50	Simple / Simple	0,6 m/s à 0°C	2D ; CFD	Thermo-aéraulique Mixte
Sasaki	[69]	1971	Fermée	-	1500	76	Simple / Simple	-		
Skaff et Gosselin	[81]	2014	En extraction et côté extérieur	-	1000	[10 ; 50]	Double / Double	-	2D ; CFD	Thermo-aéraulique Naturelle
Smith et al.	[31]	2012	Fermée	1000	1000	[48 ; 88]	Simple / Simple	-		

Auteurs	Réf.	Année	Double-fenêtre (ventilée ou non)	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Gap d'air [mm]	Vitrages (int vers ext)	Débit [m ³ /h]	Type de modèle numérique		Mode de convection
Takashi et al.	[82]	2013	Fermée	-	-	-	Simple / Double ou Double / Simple	-			
Tanimoto et Kimura	[61]	1997	Ventilée	-	[1400 ; 2000 ; 5000]	200	Simple / Simple	[0 ; 20 ; 40 ; 80]	Analytique	Thermo- aéraulique	Forcée
Wei and al.	[71]	2010	En insufflation ou en extraction	900	1200	[9 ; 15]	Simple / Simple / Simple	[36 ; 72]	EnergyPlus	Thermo- aéraulique	Forcée
Wilson et Nowak	[68]	1960	Fermée	927	635	38	Simple / Simple	-			

Tableau II-1. Récapitulatif des articles scientifiques sur les doubles-fenêtres ou fenêtres ventilées*.

II.3. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le système de double-fenêtre. Il s'agit à la base de l'ajout d'une seconde fenêtre derrière une fenêtre d'origine afin de renforcer ses performances thermiques. A l'origine utilisé, dans des climats où les hivers sont froids, ce dispositif s'est ensuite démultiplié en différentes variantes et dans différents climats.

Nous avons montré toutes les configurations possibles concernant la pose d'une double-fenêtre. Que ce soit par l'intérieur, par l'extérieur, sur l'allège ou sur le sol. Il est également possible de la laisser fermée ou de la ventiler. La ventilation peut se faire de plusieurs façons présentées dans ce chapitre. Au total, il existe 6 manières de la monter et 10 régimes de ventilation (en incluant le cas fermé). A cela s'ajoute les possibilités d'utiliser des géométries ou des vitrages différents. C'est donc un système qui peut s'adapter à beaucoup de situations et varier en fonction des objectifs énergétiques et de confort. Il est d'ailleurs présenté sous différentes appellations énoncées dans ce chapitre.

Ensuite, il a été constaté un parallèle thermique et aéraulique entre les doubles-fenêtres et les doubles façades vitrées. Evidemment la taille n'est pas la même et le rapport d'échelle entraîne des différences de comportement, de performance et de modélisation. Il existe également un parallèle avec de simples fenêtres ventilées. Les doubles-fenêtres, les simples fenêtres ventilées ou les vitrages secondaires sont parfois confondus. La différence entre ces dispositifs peut résider dans la présence de deux dormants pour les doubles-fenêtres. Néanmoins, en étudiant la littérature scientifique, il apparait que la dénomination reste à l'appréciation des auteurs.

Enfin, l'étude approfondie de cette littérature scientifique a mis en évidence les propriétés et les problématiques de recherche autour de la double-fenêtre. Cela va de la caractérisation thermique, à l'étude de la récupération de la chaleur lorsqu'elle est ventilée en insufflation, ainsi qu'au confort estival, acoustique et lumineux et aux problèmes de condensation entre les vitres. Un bilan est dressé à la fin de ce chapitre permettant de visualiser le panel de prototype étudié et de modèle numérique créé. Il en ressort que les études couvrent une large plage de dimensions, de débit de ventilation et de type de vitrage. En revanche, les épaisseurs considérées sont pour la plupart assez faibles (inférieur à 100 mm) et les menuiseries sont modernes ne reprenant pas les caractéristiques des fenêtres et façades historiques.

Chapitre III. Prototypage, plateforme et protocoles expérimentaux

La veille scientifique et l'état de l'art présentés dans le chapitre précédent ont guidé et orienté nos choix pour développer des prototypes de double-fenêtre et mettre en place un protocole expérimental adapté à leur usage et respectant les contraintes architecturales spécifiques aux bâtiments anciens. Les dispositifs expérimentaux existants à l'ENTPE étant développés pour d'autres usages, un effort d'adaptation et de mise en adéquation avec les phénomènes thermiques et aéraulique qu'engendre la double-fenêtre a été fourni.

Ainsi et conformément à la démarche scientifique décrite en introduction, deux types de dispositifs expérimentaux ont été mis au point afin de mener des tests en conditions contrôlées (Boite Chaude Gardée) et in situ (Cellule expérimentale HYBCELL). Ce chapitre présente ces deux dispositifs adaptés à notre usage, ainsi que les partis-pris pour mettre au point les prototypes de la double-fenêtre. Enfin, la calibration des plateformes expérimentales sera présentée et discutée.

III.1. Dispositif de test en conditions contrôlées

Les conditions contrôlées (températures, vitesse d'air, rayonnement...) permettent de soumettre un prototype à des sollicitations bien définies (régime permanent ou variable, échelons...). Cela permet notamment de caractériser les propriétés thermiques de la double-fenêtre et de réaliser le calibrage des modèles numériques.

Nos prototypes de double-fenêtre présentent des dimensions et formes inadaptées aux dispositifs expérimentaux de l'ENTPE. Afin de mener à bien notre étude nous avons pris la décision d'adapter une boîte chaude gardée existante et ce en réalisant un porte échantillon adapté et en complétant la métrologie et le système de contrôle commande.

La boîte chaude gardée adaptée est un dispositif permettant la caractérisation thermique d'un échantillon. Il est composé d'un caisson de garde (1), d'un caisson chaud (2), d'un porte échantillon (3) et d'un caisson froid (4) (cf. Figure III-1). Le caisson de garde limite les déperditions thermiques du caisson chaud et permet une meilleure stabilisation de la température. L'ensemble devant être adiabatique et hermétique à l'environnement extérieur. L'échantillon est placé entre le caisson froid et le caisson chaud dans lesquelles les températures sont contrôlées. Les propriétés thermiques sont calculées à partir des

températures d'air et de surfaces et de la puissance thermique échangée à travers l'échantillon. Des déflecteurs sont utilisés afin d'atténuer les vitesses d'air et d'améliorer l'homogénéisation de la température d'air. Le porte échantillon (1 m x 1 m) offrant une surface trop petite pour l'échantillon de double-fenêtre, il a été décidé de ne pas l'utiliser. Il a alors été remplacé par un porte échantillon conçu spécialement pour l'étude de la double-fenêtre.

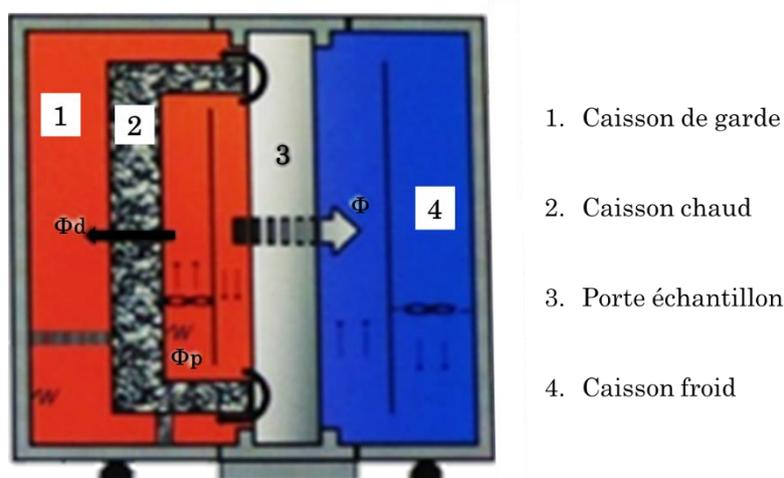


Figure III-1. Schéma de la boîte chaude gardée.

III.1.1. Conception et mise en œuvre du porte-échantillon et de l'échantillon boîte chaude gardée

Le prototype reproduit le dispositif d'une double-fenêtre, avec porte fenêtre posée par l'intérieur, tel que cela est souvent réalisé dans le bâti XIXème. De plus, un des intérêts est de considérer le mur proche tout autour de la fenêtre. C'est pourquoi le prototype comprend :

- un cadre représentatif du contexte bâti étudié avec allège, tableaux, linteau et plancher
- une fenêtre représentant de manière simplifiée l'ancienne menuiserie,
- la nouvelle fenêtre intérieure (porte-fenêtre),

- ainsi que l'ensemble des équipements nécessaires pour assurer l'étanchéité et la ventilation.

Compte-tenu de ces objectifs, l'ensemble des contraintes liées au prototype de la boîte chaude gardée inclut des contraintes matérielles, dimensionnelles et techniques parfois contradictoires ce qui a conduit à plusieurs compromis.

Contraintes matérielles :

- matériaux représentatifs du bâti ancien,
- nécessité de s'approcher des caractéristiques (inertie thermique, conductivité thermique, nature, couleur) du bâti ancien.

Contraintes techniques :

- montage / démontage facile,
- mobilité de l'échantillon.

Contraintes dimensionnelles :

- hauteur et largeur maximales disponibles : 1,85 m.

Compte tenu de ces contraintes, le choix de conception s'est porté sur la fabrication de quatre coffrages en bois à assembler remplis de blocs de béton cellulaire hourdés à la colle sur toute la périphérie de l'embrasure des baies (cf. Figure III-2). Le choix du béton cellulaire est lié au bon compromis entre inertie thermique et légèreté offert par ce matériau et malgré sa meilleure résistance thermique comparée à la pierre. Rien n'a été prévu pour fixer le dormant de la double-fenêtre qui peut alors être posée en tunnel à l'intérieur des tableaux afin de pouvoir tester l'influence de l'écart entre les deux menuiseries, en déplaçant facilement la fenêtre intérieure le long des tableaux.

Les dimensions références ont été prises sur celles d'une fenêtre de la rue Sala à Lyon. Celle-ci fait 3,13 m de haut et 1,30 m de large. Il a été décidé de conserver au moins 0,10 m sur tout le contour, destiné à la reproduction de la paroi proche dite « partie inertielle ». Cela laisse donc 1,65 m de hauteur disponible pour les menuiseries. Les autres dimensions (largeur, profondeur) ont pu être conservées ce qui laisse 0,275 m de large de

chaque côté pour la partie inertielle. La profondeur a été choisie parmi celles relevées sur différents sites et est de 0,50 m.

L'ensemble a été isolé thermiquement conformément au principe de la boîte chaude gardée et à ses dimensions (« partie isolante ») et posé sur un socle à roulette en vue de sa maniabilité (cf. Figure III-3).



Figure III-2. Photo du prototype de la BCG durant son assemblage.

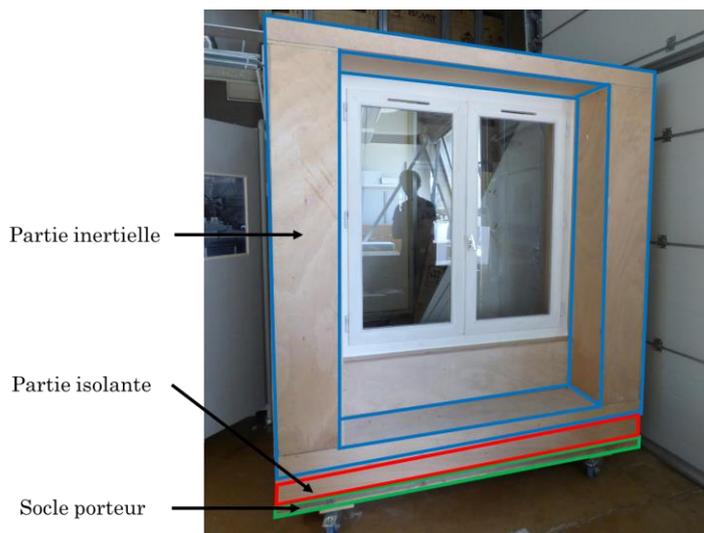


Figure III-3. Photo du prototype de la BCG sans l'isolation latérale et supérieure.

Concernant les menuiseries extérieures, l'idéal aurait été d'utiliser d'anciennes menuiseries. Cependant, étant données les dimensions très particulières du support expérimental, celles-ci ont été fabriquées sur-mesure (cf. Figure III-4). Les profils reproduisent les caractéristiques des menuiseries anciennes exceptée la fermeture à mouton et gueule de loup ou les espagnolettes. Elles sont donc constituées d'un cadre dormant et de deux vantaux en bois peint sans croisillons, ouvrant vers l'intérieur. Elles ne sont pas équipées de joint et sont posées sans calfeutrement moderne au contact de la maçonnerie. L'étanchéité aéraulique a tout de même été assurée lors des tests afin de concentrer les entrées et sorties d'air par les zones prévues. Les vitrages extérieurs sont de type simple et d'épaisseur 4 mm.

Les menuiseries intérieures ont également été réalisées en bois peint (cf. Figure III-5). Elles sont constituées de deux ouvrants et d'un dormant. L'ensemble est muni de joints. Le cadre dormant n'est pas fixé de manière irréversible au tableau afin d'étudier

l'influence de l'écart entre les menuiseries. Le calfeutrement est effectué une fois la menuiserie installée pour le test. Les ouvrants portent des soubassements pleins en bois de la même hauteur de l'allège. Elles permettent la fixation du système de ventilation. Deux exemplaires de fenêtres intérieures ont été réalisés : l'un en simple vitrage, l'autre en double vitrage. Cela permettra de tester l'influence du type de vitrage. Le simple vitrage est également de 4 mm d'épaisseur et le double vitrage est de type 4-12-4 mm à remplissage d'air. Les caractéristiques de l'ensemble matériaux utilisés pour la fabrication des prototypes sont présentées en Tableau III-1.



Figure III-4. Photo des fenêtres extérieures en simple vitrage.



Figure III-5. Photo de l'un des deux exemplaires de menuiserie intérieure.

	Type de matériau	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Capacité thermique [J/(kg.K)]
Coffrage	Contreplaqué en peuplier	450	0,13	1880
Béton cellulaire	Ytong Verti 25	500	0,125	1000
Menuiserie	Meranti	550	0,13	1880
Verre	Verre clair	2500	1	750

Tableau III-1. Propriété des matériaux du prototype de double-fenêtre.

III.1.2. Chaîne de mesure et de contrôle commande

Afin de caractériser la double-fenêtre ventilée, il a fallu procéder à plusieurs ajustements par rapport à l'instrumentation préconisée par la norme NF EN ISO 12567 [83]. En effet, l'objectif étant de quantifier les flux à travers les différentes parties du prototype il a été nécessaire de répartir les capteurs disponibles sur son ensemble. Ensuite, le soufflage de l'air froid dans le caisson chaud influencerait grandement la température de ce caisson. De plus, compte tenu des débits et des températures considérées, cela risquerait également de nuire à la stabilité et l'homogénéité de la consigne du caisson chaud. C'est pourquoi, un conduit permettant de récupérer l'air soufflé et de le réinjecter vers le caisson froid a été mis en place. Instrumenté, il permet de distinguer le flux de ventilation des autres flux.

L'ensemble de l'instrumentation est schématisé sur les Figure III-6. Pour caractériser la double-fenêtre, des sondes de température d'air et de surface de type PT100 ont été installées aussi bien côté caisson chaud, côté caisson froid que dans la cavité. Des sondes PT100 ont également été utilisées pour mesurer les températures d'air en entrée d'air et en soufflage. Les caractéristiques des capteurs utilisés sont regroupées dans le Tableau III-2. Enfin, des sondes supplémentaires installées dans chaque caisson permettent de vérifier l'homogénéité de leur température et les conditions de convection ainsi que la régulation des systèmes de chauffage et de refroidissement. Cette régulation se fait par le biais d'un programme LabVIEW récupérant l'ensemble des données mesurées et pilotant en conséquence les radiateurs du caisson chaud. Il est alors possible de fixer une consigne de température ou de puissance. Dans le premier cas, qui est celui mis en place lors de nos essais, la régulation est de type PID permettant une justesse dans la maintenance de la consigne déjà prouvée par les travaux de Bahrar [84] et Frutos Dordelly [85]. Le groupe froid possède son propre système de régulation et n'a pas pu être connecté au reste du dispositif expérimental. Il offre une régulation de la température à $\pm 1^\circ\text{C}$ par rapport à la consigne. Après plusieurs essais, une position et une taille des déflecteurs ont été déterminées afin d'homogénéiser la température dans tout le caisson froid. Il a été fait de même dans le caisson chaud. Cependant, l'ajout de ventilateurs a été nécessaire car un gradient de température vertical trop important avait été constaté. Nous avons vérifié par les mesures de vitesse d'air que ces ventilateurs n'engendraient pas un écoulement d'air trop rapide au voisinage de l'échantillon selon les critères de la norme NF EN ISO 12567 [83].

Type de mesure	Type de capteur	Précision	Plage de mesure
Température de surface Température d'air	Sonde PT100	0,1°C	-70 à +200°C
Vitesse d'air	HD403TS (DeltaOhm)	0,2 m/s +/- 3%	0 à 5 m/s

Tableau III-2. Caractéristiques métrologiques des capteurs utilisés pour les tests en conditions contrôlées.

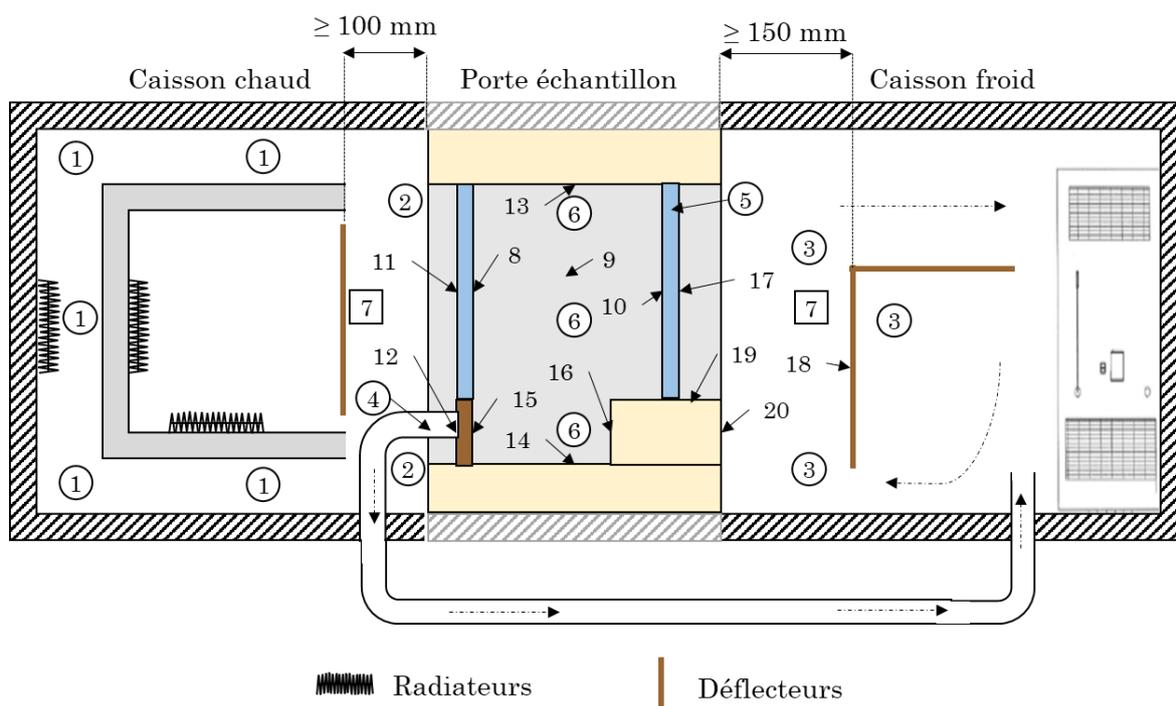


Figure III-6. Instrumentation de la boîte chaude gardée sur une coupe longitudinale.

1. Températures d'air du caisson de garde. 2. Températures d'air du caisson chaud. 3. Températures d'air du caisson froid. 4. Températures de soufflage. 5. Températures d'entrée d'air. 6. Températures d'air de la cavité. 7. Vitesse d'air des caissons chaud et froid. 8. Température vitre intérieure face DF. 9. Températures tableaux DF. 10. Température vitre extérieure face DF. 11. Température vitre intérieure face chaud. 12. Température soubassement face chaud. 13. Température linteau. 14. Température plancher. 15. Température soubassement face DF. 16. Température allège face DF. 17. Température vitre extérieure face froid. 18. Température déflecteur froid. 19. Température appui extérieur. 20. Température allège face froid.

III.1.3. Conditions de test communes des protocoles expérimentaux

Le prototype de double-fenêtre a été conçu pour permettre plusieurs études paramétriques. Ainsi, les tests en conditions contrôlées permettent la caractérisation en régime stationnaire de ses performances thermiques en fonction du débit, de l'écart entre les fenêtres et de l'écart de température entre les deux caissons. La variation du débit est expliquée en III.2.3.b. L'ensemble des tests et de leurs conditions sont présentés dans le Tableau III-3. Ils ont pu être menés uniquement avec le prototype muni de deux fenêtres en simple vitrage. Chaque test a été arrêté une fois toutes les ambiances thermiques stables. Ainsi, les données utilisées dans le chapitre suivant proviendront uniquement de cette période de stabilité des températures. En définitive, il a été testé deux écarts de fenêtre [0,2 ; 0,3] m, deux écarts de températures [15 ; 20]°C et des débits allant de 4,6 à 13,3 m³/h.

Tests	Ecart de fenêtres [m]	Consigne du caisson chaud [°C]	Consigne du caisson froid [°C]	Débit de ventilation [m ³ /h]
#1	0,3	20	5	10,8
#2	0,3	25	5	10,0
#3	0,3	20	5	5,1
#4	0,3	25	5	4,6
#5	0,3	20	5	7,6
#6	0,3	25	5	6,9
#7	0,3	20	5	13,1
#8	0,2	20	5	13,3
#9	0,2	25	5	12,5
#10	0,2	20	5	7,9
#11	0,2	25	5	7,4
#12	0,2	20	5	5,2
#13	0,2	25	5	4,9
#14	0,2	20	5	10,8
#15	0,2	25	5	10,3

Tableau III-3. Conditions des tests menés en conditions contrôlées.

III.2. Plateforme expérimentale in situ

La double-fenêtre présente un comportement thermo aéraulique très complexe qui ne peut être étudié et caractérisé en utilisant uniquement la boîte chaude gardée. En effet, des conditions extérieures variables non-contrôlées permettent de prendre en compte le rayonnement solaire réel et les fluctuations du vent par exemple. L'une des originalités de ce travail consiste donc à adapter une plateforme existante à l'ENTPE (la cellule HYBCELL) en installant une façade dotée de deux doubles-fenêtres et en adaptant sa chaîne de mesure et de contrôle commande.

HYBCELL est une plateforme expérimentale initialement destinée notamment aux études énergétiques et confort (sols chauffants, systèmes de ventilation hybride, façade active, ...). Elle permet d'effectuer des tests avec des sollicitations extérieures réelles et une ambiance intérieure finement instrumentée.

Comme décrite dans les travaux de Bahrar [84] et El Mankibi [86], la cellule est incorporée au bâtiment du laboratoire LGCB sur le site de l'ENTPE et en a été isolée thermiquement sur toutes les parois (cf. Figure III-7). Elle est intégrée à la façade nord-est du laboratoire d'un azimut de 72°. A l'extérieur, deux masques proches en béton ainsi que les bâtiments avoisinants impactent le comportement thermique de la cellule. Sa forme est parallélépipédique et ses dimensions intérieures sont : une longueur de 5 m, une largeur de 3 m, une hauteur sous-plafond de 2,6 m. La cellule est scindée en deux pièces quasi-identiques de 19,5 m³ et 20,5 m³ de volume par un mur de polystyrène de 0,16 m d'épaisseur. Cela permet d'effectuer des tests comparatifs simultanément.

Chacune de ces pièces (A et B) est munie de deux bouches d'aération murales et d'une plafonnière. Les ponts thermiques joignant ces deux pièces se situent au niveau du plancher, du cadre aluminium extérieur, de la porte liant les deux pièces et d'une gaine électrique permettant tous les passages de câbles (cf. Figure III-8). Pour les tests hivernaux, un radiateur électrique a été installé dans chacune des deux pièces. Ces radiateurs sont régulés en puissance électrique en fonction des températures mesurées dans la pièce et des consignes de température. Depuis le scindement de la cellule, un masque proche reproduisant les masques en béton a été fabriqué de manière à égaliser les apports solaires de chaque pièce (cf. Figure III-12).

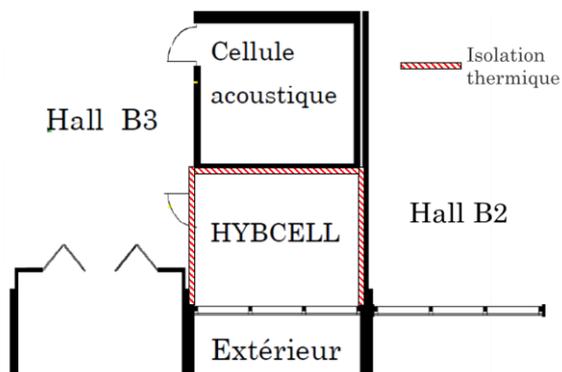


Figure III-7. Plan de la cellule HYBCELL.

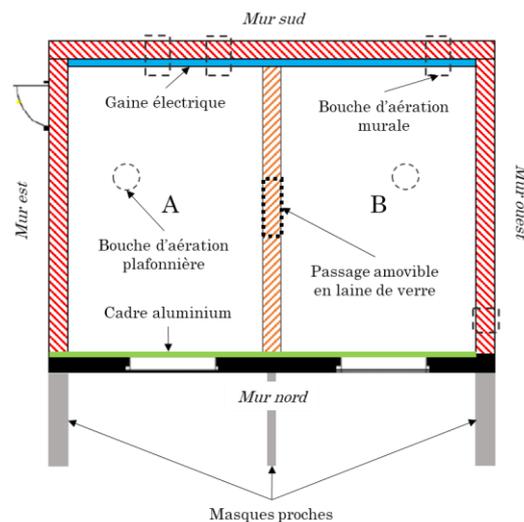


Figure III-8. Schéma de l'intérieur de la cellule.

III.2.1. Conception et mise en œuvre des prototypes pour les tests in situ

III.2.1.a. Adaptation de la façade

La façade extérieure existante n'étant en rien représentative du type de bâtiment visé dans cette thèse et ne permettant pas non plus l'intégration d'une double-fenêtre, elle a été remplacée par une façade conçue selon les mêmes contraintes et principes que le prototype de la boîte chaude gardée (cf. Figure III-9). La taille des menuiseries est identique, le reste de la paroi étant constitué de béton cellulaire (cf. Figure III-10). L'étanchéité à l'air, l'eau et au vent a été assurée :

- sur le pourtour de la façade par un calfeutrement des vides et une protection en zinc (cf. Figure III-12),
- un enduit sur la façade de couleur claire avec retour en tableaux,
- une toiture en zinc avec un recouvrement latéral complet,
- une bavette en métal sur les allèges extérieures (cf. Figure III-11).

A noter que le volume tampon compris entre les deux menuiseries a été peint en blanc de manière à s'approcher d'un état de surface uniforme et peu absorbant pour le confort d'été.



Figure III-9. Mise en place des caissons en bois avec renfort au niveau des linteaux.



Figure III-10. Vue intérieure avant la pose de la fenêtre intérieure et de la peinture blanche.



Figure III-11. Détail sur le raccord menuiserie et la bavette en métal.



Figure III-12. Photo de la façade extérieure de la cellule expérimentale HYBCELL.

III.2.1.b. Système de ventilation mécanique pour une double-fenêtre active

L'ajout du prototype de ventilation mécanique doit permettre un fonctionnement contrôlé de la double-fenêtre rendant cet élément de façade actif. La réflexion sur son intégration dans une façade historique et dans les menuiseries a conduit aux choix suivants :

- la façade historique donnant principalement sur le côté rue des immeubles, la ventilation par la double-fenêtre se fait en insufflation. En effet, les pièces de vie sont souvent disposées côté rue et les pièces de service par lesquelles se fait l'extraction de

l'air côté cours. Par conséquent, cela évite le transfert des odeurs et polluants pouvant provenir des pièces de service (chaudière, cuisine, ...) au travers de l'habitation.

- le système de ventilation est de type simple flux,
- des entrées d'air sont disposées sur les vantaux supérieurs des menuiseries intérieures. La taille des mortaises d'entrée d'air est de taille standard soit 15 x 235 mm.
- les ventilateurs s'intègrent dans les soubassements des menuiseries intérieures. Un pour chaque ouvrant. Cela permet aux prototypes d'être les plus discrets possibles visuellement.

L'ensemble des dimensions est présenté sur les Figure III-13 à Figure III-15 :

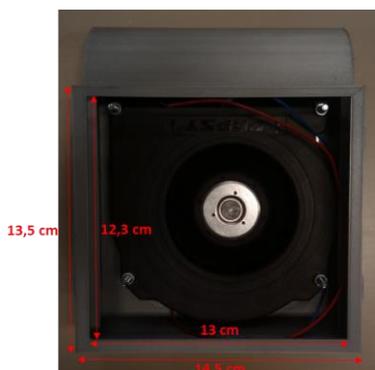


Figure III-13. Vue du ventilateur visible depuis la double-fenêtre.

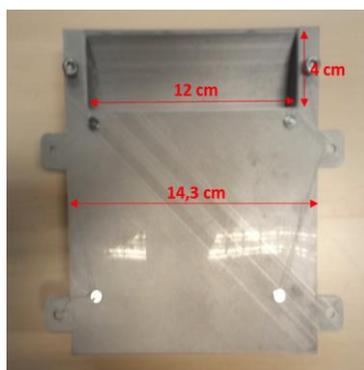


Figure III-14. Vue de la section de soufflage visible depuis l'intérieur de la pièce.



Figure III-15. Vue de la face latérale.

III.2.2. Chaîne de mesure et de contrôle commande

Une partie de l'instrumentation comprend des mesures au niveau de la double-fenêtre en vue de la calibration du modèle numérique (cf. Figure III-16). Elle inclut, par double-fenêtre :

- neuf températures de surfaces mesurées sur toutes les facettes,
- trois températures d'air mesurées sur toute la hauteur.

Une autre partie de l'instrumentation comprend des mesures pour le confort et les conditions aux limites, effectuées au centre de la pièce incluant :

- une température d'air,
- une mesure de la température de globe noir,
- une mesure du CO2.

A cela s'ajoute la mesure des températures des parois de la cellule afin de connaître les conditions aux limites et des conditions météorologiques par l'intermédiaire de la station météo de l'ENTPE située en toiture. A partir de la calibration hivernale de février, un enregistreur de température, humidité relative et CO2 a été disposé à l'extérieur au plus près de la cellule. Les caractéristiques des capteurs utilisés sont présentées dans le Tableau III-4.

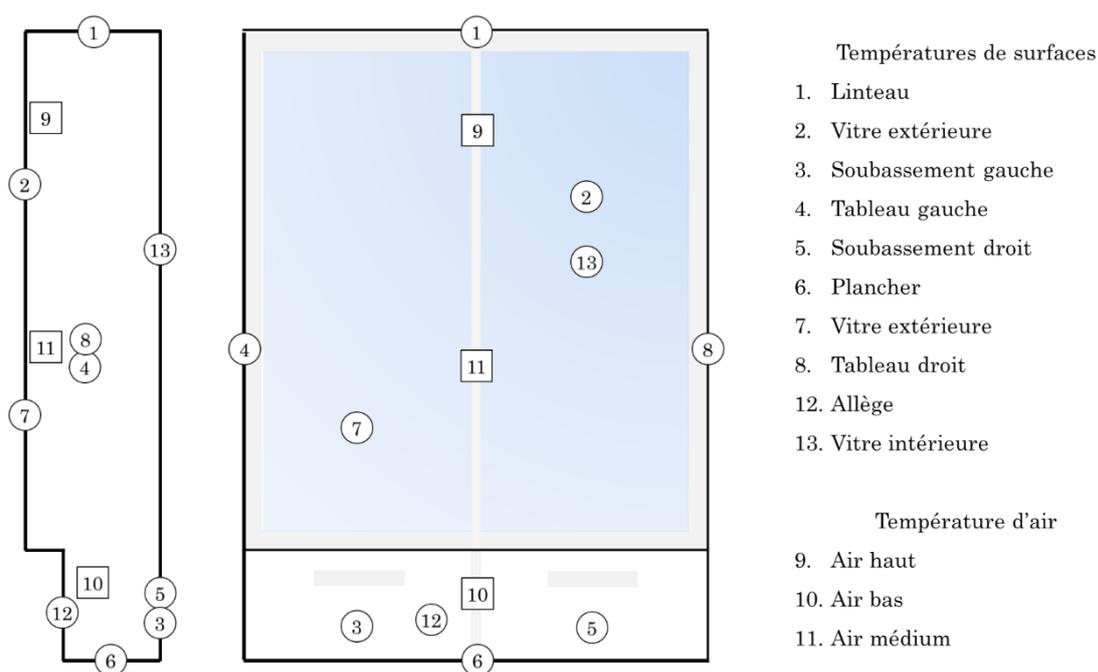


Figure III-16. Positions des capteurs dans la double-fenêtre

Type de mesure	Type de capteur	Précision	Plage de mesure
Température de surface Température d'air Température de globe noir	Sonde PT100	0,1°C	-70 à +200°C
Concentration de CO ₂	HD35EDG (DeltaOhm)	+/- 50 ppm + 3% de la mesure	0 à 5000 ppm
Humidité relative	HD35EDG (DeltaOhm)	+/- 1,8% si 0<HR<80% +/- (1,8+0,11(HR-0,80))HR	0 à 100%

Tableau III-4. Caractéristiques métrologiques des capteurs utilisés dans la cellule HYBCELL.

III.2.3. Protocole expérimental et campagnes de mesures

Outre les différents tests de calibration et de vérification de la cohérence des systèmes, deux campagnes majeures seront présentées dans ce document, l'une effectuée en période estivale du 3 août au 3 octobre et l'autre en période hivernale du 25 janvier au 25 mars. Pour chacune d'elles un protocole expérimental et une feuille de route ont été établis. De plus, des calibrations de la cellule HYBCELL et des prototypes de ventilation ont été réalisées avant chaque campagne expérimentale. La première, dans le but d'évaluer les comportements thermiques des deux pièces de la cellule HYBCELL à l'état initial, c'est-à-dire avec des simples fenêtres. La seconde dans le but de connaître les débits de ventilation en fonction de la tension d'entrée. Une calibration supplémentaire a été effectuée avant la campagne hivernale qui est celle des radiateurs électriques. Etant pilotés et régulés en puissance en fonction des températures mesurées et de la consigne, il était nécessaire de déterminer la puissance électrique de chauffage en fonction du signal d'entrée du contrôleur en 0-10 V.

III.2.3.a. Calibration de la cellule HYBCELL

La calibration vise à étudier le comportement des deux pièces de la cellule dans les mêmes conditions. Cela consiste à tester la cellule avec une simple fenêtre dans chaque pièce. L'objectif est de vérifier si les températures de globe noir et les températures d'air coïncident et, dans le cas contraire, de quantifier les différences afin de connaître les écarts thermiques présents à l'état initial de la campagne expérimentale.

- Calibration de la cellule pour la campagne estivale

La calibration estivale s'est déroulée du 20 au 25 juillet 2018 sans aucune ventilation (mortaises d'entrée obstruées) puis du 25 au 30 juillet avec une ventilation naturelle et une entrée d'air au niveau des mortaises.

Que ce soit sans ventilation ou en ventilation naturelle, les relevés des températures d'air montrent une très bonne concordance entre les deux pièces (cf. Figure III-17). On remarque néanmoins une légère divergence qui commence quelques heures avant minuit et atteint son maximum vers 8 h. Il en va de même pour les températures de globe noir (cf. Figure III-18). Ces écarts sont représentés sur la Figure III-19 et peuvent dépasser 1°C les 24, 25 et 26 juillet pendant environ 30 min. Les statistiques horaires, montrées en Figure III-20, confirment que les périodes entre 7 et 9 h ainsi qu'entre 12 et 14 h sont celles qui provoquent les plus grands écarts. Cela correspond aux périodes de début et de fin d'ensoleillement de la cellule HYBCELL. Par la suite, ces écarts initiaux seront considérés dans l'analyse des résultats.

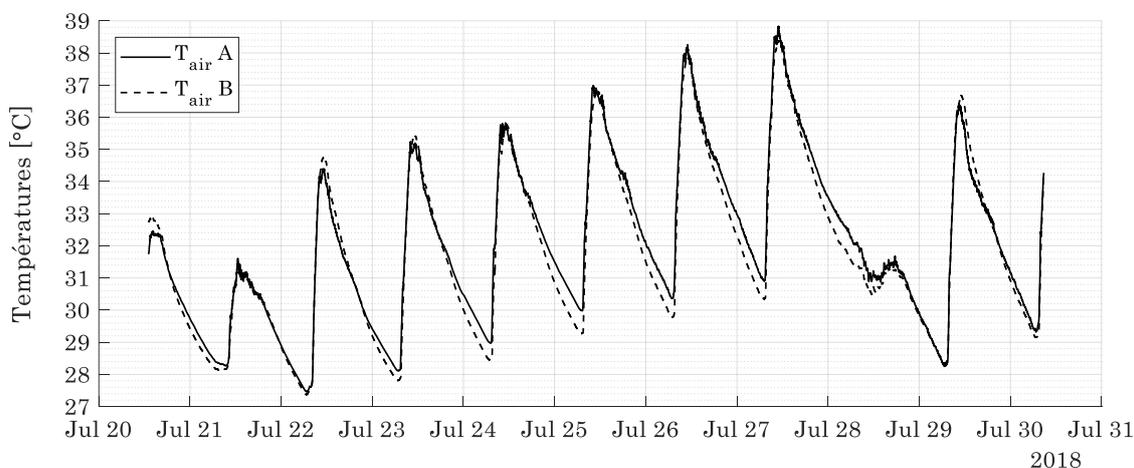


Figure III-17. Evolutions des températures d'air mesurées aux centres des pièces A et B.

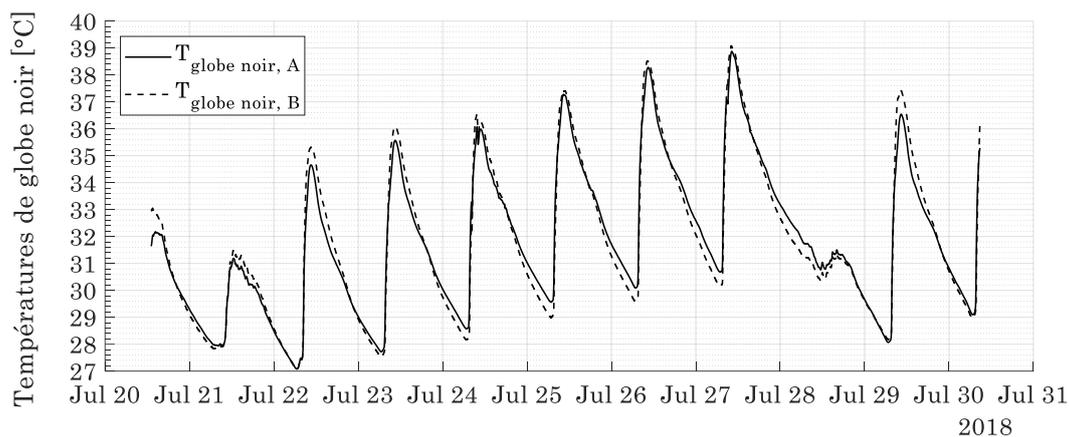


Figure III-18. Evolutions des températures de globe noir mesurées aux centres des pièces A et B.

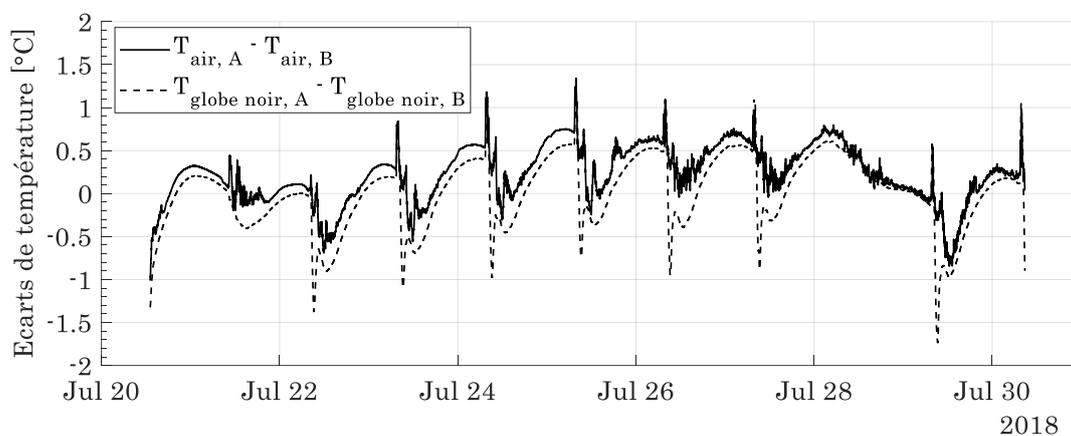


Figure III-19. Variations des écarts de températures d'air et de globe noir entre les pièces A et B.

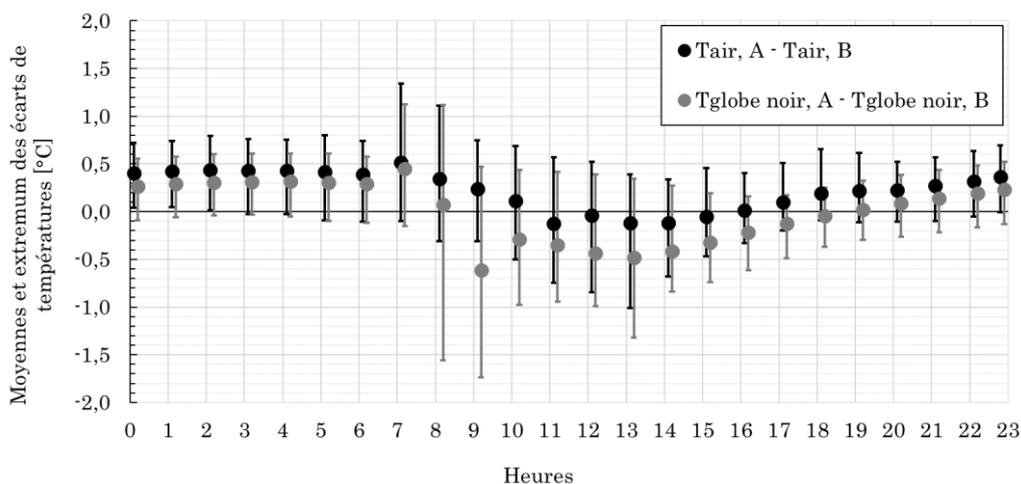


Figure III-20. Moyennes et extrémum des répartitions horaires des écarts de températures d'air et de globe noir entre les pièces A et B.

- Calibration de la cellule pour la campagne hivernale

Avant les premiers tests hivernaux une calibration de la cellule HYBCELL a également été mise en place. Durant celle-ci les mortaises d'entrée d'air n'étaient pas obstruées laissant les pièces ventilées naturellement. La calibration s'est déroulée en deux phases :

- une phase sans chauffage où le comportement thermique de la cellule subit les conditions extérieures. Celle-ci a eu lieu du 7 au 9 février 2019. Lors de cette période et à l'instar de la calibration estivale, l'objectif est d'examiner les variations de température d'air et de globe noir de chacune des deux pièces.
- une période avec chauffage où la consigne de température a été fixée à 20°C. Celle-ci a eu lieu du 11 au 13 février 2019. Lors de cette période les températures de globe noir ainsi que les consommations énergétiques du chauffage vont être comparées.

Comportement thermique

Lors de la phase sans chauffage, on remarque que les comportements thermiques de l'air des deux pièces sont similaires (cf. Figure III-21). 98% du temps l'écart entre les deux températures d'air est inférieur à 0,2 °C.

En revanche, concernant les températures de globe noir il existe un écart plus marqué (cf. Figure III-22). Cette différence pourrait s'expliquer par des températures de paroi aux limites également différentes (cf. Figure III-22). Malgré l'isolation de l'ensemble des parois de la cellule, il semblerait que les températures mesurées dans les parois est et ouest (côté extérieur à l'isolant) aient une influence quand elles diffèrent fortement. En effet, la température de la paroi est, qui est la limite de la pièce A, varie autour de 7°C alors que la température de la paroi ouest, qui est la limite de la pièce B, varie autour de 14°C. La cellule n'étant pas exempte de ponts thermiques les échanges de chaleur entre les parois limites et les parois intérieures pourraient se faire par ce biais. De plus, la pièce A est adjacente à un hall B3 qui possède une occupation et une régulation thermique différente du hall B2 adjacent à la pièce B (cf. Figure III-7). L'analyse des mêmes températures lors de la phase avec chauffage permettra de statuer sur cette hypothèse. Malgré cela l'écart entre les températures de globe noir varie de -1°C en début

d'enregistrement jusqu'à -0.6°C en fin d'enregistrement (cf. Figure III-23). De plus, l'allure est la même pour les deux pièces ce qui est satisfaisant en vue de tests comparatifs.

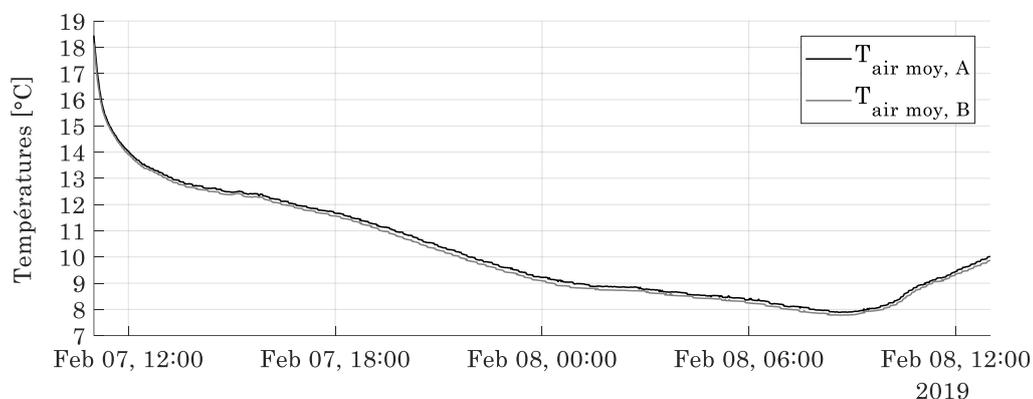


Figure III-21. Températures d'air moyennes mesurées lors de la phase sans chauffage.

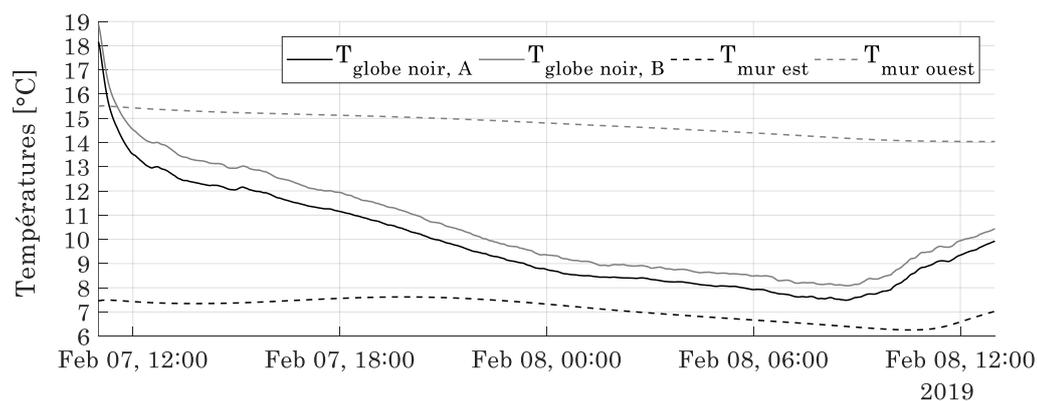


Figure III-22. Températures de globe noir mesurées lors de la phase sans chauffage.

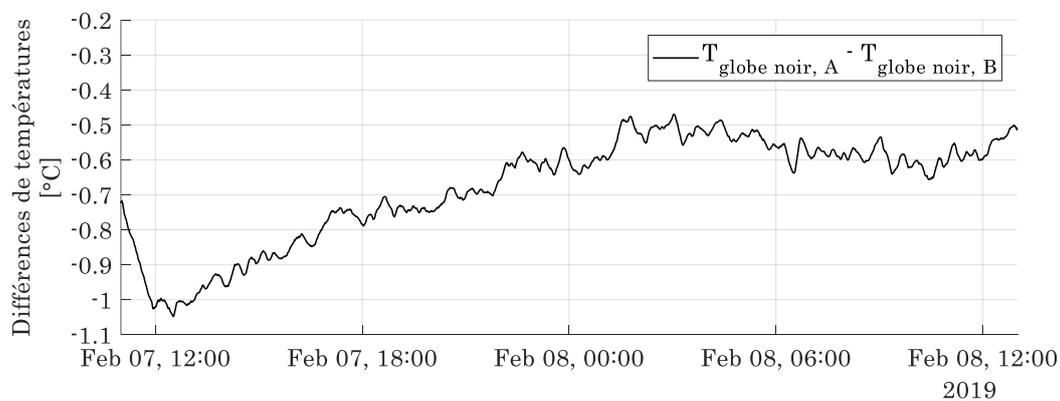


Figure III-23. Différences de températures de globe noir mesurées lors de la phase sans chauffage.

Lors de la phase avec chauffage, on remarque que la consigne de 20°C est précisément atteinte comme le montrent les courbes des températures d'air de la Figure III-24. En revanche, cette figure montre encore une fois un écart entre les températures de globe noir. Cet écart est similaire à celui trouvé durant la phase sans chauffage soit environ 0,6°C. Les courbes des températures des parois aux limites diffèrent également de manière importante ce qui appuie l'hypothèse faite lors de la phase sans chauffage sur la source de l'écart entre les températures de globe noir. Quoiqu'il en soit l'écart est resté moindre mais non négligeable et la tendance entre les deux pièces identique.

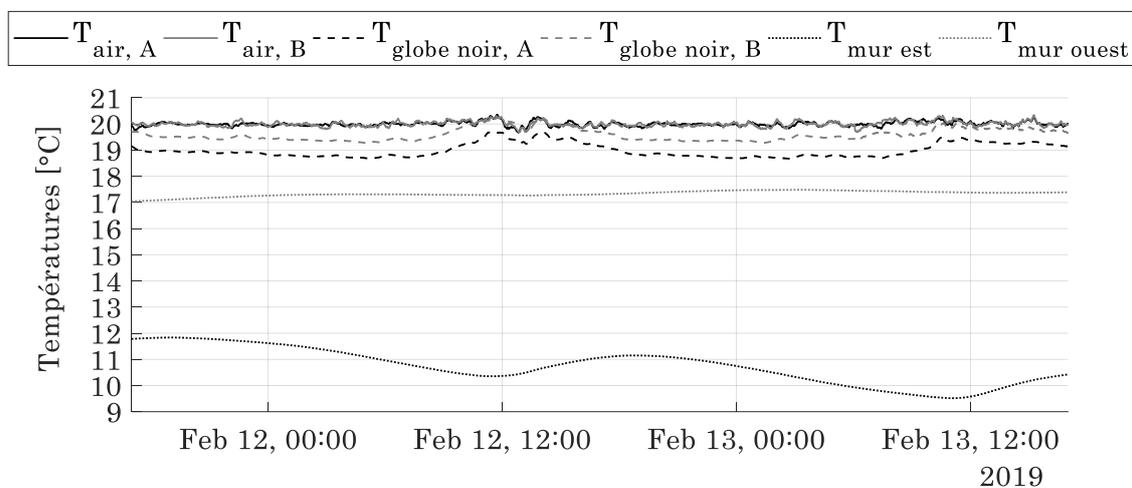


Figure III-24. Températures d'air et de globe noir mesurées lors de la phase avec chauffage.

Puisque la consigne de température a été constamment respectée dans les deux pièces, analysons à présent les consommations électriques des radiateurs lors de cette phase de calibration pour vérifier qu'il n'y ait pas une compensation en chauffage d'une pièce pour l'autre.

Calibration des systèmes de chauffage

La puissance des radiateurs est basée sur la mesure du signal (0-10 V) envoyé à la commande de chauffage qui est proportionnelle à la tension électrique du radiateur. Le signal maximal correspondant à la tension maximale délivrée par le réseau. Nous ferons l'hypothèse que celle-ci a été constante et après mesure atteint 244 V. A noter qu'en hiver il peut y avoir des perturbations dans le réseau électrique entraînant des variations de la

tension. Mais comme les radiateurs sont alimentés par le même réseau, la variation est commune à ces derniers. Par conséquent, cette hypothèse admet certainement une erreur sur les valeurs absolues des tensions aux bornes des radiateurs mais aucune erreur relative entre les appareils. Les résistances électriques des deux radiateurs ont été mesurées (29 Ohm). Par conséquent, les valeurs de puissances électriques consommées ont été calculées à partir de l'équation suivante : $P = U^2/R$.

Une fois les puissances connues on peut comparer les consommations énergétiques C_{ener} . Etant donné que les surfaces au sol S_{sol} des deux pièces diffèrent de 0,38 m², les consommations énergétiques surfaciques sont également utiles. Enfin, pour plus de justesse les consommations énergétiques surfaciques ont également été ramenées à la différence de température entre l'extérieur T_{ext} et l'intérieur $T_{int A/B}$ de la pièce selon la formule (III-1).

$$C_{ener, surf \text{ et par degrés}} = \frac{C_{ener}}{S_{sol A/B} \times (T_{int A/B} - T_{ext})} \quad (III-1)$$

La Figure III-25 montre les variations des puissances électriques des radiateurs de chaque pièce. Ces derniers se comportent de manière similaire même si on peut observer une légère hausse de la puissance du radiateur B. Le Tableau III-5 regroupe les différentes consommations énergétiques afin d'avoir une tendance claire sur la durée. On remarque que la pièce A consomme 7,02% d'énergie par mètre carré de moins que la pièce B et 6,83% lorsque les consommations sont ramenées par degré. Cette tendance est contraire à celle des températures de paroi plus basses dans la pièce A observée précédemment. En résumé, la température de globe noir de la pièce A est inférieure à celle de la pièce B (environ 0,6°C) alors que la consommation de chauffage est également inférieure d'environ 7%.

	Consommation énergétique [kWh]	Consommation énergétique surfacique [kWh/m ²]	Consommation énergétique surfacique et par degré [kWh/(m ² .°C)]
Pièce A	14,372	1,823	0,115
Pièce B	14,704	1,961	0,123
Différence relative	2,26%	7,02%	6,83%

Tableau III-5. Consommations énergétiques des radiateurs électriques lors de la phase avec chauffage.

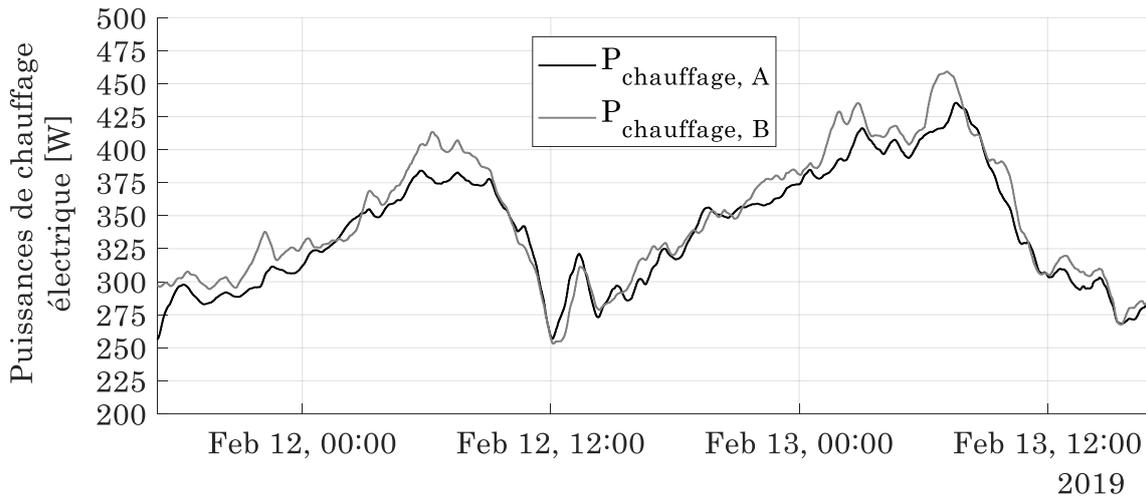


Figure III-25. Puissances électriques délivrées aux radiateurs lors de la phase avec chauffage.

Comportement aéraulique

Les mesures intérieures et extérieures de CO_2 permettent d'évaluer le taux de renouvellement d'air de chaque pièce. Ces évaluations ont été effectuées du 11 au 13 février 2019 avec une ventilation naturelle et sont représentées sur la Figure III-26. On peut constater que ce soit en phase d'inoccupation, en phase d'injection constante ou durant les phases de croissance/décroissance les concentrations des deux pièces sont très similaires. Cela témoigne d'un comportement aéraulique proche.

Afin de calculer les taux de renouvellement d'air la méthode par décroissance a pu être appliquée à la fin de la période d'injection de CO_2 . Cette méthode permet de déterminer le taux de renouvellement d'air τ_{CO_2} en fonction des concentrations C_1 et C_2 respectivement aux instants t_1 et t_2 et de la concentration extérieure C_{ext} selon la formule (III-2).

$$\tau_{\text{CO}_2} = \frac{\ln\left(\frac{C_1 - C_{\text{ext}}}{C_2 - C_{\text{ext}}}\right)}{t_2 - t_1} \quad (\text{III-2})$$

Les résultats figurant dans le Tableau III-6 montrent des renouvellements d'air très proches pour la matinée du 12 février (1,70 pour la pièce A et 1,74 pour la pièce B) mais un peu plus éloignés pour la seconde matinée (1,98 pour la pièce A et 1,65 pour la pièce B). Compte-tenu de la propagation des incertitudes liés aux différentes mesures du CO_2 , cet écart est minime par rapport à l'incertitude du taux de renouvellement d'air. En

résumé, les taux de renouvellement d'air trouvés sont très satisfaisants et montrent un comportement similaire entre les deux pièces de la cellule HYBCELL. Une retenue peut être effectuée sur le fait que ces calculs de renouvellement d'air ont été réalisés uniquement sur les périodes de décroissance des concentrations de CO₂ et non sur l'ensemble de la période de mesure.

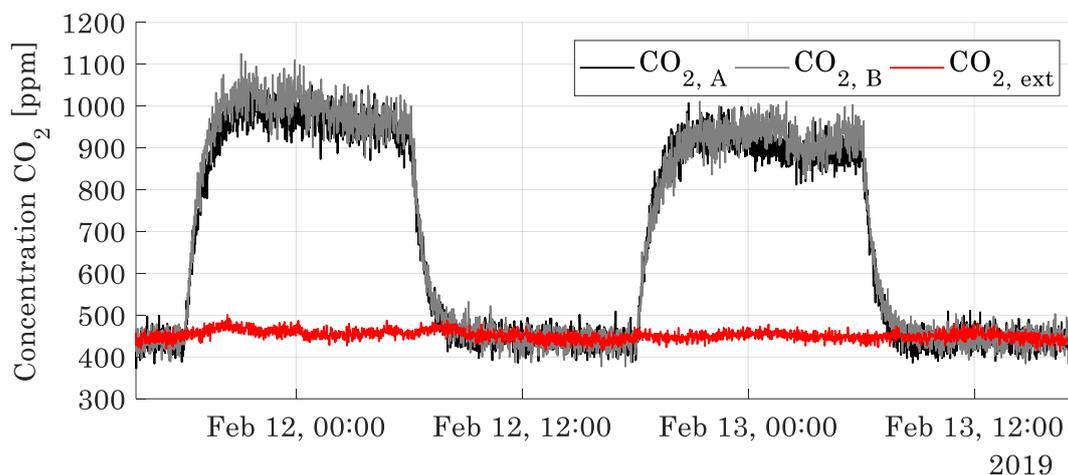


Figure III-26. Relevés des concentrations en CO₂ mesurés lors de la phase avec chauffage.

	C _{CO2 A} [ppm]	C _{CO2 B} [ppm]	C _{CO2 ext} [ppm]	τ _{CO2 A} [vol/h]	τ _{CO2 B} [vol/h]
12/02 6h20	859	886	451	1,70	1,74
12/02 8h00	489	489	465	+/- 2,21	+/- 2,21
13/02 6h20	811	839	445	1,98	1,65
13/02 7h45	472	488	450	+/- 2,81	+/- 1,61

Tableau III-6. Taux de renouvellement d'air calculés lors de la phase avec chauffage.

III.2.3.b. Calibration des systèmes de ventilation

Le but ici est d'estimer le débit de ventilation en fonction des conditions de fonctionnement. Nous avons supposé que les pertes de charge dues au volume d'air étaient négligeables devant celles du ventilateur et des mortaises d'entrée d'air. Ainsi, à conditions égales le débit sera le même pour un écart entre les fenêtres de 0,3 ou 0,1 m.

Pour mesurer ce débit de ventilation, un ballomètre FlowFinder a été utilisé. Il s'agit d'une mesure du débit par compensation de la pression à zéro en appliquant directement le ballomètre sur la section de soufflage du ventilateur. Ses caractéristiques sont montrées dans le Tableau III-7.

Les mesures au FlowFinder ont été réalisées pour chaque ventilateur, plusieurs fois et avec des tensions d'alimentation variant entre 6 et 20 V pour chaque campagne expérimentale. Elles sont présentées en Figure III-27 pour la campagne estivale et en Figure III-28 pour la campagne hivernale. A noter que les ventilateurs nommés #1 et #2 sont installés sur la double-fenêtre de la pièce A alors que les ventilateurs nommés #3 et #4 le sont sur celle de la pièce B.

Plage de mesure	10 à 550 m ³ /h
Précision	1 m ³ /h +/- 3% (minimum 3 m ³ /h)

Tableau III-7. Caractéristiques métrologiques du ballomètre FlowFinder.

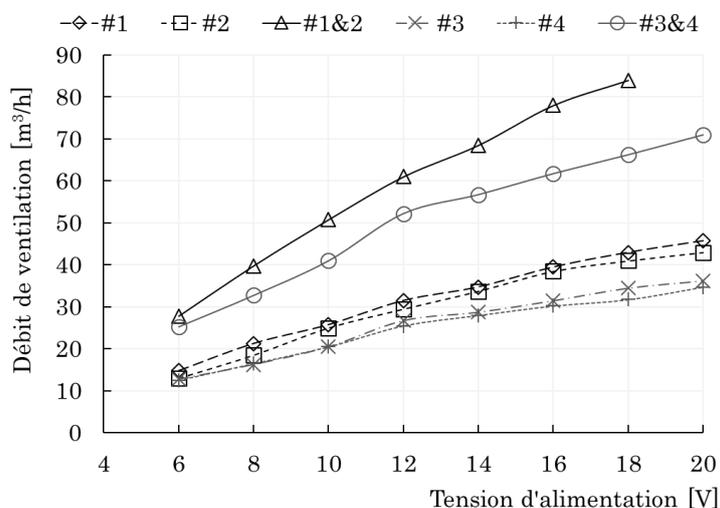


Figure III-27. Débits de ventilation moyennés de chaque prototype en fonction de sa tension d'alimentation pour la campagne estivale.

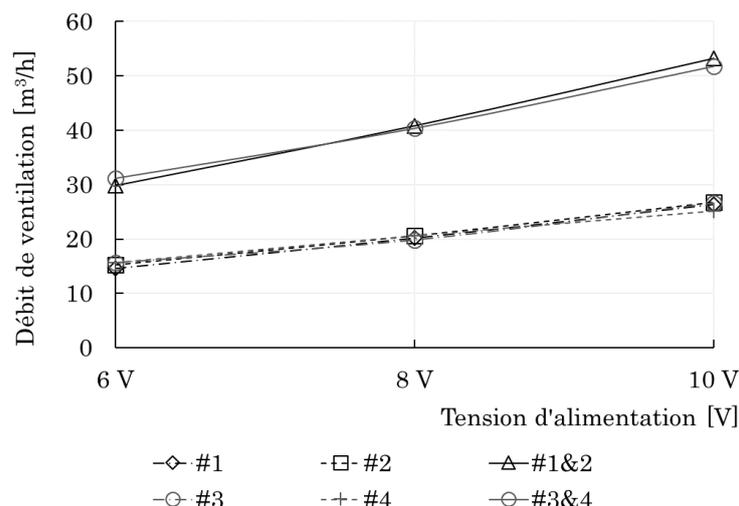


Figure III-28. Débits de ventilation moyennés de chaque prototype en fonction de sa tension d'alimentation pour la campagne hivernale.

Seulement, cette mesure se fait de manière ponctuelle et dépend de certaines conditions de fonctionnement. N'ayant pas de système de régulation sur ces ventilateurs il est prévu de maintenir la tension d'alimentation fixe pour chaque test. Or, la connaissance du débit à chaque instant est primordiale. Seulement, les performances aérauliques du ventilateur peuvent être impactées par les conditions de vent ou encore le gradient de température vertical au sein de la double-fenêtre. Afin de mesurer et considérer leurs impacts nous avons enregistré la vitesse de soufflage pour deux configurations de tension différentes durant une semaine chacune (6 V pour le ventilateur #1 uniquement puis 6 V pour les ventilateurs #1 et #2). Les mesures de vitesse de soufflage rapportées à la vitesse du vent et au gradient de température sont présentées sur la Figure III-29 pour la première semaine et sur la Figure III-30 pour la seconde semaine. A noter que la vitesse du vent considérée correspond à celle au voisinage de la façade de la cellule et a été déterminée à partir de la vitesse du vent de la station météo selon la procédure de la norme ISO 15099 [87] détaillée en V.3.2.a. Sur ces graphiques, le gradient de température est positif si la température d'entrée est supérieure à celle de soufflage.

Dans un premier temps, ces deux figures montrent que la vitesse de soufflage varie fortement sur la période étudiée. Les vitesses de soufflage peuvent varier du simple au double sur une échelle de 24 h. En effet, la vitesse de soufflage atteint son maximum peu avant midi chaque jour. Cette période correspond à la fin de la période d'ensoleillement direct de la cellule. La vitesse de soufflage baisse ensuite progressivement le reste de la

journée pour atteindre son minimum peu après 6 h. Ainsi le débit de ventilation ne peut être considéré comme constant tout au long des tests. Dans un second temps, les deux semaines de mesures montrent une corrélation entre la vitesse de soufflage et le gradient de température au sein de la double-fenêtre. Les deux grandeurs augmentent et diminuent selon les mêmes rythmes journaliers. En revanche, il ne semble pas avoir de corrélation directe entre la vitesse de soufflage et celle du vent. En effet, on peut observer sur les deux graphiques que les augmentations de la vitesse de soufflage coïncident tantôt avec une augmentation de la vitesse du vent et tantôt avec une diminution. Il en est de même pour les baisses de la vitesse de soufflage. Cela ne signifie pas pour autant que le vent n'impacte pas la ventilation mais plutôt que les mesures ne permettent pas de relier mathématiquement les deux grandeurs. Par conséquent, nous retiendrons uniquement la corrélation directe de la vitesse de soufflage avec le gradient de température.

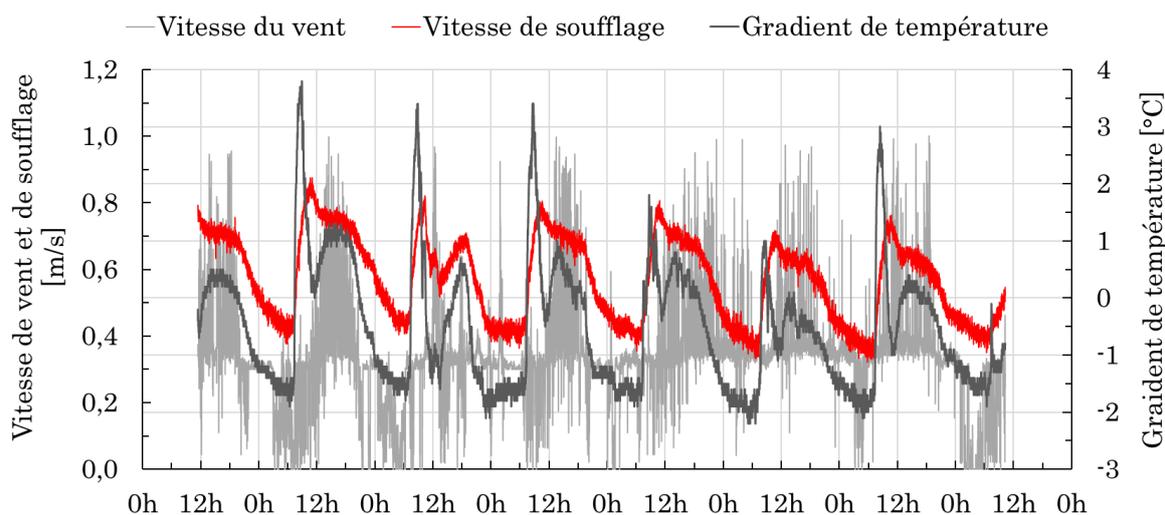


Figure III-29. Mesures de vitesse de soufflage du ventilateur #1, de vitesse du vent et du gradient de température au sein de la double-fenêtre pour une tension d'alimentation de 6 V pour le ventilateur #1 uniquement.

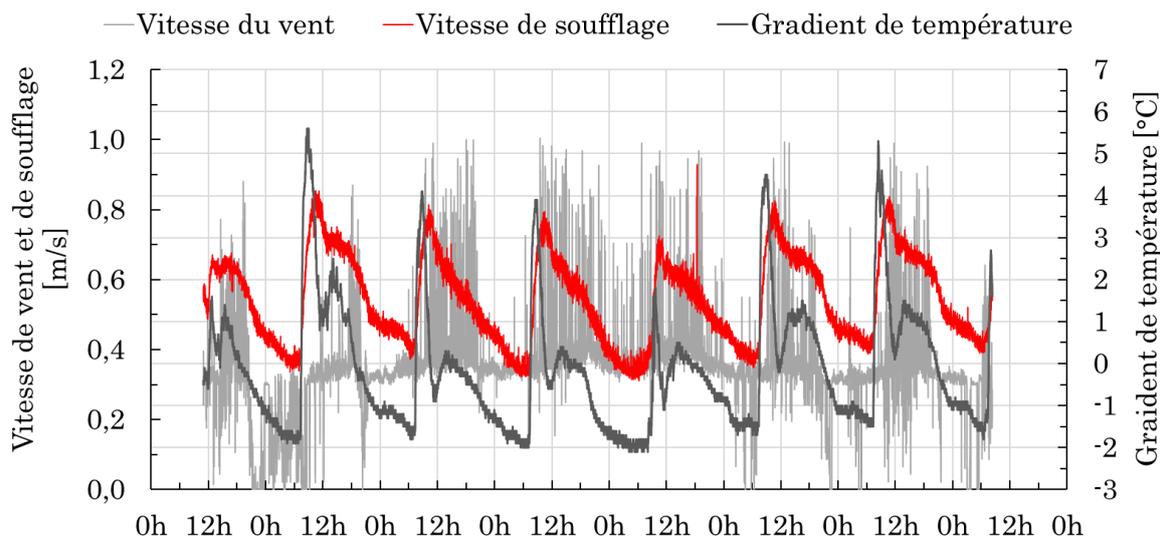


Figure III-30. Mesures de vitesse de soufflage du ventilateur #1, de vitesse du vent et du gradient de température au sein de la double-fenêtre pour une tension d'alimentation de 6 V pour les ventilateurs #1 et #2.

Comme montré en III.2.2, le gradient de température au sein de la cavité est une grandeur mesurée à chaque pas de temps. Ainsi, il faut à présent déterminer la corrélation entre la vitesse de soufflage et ce gradient. Nous ferons ensuite l'hypothèse que le débit de ventilation subit les mêmes variations que la vitesse de soufflage. Rappelons que la mesure du débit avec le FlowFinder est ponctuelle et requiert la présence d'un utilisateur. Il était alors impossible de mesurer le débit sur les deux semaines de mesure de la vitesse de soufflage. En revanche, les mesures de débit présentées en Figure III-27 et Figure III-28 ont été effectuées avec un gradient de température égal à $2,4^{\circ}\text{C}$. C'est pourquoi nous allons rechercher la corrélation entre la variation de la vitesse de soufflage et la variation du gradient de température toutes deux relativement aux valeurs mesurées avec un gradient de température de $2,4^{\circ}\text{C}$.

Pour cela, les données des deux semaines sont rassemblées et triées en fonction du gradient de température arrondi au dixième. Ensuite, nous faisons correspondre à chaque gradient une vitesse de soufflage moyenne ce qui donne la représentation graphique de la Figure III-31.

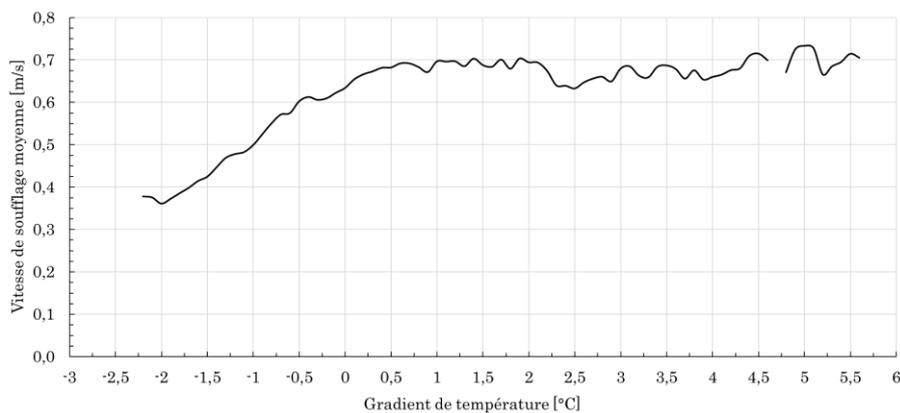


Figure III-31. Vitesses de soufflage moyennes en fonction du gradient de température arrondi au dixième.

Puis les variations relatives de la vitesse de soufflage $VAR V_{soufflage}$ et du gradient de température $VAR \Delta T$ sont obtenues selon les relations (III-3) et (III-4). On obtient alors la courbe du graphique Figure III-32.

$$VAR V_{soufflage} = \frac{V_{soufflage} - V_{soufflage\ 2,4^{\circ}C}}{V_{soufflage\ 2,4^{\circ}C}} \quad (III-3)$$

$$VAR \Delta T = \frac{\Delta T - 2,4}{2,4} \quad (III-4)$$

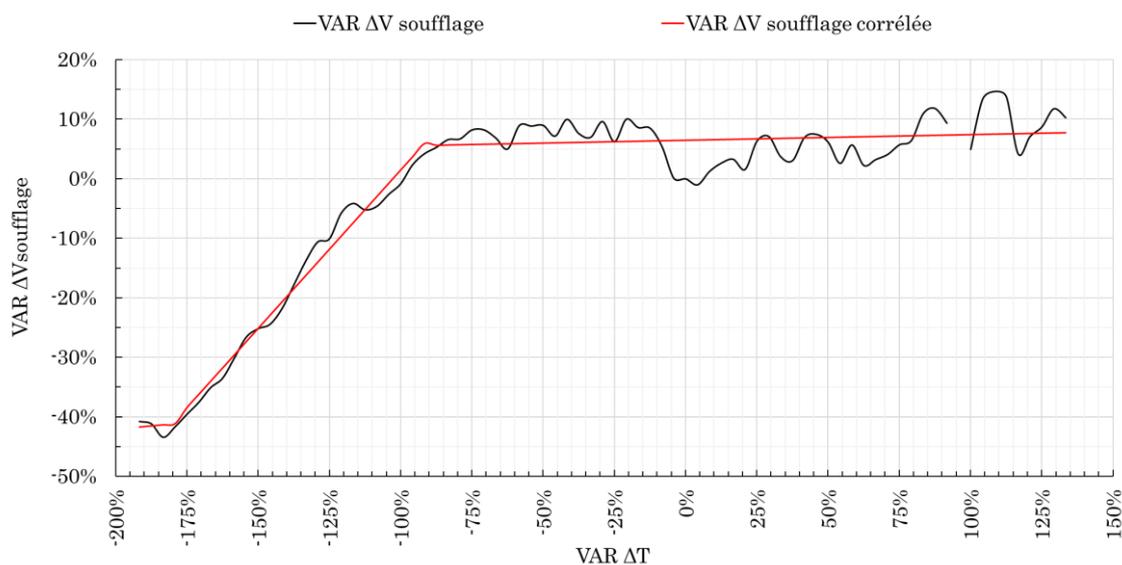


Figure III-32. Evolution de la variation de la vitesse de soufflage et celle de la variation corrélée en fonction de la variation du gradient de température.

L'utilisation d'un polynôme de degré 6 aurait permis de trouver une corrélation avec un coefficient de détermination égal à 98%. Cependant, son utilisation aurait été limitée à la plage de variation mesurée durant les deux semaines et ne permet pas d'extrapoler correctement à des cas où le gradient sort de cette plage. C'est pourquoi il a été fait le choix de découper la courbe selon trois dynamiques observées :

- une croissance linéaire lente assurant un débit minimum lorsque $VAR \Delta T \leq -175\%$,
- une croissance linéaire rapide lorsque $-175\% < VAR \Delta T \leq -70\%$,
- une croissance linéaire plus lente plafonnant le débit lorsque $VAR \Delta T > -70\%$.

Ce découpage a conduit à la corrélation suivante et est également présentée à travers la courbe rouge de la Figure III-32 :

- si $VAR \Delta T \leq -175\%$ alors $VAR V_{soufflage} = 0,0454 \times VAR \Delta T + 0,3303$
- si $-175\% < VAR \Delta T \leq -90\%$ alors $VAR V_{soufflage} = 0,5325 \times VAR \Delta T + 0,5472$
- si $VAR \Delta T > -90\%$ alors $VAR V_{soufflage} = 0,0095 \times VAR \Delta T + 0,0647$

La fonction de la variation de la vitesse de soufflage corrélée reproduit très bien la variation de la vitesse de soufflage mesurée puisque son coefficient de détermination est de 0,96. En définitive, on obtient le débit de ventilation en fonction du débit mesuré au FlowFinder $débit_{FlowFinder}$ grâce à la relation (III-5).

$$Q_v = débit_{FlowFinder}(1 + VAR V_{soufflage}) \quad (III-5)$$



Comme évoqué en III.1.3 cette correction du débit a également été appliquée pour les tests en boîte chaude mais sur les valeurs de débit directement mesurées sur le prototype BCG afin de considérer les pertes de charge du conduit de ventilation ajouté. Ces derniers sont présentés dans le Tableau III-8. Les incertitudes sur les débits ont été calculées suivant la NF ISO/CEI GUIDE 98-3 [88].

<i>Ventilateur</i>	<i>Tension d'alimentation</i> [V]	<i>Débits mesurés</i> [m ³ /h]				<i>Débit moyen</i> [m ³ /h]
#1	6	10	12	12	11	22 ± 1,1
#2	6	12	10	9	11	
#1	-	-	-	-	-	-
#2	8	10	12	10	10	11 ± 0,7
#1	-	-	-	-	-	-
#2	10	15	18	15	16	16 ± 1,0
#1	8	14	14	15	15	28 ± 0,5
#2	8	14	14	13	14	

Tableau III-8. Débits mesurés avec le FlowFinder pour plusieurs tensions d'alimentation et pour le test en BCG.

III.2.3.c. Protocoles et scénarios expérimentaux pour les tests in situ

Les scénarios mis en place permettent plusieurs études paramétriques. Tout au long des deux campagnes il a été testé des profondeurs de cavité différentes [0,1 à 0,3] m. Le débit étant dépendant des conditions extérieures il a été défini plusieurs scénarios sur la base des mesures effectuées avec le FlowFinder avec un gradient de température de 2,4°C. Ainsi trois scénarios ont été définis pour chaque campagne qui sont présentés dans le Tableau III-9. Le mode de ventilation naturelle a aussi été testé lors des deux premiers tests où les mortaises ont été laissées ouvertes et les ventilateurs éteints.

	<i>Tension / n° ventilateurs en A</i>	<i>Tension / n° ventilateurs en B</i>	<i>Débit obtenu en A [m³/h]</i>	<i>Débit obtenu en B [m³/h]</i>
<i>Campagne estivale</i>				
<i>Q1</i>	6 V / #1	6 V / #3	13 ± 1,7	13 ± 1,4
<i>Q2</i>	12 V / #1	16 V / #3	30 ± 0,9	30 ± 0,7
<i>Q3</i>	12 V / #1 #2	16 V / #3 #4	61 ± 1,2	62 ± 0,8
<i>Campagne hivernale</i>				
<i>Q1'</i>	6 V / #1	6 V / #3	15 ± 0,4	16 ± 0,6
<i>Q2'</i>	8 V / #1	8 V / #3	20 ± 0,9	20 ± 0,6
<i>Q3'</i>	6 V / #1 #2	6 V / #3 #4	30 ± 0,7	31 ± 0,9

Tableau III-9. Scénario des débits de ventilation pour chaque campagne expérimentale.

Grâce à la disposition de la cellule HYBCELL des tests comparatifs ont pu être effectués en simultanément. Ils ont permis notamment de tester une double-fenêtre avec un simple vitrage côté intérieur dans la pièce A et une autre avec un double vitrage côté intérieur dans la pièce B lors de la campagne estivale. Lors des tests hivernaux la profondeur de cavité ainsi que le débit ont été différenciés entre la pièce et la pièce B. De plus, la consigne de température à l'intérieur de la cellule a été maintenue à 20°C. Un récapitulatif du protocole estival est présenté en Tableau III-10 et un autre pour la campagne hivernale en Tableau III-11. La durée des tests a été d'environ une semaine pour chaque test.

Tests	Date	Type vitrage intérieur (A / B)	Ecart de fenêtres (A = B) [m]	Débit de ventilation (A = B) [m³/h]
#1	03/08/18 – 10/08/18	Simple / *Simple fenêtre	0,3	*Ventilation naturelle
#2	10/08/18 – 17/08/18	Simple / Double	0,3	*Ventilation naturelle
#3	17/08/18 – 24/08/18	Simple / Double	0,3	Q1
#4	24/08/18 – 31/08/18	Simple / Double	0,3	Q2
#5	10/09/18 – 18/09/18	Simple / Double	0,3	Q3
#6	18/09/18 – 22/09/18	Simple / Double	0,2	Q2
#7	25/09/18 – 03/10/18	Simple / Double	0,2	Q3

Tableau III-10. Conditions des tests in situ lors de la campagne expérimentale d'été.

Tests	Date	Type vitrage intérieur (A / B)	Ecart de fenêtres (A / B) [m]	Débit de ventilation (A / B) [m ³ /h]
#8	14/02/19 – 20/02/19	Simple / Double	0,2 / 0,2	Q1'/Q1'
#9	20/02/19 – 27/02/19	Simple / Double	0,3 / 0,2	Q1'/Q1'
#10	28/02/19 – 07/03/19	Simple / Double	0,1 / 0,2	Q1'/Q1'
#11	07/03/19 – 14/03/19	Simple / Double	0,2 / 0,2	Q2'/Q1'
#12	14/03/19 – 25/03/19	Simple / Double	0,2 / 0,2	Q3'/Q1'

Tableau III-11. Conditions des tests in situ lors de la campagne expérimentale d'hiver.

Chapitre IV. Caractérisation expérimentale de la double-fenêtre active

Le prototypage ainsi que les plateformes et protocoles expérimentaux présentés dans le chapitre précédent nous ont permis d'établir une base de données expérimentale importante aussi bien quantitativement qu'en termes de variété des grandeurs physiques mesurées. Par conséquent, l'analyse de ces mesures requiert une approche méthodique et ciblée.

Ce quatrième chapitre a donc pour objectif de traiter toute cette base de données expérimentale afin d'en extraire des observations et recommandations. Ces dernières se feront aussi bien en régime permanent qu'en régime dynamique. Elles seront concentrées sur le comportement thermique intrinsèque de la double-fenêtre et sur ses performances thermiques.

IV.1. En conditions contrôlées

Dans un premier temps, nous nous attacherons à étudier le comportement thermique de deux grandeurs que sont les températures de soufflage et l'effet de paroi froide lié à la menuiserie intérieure. Cela sera mis en relief par rapport aux différentes conditions des tests permettant une analyse paramétrique selon le débit de ventilation, l'écart entre les fenêtres et l'écart de température. Dans un second temps, nous tenterons de statuer et de quantifier les performances thermiques. Pour cela, deux coefficients de transmission thermique global ainsi qu'un coefficient d'efficacité du préchauffage seront établis et utilisés. Durant ces tests l'écart entre les fenêtres a été fixé à [0,2 ; 0,3] m et l'écart de température entre les deux caissons à [15 ; 20] °C. Seule une double-fenêtre avec deux menuiseries en simple vitrage a été testée.

IV.1.1. Comportement thermique de la double-fenêtre en conditions stationnaires

IV.1.1.a. Comportement dynamique des températures de soufflage

Pour rappel, la température T_f du caisson froid a été fixé à 5°C. La Figure IV-1 montre l'ensemble des évolutions des températures de soufflage en fonction des débits pour chaque configuration. La courbe bleue correspond aux tests avec une consigne côté

chaud de 20°C et un écart de 0,3 m entre les fenêtres. La courbe rouge correspond aux tests où seule la consigne côté chaud a été montée à 25°C. Celle en vert aux tests où seul l'écart entre les fenêtres a été raccourci à 0,2 m. La courbe violette aux tests où à la fois la consigne côté chaud et l'écart entre les fenêtres ont été modifiés respectivement à 25°C et 0,2 m. Les pentes (a) des courbes de tendance sont également affichées.

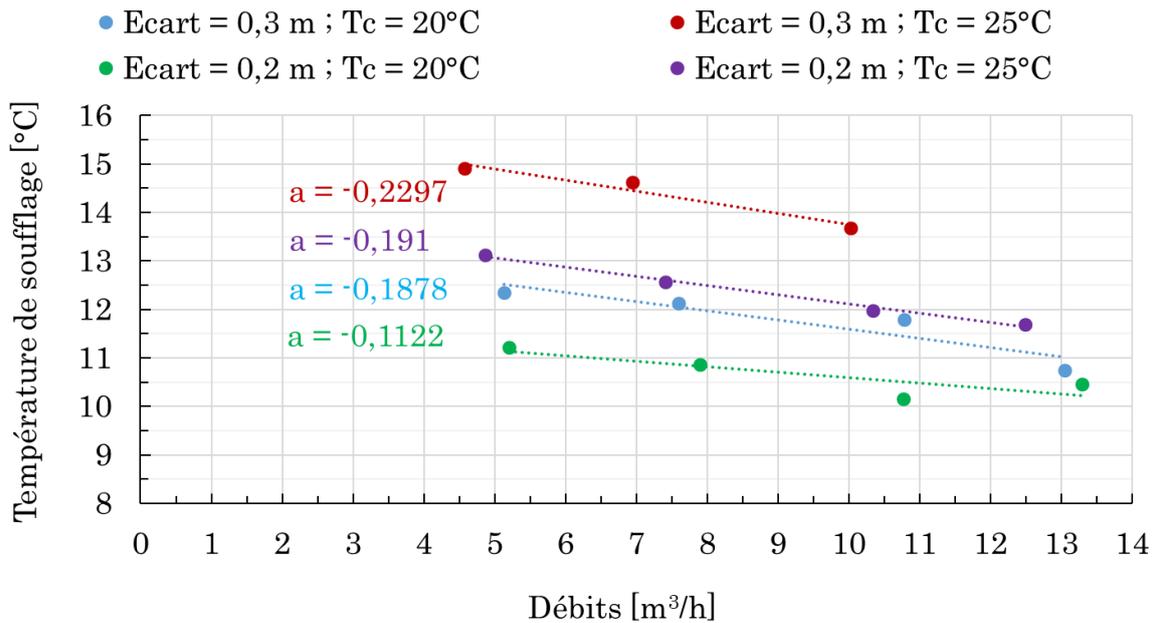


Figure IV-1. Evolutions des températures de soufflage en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.

- Influence du débit de ventilation

En se focalisant sur les courbes en fonction de la variation du débit de la Figure IV-1, on observe une baisse systématique de la température de soufflage pour un débit croissant. Même si l'augmentation du débit provoque une augmentation de la vitesse et donc des échanges convectifs, il écourte également la durée de circulation de l'air froid dans la cavité et donc la quantité d'énergie échangée. Ce deuxième effet est prédominant sur le premier, expliquant ainsi les températures de soufflage plus basse pour les débits élevés. Les pentes (a) des quatre courbes sont de [-0,188 ; -0,230 ; -0,112 ; -0,191] °C/(m³/h) respectivement pour les courbes bleues, rouges, vertes et violettes. Cela montre que sur la plage de débit testé la diminution de la température de soufflage en fonction du débit est proche quel que soit la configuration.

- Influence de l'écart de température des caissons

Les courbes, où seul le gradient thermique de part et d'autre de la double-fenêtre varie (bleues/rouges et vertes/violettes de la Figure IV-1), montrent des températures de soufflage plus élevées pour les gradients thermiques de 20°C. Ce qui est logique puisque la quantité de chaleur à récupérer est plus élevée lors des tests à consigne chaude de 25°C.

- Influence de l'écart entre les fenêtres

Pour évaluer l'influence de la profondeur de la cavité nous avons comparé les couples de courbes bleue/verte et rouge/violette de la Figure IV-1. On remarque alors qu'un écart de 0,3 m entraîne des températures de soufflage plus élevée qu'un écart de 0,2 m. La différence est plus nette pour une consigne T_c de 25°C. Autrement dit la récupération de chaleur est améliorée pour une double-fenêtre plus profonde. On peut supposer deux explications à cela. Encore une fois par l'augmentation de la durée de circulation dans la cavité puisque son volume est augmenté. Deuxièmement, l'augmentation de la profondeur entraîne des surfaces d'échanges latérales (tableaux, linteau et plancher) plus importantes. Comme le montre le graphique de la Figure IV-2, ces surfaces sont en majorité plus chaudes que l'air soufflé et participent à son réchauffement. En effet, ce graphique montre que la surface du plancher est systématiquement plus chaude que l'air soufflé. Les autres surfaces sont toutes plus chaudes pour les sept premiers tests qui correspondent aux tests avec un écart de 0,3 m. Pour les huit tests suivants, la surface du tableau droit est toujours plus froide que l'air soufflé. Toutes les autres surfaces sont plus chaudes excepté le tableau gauche et le linteau pour les tests 8 et 9 réalisés avec un débit respectif de [13,3 ; 12,5] m³/h.

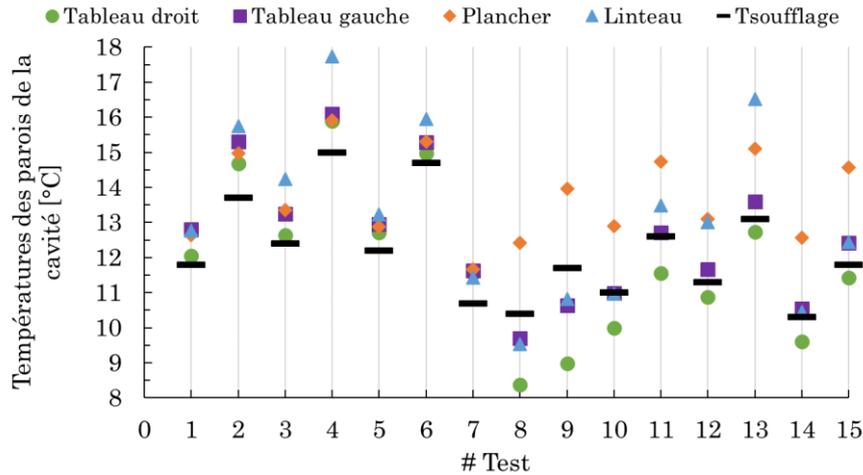


Figure IV-2. Températures des surfaces latérales et de la température de soufflage lors de chaque test.

IV.1.1.b. Comportement dynamique de l'effet de paroi lié à la menuiserie intérieure

Notons que la fenêtre est composée d'une partie transparente (la vitre) et d'une partie opaque (le soubassement) en négligeant le cadre. La Figure IV-3 montre l'ensemble des évolutions des gradients de températures dans le caisson chaud entre la température d'air et celle de la vitre intérieure puis entre la température d'air et celle du soubassement en fonction des débits pour chaque configuration. Les courbes bleues correspondent aux tests avec une consigne côté chaud de 20°C et un écart de 0,3 m entre les fenêtres. Les courbes rouges correspondent aux tests où seule la consigne côté chaud a été montée à 25°C. Celles en vert aux tests où seul l'écart entre les fenêtres a été raccourci à 0,2 m. Les courbes violettes aux tests où à la fois la consigne côté chaud et l'écart entre les fenêtres ont été modifiés respectivement à 25°C et 0,2 m. Les courbes en trait pointillé correspondent aux gradients liant la vitre intérieure et celles en trait plein aux gradients liant le soubassement. Les pentes de chaque courbe (a) sont également affichées.

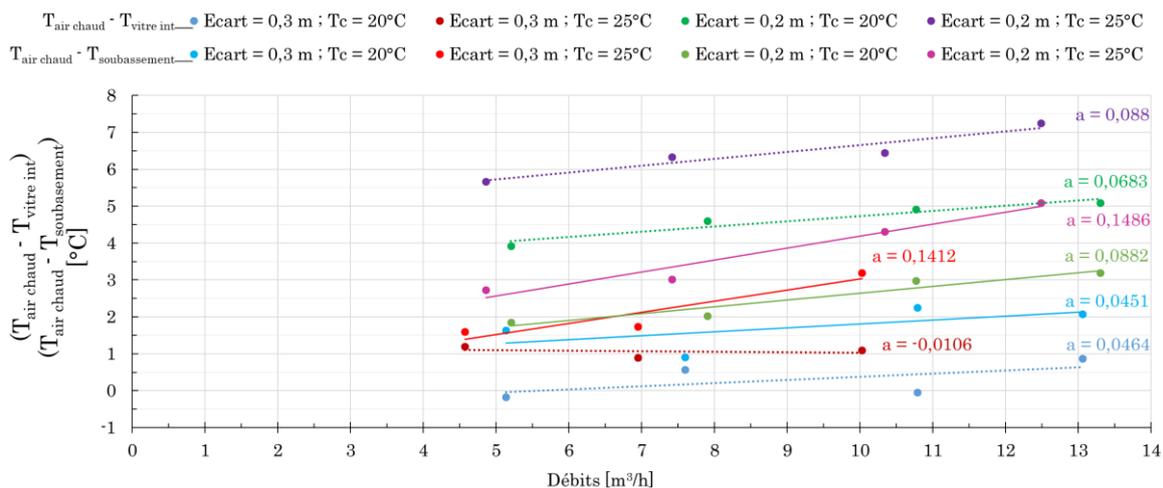


Figure IV-3. Evolutions des gradients de températures entre l'air du caisson chaud et la vitre intérieure et le soubassement en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C .

- Influence du débit de ventilation

L'influence du débit de ventilation est le même pour ces surfaces que pour la température de soufflage. Les surfaces se refroidissent à mesure que le débit augmente excepté pour le vitrage intérieur avec un écart de 0,3 m et une consigne chaude de 25°C . Pour ce dernier dans ces conditions il semblerait que le débit influence négativement mais très légèrement le gradient thermique. Cela signifierait que dans ces conditions la vitre intérieure se réchauffe légèrement avec l'augmentation du débit. Cette tendance est à relativiser au fait qu'elle provient de trois résultats contre quatre pour toutes les autres.

- Influence de l'écart de température des caissons

Pour un même débit, la Figure IV-3 indique que le gradient thermique est toujours plus important pour des écarts de température entre caissons de 20°C que 15°C . Ainsi, l'effet de paroi froide sera accentué par des ambiances intérieures plus élevées. Concernant le gradient liant la température du soubassement, la pente des courbes concernées et pour des écarts de 0,2 et 0,3 m passent respectivement de 0,149 à 0,088 $^\circ\text{C}/(\text{m}^3/\text{h})$ et de 0,141 à 0,045 $^\circ\text{C}/(\text{m}^3/\text{h})$ en diminuant la consigne T_c . En ce qui concerne le vitrage intérieur et si l'on excepte le test avec une consigne à 25°C où la courbe a un comportement très particulier comme expliqué précédemment, la pente passe de 0,088 à 0,068 $^\circ\text{C}/(\text{m}^3/\text{h})$ en diminuant la consigne T_c . Par conséquent, l'effet de paroi froide

de la vitre intérieure est beaucoup moins impacté par le changement de température du caisson chaud. Ainsi, ce dernier ne provoque pas la même augmentation des températures de la menuiserie intérieure sur l'ensemble de la menuiserie intérieure.

- Influence de l'écart entre les fenêtres

Selon le même graphique de la Figure IV-3, on peut remarquer que la vitre intérieure est plus impactée par la réduction de la profondeur de la fenêtre. En effet, pour un écart de 0,3 m, le gradient est systématiquement inférieur à celui du soubassement alors que pour un écart de 0,2 m il est systématiquement supérieur. La vitre intérieure subit donc un refroidissement plus important que le soubassement. En revanche, l'augmentation du débit a tendance à atténuer cet effet puisque les pentes des courbes du soubassement augmentent de manière plus importante comparées à celles de la vitre intérieure. Celles de la vitre passent de 0,046 à 0,068 °C/(m³/h) pour une consigne à 20°C alors que celles du soubassement passent de 0,045 à 0,088 °C/(m³/h). Les débits durant ces tests ne sont pas suffisamment élevés pour éventuellement constater le point d'intersection de chaque couple de courbe.

IV.1.2. Caractérisation des performances thermiques de la double-fenêtre active

Les performances des fenêtres sont caractérisées à l'aide de deux coefficients. Le premier est le coefficient de transmission thermique ordinairement appelé U_w . Il inclut à la fois le coefficient de transmission thermique du vitrage U_g , celui du cadre U_f et des coefficients de pertes linéiques comme le décrivent les normes ISO 15099 [87] et NF EN ISO 10077-1 [89]. Cette dernière spécifie des méthodes de calcul du coefficient U_w pour les fenêtres simples ou doubles notamment. La formule générale pour les doubles-fenêtres de cette norme se définit selon l'équation (IV-1).

$$U_w = \frac{1}{\frac{1}{U_{w1}} - R_{si} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{w2}}} \quad (IV-1)$$

où U_{w1} et U_{w2} sont les coefficients de transmission thermique des fenêtres extérieure et intérieure. R_{si} et R_{se} sont respectivement la résistance superficielle intérieure de la fenêtre extérieure utilisée seule et la résistance superficielle extérieure de la fenêtre intérieure utilisée seule. R_s est la résistance thermique de la cavité de la double-fenêtre. A travers cette formule on remarque que le calcul ne peut s'appliquer aux fenêtres ventilées de manière traversante. De plus, la norme présente une double-fenêtre comme un assemblage de deux fenêtres sur un même encadrement. Par conséquent, dans le cadre de cette thèse cette norme ne peut être utilisée.

La norme NF EN ISO 12567-1 [83] propose également une méthode de détermination de la transmission thermique des fenêtres à l'aide d'une boîte chaude gardée. En revanche, les doubles-fenêtres ne sont pas considérées. Cependant, le mode opératoire repose sur un bilan thermique qui peut s'utiliser pour la double-fenêtre. En effet, le but est de déterminer le flux thermique traversant la fenêtre q_w (équation (IV-2)) et de déterminer ensuite le coefficient de transmission U_w (équation (IV-3)).

$$q_w = \frac{\Phi_{chauffage} - \Phi_{support} - \Phi_{edge}}{A_w} \quad (IV-2)$$

$$U_w = \frac{q_w}{\Delta\theta_n} \quad (IV-3)$$

où $\Phi_{chauffage}$, $\Phi_{support}$ et Φ_{edge} sont respectivement la puissance de chauffage du caisson chaud, le flux thermique traversant le support de la fenêtre et le flux thermique traversant les bords entre la fenêtre et le support. A_w est la surface de la fenêtre et $\Delta\theta_n$ est la différence entre les températures ambiantes de chaque côté de la fenêtre.

Comme l'expliquent Appelfeld et Svendsen [42] ou Greffet dans sa thèse [66], le principe des doubles-fenêtres ventilées en insufflation imposent une démarche différente. En effet, la chaleur perdue à travers les fenêtres va être en partie récupérée par l'air circulant. Cette récupération n'est pas considérée par le coefficient de transmission « classique » présenté précédemment. Utiliser les formules des équations (IV-1) et (IV-3) pour caractériser la double-fenêtre reviendrait à sous-estimer ses performances. Par conséquent, la récupération de chaleur est à considérer dans les calculs des performances thermiques. De plus, comme le souligne Greffet, suivant le référentiel utilisé à savoir l'enveloppe interne d'un bâtiment ou l'enveloppe externe, les pertes thermiques au niveau

de la double-fenêtre seront considérées respectivement au niveau de la fenêtre intérieure ou au niveau de la fenêtre extérieure. Appelfeld et Svendsen s'attachent à utiliser un coefficient de transmission thermique qui considère l'enveloppe interne. Ils somment alors les pertes au niveau de la fenêtre extérieure avec la chaleur récupérée par ventilation. De l'autre côté, Greffet utilise les deux considérations (interne et externe) à travers deux coefficients de transmission thermique : $U_{w,e}$ qu'il désigne comme coefficient équivalent et $U_{w,app}$ comme coefficient apparent. Cependant, il couple ce dernier à un facteur d'efficacité de récupération de chaleur.

Dans cette thèse, nous considérerons les deux référentiels (interne et externe) de la paroi afin de mettre en avant les différences. Le prototype a été conçu telle une double-fenêtre installée à même le sol pour la menuiserie intérieure alors que la menuiserie extérieure est une fenêtre possédant alors une allège. Cela crée une différence entre la hauteur des deux menuiseries. En outre, l'allège participe directement au comportement thermique de la double-fenêtre puisqu'elle est en contact avec l'air circulant dans la cavité. Par conséquent, il a été fait le choix d'inclure l'allège en tant que composant de la double-fenêtre et non plus du mur.

Le second coefficient qui permet de caractériser les fenêtres est le facteur solaire S_w . Il permet de mesurer la capacité de la fenêtre à transmettre la chaleur issue de radiations solaires à l'intérieur du bâtiment. Cependant, il n'est pas possible de le déterminer à l'aide des dispositifs expérimentaux présentés et ne sera donc pas étudié dans ce rapport.

IV.1.2.a. Comportement dynamique des coefficients de transmission thermique

Afin de calculer les coefficients de transmission thermique, nous considérons que les flux à travers les différents blocs de la double-fenêtre sont monodimensionnels. Par conséquent, le bilan thermique de la boîte chaude gardée peut s'écrire selon l'équation (IV-4).

$$\Phi_{chauffage} = \Phi_{support} + \Phi_{allège} + \Phi_{w,ext} + \Phi_{edge} + \Phi_{vent} \quad (IV-4)$$

où les flux sont représentés sur la Figure IV-4. Les flux traversant un bloc Φ (support ou allège) se calculent en fonction de la surface du bloc A , de la différence de température de surface à ses limites ΔT_s et de sa résistance thermique R_{th} , suivant la relation (IV-5). Les résistances thermiques sont déterminées à partir des données des fabricants des matériaux utilisés pour le support et l'allège.

$$\Phi = \frac{A \times \Delta T_s}{R_{th}} \quad (IV-5)$$

Le flux traversant les bords Φ_{edge} est calculé selon la méthode de calcul de la norme NF EN ISO 12567-1 [83]. Le flux de ventilation Φ_{vent} peut se déterminer en fonction de la masse volumique de l'air circulant dans la double-fenêtre ρ_{DF} , de sa chaleur spécifique $c_{p,DF}$, du débit Q_v et de la différence entre la température de sortie T_{sortie} et celle d'entrée $T_{entrée}$ suivant l'équation (IV-6).

$$\Phi_{vent} = \rho_{DF} \times c_{p,DF} \times Q_v \times (T_{sortie} - T_{entrée}) \quad (IV-6)$$

Connaissant la puissance de chauffage, le bilan thermique (IV-4) permet ainsi de déterminer le flux à travers la menuiserie extérieure. Ensuite, les coefficients de transmission thermique de la double-fenêtre se définissent selon un gradient de température entre le caisson chaud et froid ΔT_{ch-fr} et la surface totale de l'ensemble fenêtre extérieure et allège $A_{w,ext+allège}$ comme décrit dans les équations (IV-7) et (IV-8).

$$\text{fenêtre intérieure: } U_{w1} = \frac{(\Phi_{allège} + \Phi_{w,ext} + \zeta \times \Phi_{edge} + \Phi_{vent})}{A_{w,ext+allège} \times \Delta T_{ch-fr}} \quad (IV-7)$$

$$\text{fenêtre extérieure: } U_{w2} = \frac{(\Phi_{allège} + \Phi_{w,ext} + \zeta \times \Phi_{edge})}{A_{w,ext+allège} \times \Delta T_{ch-fr}} \quad (IV-8)$$

Un coefficient ζ est rajouté devant le flux traversant les bords. Initialement, la norme NF EN ISO 12567-1 [83] ne considère pas ce flux dans la caractérisation d'une fenêtre car il dépend aussi de la paroi dans laquelle est la menuiserie. Seulement, puisque nous considérons ici l'allège comme partie intégrante de la double-fenêtre il semble aussi

cohérent de considérer le flux à travers les bords entre la fenêtre et l'allège. Ce dernier représente une fraction du flux totale à travers les bords. C'est cette proportion que traduit le coefficient ζ .

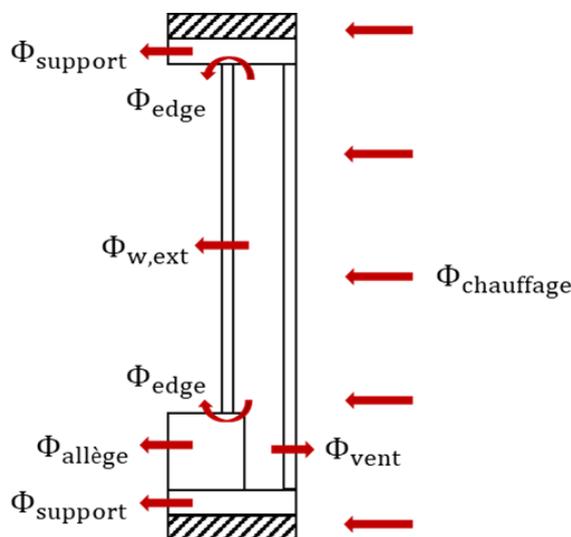


Figure IV-4. Schéma du bilan thermique utilisé pour le calcul du coefficient de transmission thermique.

Les évolutions du coefficient U_{w1} sont représentées sur la Figure IV-5 et celles du coefficient U_{w2} sur la Figure IV-6. Premièrement, on remarque que les deux dynamiques sont similaires. L'augmentation du débit réduit les performances thermiques et la performance thermique de la double-fenêtre semble tendre vers une asymptote dans les faibles débits. Le coefficient U_{w1} a des valeurs supérieures à celles de U_{w2} car le premier prend en compte le flux de ventilation et correspond ainsi au flux traversant la menuiserie intérieure alors que le second coefficient correspond aux pertes à travers la menuiserie extérieure. Dans le cas où il y a récupération de chaleur, U_{w1} est forcément supérieur à U_{w2} . La similarité dynamique des deux coefficients se situe aussi dans la hiérarchie des configurations. Dans les deux cas, les meilleures performances sont atteintes avec un écart réduit (0,2 m) et avec un faible gradient de température (20°C), suivies de la configuration où l'écart passe à 0,3 m. Enfin ce sont les configurations avec les plus grands gradients de température qui montre des performances plus faibles. Cela signifie que le flux de ventilation ne bouleverse pas cette hiérarchie. De plus, en comparant les performances selon l'écart entre les fenêtres (courbes verte/bleue et violette/rouge), on remarque que les coefficients obtenus sont très proches. Ainsi, élargir la double-fenêtre ne semble pas être

le paramètre le plus impactant. Le gradient de température aux bornes de la double-fenêtre et le débit de ventilation sont donc les deux paramètres les plus impactant.

Pour l'ensemble des configurations les minimums ont des valeurs comprises entre 2,4 et 3,2 W/(m².K) pour U_{w1} et entre 2,0 et 2,9 W/(m².K) pour U_{w2} . Dans notre cas l'allège, d'une résistance thermique de 2,38 °C.m²/W, est considérée comme partie intégrante du système de double-fenêtre. Elle représente 18% de la section de la double-fenêtre. Par conséquent, elle joue un rôle important dans les valeurs des U_w et a tendance ici à faire baisser ces valeurs. A noter également que l'exigence de 1,9 W/(m².K) dictée par la réglementation, comme détaillé en I.1.1, n'est alors jamais atteinte. Cependant, elle n'est pas adaptée à une double-fenêtre ventilée puisqu'elle ne considère pas sa capacité à être également un organe de ventilation. On peut donc penser qu'une exigence moins rude serait appliquée dans ce cas et concernerait aussi son efficacité à préchauffer l'air insufflé. C'est pourquoi il est rigoureux de quantifier la récupération de la chaleur.

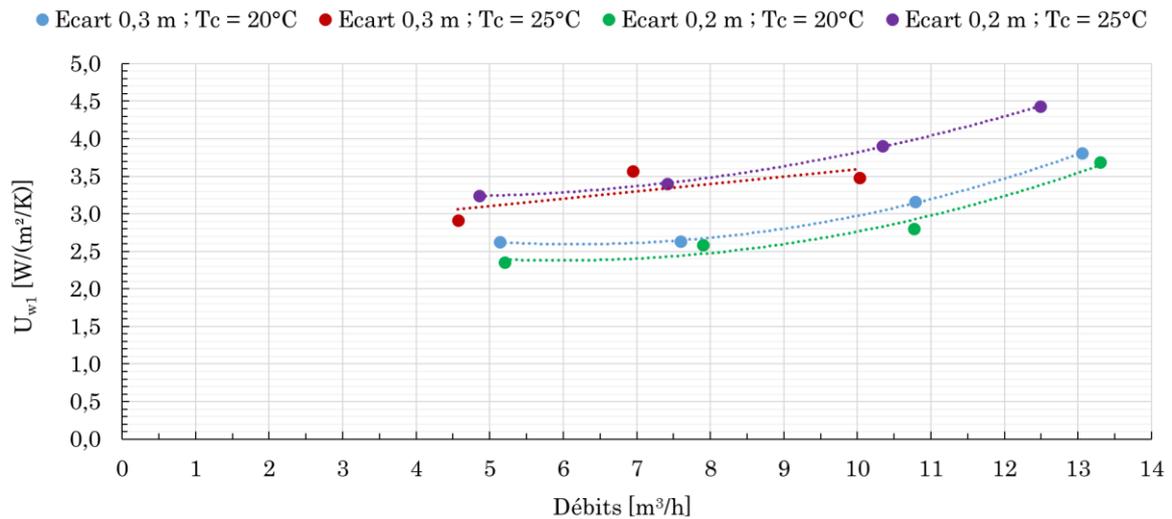


Figure IV-5. Evolutions du coefficient U_{w1} en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.

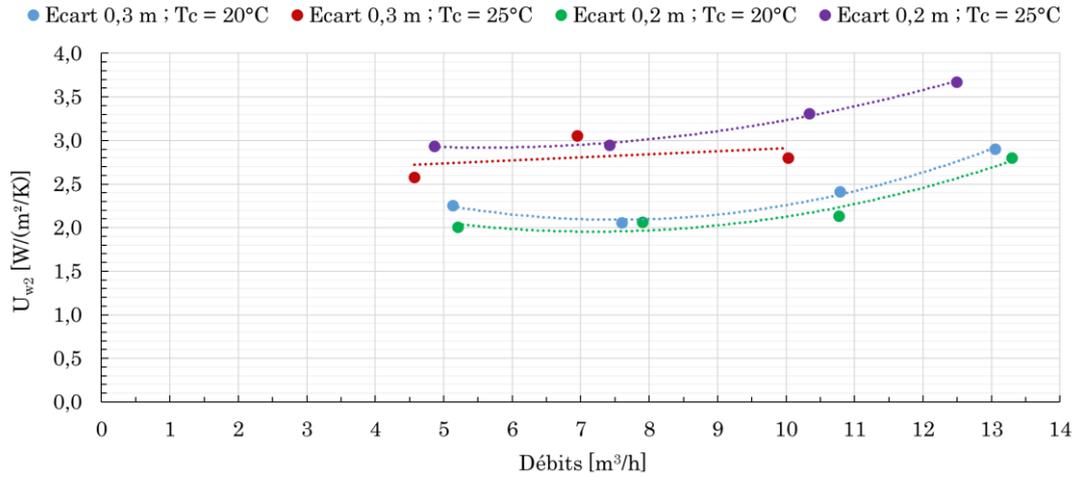


Figure IV-6. Evolutions du coefficient U_{w2} en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.

IV.1.2.b. Comportement dynamique de l'efficacité de préchauffage d'air

Afin d'étudier l'apport et l'efficacité de la ventilation dans la double-fenêtre, un indice de rendement ε a été établi (équation (IV-9)). Ses évolutions sont représentées sur la Figure IV-7.

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{soufflage}} - T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}} \quad (IV-9)$$

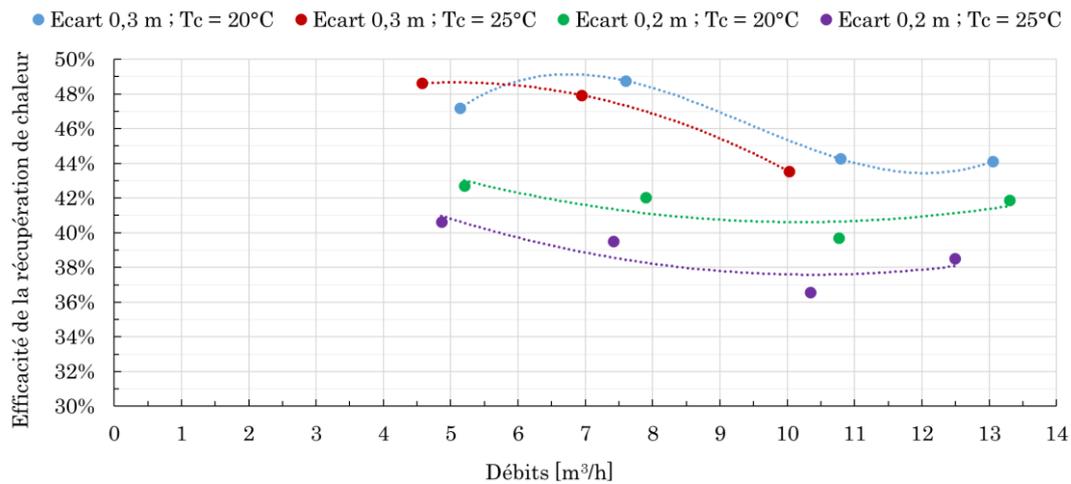


Figure IV-7. Evolutions de l'efficacité de la récupération de chaleur en fonction du débit pour chaque configuration. T_f fixée à 5°C.

Pour chaque configuration, le débit le plus faible soit environ 5 m³/h offre le meilleur rendement excepté pour la courbe bleue où il est trouvé pour un débit d'environ 7,5 m³/h. Ces meilleurs rendements varient entre 40 et 49%. Les plus faibles rendements sont obtenus pour un débit compris entre 10 et 11 m³/h excepté encore pour la courbe bleue où le rendement à 13 m³/h est également un minimum. Ces minimums sont compris entre 36 et 44%. Ainsi, le système de double-fenêtre permet de récupérer au minimum plus d'un tiers de la chaleur perdue par la fenêtre intérieure tout en assurant un débit de ventilation élevé.

Des tests supplémentaires permettraient de confirmer et d'affiner les courbes mais on peut tout de même faire quelques observations. Tout d'abord, les écarts de fenêtre les plus grands (0,3 m) offrent les meilleures rendements (courbes bleue et rouge) quel que soit le débit de ventilation. Cela rejoint l'analyse faite sur les températures de soufflage en IV.1.1.a, mettant en avant le rôle supposé des parois latérales et du temps de circulation au sein de la cavité. La différence de rendement selon l'écart entre les fenêtres a tendance à diminuer avec l'augmentation du débit. Deuxièmement, un écart de température plus faible aux bornes de la double-fenêtre (ici 15°C) entraîne, dans 6 cas sur 7, une meilleure récupération de la chaleur peu importe l'écart entre les fenêtres (0,2 ou 0,3 m). Ainsi malgré la diminution de la chaleur disponible, la récupération de la chaleur est plus efficace pour des gradients faibles ce qui ne signifie pas une température de soufflage plus élevée en revanche comme constaté en IV.1.1.a.

Afin de conclure la caractérisation à l'aide de la boîte chaude, intéressons-nous à la répartition des flux au travers l'ensemble de l'échantillon afin situer ce flux de ventilation.

IV.1.2.c. Répartition des flux de chaleur transférés

La répartition des flux traversant la double-fenêtre représentée sur l'histogramme en Figure IV-8, offre une vue globale des zones les plus déperditives selon les configurations. Sur l'axe secondaire sont rappelés les coefficients U_{w1} obtenus pour chaque test. Les barres sont classées par débit croissant pour chaque configuration dans l'ordre suivant : [Ecart = 0,3 m et $T_c = 20^\circ\text{C}$; Ecart = 0,3 m et $T_c = 25^\circ\text{C}$; Ecart = 0,2 m et $T_c = 20^\circ\text{C}$; Ecart = 0,2 m et $T_c = 25^\circ\text{C}$].

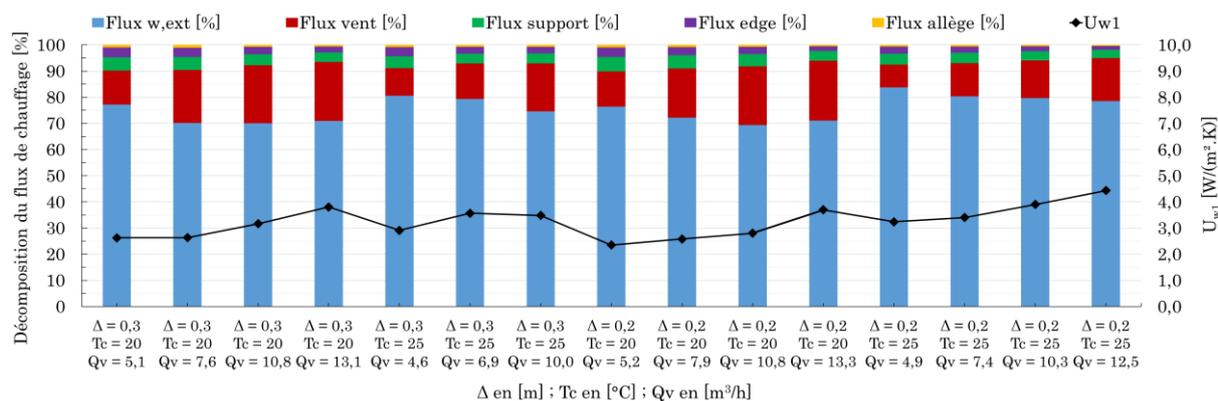


Figure IV-8. Décomposition du flux de chauffage traversant le prototype de la double-fenêtre sur sa limite du côté froid.

La menuiserie extérieure est la plus déperditive et représente entre 69 et 84% de la puissance de chauffage. Cette dernière est ensuite en majorité récupérée par l'air circulant dans la cavité. Ce flux de ventilation est compris entre 9 et 23%. Le reste de la puissance de chauffage est dissipée très minoritairement par le support, les effets de bord et l'allège. Ils représentent à eux trois entre 5 et 10% du flux de chauffage.

En suivant les répartitions selon l'augmentation du débit, on remarque que les pertes par la menuiserie extérieure stagnent rapidement. On observe également que leurs maximums sont atteints pour les plus faibles débits. Concernant les parts du flux de ventilation il croît en même temps que le débit mais stagne aussi rapidement alors que, selon la Figure IV-7, l'efficacité des échanges décroît. Par conséquent, l'augmentation de la prépondérance du flux de ventilation et a contrario une baisse de celle du flux traversant la menuiserie extérieure ne signifient pas une amélioration du rendement de ventilation ni une baisse des coefficients de transmission thermique.

Si l'on écarte les trois flux minoritaires que sont les flux du support, des effets de bord et de l'allège, on obtient les tendances montrées en Figure IV-9.

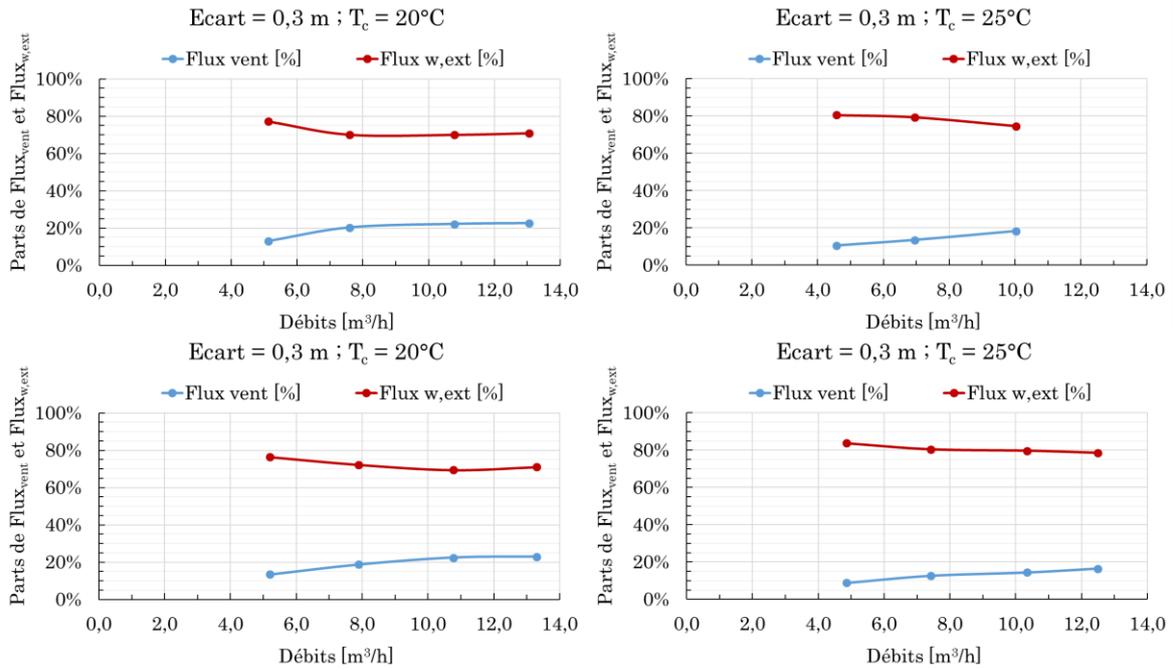


Figure IV-9. Parts de Flux_{vent} et Flux_{w,ext} selon le débit de ventilation pour chaque configuration.

En augmentant le débit, les quatre configurations tendent vers un équilibre des répartitions entre le flux de ventilation et le flux traversant la menuiserie extérieure. Ce ratio est visible pour les deux configurations où la consigne du caisson chaud est de 20°C. Il tend vers une valeur de 71% pour le flux à travers la menuiserie extérieure et 23% pour celui de ventilation. Cet équilibre est atteint plus ou moins rapidement en fonction du débit selon le gradient de température. Pour un gradient de 15°C il est atteint rapidement dès 8 m³/h alors que pour un gradient de 20°C il n'est pas encore atteint à 12 m³/h.

A présent que les données extraites des tests en conditions contrôlées ont été analysées et que plusieurs observations ont pu être faites, analysons les données expérimentales en conditions in situ.

IV.2. En conditions in situ

Dans cette partie nous allons utiliser l'ensemble des données expérimentales de la cellule HYBCELL pour caractériser le comportement thermique in situ de la double-fenêtre. Afin de mieux prendre en compte le contexte météorologique, trois périodes ont été extraites des données mesurées. Ces trois périodes sont liées à l'ensoleillement de la double-fenêtre et se définissent ainsi :

- la nuit: P1
- la période d'exposition au rayonnement solaire direct : P2
- hors nuit et exposition au rayonnement solaire direct : P3

L'irradiation directe a été calculée selon les équations présentées en V.4.1.a.

IV.2.1. Comportement thermique estival

Dans un premier temps, nous concentrerons l'étude sur la période estivale correspondante à la première série de test. L'ensemble du dispositif expérimental regroupant beaucoup de données, leur analyse requiert une sélection des sorties étudiées. Nous avons décidé d'étudier les résultats en fonction :

- du gradient thermique vertical dans la double-fenêtre, correspondant à la différence de température entre le capteur d'air de la zone basse et celui de la zone haute. Ainsi, un gradient positif indique un réchauffement alors qu'un gradient négatif indique un refroidissement de l'air au sein de la cavité.
- de l'effet de paroi froide caractérisé par la différence de température entre l'air ambiant et la vitre intérieure qui est une source d'inconfort thermique,
- de la température de soufflage,
- de la température ambiante dans chacune des pièces d'HYBCELL,
- de l'efficacité d'échange thermique.

IV.2.1.a. Comportement dynamique du gradient thermique vertical dans la double-fenêtre et de l'effet de paroi froide

Rappelons que sur l'ensemble des graphiques suivants, la pièce A est munie d'une double-fenêtre avec un simple vitrage (DFA) côté intérieur et celle de la pièce B d'un double vitrage (DFB). Chaque graphique va donc permettre de mesurer l'influence du type de vitrage sur le comportement thermique suivant les conditions des tests (débits et écart entre les fenêtres).

Les graphiques des Figure IV-10 puis Figure A-1 à Figure A-4 (Annexe A) montrent les évolutions à la fois des gradients thermiques d'air verticaux dans la double-fenêtre et des différences entre les températures ambiantes et celles des vitres intérieures. Sont également tracées les évolutions des gradients de température entre l'intérieur de la cellule et l'extérieur. De ces cinq figures on peut dresser plusieurs observations générales à propos du gradient thermique au sein de la double-fenêtre.

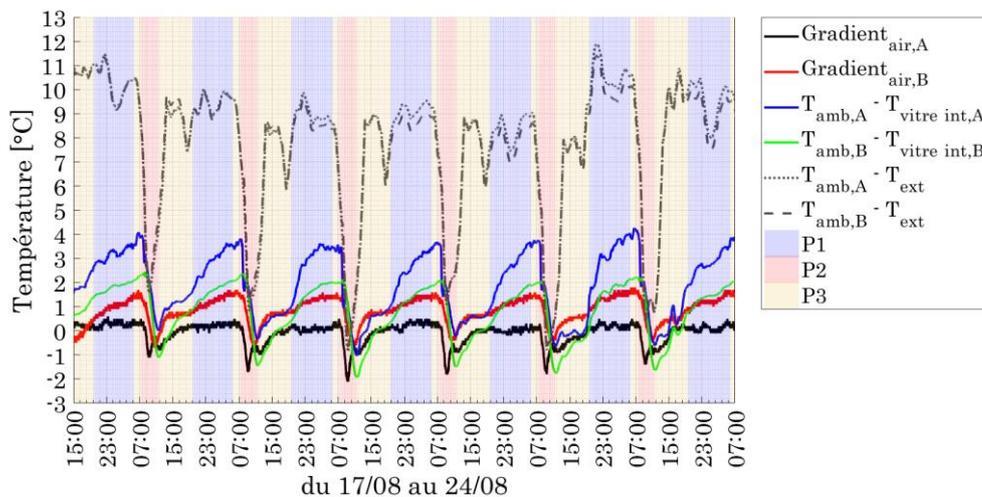


Figure IV-10. Évolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 3.

Pour les deux doubles-fenêtres, le gradient thermique chute durant P2 puis remonte après cette période d'irradiation directe pour atteindre une valeur quasi constante jusqu'à la prochaine période P2. C'est durant cette période que la température extérieure est la plus élevée aux abords de la cellule et par conséquent les gains thermiques par la ventilation se réduisent et peuvent même devenir négatifs indiquant que l'air circulant dans la double-fenêtre se refroidit. Sur les graphiques, cela se visualise à chaque fois que le gradient thermique est négatif.

Les extremums du gradient de la DFA pour les tests 3, 4, 6, 7 et 8 sont respectivement égaux à [-2,1/0,6 ; -1/0,8 ; -1/1 ; -0,6/1,6 ; -0,8/1] °C. Ceux de la DFB sont respectivement égaux à [-0,6/1,8 ; -0,8/3,6 ; -2,8/1,4 ; -2,6/3,4 ; -2,6/2,8] °C. De plus, on peut constater que le simple vitrage entraîne des amplitudes moins importantes du gradient que le double vitrage. Ce dernier étant plus isolant, l'effet de serre provoqué dans la cavité est accentué. Cela laisse présager des échanges thermiques de l'air ventilé plus importants pour la DFB et donc un pouvoir de refroidissement ou de réchauffement plus grand que la DFA. Les moyennes des écarts absolus entre les deux gradients thermiques sont de l'ordre de [0,9 ; 1,4 ; 0,6 ; 0,9 ; 0,8] °C respectivement pour les tests 3, 4, 6, 7 et 8.

Les refroidissements observés interviennent fréquemment. Le Tableau IV-1 montre les fréquences où le gradient est négatif pour chaque test en fonction des conditions de test. On remarque que pour la DFA le refroidissement de l'air a lieu entre 16 et 34% du temps. Pour la DFB il a lieu entre 8 et 49% du temps. Ainsi, en condition estivale la ventilation de la double-fenêtre permet assez souvent de refroidir l'air entrant. Cela met en avant les échanges thermiques avec l'ensemble des parois murales et vitrées de la cavité.

Les comportements dynamiques de l'effet de paroi froide dans les deux pièces sont similaires. Il s'accroît dès que l'ensoleillement direct de la fenêtre s'arrête pour atteindre des valeurs maximales, suivant les tests, comprises entre 4 et 6°C pour la DFA et 2 et 3,5°C pour DFB juste avant le début de l'ensoleillement direct le jour suivant. Cet ensoleillement fait chuter drastiquement l'écart de température puisqu'il réchauffe fortement la paroi vitrée, peu inertielle thermiquement, sur une courte période (P2). Les valeurs minimales se situent entre 0 et - 2°C suivant les tests. Comme on pourrait s'y attendre l'écart est plus important pour la DFA puisque son vitrage est moins isolant. La température du vitrage intérieur est alors plus impactée par les conditions dans la double-fenêtre et à l'extérieur.

	Fréquence DFA	Fréquence DFB	Ecart fenêtre [m]	Débit moyen A [m³/h]	Débit moyen B [m³/h]	Débit min A [m³/h]	Débit min B [m³/h]	Débit max A [m³/h]	Débit max B [m³/h]
Test 3	34 %	9 %	0,3	13	11	11	8	14	14
Test 4	21 %	8 %	0,3	29	22	24	17	32	32
Test 5	32 %	49 %	0,3	58	59	47	42	65	66
Test 6	30 %	41 %	0,2	28	26	19	17	32	32
Test 7	16 %	27 %	0,2	56	52	47	35	65	66

Tableau IV-1. Fréquences des refroidissements pour chaque test en fonction des conditions de test.

IV.2.1.b. Comportement dynamique de la température de soufflage et de la température ambiante

Les graphiques des Figure IV-11 puis Figure A-5 à Figure A-8 (Annexe A) montrent l'évolution des températures de soufflage, ambiantes et extérieure dans les deux pièces de la cellule.

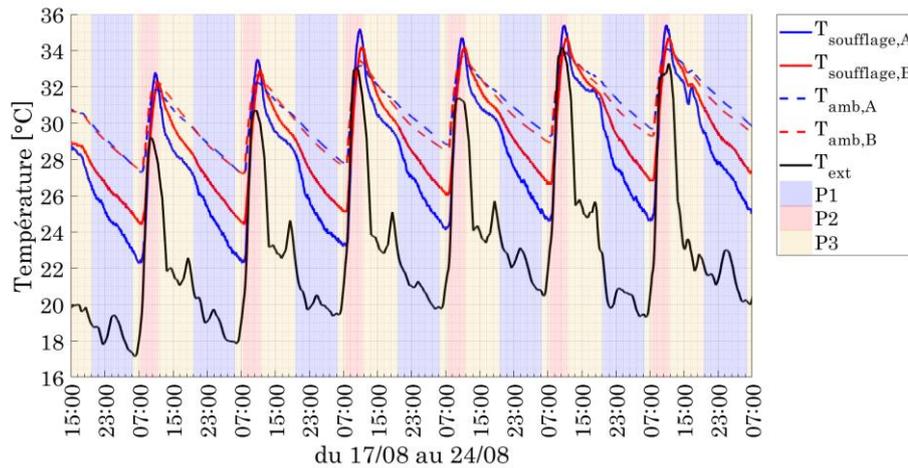


Figure IV-11. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 3.

Concernant les températures de soufflage, on observe plusieurs comportements différents. Lors du test 3, la température de soufflage en B est constamment supérieure à celle en A excepté pendant une courte période en fin de P2. Puis lors du test 4, la température en B est constamment supérieure à celle en A sans exception. Enfin, lors des trois derniers tests, la température de soufflage en B est supérieure à celle en A la nuit et l'inverse se produit l'après-midi. Ainsi, le double vitrage permet d'avoir une température de soufflage plus élevée la nuit. Par conséquent, si l'objectif est d'utiliser la double-fenêtre pour rafraichir la pièce la nuit, il est préférable d'avoir un simple vitrage.

Les différences observées entre les deux températures de soufflage sont de l'ordre de plusieurs degrés. Plus exactement si l'on considère la différence $T_{\text{soufflage,A}} - T_{\text{soufflage,B}}$ les extremums pour les tests 3, 4, 5, 6 et 7 sont respectivement égaux à $[-2,4/1,7 ; -4,8/1,2 ; -2,3/2 ; -2,8/1,7 ; -2,7/3,2]$ °C. L'analyse paramétrique des courbes d'un test à l'autre ne permet pas de mettre en avant une quelconque influence sur ces températures de soufflage. En revanche, on peut constater que les températures de soufflage sont toujours inférieures aux températures ambiantes. Par conséquent, la ventilation de la double-fenêtre qu'elle soit munie d'un simple ou d'un double vitrage permet de réduire la

surchauffe dans la pièce. Malheureusement, la température extérieure n'a pas été très élevée, ne dépassant que rarement la température intérieure. Par conséquent, il est donc impossible de juger expérimentalement du dispositif de double-fenêtre dans un contexte de surchauffe thermique extérieure.

A propos des températures d'ambiances, leur comportement est similaire d'une pièce à l'autre. Seuls les deux derniers jours du Test 7 présente un écart entre les températures ambiantes en faveur de la pièce B. L'écart maximal est d'environ 1°C durant cette courte période. Ces deux jours ont été peu ensoleillés comme en témoigne les très courtes durées des périodes P2. Par conséquent, la différence de vitrage provoque quelques changements dans le comportement thermique comme énoncé précédemment mais in fine il n'y a pas d'impact sur la température de la pièce.

IV.2.1.c. Comportement dynamique paramétrique de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé

A l'instar des tests en boîte chaude gardée, nous allons étudier les évolutions de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé. La formulation (IV-9) a de nouveau été utilisée. Seulement, s'agissant d'un rapport de deux différences, pour éviter des résultats trop démesurés nous restreindrons les calculs de l'efficacité aux deux conditions (IV-10) ou (IV-11). De plus, les cas où une des deux différences est nulle n'ont pas été considérés. Ce faisant, le signe de l'efficacité est guidé par quatre cas (IV-12). Les cas 1 et 3 correspondent à un refroidissement de l'air ventilé alors que les cas 2 et 4 correspondent à un réchauffement. Les cas 1 et 4 correspondent à une situation où la température intérieure est inférieure à celle extérieure et inversement pour les cas 2 et 3.

$$|T_{\text{soufflage}} - T_{\text{ext}}| > 1^{\circ}\text{C} \quad (IV-10)$$

$$|T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}| > 1^{\circ}\text{C} \quad (IV-11)$$

$$\begin{array}{ll} \text{cas 1} \quad \begin{cases} T_{\text{soufflage}} < T_{\text{ext}} \\ T_{\text{int}} < T_{\text{ext}} \end{cases} \text{ alors } \varepsilon > 0 & \text{cas 2} \quad \begin{cases} T_{\text{soufflage}} > T_{\text{ext}} \\ T_{\text{int}} > T_{\text{ext}} \end{cases} \text{ alors } \varepsilon > 0 \\ \text{cas 3} \quad \begin{cases} T_{\text{soufflage}} < T_{\text{ext}} \\ T_{\text{int}} > T_{\text{ext}} \end{cases} \text{ alors } \varepsilon < 0 & \text{cas 4} \quad \begin{cases} T_{\text{soufflage}} > T_{\text{ext}} \\ T_{\text{int}} < T_{\text{ext}} \end{cases} \text{ alors } \varepsilon < 0 \end{array} \quad (IV-12)$$

Les évolutions de cette efficacité pour l'ensemble des cinq tests estivaux en fonction du débit de ventilation et pour chaque cas susmentionné sont présentés en Figure IV-12 pour la DFA et en Figure IV-13 pour la DFB. Une efficacité supérieure à 100% ou inférieure à -100% s'explique par les apports qui vont soit surchauffer la double-fenêtre par rapport à la pièce dans le cas du réchauffement, soit surchauffer la pièce par rapport à la double-fenêtre dans le cas du refroidissement.

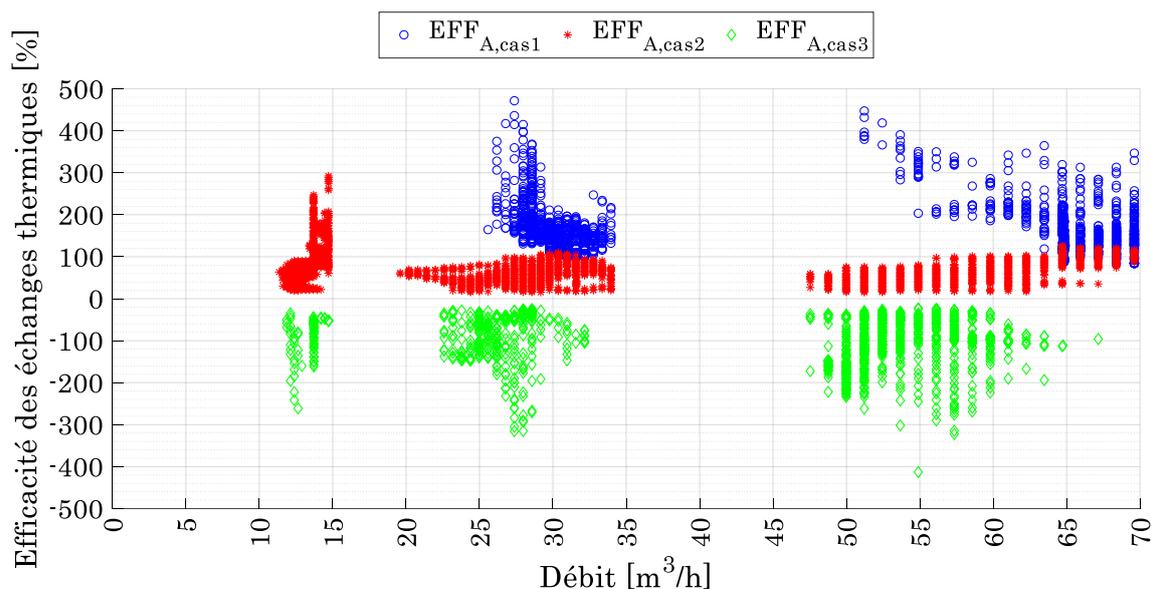


Figure IV-12. Evolutions de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFA.

Pour la DFA, durant ces cinq tests estivaux le cas 4 n'a visiblement pas eu lieu. En mode réchauffement (cas 2) on remarque que l'efficacité varie entre 0 et 300% pour les faibles débits (entre 10 et 16 m³/h). Cependant, on peut constater qu'elle semble plafonner à 125% pour tous les débits supérieurs. A contrario en mode refroidissement (cas 1) il ne semble pas y avoir de plafonnement pour les grands débits puisque l'efficacité varie régulièrement entre 100 et 450%. Il en va de même pour le refroidissement du cas 3 où l'efficacité varie aussi entre 0 et -400%.

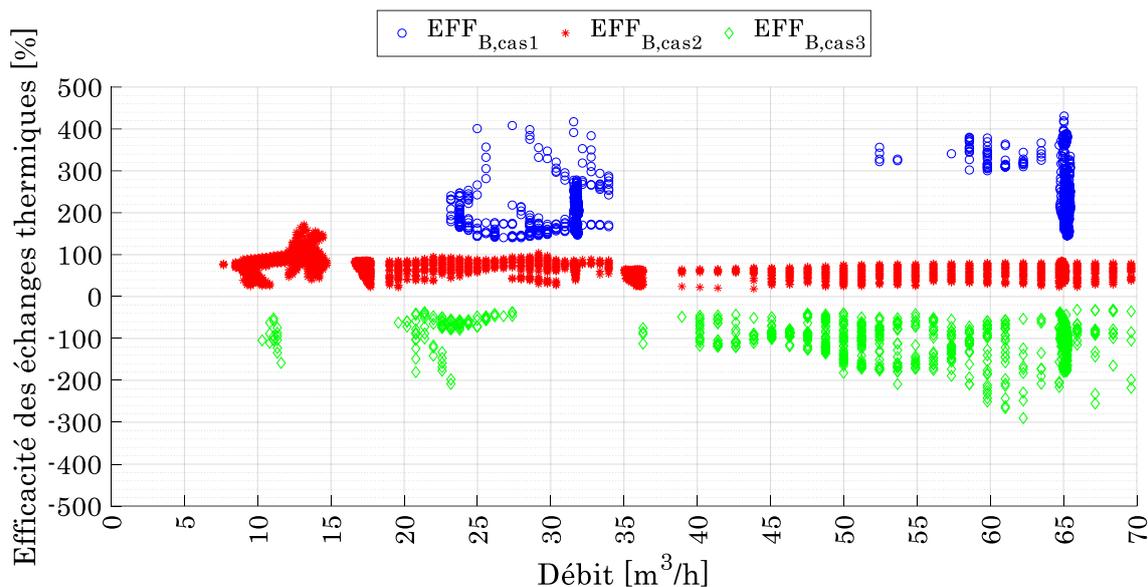


Figure IV-13. Evolutions de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFB.

Pour la DFB, l'efficacité est globalement réduite pour chaque cas. En revanche, on observe bien un plafonnement pour le cas 2 y compris pour les faibles débits. Dans quelques situations cette dernière atteint 150% pour des débits compris entre 12 et 15 m³/h mais majoritairement ne dépasse pas 100%. Pour les modes de refroidissement des cas 1 et 3, l'efficacité varie respectivement entre 50 et 450% puis entre -25 et -300%. Le double vitrage semble donc réduire l'efficacité des échanges que ce soit en réchauffement ou en refroidissement de l'air ventilé par rapport au simple vitrage. Cela est plus net pour le réchauffement (cas 2). Ainsi, on peut constater que l'efficacité des échanges thermiques est plus importante en mode refroidissement qu'en mode réchauffement. En revanche, étant donné les nuages de points on constate qu'il n'y a pas de corrélation unique entre le débit et l'efficacité. Nous allons donc affiner et trier les résultats en fonction des conditions de test.

Ainsi, nous allons à présent étudier les évolutions de l'efficacité des échanges thermiques en fonction de conditions de test. Les conditions de test choisies sont l'écart entre les fenêtres inclut dans le protocole expérimental, la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur puis le rayonnement reçu par la double-fenêtre (Ray). Ce dernier est calculé selon la démarche présentée en V.4.1. Ces conditions ont été présélectionnées parmi celles offrant le plus de données à traiter.

Les évolutions paramétriques sont montrées à travers la Figure IV-14 en condition nocturne et la Figure A-9 en condition diurne (Annexe A).

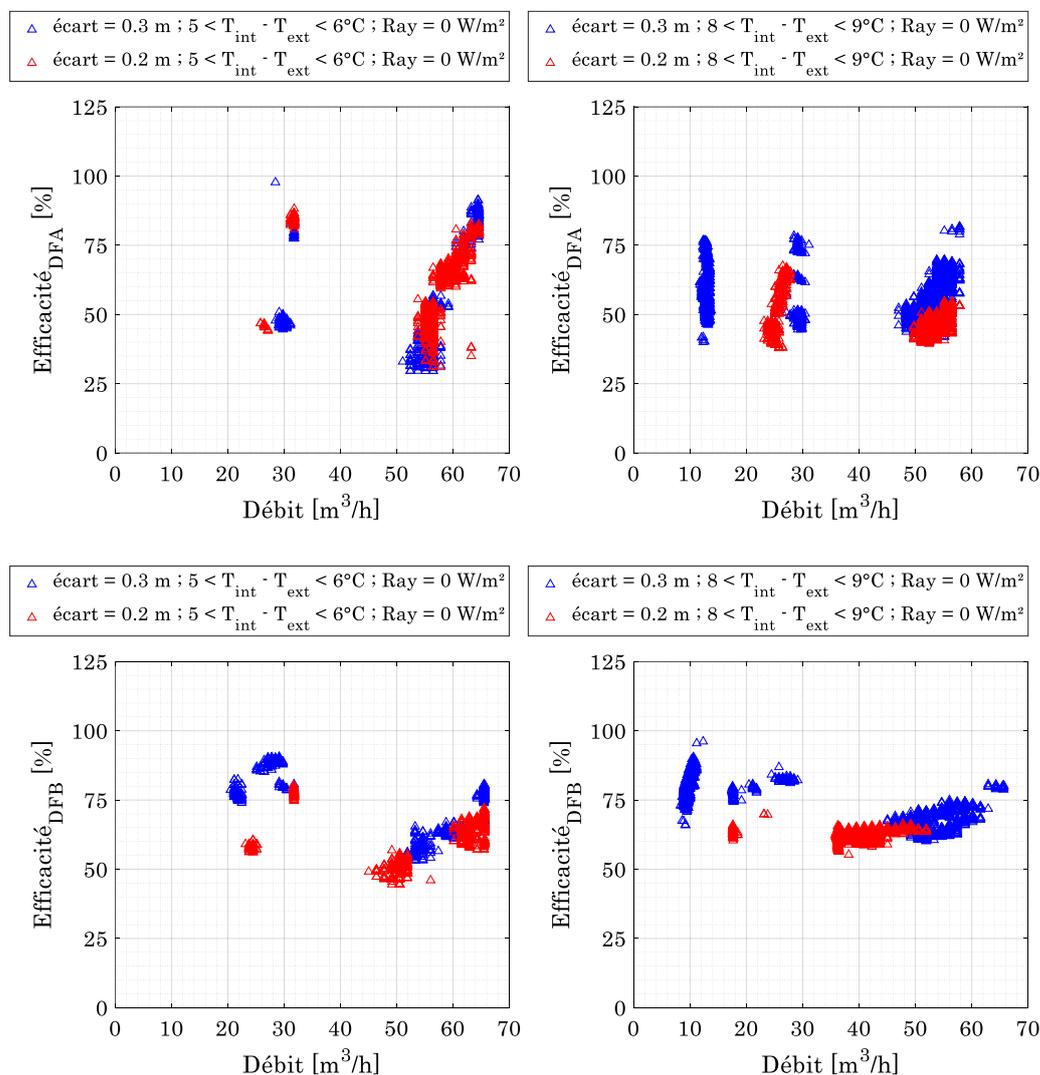


Figure IV-14. Evolutions estivales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA et la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur en l'absence de rayonnement solaire.

Dans toutes les configurations et que ce soit pour la DFA ou DFB on peut constater qu'il n'y a pas de tendance particulière. Pour un même débit on observe que l'efficacité varie de plusieurs dizaines de pourcent pour une même configuration ce qui conduit aux différents nuages de points sur les graphiques. Il n'y a pas non plus de différence notable selon l'écart entre les fenêtres ou le type de vitrage. Les tendances observées lors des tests en BCG n'ont pas été retrouvées lors des tests in situ. Cette différence de résultats peut s'expliquer par différentes raisons. La première est qu'en régime dynamique la

caractérisation de cette double-fenêtre ventilée est plus complexe et dépend peut-être de plus de paramètres que ceux utilisés ici. Les conditions de test (débit de ventilation, durée et période de test) ne sont peut-être pas suffisantes et la caractérisation nécessiterait alors d'élargir la base de données de mesure. La troisième est que les tests en BCG ne sont eux peut-être pas représentatif et que réalisés avec des paramétrages supplémentaires et différents, les résultats tendraient vers ceux obtenus en in situ.

IV.2.2. Comportement thermique hivernal

L'affinage des sorties effectué pour cette campagne de test est quasiment le même que celui de la campagne estivale. Néanmoins, les tests s'étant déroulé avec un chauffage contrôlé et une température intérieure constante, l'analyse des températures d'ambiance intérieures est remplacée par celle de la consommation énergétique du chauffage électrique de chaque pièce de la cellule HYBCELL.

IV.2.2.a. Comportement dynamique du gradient thermique vertical dans la double-fenêtre et de l'effet de paroi froide

Les évolutions des gradients thermiques dans les doubles-fenêtres et des effets de paroi froide sont représentées pour chaque test dans les Figure IV-15 puis Figure B-1 à Figure B-4 (Annexe B).

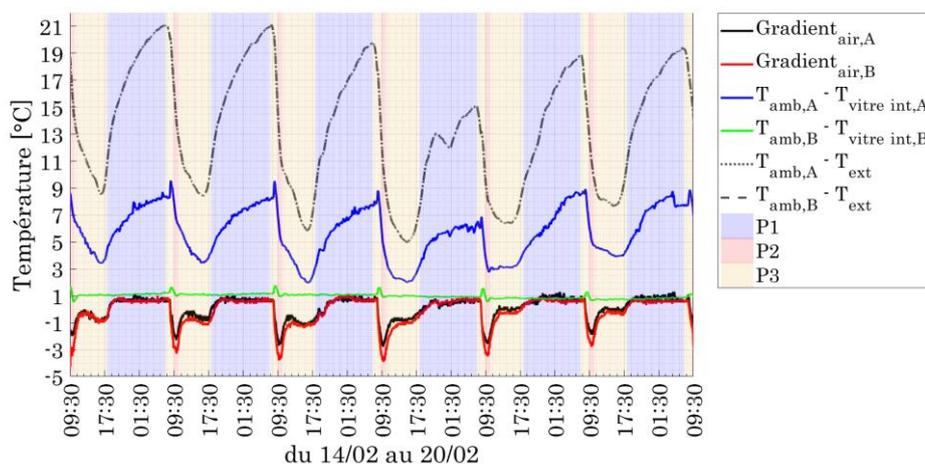


Figure IV-15. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 8.

Au travers de cette série de test on peut constater que le gradient thermique traduit un refroidissement de l'air ventilé en journée et un réchauffement la nuit avec un plafonnement des valeurs des gradients. Lors du test 8 où les conditions de débit et d'écart de fenêtre sont les mêmes, les gradients de la DFA et de la DFB sont similaires à l'exception de la fin de la période d'ensoleillement directe P2 où le gradient de la DFB est d'environ 1°C inférieur à celui de la DFA.

En ce qui concerne, les effets de paroi froide, on remarque premièrement que le double vitrage de la DFB entraîne un effet quasi constant tout au long des cinq semaines de test grâce à sa meilleure isolation thermique. L'effet de paroi froide est d'environ 1°C. Celui engendré par la DFA a un comportement logique c'est-à-dire une augmentation durant la nuit où la température extérieure est la plus faible et une diminution durant la journée où la température extérieure se rapproche de celle dans la cellule. Les valeurs de cette différence de température oscillent entre 1-2°C et 9-10°C quel que soit le test. Par conséquent, les changements de paramétrage, c'est-à-dire la variation de débit puis l'écart entre les fenêtres, ne semblent pas influencer l'effet de paroi froide de la DFA de manière significative sur les semaines de test par rapport à celui de la DFB constant.

IV.2.2.b. Comportement dynamique de la température de soufflage et de la puissance de chauffage

Les évolutions des températures de soufflage et de la puissance de chauffage sont représentées pour chaque test en Figure IV-16 puis Figure B-5 à Figure B-8 (Annexe B).

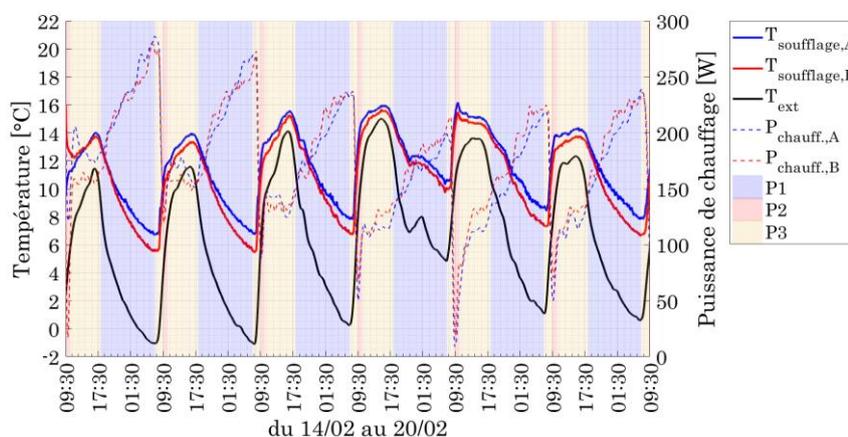


Figure IV-16. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 8.

Lors du test 8 où les conditions sont les mêmes pour le simple et double vitrage, on peut remarquer que la température de soufflage de la DFB est inférieure à celle de la DFA. L'écart maximum atteint 1°C à l'aube. Le double vitrage étant plus isolant, l'air circulant dans la double-fenêtre ne peut récupérer autant de chaleur traversant la paroi vitrée. Ce comportement est le même lors des test 9 et 10 où l'écart entre les fenêtres de la DFA a varié respectivement de 0,3 et 0,1 m et ce pour des températures extérieures similaires entre les trois tests. Ainsi, ce changement d'écart ne semble pas influencer la température de soufflage de la DFA. En revanche, en augmentant le débit (test 11 et 12) dans la DFA par rapport à celui de la DFB, on remarque que les deux températures de soufflage sont équivalentes. Ainsi, augmenter le débit dans la DFA permet logiquement de diminuer la température de soufflage et la rapprocher de celle de la DFB. Nous allons donc essayer d'extraire des tendances paramétriques quant à la température de soufflage.

L'analyse paramétrique de la température de soufflage est présentée à travers la Figure IV-17 pour la période nocturne et la Figure IV-18 pour la période diurne. Elles permettent de mesurer l'influence du débit en comparant les points de mesure bleus/verts aux rouges et aux noirs ainsi que de mesurer l'influence du vitrage en comparant les points de mesure verts (DFB) aux autres. En examinant ces deux graphiques on constate le même comportement pour chacune des conditions de test. La température de soufflage diminue de la même manière quel que soit le débit considéré ou le type de vitrage.

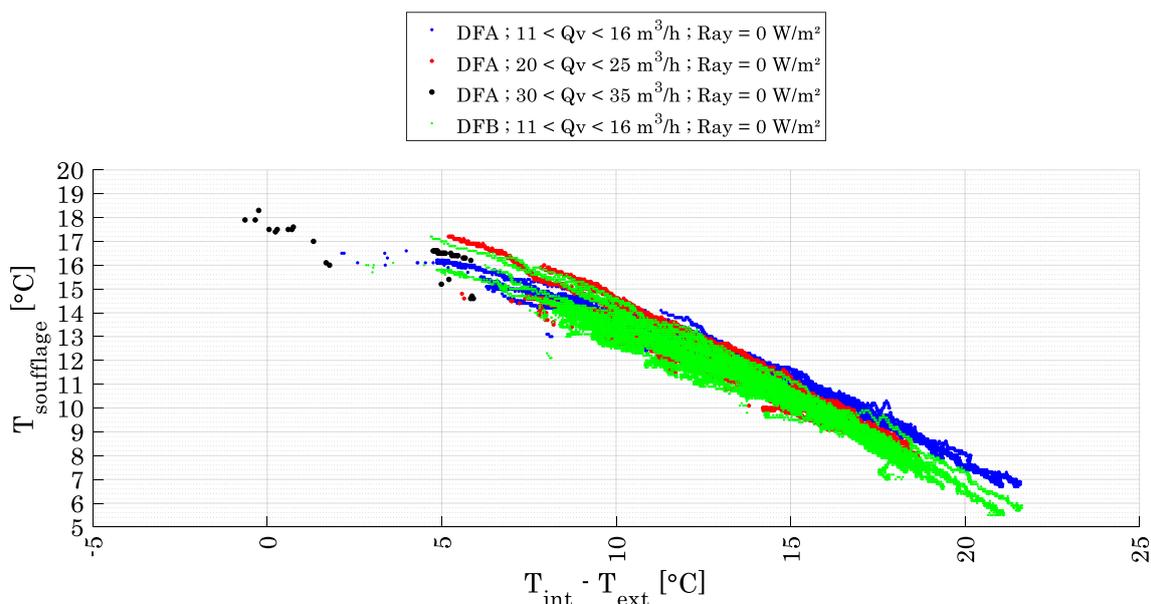


Figure IV-17. Evolutions hivernales de la température de soufflage en fonction de la différence de température intérieur/extérieur selon l'écart entre les fenêtres, le débit de ventilation en période nocturne.

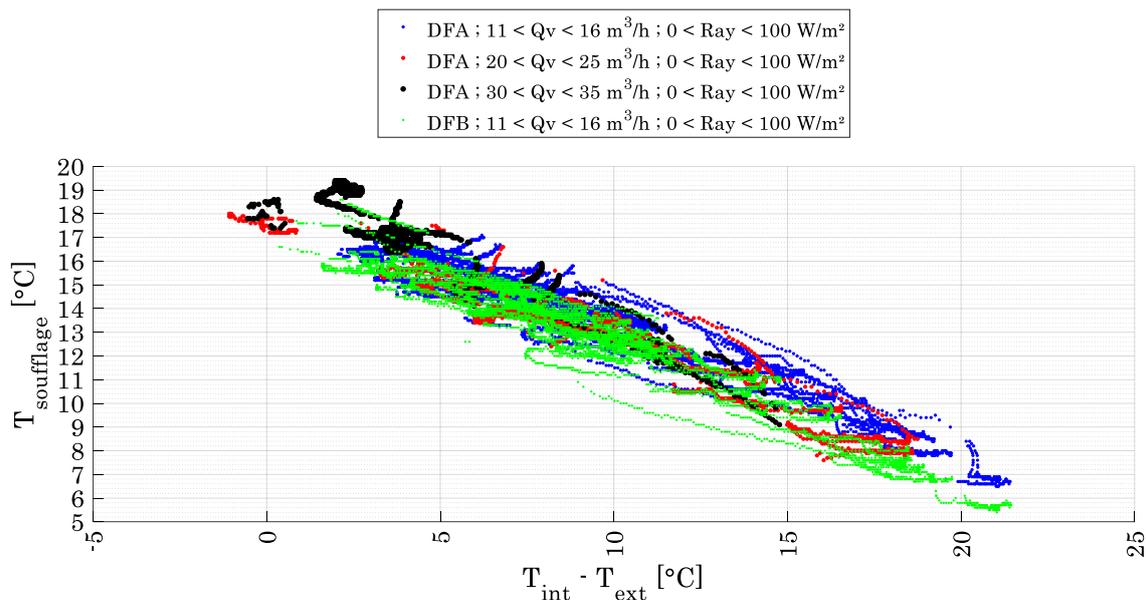


Figure IV-18. Evolutions hivernales de la température de soufflage en fonction de la différence de température intérieur/extérieur selon l'écart entre les fenêtres, le débit de ventilation en période nocturne.

Les évolutions graphiques des puissances de chauffage montrent un comportement similaire entre les deux pièces lors des trois premiers tests où seul l'écart entre les fenêtres varie. En revanche, lors des deux derniers tests (Figure B-7 et Figure B-8) on observe une consommation plus élevée pour la pièce A. Ce qui s'explique par l'augmentation du débit de ventilation dans cette pièce. Les consommations énergétiques surfaciques de chauffage sont listées dans le Tableau IV-2. A cause de conditions météorologiques différentes durant les tests, les données de ce tableau permettent uniquement de comparer les écarts entre les deux pièces et non la même pièce d'un test à l'autre.

	Consommation énergétique surfaccique A [kWh/m ²]	Consommation énergétique surfaccique B [kWh/m ²]	Ecart relatif (A-B)/B
Calibration	-	-	-7,02 %
Test 8	2,6	2,8	-8,06 %
Test 9	2,7	3,0	-8,47 %
Test 10	2,4	2,6	-7,77 %
Test 11	2,1	2,0	3,79 %
Test 12	3,4	3,0	10,73 %

Tableau IV-2. Consommations énergétiques surfacciques de chauffage de chaque pièce lors des tests hivernaux.

On s'aperçoit alors que lors des trois premiers tests la DFA munie du simple vitrage entraîne une plus basse consommation que la DFB munie d'un double vitrage. Cet écart est en partie lié aux caractéristiques intrinsèques de la cellule puisqu'il y avait déjà un écart de -7,02% en faveur de la pièce A lors de la calibration. En revanche, cet écart est quelque peu accentué pour les trois premiers tests ce qui mène à penser qu'à conditions de test égales la DFA réduit légèrement la consommation de chauffage. Cela signifie que la récupération de chaleur de la DFA compense les déperditions surfaciques de la fenêtre de manière plus importante que l'isolation thermique supérieure de la DFB compense la plus faible récupération de chaleur.

Comme souligné précédemment, la différence de température intérieur/extérieur, les apports solaires et la durée des mesures diffèrent durant chaque test. Ainsi, pour comparer les données de chauffage d'un test à l'autre, nous avons calculé les consommations énergétiques surfaciques rapportées au gradient de température intérieur/extérieur des périodes nocturnes de chaque test. Ces périodes différant d'un test à l'autre nous avons également rapporté les résultats par jour équivalent. Les valeurs sont présentées dans le Tableau IV-3. Ce faisant cela permet de mesurer l'influence de l'écart des fenêtres (test 8, 9 et 10) et du débit (test 8, 11 et 12) dans la DFA.

	Consommation énergétique surfacique et par degré en période nocturne dans la pièce A [Wh/(m ² .°C.jour)]	Débit moyen obtenu sur cette période [m ³ /h]
Test 8	37,6	13
Test 9	38,0	15
Test 10	41,8	13
Test 11	42,5	16
Test 12	37,8	23

Tableau IV-3. Consommations énergétiques surfaciques et par degré de chauffage de chaque pièce en période nocturne lors des tests hivernaux.

On s'aperçoit alors que le plus petit écart de fenêtre (0,1 m), utilisé lors du test 10, entraîne la plus haute consommation de chauffage alors que l'écart de 0,2 m entraîne la plus faible consommation. La différence entre le test 8 et le test 9 étant infime, on ne peut pas apprécier lequel des deux écarts est le meilleur ce qui rejoint l'analyse de la BCG. En revanche, un écart très réduit augmente les consommations. Concernant l'influence du débit il n'y a pas non plus de tendance linéaire. En effet, le test où le débit est moyennement le plus faible (13 m³/h) entraîne la même consommation que lors du test où

le débit est à 23 m³/h. Par conséquent et conformément aux observations faites sur les autres grandeurs, le débit, sur la plage étudiée, n'influence pas non plus les consommations de chauffage.

IV.2.2.c. Comportement dynamique paramétrique de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé

Les évolutions hivernales des efficacités pour tous les tests en fonction des cas 1, 2 et 3 (réchauffement / refroidissement) obtenu et du débit sont représentées sur la Figure IV-19 pour la DFA et sur la Figure IV-20 pour la DFB.

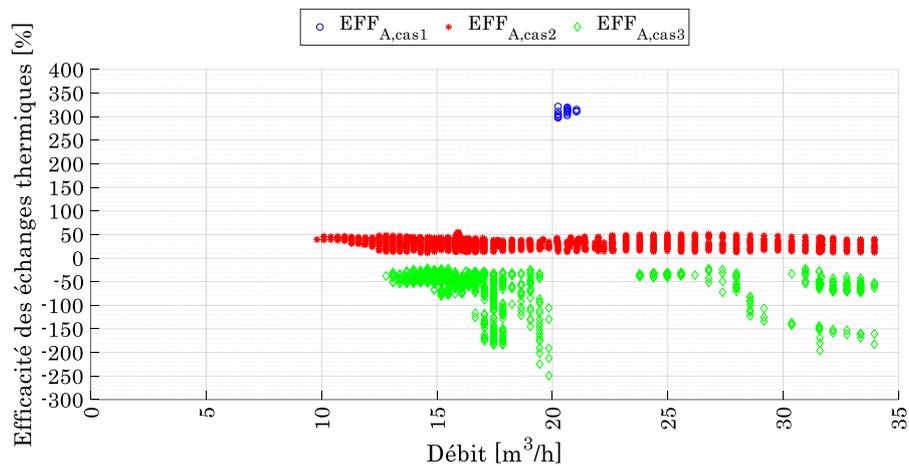


Figure IV-19. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFA.

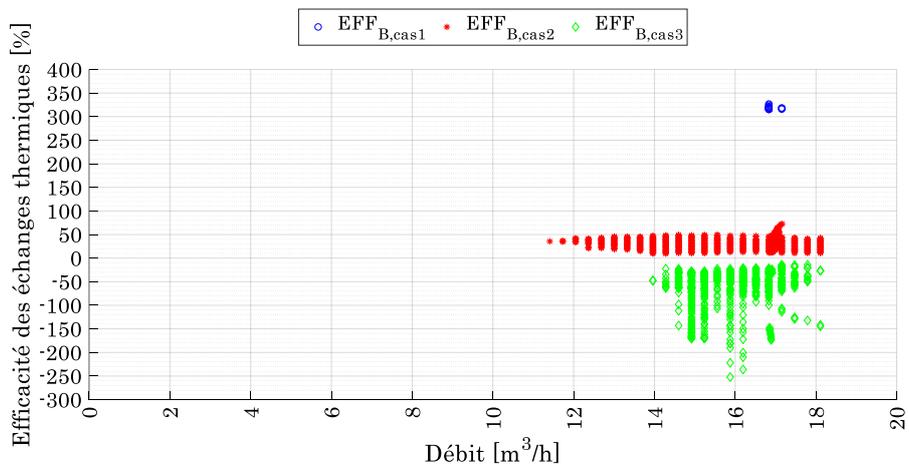


Figure IV-20. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé en fonction du débit pour la DFB.

Pour cette saison le cas 4 n'a toujours pas eu lieu et le cas 1 lui est apparu en trop faible quantité pour tirer des conclusions. En revanche, pour les deux autres cas on constate des nuages de points similaires entre la DFA et la DFB. L'efficacité du réchauffement (cas 2) varie entre 0 et 50% quel que soit le débit alors l'efficacité du refroidissement (cas 3) peut être plus importante et varie entre -20 et -250%. Étant donné le nombre de points considérés, le fait que le préchauffage de l'air entre 10 et 35 m³/h sur cinq semaines ne dépasse pas 50% semble alors caractéristique de cette double-fenêtre ventilée installée dans cette orientation. Ces chiffres rejoignent ceux des tests en BCG où l'efficacité plafonne également à 50%. Le nombre important de cas 3 rencontrés pose alors question sur la manière dont ils peuvent se produire en contexte hivernal. En effet, ce cas 3 correspond à la situation où la température de soufflage est inférieure à la température extérieure. Après analyse des données ce cas 3 est provoqué par des températures des parois au sein de la cavité plus froide que l'air extérieure. Cela a lieu en journée alors que la température extérieure augmente plus rapidement que celle des parois à cause de leur inertie thermique plus importante. L'air ventilé se refroidit donc au contact de ces parois froides. Cela souligne les échanges présents entre l'air et les parois non vitrées de la cavité. Par conséquent, la température de la façade va être très importante puisqu'en cas de façade lourde mal isolée la double-fenêtre peut insuffler de l'air plus froid que l'air extérieur qui est encore plus froid qu'un seuil de confort tel que 20°C par exemple.

Tout comme pour la période estivale, nous allons tenter d'extraire des tendances quant à l'efficacité en fonction des différentes conditions de test. L'analyse paramétrique est effectuée au travers des Figure B-9 et Figure B-10 pour la période nocturne et des Figure B-11 et Figure B-12 pour la période diurne (Annexe B).

A l'instar des premiers résultats estivaux, l'analyse paramétrique ne montre pas de tendance de l'efficacité par rapport aux conditions de test. Ainsi, la caractérisation paramétrique de cette double-fenêtre ventilée est plus complexe et les nombreuses séries de test n'ont pu y parvenir. Si l'outil expérimental in situ n'a pu le permettre, l'utilisation d'un outil numérique serait une autre approche le permettant peut-être. Ce sera l'objet des deux prochains chapitres.

IV.3. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'exploitation de l'ensemble des données expérimentales. Comme expliqué au Chapitre III, ce travail est scindé en deux parties : la première correspond aux tests réalisés en conditions contrôlées concerne uniquement la double-fenêtre munie d'un simple vitrage intérieur. La seconde partie traite de la caractérisation en régime dynamique rendue possible grâce à l'utilisation de la cellule expérimentale HYBCELL. Ce travail a permis d'obtenir une base de données expérimentale importante qu'il a fallu analyser. Cela a requis une approche méthodique appliquée tout au long de ce chapitre. Les choix des grandeurs de sortie sur lesquelles portent les observations sont aussi bien des mesures directes telles que les températures de soufflage, les gradients de température, les effets de paroi froide, les températures ambiantes ou les consommations de chauffage qu'indirectes comme les deux coefficients de transmission thermique utilisés ou l'efficacité des échanges thermiques de l'air au sein de la cavité de la double-fenêtre. Ce travail d'analyse couplé aux choix protocolaires a permis de mesurer l'influence de certains paramètres de conception (écart entre les fenêtres), de fonctionnement (débit de ventilation ou extérieurs (gradient de température intérieur/extérieur et irradiation solaire)).

Les tests en conditions contrôlées ont montré que :

- un écart entre fenêtre plus grand favorise les échanges au sein de la cavité entraînant une température de soufflage plus élevée.
- l'effet de paroi froide est moins impacté en considérant la paroi vitrée que le soubassement de la menuiserie lorsque le gradient de température aux bornes de la double-fenêtre augmente. En revanche, il est plus impacté par une réduction de l'écart entre les fenêtres mais la différence d'impact entre les deux composantes de la menuiserie intérieure est atténuée avec l'augmentation du débit.
- la caractérisation des performances thermiques de ce genre de dispositif peut se faire au moyen de deux indices de transmission qui diffèrent selon que l'on considère les pertes du bâtiment au niveau de la menuiserie intérieure ou extérieure. De plus, pour faire face à l'asymétrie des deux menuiseries, nous proposons de considérer l'allège de la menuiserie extérieure comme partie intégrante de la double-fenêtre.

- l'augmentation du débit diminue les performances thermique (transmission et récupération de la chaleur).
- le gradient de température et le débit de ventilation impactent davantage le coefficient U_w que l'écart entre les fenêtres.
- les valeurs de U_w obtenus varient entre 2,4 et 3,2 W/(m².K) si l'on considère le flux traversant la menuiserie intérieure et entre 2,0 et 2,9 W/(m².K) si l'on considère le flux à travers la menuiserie extérieure. Ce genre de système ne peut avoir des performances fixes puisqu'elles dépendent de condition de fonctionnement et extérieures. Des exigences dynamiques sont donc requises.
- l'efficacité des échanges thermiques augmente avec la diminution du débit et varie entre 36 et 49% selon les conditions de fonctionnement. Le dispositif peut donc permettre de récupérer la moitié des pertes thermiques.
- la majorité de la chaleur du chauffage est perdue par la menuiserie extérieure à raison de 69 à 84% et récupérée par la ventilation à raison de 9 à 23% suivant les cas. De plus, avec l'augmentation du débit, un équilibre semblerait être atteint entre ces deux composantes plus ou moins rapidement selon le gradient de température.

Dans un second temps, les tests in situ ont permis de dresser le comportement dynamique des grandeurs de sortie et ont montré que pour la période estivale :

- le refroidissement de l'air au sein de la double-fenêtre est possible et même fréquent puisqu'il a eu lieu entre 16 et 34% du temps pour la double-fenêtre munie de deux simples vitrages et entre 8 et 49% pour celle munie d'un double vitrage intérieur.
- le refroidissement présente une meilleure efficacité que le préchauffage de l'air.
- malgré les quelques différences de comportement intrinsèque de chaque double-fenêtre, il n'y a pas de différence sur l'ambiance intérieure des deux pièces de la cellule. De plus, les conditions estivales ayant été plutôt douces, les températures de soufflages ont toujours été inférieures aux températures ambiantes ce qui ne permet pas de juger le dispositif dans un contexte de surchauffe estivale ou caniculaire par exemple.
- malgré les nombreuses analyses tentées et montrées, il n'y a pas de tendances observées quant aux sorties en fonction des conditions de test.

Pour la période hivernale, les mesures ont montré que :

- il n'y a pas de tendance paramétrique claires pour les sorties excepté l'écart entre fenêtre très réduit (0,1 m) qui semble augmenter les consommations de chauffage liées à l'utilisation de la double-fenêtre en simple vitrage.
- l'efficacité du préchauffage plafonne à 50% appuyant les résultats des tests en conditions contrôlées.
- un refroidissement de l'air ventilé peut avoir lieu en journée alors que la température de soufflage reste inférieure à une température confortable standard. Ce phénomène important et non souhaitable est rendu possible par le fait que les parois opaques de la cavité ont été plus froides que l'air extérieur. Par conséquent, la température de la façade extérieure proche de la double-fenêtre est importante et que ce rafraîchissement de l'air ventilé pourrait être fréquent dans le cas d'une façade mal isolée ou d'une façade lourde isolée par l'intérieur.

Il ne peut donc y avoir d'exigences réglementaires sans considérer certains paramètres extérieurs, de conception ou de fonctionnement. Il s'est avéré, pour les tests in situ et malgré le nombre important de test effectués, que les caractérisations paramétriques n'ont dégagé aucune tendance claire traduisant ainsi la complexité de fonctionnement du dispositif en conditions réelles. De ce fait, l'outil expérimental n'ayant permis l'entière caractérisation, pour causes météorologiques défavorables ou durée de campagne expérimentale insuffisante, nous avons émis l'intérêt d'utiliser un outil numérique. Les deux prochains chapitres vont donc porter sur la construction et l'exploitation de ce type d'outil.

Chapitre V. Développement et validation d'un modèle numérique

Bien que limitées aux conditions de test, la caractérisation expérimentale a permis de dresser des observations sur l'utilisation en conditions contrôlées et in situ de la double-fenêtre active. Afin d'élargir le champ des conditions et paramètres étudiés nous avons décidé de construire un modèle numérique de la double-fenêtre ventilée.

Ce chapitre traite du développement de cet outil numérique et de sa validation expérimentale. La première section présente la structure du modèle ainsi que la géométrie de la double-fenêtre modélisée. Ensuite, les trois sections suivantes décrivent chacune la modélisation d'un mode de transfert thermique. Enfin, dans une dernière section, la validation du modèle numérique est démontrée. Cette dernière propose une démarche originale et critique, basée sur les données expérimentales.

V.1. Structure du modèle numérique et géométrie utilisée

Ce modèle de double-fenêtre doit reproduire le comportement thermique du composant de façade en fonction de toutes les sollicitations extérieures. Ainsi, les trois modes de transferts thermiques doivent être considérés simultanément. Chaque mode de transferts thermiques interagissant avec les autres, leurs modélisations numériques respectives doivent être couplées selon les grandeurs d'entrées et de sorties requises. Comme illustré en Figure V-1, le modèle thermo-aéraulique permet d'obtenir les températures d'air dans la cavité et les coefficients d'échanges convectifs. Ces derniers font parties des conditions aux limites nécessaires au modèle conductif tout comme les flux radiatifs obtenus à partir du modèle de rayonnement. Le modèle conductif permet alors de calculer l'ensemble des températures de surface de chaque paroi de la double-fenêtre. Ces températures de surface sont elles-mêmes requises par les deux autres modèles.

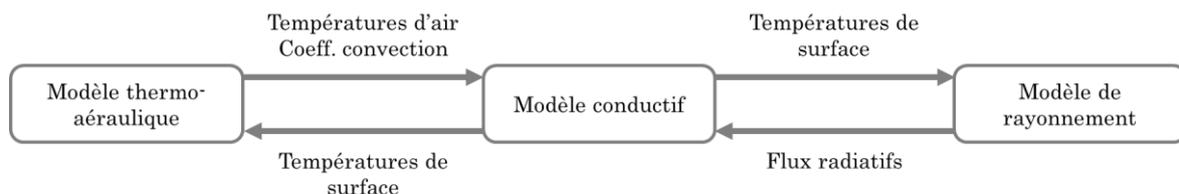


Figure V-1. Principe de couplage des différents modes de transferts thermiques.

Il a été constaté en II.2.5 que la plupart des modèles numériques existants ne considèrent que des géométries bidimensionnelles en assimilant la double-fenêtre à deux vitrages parallèles le plus souvent. Les transferts thermiques avec les surfaces latérales sont ainsi négligés cela étant justifié par la mince profondeur de la double-fenêtre. Or, dans notre cas la profondeur de la cavité peut atteindre 0,3 m. Considérant les autres dimensions, les tableaux, le linteau et le plancher représentent 29% des surfaces comprises dans la cavité. C'est pour cette raison que le modèle considèrera les transferts avec toutes les surfaces de la cavité d'air.

Ainsi, le modèle s'apparente à un modèle 3D où chaque transfert thermique est supposé unidimensionnel. Par conséquent, chaque paroi de la double-fenêtre peut y être représentée. Il a cependant été fait l'hypothèse d'aligner l'allège à la menuiserie extérieure négligeant ainsi le rebord horizontal de l'allège. Cette hypothèse est liée à la détermination des facteurs de forme abordée en V.4.3. Ainsi, la géométrie implémentée dans le modèle numérique est un parallélépipède constitué de huit surfaces comme illustré en Figure V-2. En effet, les deux faces constituant les menuiseries sont constituées de deux surfaces chacune. L'une pour chacun des vitrages et l'autre pour l'allège ou le soubassement. Cette géométrie ne considère pas les cadres des fenêtres.

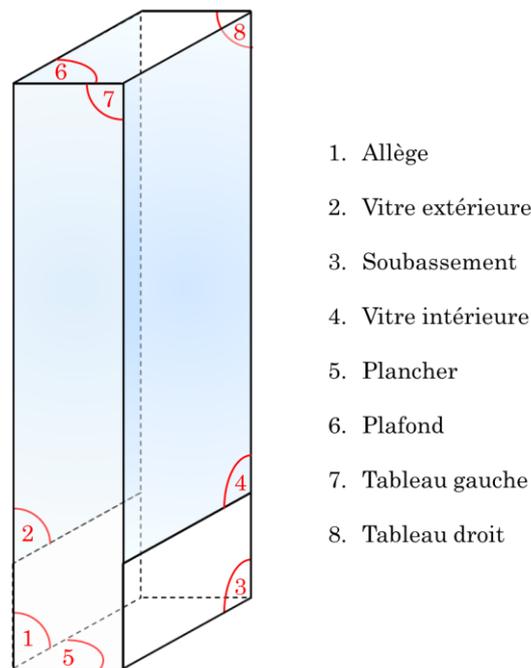


Figure V-2. Géométrie utilisée dans le modèle numérique.

V.2. Modèle conductif multi-parois

Le modèle de conduction a pour but de déterminer les températures de surface de chaque paroi composant la double-fenêtre. Cette dernière étant constituée de huit surfaces, cela fait donc autant de températures de surface à déterminer par ce modèle. Les transferts sont considérés comme monodimensionnels ce qui donne une discrétisation spatiale de chaque paroi selon un seul axe. Cet axe est défini selon l'inverse de la normale de la surface considérée.

V.2.1. Méthode numérique appliquée

La modélisation des transferts thermiques passe par la résolution d'équations différentielles de manière discrète. Il existe alors plusieurs méthodes de résolution numérique. On peut citer tout d'abord la méthode des différences finies. Elle consiste, en tout nœud d'un maillage régulier, à remplacer les dérivées partielles (spatiales et temporelles) par leurs approximations obtenues à l'aide des valeurs de la grandeur inconnue qui avoisinent le nœud recherché. Les approximations sont déterminées à partir du développement de Taylor. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et sa courante utilisation a montré sa fiabilité pour modéliser les transferts thermiques monodimensionnels [84–86,90]. Le développement de Taylor par rapport aux variables de temps offre plusieurs schémas. On peut citer par exemple, le schéma dit « explicite » où on suppose qu'au nœud considéré, la grandeur recherchée est une valeur connue et que seule la valeur à l'instant suivant est inconnue. Ainsi, chaque grandeur est déterminée selon sa propre valeur et celles de ses voisines à l'instant précédent (cf. Figure V-3(a)). Ce schéma est facile à programmer mais impose une condition de stabilité qui relie le pas de temps au pas d'espace. Cette condition impose par exemple, que si on veut améliorer la précision spatiale du schéma en divisant le pas par deux, on devra alors diviser le pas de temps par quatre pour conserver la stabilité du schéma. Cela peut donc coûter très cher en temps de calcul pour des simulations de plusieurs jours voire annuelles. C'est pourquoi il existe d'autres schémas. C'est le cas du schéma dit « implicite ». On suppose qu'au nœud considéré, la grandeur recherchée est une valeur inconnue ainsi que celles des autres nœuds au même instant. Le développement s'effectue alors vers les temps négatifs (cf. Figure V-3(b)). Ainsi, chaque grandeur est déterminée selon sa propre valeur à l'instant précédent et celles de ses voisines à l'instant considéré. Cela implique la résolution de

systèmes d'équations et une initialisation des grandeurs. Contrairement au schéma explicite, le schéma implicite présente l'avantage d'être inconditionnellement stable. C'est ce schéma qui a été choisi pour tout le modèle numérique de la double-fenêtre.

Pour finir on peut également citer la méthode des éléments ainsi que celle des volumes finis. La première peut convenir aux géométries plus complexes puisqu'elle fait intervenir un maillage quelconque. Cette méthode est cependant plus compliquée à programmer et nécessite des temps de calcul plus importants. La seconde méthode, celle des volumes finis, revient à discrétiser la géométrie en différents volumes de contrôle. La méthode repose sur la mise en place d'un bilan de conservation dans chaque volume qui conduit à une formulation intégrale au niveau des frontières [91]. Tout comme la méthode des éléments finis, celle des volumes finis s'adapte très bien pour les géométries complexes mais nécessite plus de temps de calcul.

Dans la suite de ce chapitre, la discrétisation se fera selon l'axe x et nous utiliserons la nomenclature suivante :

- l'indice i désigne le nœud à l'endroit recherché,
- les indices $i-1$ et $i+1$ les nœuds voisins,
- l'exposant t désigne l'instant considéré,
- l'exposant $t-1$ l'instant précédent.

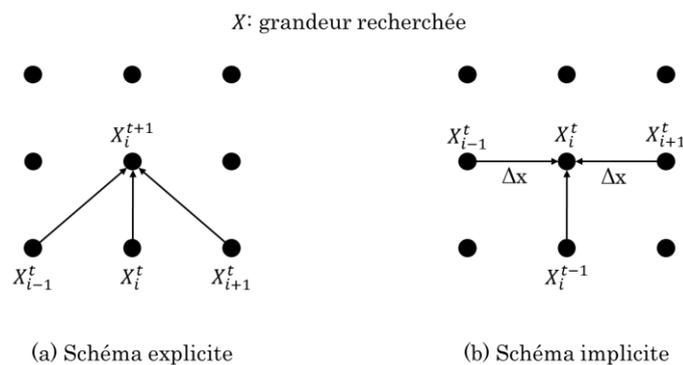


Figure V-3. Représentation des schémas explicite et implicite de la méthode des différences finies.

V.2.2. Description de la méthode des différences finies en schéma implicite

V.2.2.a. Décomposition en série de Taylor par rapport aux variables d'espace

Deux décompositions sont possibles : l'une de i vers $i+1$ et l'autre de i vers $i-1$; En s'arrêtant au 3^{ème} ordre cela conduit aux formulations (V-1) et (V-2).

$$X_{m_{i+1}} = X_i + \Delta x \left(\frac{\partial X}{\partial x} \right)_i + \frac{\Delta x^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \right)_i + \frac{\Delta x^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 X}{\partial x^3} \right)_i + \theta(\Delta x^4) \quad (V-1)$$

$$X_{m_{i-1}} = X_i - \Delta x \left(\frac{\partial X}{\partial x} \right)_i + \frac{\Delta x^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \right)_i - \frac{\Delta x^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 X}{\partial x^3} \right)_i + \theta(\Delta x^4) \quad (V-2)$$

où θ est une fonction regroupant l'infinité de termes de la suite de la série de Taylor mais étant essentiellement une dérivée partielle d'ordre 4 de la grandeur recherchée X . De ces deux équations les valeurs des dérivées partielles peuvent être tirées (équations (V-3) (V-4)).

$$\left(\frac{\partial X}{\partial x} \right)_i = \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{\Delta x^2}{6} \frac{\partial^3 X}{\partial x^3} \quad (V-3)$$

$$\left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \right)_i = \frac{X_{i-1} - 2X_i + X_{i+1}}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta x^2} \theta(\Delta x^4) \quad (V-4)$$

V.2.2.b. Décomposition en série de Taylor par rapport aux variables de temps

Comme expliqué précédemment, le schéma implicite implique le développement vers les temps antérieurs. Ce qui conduit à la relation (V-5). De cette relation on peut en déduire la dérivée partielle temporelle (équation (V-6)).

$$X^{t-1} = X^t - \Delta t \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)^t + \frac{\Delta t^2}{2} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \right)^t \quad (V-5)$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)^t = \frac{X^t - X^{t-1}}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \right)^t \quad (V-6)$$

V.2.3. Application aux nœuds à l'intérieur d'un matériau

L'évolution de la température T des nœuds à l'intérieur d'un matériau est régie par l'équation de la chaleur. En considérant la conductivité thermique λ , la masse volumique ρ ainsi que la chaleur spécifique c_p comme constantes cela conduit à la relation (V-7). En appliquant les séries de Taylor présentées précédemment, l'équation de la chaleur prend alors la forme de l'équation (V-8). Δx et Δt étant respectivement le pas d'espace et le pas de temps.

$$-\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = 0 \quad (V-7)$$

$$\frac{-\lambda}{\Delta x^2} T_{i-1}^t + \left(\frac{\rho c_p}{\Delta t} + \frac{2\lambda}{\Delta x^2} \right) T_i^t + \frac{-\lambda}{\Delta x^2} T_{i+1}^t = \frac{\rho c_p}{\Delta t} T_i^{t-1} \quad (V-8)$$

V.2.4. Application aux nœuds à l'interface de deux matériaux

Pour les nœuds situés à l'interface de deux matériaux, la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique ne peuvent plus être considérées constantes. Ainsi, le bilan thermique de part et d'autre de l'interface donne le couple d'équation (V-9). En considérant des volumes élémentaires sur la moitié du pas d'espace cela permet de remplacer la masse m du système (V-9) par la relation (V-10), ce qui selon El Mankibi entraîne une erreur de premier ordre [86]. S étant la surface de la paroi considérée. La somme du système d'équation (V-9) permet d'exprimer la température au nœud d'interface i (équation (V-11)).

$$\begin{cases} m_i c_{p_i} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i = -\lambda_i \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_i \\ m_{i+1} c_{p_{i+1}} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i+1} = -\lambda_{i+1} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i+1} \end{cases} \quad (V-9)$$

$$m = \rho S \frac{\Delta x}{2} \quad (V-10)$$

$$-\frac{2\lambda_{i-1}}{\Delta x^2} T_{i-1}^t + \left(\frac{\rho_{i-1} c_{p_{i-1}}}{\Delta t} + \frac{\rho_{i+1} c_{p_{i+1}}}{\Delta t} + \frac{2\lambda_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{2\lambda_{i+1}}{\Delta x^2} \right) T_i^t - \frac{2\lambda_{i+1}}{\Delta x_{i+1}^2} T_{i+1}^t = \left(\frac{\rho_{i-1} c_{p_{i-1}}}{\Delta t} + \frac{\rho_{i+1} c_{p_{i+1}}}{\Delta t} \right) T_i^{t-1} \quad (V-11)$$

V.2.5. Application aux nœuds aux limites

Afin de déterminer les températures de surface il est également nécessaire de réaliser le bilan thermique aux nœuds limites. Les sollicitations externes prise en compte sont les échanges par convection et le rayonnement reçu par la paroi. Les volumes élémentaires dans lesquels les bilans thermiques sont réalisés sont les mêmes qu'en V.2.4. Cela conduit à l'équation (V-12). L'application des séries de Taylor mène aux relations (V-13) et (V-14). h_{amb} et φ_{net} étant respectivement les coefficients de convection de l'ambiance limite et le flux radiatif arrivant sur la paroi à la limite considérée.

$$m_i c_{p_i} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i = h_{amb} S (T_{amb} - T_i) - \lambda_i S_i \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_i + \varphi_{net_i} S_i \quad (V-12)$$

si la limite se situe au noeud $i = 1$

$$\left(\frac{\rho_1 c_{p_1}}{\Delta t} + \frac{2h_{amb_1}}{\Delta x} + \frac{2\lambda_1}{\Delta x^2} \right) T_1^t - \frac{2\lambda_2}{\Delta x^2} T_2^t = \frac{\rho_1 c_{p_1}}{\Delta t} T_1^{t-1} + \frac{2h_{amb_1}}{\Delta x} T_{amb_1} + \frac{2}{\Delta x} \varphi_{net_1} \quad (V-13)$$

si la limite se situe au noeud $i = N$

$$-\frac{2\lambda_{N-1}}{\Delta x^2} T_{N-1}^t + \left(\frac{\rho_N c_{p_N}}{\Delta t} + \frac{2h_{amb_N}}{\Delta x} + \frac{2\lambda_N}{\Delta x^2} \right) T_N^t = \frac{\rho_N c_{p_N}}{\Delta t} T_N^{t-1} + \frac{2h_{amb_N}}{\Delta x} T_{amb_N} + \frac{2}{\Delta x} \varphi_{net_N} \quad (V-14)$$

V.2.6. Modèle conductif des vitrages

Par leur transparence, les vitrages impliquent des modifications dans le bilan thermique en chaque nœud. Ainsi, les flux radiatifs sont considérés en chaque nœud de la discrétisation selon le facteur de transmissivité du verre. De plus, l'épaisseur des vitres étant très fine devant celles des autres surfaces, nous avons choisi de modéliser uniquement les nœuds aux limites ou à l'interface entre deux matériaux pour le double vitrage. Au total, cela fait respectivement deux et quatre nœuds pour le simple et double vitrage. En outre, l'inertie thermique des vitrages étant également très faibles devant celles des autres matériaux le régime permanent a été appliqué au modèle des vitrages. Pour le cas du double vitrage, les échanges de grandes longueurs d'onde entre les deux nœuds bornant la lame d'air ont également été pris en compte. Enfin, les propriétés radiatives des vitrages ont été considérées constantes quel que soit l'angle d'incidence du

rayonnement. Cela conduit au système d'équations (V-15) pour le simple vitrage et au système (V-16) pour le double vitrage.

$$\begin{cases} \varphi_{net,1} + \varphi_{CLO,2} \times \tau_{CLO} + h_{amb,1}(T_{amb,1} - T_1) = \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}(T_1 - T_2) \\ \varphi_{net,2} + \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO} + h_{amb,2}(T_{amb,2} - T_2) = \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}(T_2 - T_1) \end{cases} \quad (V-15)$$

$$\begin{cases} \varphi_{net,1} + \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO}^2 + h_{amb,1}(T_{amb,1} - T_1) = \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}(T_1 - T_2) \\ \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO} + \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO} + h_{lame\ air}(T_3 - T_2) + R_{rad}(T_3 - T_2) = \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}(T_2 - T_1) \\ \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO} + \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO} + h_{lame\ air}(T_2 - T_3) + R_{rad}(T_2 - T_3) = \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}(T_3 - T_4) \\ \varphi_{net,4} + \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO}^2 + h_{amb,4}(T_{amb,4} - T_4) = \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}(T_4 - T_3) \end{cases} \quad (V-16)$$

où

$$R_{rad} = \frac{4\sigma\overline{T_{2,3}}^3}{2 - \varepsilon_{vitrage}} \quad (V-17)$$

avec $\overline{T_{2,3}}$ la température de surface moyenne entre chaque vitrage.

V.2.7. Conditions initiales et conditions aux limites utilisées

Le schéma implicite développé ici implique l'utilisation de conditions initiales pour chaque grandeur calculée. L'initialisation des grandeurs se fait en utilisant les données expérimentales en ce qui concerne la simulation des tests expérimentaux. Pour des simulations ne correspondant pas à un test réalisé, l'initialisation se fait à partir de valeur arbitrairement choisie. Par conséquent, cela entraîne une période d'initialisation des grandeurs au début de la simulation. Ainsi, dans toutes ces simulations le premier jour ne sera pas considéré afin de laisser au modèle le temps de s'initialiser.

Chaque distribution de température peut être déterminée si et seulement si les conditions aux frontières sont connues. Chaque paroi est donc limitée par un couple de conditions aux limites. Pour les problèmes thermiques, il en existe deux types :

- les conditions de type Dirichlet. Il s'agit du cas où la température est connue à la frontière. Il suffit alors d'imposer cette température au nœud limite en question remplaçant alors l'équation (V-13) et/ou (V-14) par une température fixe.
- les conditions de type Neumann. Dans ce cas, la variation de la température est connue à la frontière. C'est donc l'expression physique de la condition aux limites qui fournit l'équation manquante à la résolution du système d'équations. Comme évoqué précédemment, dans tous le modèle les sollicitations externes sont les flux convectifs et radiatifs. Dans ce cas, on utilise alors les équations (V-13) et (V-14).

Il a été considéré pour chaque surface que le premier nœud ($i=1$) correspondrait au nœud en contact avec la double-fenêtre. Ainsi toutes les surfaces ont une condition aux limites de type Neumann à leur premier nœud. Ensuite, seuls les surfaces (1) à (4) (cf. Figure V-2) possède une seconde condition limite de type Neumann à leur $N^{\text{ième}}$ nœud. L'ambiance considérée est soit l'environnement extérieur pour (1) et (2) ou l'environnement intérieur pour (3) et (4). Pour les autres surfaces dont l'inverse à la normale se dirige vers l'intérieur de la façade, il a été fixé une condition de type Dirichlet correspondant à une température de mur appelée T_{inf} . Cette dernière est calculée également à l'aide d'une méthode des différences finies en schéma implicite dont la discrétisation se fait dans la direction de la normale à la façade. T_{inf} dépend ainsi de deux conditions aux limites de type Neumann considérant les sollicitations des ambiances intérieures et extérieur. Un exemple de ce type est illustré en Figure V-4.

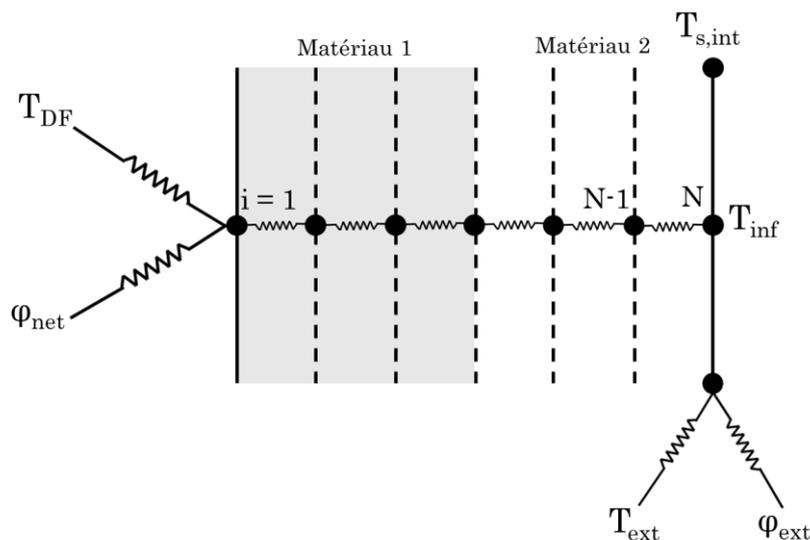


Figure V-4. Représentation de la discrétisation d'une des parois (5) à (8).

V.2.8. Expression matricielle du système d'équations

Le principe de la méthode implicite qui implique que les valeurs des nœuds voisins sont inconnues entraîne donc l'utilisation d'un système N équations à N inconnues. L'ensemble du modèle conductif peut alors se réduire aux équations matricielles (V-18) et (V-19) pour les parois opaques et (V-20), (V-21) et (V-22) pour les parois vitrées. Les composantes de ces matrices sont rassemblées dans le Tableau V-1 pour les parois opaques et le Tableau V-2 pour les parois vitrées.

$$\begin{bmatrix} Bl_1 & Al_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A & B & A & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & A & B & A \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Al_N & Bl_N \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1^t \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_N^t \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} T_1^{t-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_N^{t-1} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} Cl1_1 & 0 & Cl2_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Cl1_N & 0 & Cl2_N \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_N \\ \varphi_{net,1} \\ \varphi_{net,N} \end{pmatrix} \quad (V-18)$$

$$[AB](T^t) = [D](T^{t-1}) + [Cl](E) \quad (V-19)$$

Nœuds à la limite i = 1				
$Al_1 = -\frac{2\lambda_2}{\Delta x^2}$	$Bl_1 = \left(\frac{\rho_1 c_{p1}}{\Delta t} + \frac{2h_{amb1}}{\Delta x} + \frac{2\lambda_1}{\Delta x^2} \right)$			si condition de type Neumann
$Al_1 = 0$	$Bl_1 = 1$			si condition de type Dirichlet
Nœuds à l'intérieur du matériau				
$A = \frac{-\lambda}{\Delta x^2}$	$B = \left(\frac{\rho c_p}{\Delta t} + \frac{2\lambda}{\Delta x^2} \right)$			
Nœuds à l'intérieur de deux matériaux				
$A_{i-1} = -\frac{2\lambda_{i-1}}{\Delta x^2}$	$B = \left(\frac{\rho_{i-1} c_{p_{i-1}}}{\Delta t} + \frac{\rho_{i+1} c_{p_{i+1}}}{\Delta t} + \frac{2\lambda_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{2\lambda_{i+1}}{\Delta x^2} \right)$			$A_{i+1} = -\frac{2\lambda_{i+1}}{\Delta x^2}$
Nœuds à la limite i = N				
$Al_N = -\frac{2\lambda_{N-1}}{\Delta x^2}$	$Bl_N = \left(\frac{\rho_N c_{p_N}}{\Delta t} + \frac{2h_{ambN}}{\Delta x} + \frac{2\lambda_N}{\Delta x^2} \right)$			si condition de type Neumann
$Al_N = 0$	$Bl_N = 1$			si condition de type Dirichlet
Matrice D et Cl				
$D = \frac{\rho_i c_{p_i}}{\Delta t}$				
$Cl1_1 = \frac{2h_{amb1}}{\Delta x}$	$Cl2_1 = \frac{2}{\Delta x}$	$Cl1_N = \frac{2h_{ambN}}{\Delta x}$	$Cl2_N = \frac{2}{\Delta x}$	si condition de type Neumann
$Cl1_1 = 1$	$Cl2_1 = 0$	$Cl1_N = 1$	$Cl2_N = 0$	si condition de type Dirichlet

Tableau V-1. Composantes des matrices du modèle conductif des parois opaques.

$$\begin{bmatrix} B_{V1} & A_{V1} \\ A_{V1} & B_{V2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{net,1} + \varphi_{CLO,2} \times \tau_{CLO} + h_{amb,1} T_{amb,1} \\ \varphi_{net,2} + \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO} + h_{amb,2} T_{amb,2} \end{bmatrix} \quad (V-20)$$

$$\begin{bmatrix} B_{V1} & A_{V1} & 0 & 0 \\ A_{V1} & B_{V3} & A_{V2} & 0 \\ 0 & A_{V2} & B_{V3} & A_{V1} \\ 0 & 0 & A_{V1} & B_{V4} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{net,1} + \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO}^2 + h_{amb,1} T_{amb,1} \\ \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO} + \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO} \\ \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO} + \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO} \\ \varphi_{net,4} + \varphi_{CLO,1} \times \tau_{CLO}^2 + h_{amb,4} T_{amb,4} \end{bmatrix} \quad (V-21)$$

$$[AB](T) = [CL] \quad (V-22)$$

A_v	B_v
$A_{V1} = -\frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}$	$B_{V1} = h_{amb,1} + \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}$
$A_{V2} = -h_{lame\ air} - R_{rad}$	$h_{amb,2} + \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}$
	$B_{V3} = \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}} + h_{lame\ air} + R_{rad}$
	$B_{V4} = h_{amb,4} + \frac{\lambda_{vitrage}}{e_{vitrage}}$

Tableau V-2. Composantes des matrices du modèle conductif des parois opaques.

V.3. Modèle thermo-aéraulique

Comme l'a montré la section V.2, le modèle multi-parois nécessite de connaître les sollicitations aux limites. Une de ces sollicitations est la convection sur les parois que ce soit au sein de la double-fenêtre, à l'intérieur de la cellule ou à l'extérieur. Cette partie présente le modèle thermo-aéraulique utilisé dans le modèle global de double-fenêtre. Le but de ce modèle est donc de déterminer la distribution des températures d'air dans la cavité de la double-fenêtre ainsi que l'ensemble des coefficients de transferts convectifs.

V.3.1. Bilan d'énergie appliqué aux volumes d'air ventilés

La cavité de la double-fenêtre peut être assimilée à un volume ou à M sous-volumes dans lesquels le bilan d'énergie est établi. Ce dernier résulte des échanges thermiques entre l'air du volume considéré et son environnement. En considérant que l'air n'est pas un milieu participatif aux échanges radiatifs, les échanges thermiques sont de deux types :

- convectifs entre l'air et les six parois constituantes du sous volume. Selon le sous volume considéré certaines de ces parois sont fictives. Elles correspondent aux frontières où il y a un transfert d'air.
- induit par les mouvements d'air entre les différents sous-volumes de la cavité et/ou les ambiances extérieure/intérieure.

Cela conduit au bilan thermique de l'équation (V-23). Dans tous le modèle nous faisons l'hypothèse que les masses volumiques dépendent exclusivement de la température selon l'approximation de Boussinesq et sont calculées selon l'équation (V-24). La masse volumique et la température de référence ont respectivement la valeur de $1,221 \text{ kg/m}^3$ et 15°C . β est le coefficient de dilatation thermique et \dot{m} le débit massique traversant le sous volume.

$$\rho_i c_p V_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^6 h_j S_j (T_{s,j} - T_i) + \dot{m} c_p (T_{i-1} - T_i) + \dot{m} c_p (T_{i+1} - T_i) \quad (V-23)$$

$$\rho_i = \rho_{\text{ref}} (1 - \beta (T_i - T_{\text{ref}})) \quad (V-24)$$

De là, le problème peut se mettre sous la forme d'un système d'équation avec autant d'équations et d'inconnues qu'il y a de sous-volumes dans la cavité. En considérant que le premier sous volume portant l'indice 1 se situe en bas de la double-fenêtre et que le sous volume d'indice M se situe en haut de la cavité, cela conduit à l'écriture matricielle (V-25).

$$\begin{bmatrix} B & A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A & B & A & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & A & B & A \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A & B \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1^t \\ \vdots \\ T_M^t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_i c_p V_i}{\Delta t} \\ \vdots \\ \frac{\rho_M c_p V_M}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1^{t-1} \\ \vdots \\ T_M^{t-1} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^6 h_{s,j} S_j T_{s,j} + \dot{m} c_p T_{int} \\ \sum_{i=1}^6 h_{s,j} S_j T_{s,j} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^6 h_{s,j} S_j T_{s,j} \\ \sum_{j=1}^6 h_{s,j} S_j T_{s,j} + \dot{m} c_p T_{ext} \end{bmatrix} \quad (V-25)$$

avec

$$A = -\dot{m} c_p \quad (V-26)$$

$$B = \frac{\rho_i c_p V_i}{\Delta t} + 2\dot{m} c_p + \sum_{j=1}^6 h_j S_j \quad (V-27)$$

V.3.2. Coefficients de transferts convectifs

V.3.2.a. Coefficients d'échanges convectifs intérieur et extérieur

Le coefficient de convection intérieur h_{int} correspondant aux échanges entre la menuiserie intérieure et l'ambiance intérieure est estimé selon la formulation empirique de Park et al. [27]. Cette formulation, présentée dans l'équation (V-28), a été déterminée pour une configuration de double-fenêtre semblable à celle étudiée dans cette thèse. C'est-à-dire une double-fenêtre en insufflation avec l'entrée d'air en partie haute et le soufflage en partie basse. Le coefficient de convection est dépendant du gradient de température entre la menuiserie intérieure $T_{fen,int}$ et l'air du milieu ambiant T_{int} ainsi que de la hauteur de la fenêtre H_{DF} .

$$h_{\text{int}} = 3.8249 \left(\frac{|T_{\text{fen,int}} - T_{\text{int}}|}{H_{\text{DF}}} \right)^{0.0144} \quad (V-28)$$

Le coefficient de convection extérieur h_{ext} est lui calculé selon la méthode de calcul de la norme ISO 15099 [92]. Cette méthode présente l'avantage de considérer la direction du vent dans la détermination du coefficient. Cela paraît indispensable et plus réaliste mais n'est pas toujours pris en compte dans les autres formulations trouvées dans la littérature. En effet, les façades d'un bâtiment sont soumises à des pressions différentes selon qu'elles soient exposées ou non au vent. Par conséquent, les échanges convectifs diffèrent d'une façade à une autre. Ainsi, le coefficient d'échange convectif extérieur est calculé selon la méthode présentée dans les équations (V-29) à (V-32). Elle fait donc intervenir la direction du vent relative à celle de la cellule HYBCELL γ ainsi que la vitesse du vent à hauteur de la cellule v_{vent} . Cette dernière est estimée en fonction de la vitesse du vent mesurée à 10 m v_{wind10} selon l'équation (V-30) extraite de la thèse d'El Mankibi [86].

$$h_{\text{ext}} = 4,7 + 7,6 u \quad (V-29)$$

où

$$v_{\text{wind}} = 0,35 H_{\text{HYBCELL}}^{0,25} v_{\text{wind10}} \quad (V-30)$$

$$\begin{aligned} & \text{la façade est face au vent} \quad \text{si } -45^\circ \leq |\gamma| \leq 45^\circ \\ & \hookrightarrow \quad \begin{aligned} u &= 0,25 v_{\text{vent}} \quad \text{si } v_{\text{vent}} > 2 \\ u &= 0,5 v_{\text{vent}} \quad \text{sinon} \end{aligned} \end{aligned} \quad (V-31)$$

$$\begin{aligned} & \text{la façade est sous le vent} \quad \text{sinon} \\ & \hookrightarrow \quad u = 0,3 + 0,05 v_{\text{vent}} \end{aligned} \quad (V-32)$$

V.3.2.b. Coefficients d'échanges convectifs au sein de la double-fenêtre

Enfin, chaque paroi de la cavité de la double-fenêtre requiert un coefficient d'échange spécifique. Leur détermination est complexe et fait l'objet de plusieurs études. Comme pour les deux coefficients précédents d'ailleurs, ils dépendent des conditions

d'écoulement. De plus, comme l'a montré Greffet dans son étude d'une fenêtre pariéto-dynamique, le coefficient de convection varie au voisinage d'une même surface si l'écoulement n'est pas établi [66]. Dans notre cas, nous avons appliqué une formulation empirique utilisée par Frutos Dordelly dans sa thèse [85] et détaillée dans les équations (V-33) à (V-37).

$$h_{DW} = 6h_c + 12v_{DW} \quad (V-33)$$

où

$$h_c = Nu \frac{\lambda}{D} \quad (V-34)$$

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67 Ra^{0,25}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (V-35)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (V-36)$$

$$Ra = \frac{\rho^2 D^3 g c_p \beta \Delta T}{\mu_{DW} \lambda_{DW}} \quad (V-37)$$

Il l'a utilisée dans l'étude d'une cheminée solaire qui est un conduit ventilé de 0,5 m de profondeur. Son système et la double-fenêtre ventilée, par leur principe de fonctionnement et leur profondeur, ont donc des similarités ce qui explique l'utilisation de sa méthode de calcul. Comme dans les autres sources, le coefficient d'échange a une composante liée à un coefficient d'échange en convection naturelle h_c et une seconde composante liée à la vitesse de l'air v_{DW} . Le coefficient d'échange naturel est fonction du Nusselt Nu , de la conductivité thermique de l'air λ et d'une dimension caractéristique D . La différence avec les autres formulations, comme celle de la norme ISO 15099 par exemple, provient du calcul du Nusselt où les différents coefficients diffèrent. A noter que la formulation finale du coefficient d'échange dans la double-fenêtre a été ajustée suite à plusieurs simulations afin de calibrer au mieux les résultats simulés sur les mesures pour obtenant ainsi l'équation (V-33). Ces formulations faisant intervenir un gradient de température entre deux surfaces, nous avons fait l'hypothèse d'un coefficient d'échange

pour chaque couple de surface opposées [(1)/(3) ; (2)/(4) ; (5)/(6)]. C'est pourquoi la dimension caractéristique correspond ici à la distance entre chacune de ces deux surfaces.

V.3.2.c. Coefficient d'échange convectif au sein du double vitrage

Le coefficient d'échange convectif au sein du double vitrage h_{DV} est calculé selon la méthode de la norme ISO 15099 [87] détaillée dans les relations (V-38) à (V-40).

$$h_{DV} = Nu_{DV} \frac{\lambda_{lame\ air}}{e_{lame\ air}} \quad (V-38)$$

$$Nu_{DV} = \max[Nu_1, Nu_2] \quad (V-39)$$

$$\begin{cases} Nu_1 = 0,0673838 \times Ra^{1/3} & \text{si } 5 \cdot 10^{-4} < Ra < 10^6 \\ Nu_1 = 0,028154 \times Ra^{0,4134} & \text{si } 10^{-4} < Ra \leq 5 \cdot 10^{-4} \\ Nu_1 = 1 + 1,7596678 \cdot 10^{-10} \times Ra^{2,2984755} & \text{si } Ra \leq 10^{-4} \end{cases} \quad (V-40)$$

$$Nu_2 = 0,242 \left(\frac{Ra}{\frac{H_{lame\ air}}{e_{lame\ air}}} \right)^{0,272}$$

avec $H_{lame\ air}$ la hauteur de la lame d'air, $e_{lame\ air}$ son épaisseur et $\lambda_{lame\ air}$ sa conductivité thermique.

V.4. Modèle radiatif

L'utilité de ce modèle est de fournir les flux radiatifs net, qui est une des sollicitations extérieures requises par le modèle de conduction. Nous assimilerons toutes les surfaces comme des corps gris diffus et opaques sauf pour les vitrages qui sont transparents. Ce modèle permet la distinction entre le rayonnement par courtes longueurs d'onde (CLO) et celui par grandes longueurs d'onde (GLO). Les échanges par courtes longueurs d'onde correspondent au flux solaire absorbé par les surfaces alors que les échanges par grandes longueurs d'onde correspondent au flux radiatif inter surface liés à leur température. Le flux radiatif total net φ_{net} reçu par une surface est donc égal à la somme du flux CLO absorbé $\alpha_{CLO} \times \varphi_{CLO}$ et du flux net GLO φ_{GLO} (cf. équation (V-41)).

$$\varphi_{net} = \alpha_{CLO} \times \varphi_{CLO} + \varphi_{GLO} \quad (V-41)$$

où α est le coefficient d'absorption CLO spécifique à chaque surface. Ainsi une partie du modèle radiatif est destiné au calcul du flux solaire incident sur chaque surface et une seconde partie aux échanges radiatifs entre les surfaces.

V.4.1. Rayonnement par courtes longueurs d'onde (CLO)

Dans un premier temps, un modèle utilisant la méthode de lancer de rayon a été utilisé pour déterminer les tâches solaires sur chacune des surfaces. Pour résumer, cette méthode consiste à identifier les intersections entre des demi-droites (rayons de soleil) et des surfaces. L'ensemble de ces points d'intersection sur une surface forment donc la tâche solaire dont on peut obtenir ensuite son taux d'ensoleillement. Tout cela nécessite que les demi-droites soient calculées à chaque pas de temps puisque leurs origines correspondent à la position solaire et qu'un maillage fin soit utilisé pour les demi-droites de manière à obtenir un résultat précis. Après utilisation, le temps de calcul de cette méthode a fortement ralenti les temps de simulation. Par conséquent, il a été décidé de simplifier cette partie du modèle et d'opter pour une modélisation plus rapide. C'est cette seconde méthode qui est présentée par la suite.

Elle consiste à considérer uniquement le flux solaire traversant la vitre extérieure. Cette quantité de chaleur est ensuite répartie entre chacune des surfaces suivant les

facteurs de forme. Un schéma récapitulatif illustre notamment le principe du modèle radiatif en Figure V-5. De plus, aucune tâche solaire n'est considérée sur la vitre extérieure. L'irradiation fonctionne comme un TOR. Si l'angle d'incidence du rayonnement est dans les plages de hauteur et d'azimut solaire de la double-fenêtre, alors le flux solaire reçue par la vitre est égal au flux incident depuis cette position solaire.

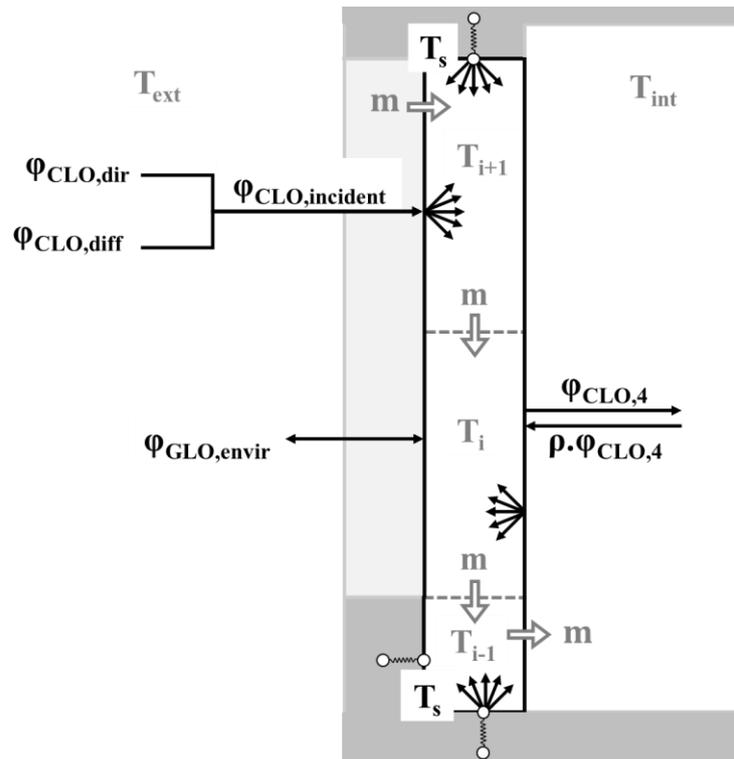


Figure V-5. Schéma récapitulatif de la modélisation des échanges thermiques au sein de la double-fenêtre.

Nous allons donc rechercher le flux CLO incident transmis par la vitre extérieure $\phi_{transmis,CLO}$. Ce dernier a une composante directe et une composante diffuse :

- le flux direct $\phi_{dir,CLO}$ dépend des données météo telle que la position du soleil et de la localisation géographique de la surface considérée.
- le flux diffus $\phi_{diff,CLO}$ correspond à la quantité de chaleur solaire provenant par réflexion du ciel, du sol ou de l'environnement (bâtiment, arbre).

Cela nous amène à la relation suivante (équation (V-42)) :

$$\varphi_{transmis,CLO} = \tau_{CLO,ext} \times (\varphi_{dir,CLO} + \varphi_{diff,CLO}) \quad (V-42)$$

où $\tau_{CLO,ext}$ est la transmissivité du vitrage extérieur.

V.4.1.a. Détermination du flux direct CLO sur la vitre extérieure

La composante directe se calcule d'après la position solaire et la donnée de la station météo qu'est le flux solaire direct reçu par une surface horizontale $\varphi_{dir,hor}$. La suite des calculs (équations (V-43) à (V-48)) concerne la relation entre la donnée acquise par la station météo et le flux incident de la vitre extérieure [59].

$$\varphi_{dir,CLO} = \frac{\varphi_{dir,hor} \times \cos \theta}{\sin(alt_{sun})} \quad si \begin{cases} \zeta_1 < azi_{sun} < \zeta_2 \\ \zeta_3 < alt_{sun} < \zeta_4 \end{cases} \quad (V-43)$$

$$\varphi_{dir,CLO} = 0 \quad sinon$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin(declin) \sin(lat) \cos(incl) - \sin(declin) \cos(lat) \sin(incl) \cos(orient) \\ &+ \cos(declin) \sin(lat) \sin(incl) \cos(orient) \cos(\omega) \\ &+ \cos(declin) \sin(incl) \sin(orient) \sin(\omega) \end{aligned} \quad (V-44)$$

$$si \cos \theta < 0, \quad alors \ on \ considère \ \cos \theta = 0 \quad (V-45)$$

$$\omega = 15 \times (t_s - 12) \quad (V-46)$$

$$t_s = t_{leg} + \frac{(long_{ref} - long)}{15} + 0,17 \times \sin\left(4\pi \frac{n_{day} - 80}{373}\right) - 0,29 \times \sin\left(2\pi \frac{n_{day} - 8}{355}\right) - C \quad (V-47)$$

$$declin = 23,45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (n_{day} + 284)\right) \quad (V-48)$$

avec :

- alt_{sun} : altitude solaire [rad]
- azi_{sun} : azimut solaire [rad]
- θ : angle d'incidence du rayonnement sur la surface considérée [rad]

- $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$: angles limites des masques horizontaux et azimutaux [rad]
- $declin$: déclinaison solaire [rad]
- lat : latitude solaire [rad]
- $incl$: inclinaison de la surface considérée [rad]
- $orient$: orientation de la surface considérée [rad]
- ω : angle horaire [rad]
- t_s : temps solaire [h]
- t_{leg} : temps légal [h]
- $long_{ref}$: longitude de référence (15° dans notre cas) [°]
- $long$: longitude de la surface considérée [°]
- C : coefficient correcteur (=1 si heure d'été)
- n_{day} : numéro du jour concerné (1^{er} février = 32)

V.4.1.b. Détermination du flux diffus CLO sur la vitre extérieure

La composante diffuse est composée du flux diffus provenant du ciel mais aussi du flux réfléchi par l'environnement (direct + diffus). Cette composante est définie par la relation (V-49). Cette dernière fait intervenir les facteurs de forme entre le ciel est la double-fenêtre $F_{ciel,DF}$ puis celui entre l'environnement et la double-fenêtre $F_{envir,DF}$. En effet, la répartition entre les deux sources du flux (ciel et environnement) dépend de leur proportion dans le « champ de vision » de la fenêtre. Ces facteurs de forme ont été calculé selon les formulations de Ritoux [93].

$$\varphi_{diff,CLO} = \varphi_{diff,hor} \times F_{ciel,DF} + (\varphi_{diff,hor} + \varphi_{dir,hor}) \times albedo \times F_{envir,DF} \quad (V-49)$$

où $\varphi_{diff,hor}$ est le flux diffus mesuré par la station météo et $albedo$ la réflectivité de l'environnement.

V.4.1.c. Détermination du flux CLO reçu par chacune des surfaces de la double-fenêtre

Une fois le flux transmis par la vitre extérieure déterminé, il est possible de calculer celui reçu par l'ensemble des surfaces à l'intérieur de la double-fenêtre. L'enceinte de la double-fenêtre va être le lieu de plusieurs inter-réflexions successives entre les surfaces la composant. Par conséquent, le flux CLO reçu par une surface est composé d'une partie directe et d'une partie issue de ces inter-réflexions. Cela veut dire que le flux arrivant sur une surface i dépend du flux que cette même surface a réfléchi sur les autres surfaces. En outre, s'agissant d'une double-fenêtre une partie du flux CLO qui traverse le vitrage extérieur traverse également le vitrage intérieur qui est ensuite partiellement réfléchi en retour par l'intérieur de la cellule vers la cavité. Pour une surface i , composante d'un volume de j surfaces, cela nous conduit à la formulation (V-50). A noter que le cas particulier du linteau a été considéré. En effet, cette surface ne reçoit en réalité aucun rayonnement direct mais uniquement à partir des réflexions des autres surfaces. C'est pourquoi le premier terme de la relation (V-50) a été considéré nul pour le calcul du flux CLO de cette surface.

$$\varphi_{CLO,i} = F_{2,i} \times \varphi_{transmis,CLO} + \sum_{j=1}^N (F_{j,i} \times \rho_j \times \varphi_{CLO,j}) + F_{4,i} \times \rho_{HYB} \times \tau_{CLO,int}^2 \times \varphi_{CLO,4} \quad (V-50)$$

ce qui donne le système matriciel suivant (V-51):

$$[A][\varphi_{CLO}] = [B] \quad (V-51)$$

où

$$A = \delta_{i,j} - F_{j,i} \times \rho_j - \delta_{i,4} \times F_{4,i} \times \rho_{HYB} \times \tau_{CLO,int}^2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \delta_{i,j} = 0 \text{ si } i \neq j \\ \delta_{i,j} = 1 \text{ si } i = j \\ \delta_{i,4} = 0 \text{ si } j \neq 4 \\ \delta_{i,4} = 1 \text{ si } j = 4 \end{cases} \quad (V-52)$$

$$B = F_{2,i} \times \varphi_{transmis,CLO} \quad (V-53)$$

avec

- $F_{j,i}$: facteur de forme de la surface j vers i. Les indices 2 et 4 correspondent respectivement aux surfaces 2 (vitrage extérieur) et 4 (vitrage intérieur) montrées en Figure V-2.
- ρ_j, ρ_{HYB} : réflectivités de la surface j et des parois intérieures d'HYBCELL
- $\tau_{CLO,int}$: transmissivité du vitrage intérieur
- $\delta_{i,j}$: symbole de Kronecker
- N : nombre de surface composant la cavité d'air

V.4.1.d. Echanges radiatifs CLO avec l'environnement et la cellule HYBCELL

Jusqu'ici ont été décrit tous les flux radiatifs CLO présent à l'intérieur de la double-fenêtre. Pour boucler l'ensemble du modèle d'autres flux radiatifs ont été considérés. En effet, il s'agit des flux CLO entre la façade extérieure (mur et vitrage compris) et l'environnement puis des flux CLO arrivants sur la menuiserie intérieure depuis l'intérieur de la pièce. Ainsi le flux CLO arrivant sur la façade sur le mur extérieur est défini selon la relation (V-54) et celui sur la vitre extérieure selon la relation (V-55). Les flux CLO arrivant par réflexion sur la menuiserie intérieure (vitrage et soubassement) sont définis par les relations (V-56) et (V-57).

$$\varphi_{CLO\ ext, \ mur\ ext} = \alpha_{mur\ ext} \times (\varphi_{diff,CLO} + \varphi_{diff,CLO}) \quad (V-54)$$

$$\varphi_{CLO\ ext, \ vitre\ ext} = \alpha_{vitre\ ext} \times (\varphi_{diff,CLO} + \varphi_{diff,CLO}) \quad (V-55)$$

$$\varphi_{CLO\ int, \ vitre} = \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO,int} \times \rho_{HYB} \times \alpha_{vitre\ int} \quad (V-56)$$

$$\varphi_{CLO\ int, \ soubassement} = \varphi_{CLO,4} \times \tau_{CLO,int} \times \rho_{HYB} \times \alpha_{soubassement\ int} \quad (V-57)$$

V.4.2. Rayonnement par grandes longueurs d'onde (GLO)

V.4.2.a. Echanges radiatifs GLO au sein de la double-fenêtre

Afin de déterminer le rayonnement reçu par une surface, nous avons utilisé la méthode des radiosités. La radiosité correspond à l'ensemble des flux qui se dégage d'une surface. Elle est donc composée d'une partie émise, l'émittance et d'une seconde partie réfléchie. Ainsi, le flux GLO net d'une surface i est défini selon l'équation (V-58). Encore une fois, des inter-réflexions vont intervenir au sein de la cavité entre les surfaces. Ce qui conduira au système matriciel présenté en (V-61).

$$\varphi_{GLO,i} = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (J_i - M_i) \quad (V-58)$$

avec

$$J_i = M_i + \frac{\rho_i}{S_i} \sum_{j=1}^N (S_j \times F_{j,i} \times J_j) \quad \text{avec} \quad M_i = \varepsilon_i \times \sigma \times T_i^4 \quad (V-59)$$

$$\sum_{i=1}^N (\delta_{i,j} - \rho_i \times F_{i,j}) J_i = M_i \quad (V-60)$$

$$[A] [J] = [B] \quad (V-61)$$

où

$$A = \delta_{i,j} - \rho_i \times F_{i,j} \quad B = M_i \quad (V-62)$$

avec

- J_i : radiosité de la surface i [W/m²]
- ε_i : émissivité de la surface i
- S_i : surface i [m²]
- σ : constant de Stefan-Boltzmann [W/(m².K⁴)]
- T_i^4 : température de la surface i [K]

V.4.2.b. Echanges radiatifs GLO avec l'environnement

Enfin, il existe des échanges radiatifs GLO entre la façade et l'environnement. Ces échanges sont définis respectivement par les relations (V-63) et (V-64). Pour ces derniers, nous considérons le ciel comme un corps noir.

$$\varphi_{GLO\ envir, mur\ ext} = \varepsilon_{GLO, mur\ ext} \times \sigma [F_{ciel,DF}(T_{ciel}^4 - T_{mur\ ext}^4) + F_{envir,DF}(T_{ext}^4 - T_{mur\ ext}^4)] \quad (V-63)$$

$$\varphi_{GLO\ envir, vitre\ ext} = \varepsilon_{GLO, vitre\ ext} \times \sigma [F_{ciel,DF}(T_{ciel}^4 - T_{mur\ ext}^4) + F_{envir,DF}(T_{ext}^4 - T_{mur\ ext}^4)] \quad (V-64)$$

où T_{ciel} est la température du ciel, en K, qui se calcule selon la relation (V-65) de Clarke [94].

$$T_{ciel} = \left[9,365574 \cdot 10^{-6} (1 - cc) T_{ext}^6 + T_{ext}^4 cc (1 - 0,84cc) \left(0,527 + 0,84cc + 0,161e^{\left(8,45 \left(1 - \frac{273}{T_{ext}} \right) \right)} \right) \right]^{0,25} \quad (V-65)$$

La température du ciel est fonction de l'indice cc cloud and cover qui représente la couverture du ciel par les nuages. Il est compris entre 0 (ciel dégagé) et 1 (ciel entièrement nuageux). Son estimation nécessiterait une prise de photo permanente du ciel. Dans notre cas nous utiliserons le rapport utilisé par El Mankibi [86] entre le flux diffus et le flux total reçu par la station météo (équation (V-66)) Ce rapport permet une estimation cohérente puisque le flux diffus de la station météo provient du ciel mais possède notamment une limite d'utilisation en période nocturne où sa valeur atteint 0 quel que soit la couverture du ciel.

$$cc = \frac{\varphi_{diff,hor}}{\varphi_{diff,hor} + \varphi_{dir,hor}} \quad (V-66)$$

V.4.3. Facteurs de forme

Les calculs d'échanges radiatifs présentés précédemment font intervenir des facteurs de forme entre les différentes parois composant l'enceinte de la double-fenêtre. Le facteur de forme, $F_{i,j}$ peut se définir comme étant la part de radiosité d'une surface A_i reçue par une surface A_j . Il se calcule analytiquement en résolvant la double intégrale en (V-67). Il est fonction de l'angle formé par la normale d'une surface et la distance entre les deux surfaces χ_i ainsi que de cette distance r . La résolution numérique de cette double intégrale requiert souvent beaucoup de temps de calcul et n'est pas forcément justifiée dans le cas de géométrie simple [94]. Dans notre cas, les surfaces sont toutes des rectangles et il existe des formulations empiriques issues de simplification de l'équation fondamentale présentée en (V-67). L'estimation de l'ensemble des facteurs de forme s'est donc faite selon les relations décrites par Ritoux [93] ajoutées à la relation de réciprocité (V-68) et au fait que des surfaces coplanaires ont un facteur de forme nul.

$$F_{i,j} = \frac{1}{A_i} \int^{A_i} \int^{A_j} \frac{\cos\chi_i \cos\chi_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (V-67)$$

$$A_i F_{i,j} = A_j F_{j,i} \quad (V-68)$$

V.5. Validation expérimentale du modèle numérique

Afin de confronter les résultats des simulations aux mesures expérimentales, nous avons établi notre propre méthode de validation numérique. Celle-ci est basée sur l'utilisation d'outils statistiques qui viennent compléter l'analyse classique des courbes des valeurs simulées et mesurées.

V.5.1. Description de la méthode de validation

Deux premiers indices statistiques ont été utilisés pour la validation numérique. Il s'agit de l'erreur moyenne normalisée (NMBE) et du coefficient de variation de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)). Ils sont tous deux tirés des recommandations de l'ASHRAE 14 « Measurement of Energy and Demand Savings » [95]. Ce sont à l'origine des indices créés pour validation des modèles de simulation dynamique de bâtiment sur une période annuelle. Mais ils ont aussi été utilisés à des fins de validation numérique par Roccamena et Frutos Dordelly [85,90]. C'est pourquoi, en plus de les utiliser nous porterons un regard critique sur ces indices. Ils s'expriment en fonction des données mesurées $y_{measured}$ et simulées $y_{simulated}$ à comparer selon les relations (V-69) et (V-70). Selon les recommandations de l'ASHRAE, un NMBE compris entre $\pm 10\%$ et un CV(RMSE) compris entre $\pm 30\%$ sont représentatifs d'un modèle validé. Enfin, nous utiliserons le coefficient de détermination R^2 qui reflète le degré de linéarité entre deux jeux de données. Compris entre 0 et 1 il permet donc de juger la concordance des tendances de deux évolutions de grandeurs. Il est exprimé selon la relation (V-71).

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{measured,i} - y_{simulated,i})}{\bar{y}_{measured} (n-1)} \times 100 \quad (V-69)$$

$$CV(RMSE) = \frac{100}{\bar{y}_{measured}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{measured,i} - y_{simulated,i})^2}{(n-1)}} \quad (V-70)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_{measured,i} - \bar{y}_{measured,i})(y_{simulated,i} - \bar{y}_{simulated,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{measured,i} - \bar{y}_{measured,i})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_{simulated,i} - \bar{y}_{simulated,i})^2}} \right)^2 \quad (V-71)$$

Utilisés sur une échelle de temps trop grande, les indices NMBE et CV(RMSE) peuvent cacher des sources de divergence entre les résultats simulés et les mesures. C'est pourquoi nous avons décidé de partager chaque journée en trois périodes distinctes de manière à nuancer l'analyse. Ces trois périodes, utilisées précédemment en IV.2, nommées P1, P2 et P3, équivalent à :

- la nuit P1, c'est-à-dire quand $\varphi_{diff,hor} + \varphi_{dir,hor} = 0$,
- la période d'exposition au rayonnement solaire direct P2, autrement dit quand $\varphi_{dir,CLO} + \varphi_{diff,CLO} > 0$,
- la période hors nuit et exposition au rayonnement solaire direct P3.

A titre indicatif, les indices NMBE et CV(RMSE) seront aussi calculés selon toute la période de test (WP) ce qui permettra de juger de la pertinence de leur utilisation.

Le modèle numérique et les campagnes expérimentales comprenant beaucoup de grandeurs à comparer, nous nous limiterons ici aux plus pertinentes. Les résultats de la validation seront concentrés sur la comparaison des trois températures d'air mesurées au sein de la cavité et de trois températures de surface ST1, ST2, ST3 définies selon la relation (V-72) et les températures d'air au différents niveaux $T_{entrée}$, T_{mid} , T_{sortie} .

$$ST1 = \overline{(T_{allège}, T_{plancher}, T_{lnteau}, T_{tableau\ gauche}, T_{tableau\ droit})}$$

$$ST2 = T_{vitre\ ext} \tag{V-72}$$

$$ST3 = T_{vitre\ int}$$

Ensuite, étant donné que le gradient vertical de température de la double-fenêtre intervient dans les performances énergétiques de celle-ci, il sera nécessaire de confronter les gradients simulés aux gradients mesurés. Il s'agira de comparer à la fois de manière absolue mais surtout de vérifier que le signe du gradient est le même. En effet, un modèle numérique estimant les températures d'air avec une erreur acceptable peut cacher un changement de signe dans le gradient de température. On se retrouverait alors avec une récupération ou une perte de chaleur du côté des mesures et l'inverse du côté du modèle numérique.

V.5.2. Résultats de la validation

Dans un premier temps la validation se concentrera sur les tests de la double-fenêtre munie d'une fenêtre intérieure en simple vitrage (DF/SV) puis dans un second temps sur ceux de la double-fenêtre munie d'un double vitrage en fenêtre intérieure (DF/DV). Le modèle étant conçu pour une double-fenêtre ventilée mécaniquement, la validation se fera uniquement à partir des tests correspondant soit les tests 3 à 12 des Tableau III-10 et Tableau III-11.

V.5.2.a. Validation du modèle DF/SV

- Analyse des températures de surfaces et des températures d'air

L'ensemble des résultats statistiques sont présentés dans le Tableau V-3. Les valeurs dépassant les seuils ont été grisées. Concernant le NMBE, on peut constater que la force du modèle se situe sur les estimations de $T_{\text{entrée}}$, T_{mid} et ST1. Elles respectent les conditions des +/-10% dans respectivement 28, 28 et 27 cas sur 30. D'un autre côté les faiblesses se situent sur les estimations de T_{sortie} , ST3 et ST2 puisqu'elles dépassent les seuils dans respectivement 10, 10 et 6 cas sur 30. Du point de vue du découpage temporel, le modèle semble simuler justement durant P3, P1 puis P2. Le NMBE est respecté dans respectivement 55, 52 et 40 cas sur 60. On peut noter également que 70% des valeurs excédentaires se situent entre 10 et 15%.

Dans un deuxième temps, toutes les valeurs des CV(RMSE) remplissent les exigences de +/-30% sauf un cas de ST3 durant P2 lors du test 12. Enfin, les coefficients de détermination sont compris entre 77 et 97% avec une valeur moyenne de 91%. Bien qu'il n'y ait pas de seuil à respecter quant à ce dernier coefficient, les résultats montrent une très bonne corrélation entre les tendances des mesures expérimentales et simulées. Le point faible du modèle se situe sur la tendance de ST3 puisqu'elle correspond le plus souvent aux valeurs les plus faibles de chaque test. Enfin, les résultats statistiques sur toute la durée du test (WP) laisseraient penser que le modèle est encore plus précis. Ainsi, l'utilisation du découpage temporel offre une interprétation plus nuancée.

ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	
Test 3						Test 4						Test 5						Test 6						Test 7						
NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						
P1	9,4	6,1	8,4	7,0	7,3	3,5	9,8	8,6	8,2	8,2	7,9	1,8	7,2	7,4	6,2	5,9	4,6	1,1	8,2	6,4	4,8	3,6	3,2	0,1	8,3	9,0	6,5	6,4	4,1	-0,5
P2	-8,2	3,3	-12,4	-1,9	1,3	-2,0	-7,3	6,8	-13,5	-0,9	3,9	-2,8	-5,3	9,0	-13,1	-0,7	3,9	-3,3	-6,3	5,1	-13,9	-8,6	1,3	-6,1	-4,6	13,8	-16,5	-4,1	7,7	-5,6
P3	1,8	7,1	5,1	4,7	5,6	0,9	2,7	8,3	4,5	5,1	5,8	1,0	1,8	9,6	4,8	5,9	5,3	1,9	0,2	7,6	3,3	2,7	3,8	0,2	-1,0	7,2	1,8	1,3	2,2	-1,5
WP	3,4	6,1	3,7	4,5	5,5	1,5	4,7	8,2	4,1	5,7	6,4	0,9	3,6	8,6	3,7	5,2	4,8	1,0	3,3	6,8	2,2	2,0	3,3	-0,5	3,3	8,4	3,1	3,3	3,4	-1,2
CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						
P1	9,6	6,7	8,5	7,3	7,6	3,9	10,2	9,2	8,4	8,5	8,2	2,7	7,5	8,3	6,9	6,9	5,5	2,8	8,8	7,0	5,3	4,6	4,2	1,9	8,6	9,8	7,2	7,1	5,2	3,0
P2	10,7	5,8	14,0	3,4	3,1	3,4	10,1	8,9	15,7	3,6	5,2	3,9	7,3	9,8	14,0	3,8	5,1	4,1	9,4	6,5	15,5	9,6	3,1	7,0	7,1	15,3	18,1	5,5	9,0	6,2
P3	6,1	8,5	6,5	5,8	6,5	3,8	6,8	10,4	6,8	7,3	7,4	4,0	6,3	11,5	7,7	8,9	7,7	5,0	7,2	9,9	7,4	7,8	6,9	4,9	6,9	10,4	6,3	7,4	6,8	4,6
WP	8,4	7,5	8,9	6,0	6,4	3,8	8,7	9,9	8,8	7,5	7,5	3,6	7,0	10,3	8,3	7,8	6,6	4,1	8,1	8,7	8,0	7,1	5,7	4,3	7,8	10,9	7,8	7,2	6,5	4,1
R ²						R ²						R ²						R ²						R ²						
0,84 0,94 0,77 0,95 0,96 0,95						0,87 0,94 0,81 0,93 0,95 0,95						0,85 0,93 0,77 0,88 0,92 0,92						0,88 0,95 0,84 0,89 0,95 0,94						0,92 0,94 0,90 0,93 0,95 0,97						
Test 8						Test 9						Test 10						Test 11						Test 12						
NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						
P1	4,5	10,2	16,9	-2,6	6,2	-14,0	3,5	9,3	12,9	3,0	6,0	-10,3	3,1	7,6	10,2	0,5	3,4	-5,9	2,7	10,2	9,2	-1,7	3,9	-8,0	2,6	8,6	7,8	-2,0	0,8	-10,0
P2	2,5	24,2	-5,2	10,8	15,7	-5,7	0,8	20,9	-3,0	9,7	14,2	-3,2	-6,7	11,3	-9,3	1,1	6,8	-12,1	-11,9	9,5	-16,3	-7,7	3,4	-14,5	-24,6	5,3	-34,4	-15,2	-1,6	-22,9
P3	-7,4	7,0	4,9	-0,9	4,1	-11,3	-8,8	3,6	2,0	-2,2	1,4	-10,1	-7,5	2,2	1,5	-4,9	-1,1	-9,5	-7,6	3,7	0,1	-7,4	-1,0	-10,5	-10,1	2,6	-2,3	-7,1	-2,6	-11,9
WP	-0,7	9,8	10,6	-0,9	5,9	-12,3	-2,0	7,5	7,1	1,1	4,5	-9,7	-1,9	5,3	5,6	-1,9	1,5	-7,7	-2,6	7,1	3,9	-4,6	1,6	-9,5	-5,7	5,3	-0,7	-5,8	-1,0	-12,2
CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						
P1	6,3	10,9	17,5	4,8	6,4	14,7	5,7	9,7	13,3	3,6	6,2	10,5	5,8	8,0	10,5	2,9	3,9	6,3	5,2	10,9	9,9	2,7	4,4	8,7	5,1	9,4	8,3	4,5	2,7	11,1
P2	5,1	26,2	6,8	12,4	16,9	7,6	4,1	22,7	6,6	11,4	15,2	4,8	10,0	14,3	14,8	6,1	9,4	12,9	13,3	11,9	19,8	8,9	5,6	15,2	26,3	11,1	37,2	16,8	5,6	23,7
P3	12,2	14,7	8,0	7,6	10,8	12,3	12,8	10,6	5,6	7,7	8,4	11,0	10,9	7,2	5,5	7,5	6,0	10,1	11,3	9,0	6,5	9,6	6,8	11,4	12,4	9,0	6,3	8,6	6,9	12,3
WP	9,4	16,0	13,4	7,4	10,3	13,2	9,6	12,5	10,0	6,8	8,5	10,5	8,6	8,2	8,8	5,8	5,5	8,6	9,0	10,2	9,3	7,4	5,8	10,5	12,6	9,9	13,7	9,3	5,7	13,8
R ²						R ²						R ²						R ²						R ²						
0,90 0,88 0,91 0,93 0,89 0,95						0,91 0,90 0,88 0,92 0,90 0,96						0,86 0,93 0,87 0,92 0,93 0,94						0,85 0,93 0,84 0,94 0,94 0,93						0,88 0,94 0,77 0,95 0,96 0,92						

Tableau V-3. Résultats de la validation statistique de DF/SV.

En définitive, les résultats numériques montrent alors une bonne concordance avec les mesures. Cependant, le modèle numérique semble perdre en précision lors de l'estimation des températures des vitrages et de la température d'air du sous volume inférieur et/ou lorsque le soleil irradie directement sur la double-fenêtre. Au-delà des erreurs liées aux modèles numériques, des incertitudes expérimentales peuvent aussi influencer les performances. En effet, les températures de surface simulées sont confrontées à des valeurs mesurées provenant d'une seule sonde. Cette unique mesure n'est peut-être pas forcément représentative de l'ensemble de la surface notamment pour celles qui sont le plus exposée au soleil. De plus, les vitrages ayant une faible inertie thermique, ils réagissent rapidement aux sollicitations extérieures. L'estimation de ces dernières se doit alors d'être très précise pour éviter des erreurs éventuelles. Les écarts sur les températures d'air peuvent également être dues à une hétérogénéité thermique de chaque sous-volume. Dans ce cas, l'installation de plusieurs sondes dans un même sous-volume serait nécessaire pour une mesure plus précise de la température d'air moyenne.

Si l'on regarde les résultats statistiques de manière saisonnière, il apparaît que les tests hivernaux rassemblent une majorité des valeurs excédentaires. Cependant, les formulations du NMBE (V-69) et CV(RMSE) (V-70) avantagent les tests estivaux puisque les températures moyennes sont plus élevées. A l'échelle de la journée elles avantagent les périodes P2 et P3 par rapport à P1. C'est pourquoi l'analyse des indices statistiques n'est peut-être pas suffisante pour valider le modèle numérique et une interprétation graphique est requise pour confirmer et/ou nuancer les premières observations.

Dans le but de visualiser les comportements des grandeurs, les résultats de ST2 et de ST3 des tests 7 et 8 sont représentés sur les Figure C-1 et Figure C-2 puis ceux des températures d'entrée et de sortie des tests 3 et 12 sont représentés sur les Figure C-3 et Figure C-4 (Annexe C). Ces résultats ont été choisis pour leur diversité en termes de saison de test, précision et grandeurs physiques. Les courbes des Figure C-1 et Figure C-2 sont en accord avec les résultats statistiques dans le sens où ST2 est correctement estimée pendant P2 et ST3 est précisément estimée seulement durant le test 7 (Figure C-1) mais montre des écarts pour le test 8 (Figure C-2) en particulier pendant P2. Concernant les températures d'air du test 3 en Figure C-3, on peut remarquer la bonne concordance entre les températures de sortie simulées et mesurées avec une légère erreur durant P1 alors que la température d'entrée est mieux estimée durant P2. Les courbes du test 12 montre la difficulté du modèle à estimer la température de sortie dans chaque période et la bonne estimation de la température d'entrée pendant P1. Une fois de plus, ces observations

graphiques rejoignent les observations statistiques ce qui montre que l'utilisation des indices statistiques s'avère fiable pour une analyse à l'échelle de la journée.

Si l'on se concentre sur l'analyse saisonnière, on remarque que les erreurs sur ST2 semblent équivalentes entre le test estival (Figure C-1) et le test hivernal (Figure C-2) sauf durant la période P3 où le test hivernal montre légèrement une meilleure précision. Les erreurs d'estimation de ST3 sont moindres pour le test 7 durant P1, moindres pour le test 8 durant P3 et équivalentes durant P3. Concernant les températures d'entrée, les graphiques montrent également la plus grande précision dans les résultats du test 3 (Figure C-3) comparée à ceux du test 12 (Figure C-4) durant P1, l'inverse durant P2 et une équivalence durant P3. Enfin, les températures de sortie sont bien mieux estimées dans le test 3 que dans le test 12. Toutes ces observations graphiques se retrouvent dans les résultats statistiques ce qui montre qu'une comparaison saisonnière est tout de même possible à l'aide des indices NMBE et CV(RMSE).

- Analyse du gradient thermique

Le Tableau V-4 montre les moyennes et écarts-types des différences entre les gradients thermiques mesuré et simulé.

	Moy. [°C]	Ecart-type [°C]								
	Test 3		Test 4		Test 5		Test 6		Test 7	
P1	0,9	0,2	1,3	0,3	1,0	0,2	0,7	0,2	1,0	0,2
P2	0,0	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6	-0,6	0,4	0,3	0,4
P3	1,1	0,3	1,0	0,5	1,0	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6
WP	0,9	0,5	1,1	0,5	1,0	0,5	0,6	0,6	0,8	0,5
	Test 8		Test 9		Test 10		Test 11		Test 12	
P1	1,2	0,2	1,5	0,2	0,8	0,4	0,8	0,4	1,0	0,3
P2	2,4	0,4	1,9	0,6	1,9	1,1	0,9	0,5	1,1	0,8
P3	1,4	0,5	1,1	0,5	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7	0,5
WP	1,3	0,5	1,4	0,5	0,8	0,5	0,7	0,5	0,9	0,5

Tableau V-4. Moyennes et écarts-types des différences entre les gradients thermiques mesuré et simulé pour tous les tests de DF/SV.

On remarque alors que les écarts moyens sont très faibles pour les tests estivaux (tests 3 à 7) (compris entre 0 et 1,3°C) et assez faibles pour les tests hivernaux (tests 8 à 12) (compris entre 0,7 et 2,4°C). En hiver, on peut constater que c'est la période P2 qui montre les plus hautes moyennes. Ces observations sur les moyennes rejoignent celles faites à la section précédente sur les indices statistiques. Les écarts-types assez faibles traduisent une répartition des écarts proches des moyennes. Ils se situent entre 0,2 et 1,1°C pour l'ensemble des tests. La différence saisonnière s'explique par le fait que les gradients thermiques sont plus importants en hiver qu'en été. Ainsi, le modèle reproduit mieux le comportement thermique lorsqu'il y a un faible gradient au sein de la double-fenêtre.

Enfin, comme évoqué en préambule, l'analyse des signes est importante puisqu'elle permet de savoir si le modèle estime un gradient thermique de même sens que celui mesuré. In fine, cela impacte l'effet récupérateur de chaleur ou non de la double-fenêtre. Ainsi, la Figure V-6 montre la fréquence d'opposition des signes des gradients thermiques. Un ratio de 50% signifie que le gradient thermique vertical simulé de la cavité a un sens inverse à celui mesuré 50% du temps de la période considérée.

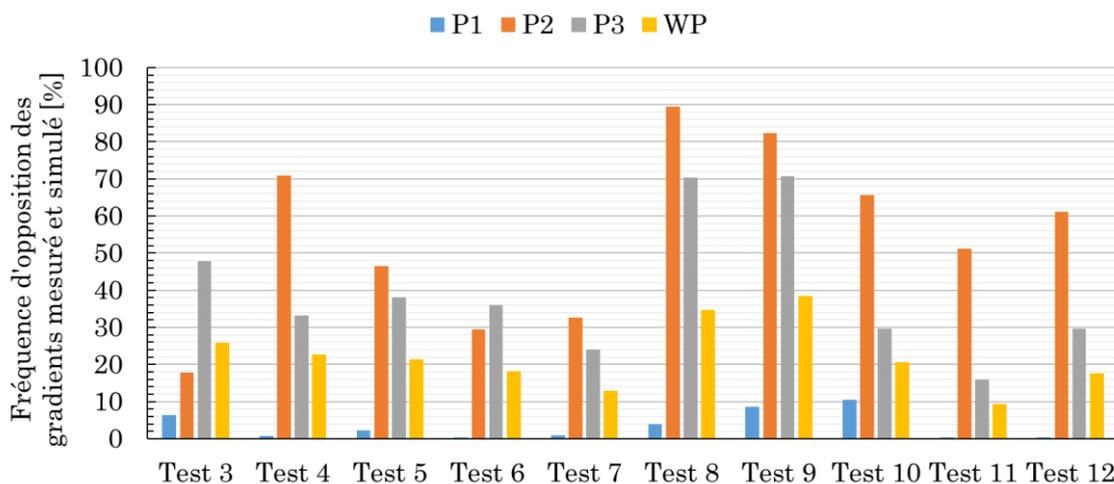


Figure V-6. Fréquence des oppositions de signe des gradients thermiques mesuré et simulé pour tous les tests de DF/SV.

Si l'on utilise le découpage périodique on remarque que le point fort du modèle se situe encore une fois pendant la nuit (P1) où les sens des gradients s'accordent plus de 90% du temps pour l'ensemble des tests. En revanche, la période P3 et surtout la période P2 montrent des ratios plus mitigés. En effet, les ratios atteignent plus de 80% pour les

tests 8 et 9. De manière globale, les tests hivernaux sont encore les plus compliqués à reproduire numériquement. On peut néanmoins nuancer ces résultats par le fait qu'ils concernent des périodes courtes à l'échelle journalière. En effet, si l'on regarde sur l'ensemble des périodes de test (WP), les ratios sont assez encourageants puisqu'ils ne dépassent pas 25% pour les tests estivaux et 40% pour les tests hivernaux. De plus, ces valeurs ne prennent pas en compte les valeurs absolues des gradients thermiques verticaux. C'est pourquoi une opposition de signe d'un gradient de $0,1^{\circ}\text{C}$ a autant d'importance qu'une opposition de signe d'un gradient de 2°C alors que la quantité de chaleur échangée correspondante est beaucoup moins importante. Or, les résultats expérimentaux ont montré des gradients assez faibles ce qui minimise leurs intérêts et la recherche de justesse absolue de la part du modèle numérique. Enfin, les possibles incertitudes expérimentales évoquées dans la section précédente à propos des indices NMBE et CV(RMSE) restent valables pour les résultats des gradients thermiques.

En définitive, la méthode de validation appliquée pour DF/SV a montré sa fiabilité et sa justesse. Elle a également montré que l'utilisation des indices statistiques peut être suffisante. C'est pourquoi seuls les résultats statistiques seront présentés pour les simulations de DF/DV.

V.5.2.b. Validation du modèle DF/DV

- Analyse des températures de surfaces et des températures d'air

Le Tableau D-1 (Annexe D) regroupe les résultats statistiques du modèle numérique simulant l'intégralité des tests de la double-fenêtre munie d'un double vitrage en menuiserie intérieure. On remarque alors une plus grande quantité de valeurs excédant les seuils de validation. Les résultats trouvés pour ST3 lors du test 8 ont été biaisés par un simple problème de décollement de la sonde qui n'a donc pas mesuré la température de vitrage intérieur et ne sont donc pas pris en compte. Ainsi, il y a 50 cas sur 177 où le NMBE dépasse le seuil de $\pm 10\%$. Les forces du modèle sont les estimations des températures de surfaces et plus particulièrement ST1 et ST3 qui ne recensent respectivement que 3 et 7 cas excédentaires sur 30 et 27 ainsi que les températures d'entrée et de sortie qui recensent respectivement 7 et 6 cas sur 30. Les autres grandeurs ST2 et T_{mid} recensent respectivement 11 et 16 cas excédentaires sur 30 soit plus d'un tiers pour chacun. Concernant le découpage temporel, P3 est la période qui pose le moins de

problème au modèle puisqu'elle comprend 6 cas excédentaires sur 59. P1 et P2 quant à elles comprennent respectivement 17 et 27 cas excédentaires sur 59. Cependant les résultats du CV(RMSE) sont toujours encourageants puisqu'il n'y a qu'un seul cas qui invalide le modèle. Enfin, les coefficients de détermination R^2 sont compris entre 72 et 97% avec une moyenne 89% si l'on exclut le 5% trouvé au test 8. L'estimation de la température de surface du vitrage intérieure (ST3) est celle qui, encore une fois, pose le plus de problème en termes de tendance.

Ainsi, il semblerait que DF/DV soit moins juste et précis que DF/SV se traduisant par un accroissement non négligeable des cas statistiquement invalidant. C'est pourquoi nous ne retiendrons que DF/SV lors de la caractérisation numérique dans le chapitre suivant.

V.6. Conclusion

Ce chapitre détaille le développement du modèle numérique de la double-fenêtre ventilée. Ce dernier présente l'avantage de simuler le comportement thermique du système en considérant toutes les surfaces de la double-fenêtre y compris les parois murales formant la cavité d'air. Il permet donc la modélisation d'une géométrie 3D où chaque transfert thermique est considéré unidimensionnel. Il est constitué de trois sous-modèles couplés les uns aux autres. Chacun de ces sous-modèles simule l'un des trois modes de transferts thermiques considérés. Afin d'obtenir un modèle léger et rapide, nous avons dû repenser notamment le sous-modèle de rayonnement. Cela a entraîné des hypothèses fortes sur l'irradiation solaire incidente de la vitre extérieure.

Dans un second temps, une méthode de validation originale a été mise au point. Elle repose sur l'utilisation d'indices statistiques (NMBE et CV(RMSE)) tiré de la littérature scientifique et un découpage temporel des données. Cependant, comme les indices n'ont pas été prévus pour des validations numériques hebdomadaires il a fallu compléter la méthode par une analyse graphique. Cette dernière a permis de conclure que l'utilisation des indices statistiques était cohérente, fiable et suffisante pour valider le modèle numérique à partir de nombreuses données expérimentales. La méthode de validation comprend également la validation sur les gradients thermiques verticaux. Il s'agit de vérifier en plus de la précision absolue des températures d'air, le signe du gradient. Cela impacte l'efficacité de la récupération de chaleur grâce à la ventilation de la double-fenêtre.

De cette méthode de validation, il en ressort que seule la version DF/SV du modèle numérique reproduit justement le comportement thermique des surfaces et de l'air ventilé de la double-fenêtre. Les forces du modèle sont l'estimation des températures des surfaces opaques, les températures d'air des sous-volumes supérieures. Les périodes de la journée où le modèle est le plus juste sont les deux périodes lors desquelles il n'y a pas d'irradiation solaire directe sur la double-fenêtre. A contrario ses faiblesses sont l'estimation des températures de surface des vitrages et la température de sortie d'air.

Chapitre VI. Caractérisation numérique de la double-fenêtre active

L'analyse des tests expérimentaux dans le Chapitre IV a permis de dégager plusieurs résultats sur le comportement thermique de la double-fenêtre. Mais comme nous l'avons souligné ce dispositif est plus complexe à caractériser et les nombreux tests expérimentaux n'ont donné qu'une caractérisation partielle de son comportement thermique. Par conséquent, l'objectif de ce dernier chapitre est d'utiliser la version DF/SV du modèle numérique afin de compléter cette caractérisation. Son utilisation va permettre de reproduire le changement de paramètres extérieurs, de conception ou de fonctionnement et de déterminer le comportement thermique de la double-fenêtre selon plusieurs configurations.

Le Chapitre IV a également montré que des coefficients de performance U_w peuvent être utilisés. Seulement, ils se différencient des coefficients des menuiseries standards par leur caractère dynamique. En effet, comme l'indiquent les résultats expérimentaux, les performances de la double-fenêtre ventilée varient en cours d'utilisation. Ainsi, dans un premier temps, nous analyserons un panel de paramètres afin d'en extraire les plus influents sur le comportement thermique. L'influence sera mesurée pour chaque température, appelées sorties, définissant les coefficients de performance. Dans un second temps, nous dégagerons toutes les dynamiques de ces sorties en fonction des paramètres influents sélectionnés, à l'aide de régression linéaire multiple.

VI.1. Recherche des paramètres d'influences

La recherche des paramètres d'influence revient à tester l'impact de la variation de plusieurs paramètres sur une variable de sortie. Les travaux sur le sujet sont nombreux puisque cette technique permet d'identifier méthodiquement et rapidement des facteurs d'influence sur des systèmes, des performances de système ou encore de bâtiment pour rester dans le domaine de l'énergétique du bâtiment. Par exemple, des études témoignent de leur utilisation afin de construire des modèles prédictifs de consommation énergétique de bâtiment [96,97]. La recherche des paramètres d'influence est alors couplée à des techniques de régression pour obtenir le modèle prédictif. Nous avons utilisé la même approche pour notre dispositif de double-fenêtre. Chaque paramètre a été testé individuellement et dans des conditions stables de manière à éviter les interdépendances. Nous avons également fait le choix de tester les paramètres dans différents scénarios.

VI.1.1. Panel de paramètres testés, scénarisation et valeurs choisies

Les paramètres testés correspondent à des grandeurs liées aux conditions extérieures, de conception ou de fonctionnement. Pendant qu'un paramètre est testé les valeurs des autres sont fixées à des valeurs de référence. Pour les paramètres météorologiques, les plages de variation et les valeurs références découlent des moyennes et extremum observés durant l'ensemble des tests de manière à rester dans des conditions d'utilisation du modèle numérique. Pour les paramètres liés aux propriétés de la double-fenêtre, les valeurs de référence correspondent à celle du prototype initial utilisée pour la validation du modèle numérique. Leurs plages de variation en revanche ont été choisies de manière à être réaliste et représentatives d'autres cas de figure (choix de matériaux différents par exemple). De plus, comme évoqué précédemment, nous avons fait le choix de dresser plusieurs scénarios de conditions stables. Cela a permis d'observer les influences dans plusieurs cas de figure. Ces scénarios correspondent aux conditions estivales et hivernales puis nocturnes et diurnes. De plus, nous avons observé que les corrélations entre le paramètre testé et la sortie analysée pouvaient varier selon le débit. Ainsi, trois débits différents ont été appliqués à chaque scénario. Au total, c'est douze configurations qui ont été établies. Le panel de paramètres testés et leurs plages de variation sont indiqués dans le Tableau VI-1. Au total la recherche concerne 20 paramètres. Les paramètres liés aux propriétés thermiques (P11, P12 et P13) des parois murales ont été testés en considérant ces parois comme constituées d'un seul matériau. Le modèle de conduction multi-paroi a été appliqué uniquement en valeur de référence.

Paramètre testé	Dénomina- tion	S1		S2		S3		S4	
		Eté/Nuit	Eté/Jour	Eté/Jour	Eté/Jour	Hiver/Nuit	Hiver/Nuit	Hiver/Jour	Hiver/Jour
Température extérieure [K]	P1	290	307	280	285	279	303	283	307
		279	303	283	307	271	284	276	293
Température intérieure [K]	P2	298	290	293	293	288	307	288	307
		288	307	288	307	290	296	290	296
Vitesse du vent [m/s]	P3	0,21	0,31	0,27	0,26	0	1	0	1
		0	1	0	1	0	1	0	1
Rayonnement solaire [W/m ²]	P4	0	310	0	190	-	-	25	450
		-	-	25	600	-	-	25	450
Réflectivité des murs intérieurs d'HYBCELL	P5	0,7							
		0				1			
Débit de ventilation [m ³ /h]	P6	10(b) - 20(a) - 30(c)							
		8				68			
Epaisseur de la vitre intérieure [m]	P7	0,004							
		0,001				0,01			
Epaisseur de la vitre intérieure [m]	P8	0,004							
		0,001				0,001			
Transmissivité CLO des vitrages	P9	0,76							
		0				1			
Absorptivité GLO des vitrages	P10	0,9							
		0				1			
Conductivité thermique des murs de la cavité [W/(m.K)]	P11	0,1253							
		0,1				0,9			
Masse volumique des murs de la cavité [kg/m ³]	P12	497,5							
		300				2700			
Chaleur spécifique des murs de la cavité [J/(kg.K)]	P13	1044							
		800				1500			
Absorptivité CLO des murs de la cavité	P14	0,3							
		0,1				0,9			
Absorptivité GLO des murs de la cavité	P15	0,3							
		0,1				0,9			
Ecart entre les fenêtres [m]	P16	0,2							
		0,1				0,5			
Rapport hauteur allège/hauteur DF	P17	0,17							
		0,025				0,4			
Rapport écart fenêtre / largeur DF	P18	0,17							
		0,15				0,6			
Rapport écart fenêtre / hauteur DF	P19	0,12							
		0,15				0,6			
Rapport largeur DF / hauteur DF	P20	0,72							
		0,5				2			

Tableau VI-1. Liste des paramètres testés, leurs plages de valeurs et leurs valeurs de référence (en gras) en fonction des différents scénarios.

Précisons que les trois débits testés [20 ; 10 ; 30] m³/h apportent respectivement les dénominations a, b et c à chaque scénario dans la suite du rapport.

VI.1.2. Grandeurs de sortie, et influence du panel de paramètre testé

L'influence de chaque paramètre a été évaluée sur plusieurs grandeurs de sortie du modèle numérique. Ces sorties correspondent à des grandeurs utilisées dans l'évaluation des performances thermiques de la double-fenêtre en régime stationnaire par l'utilisation des coefficients U_{w1} et U_{w2} présentés en IV.1.2. Il s'agit de la température d'air de sortie, de la température d'air en entrée, de la température de surface de la vitre extérieure, de la température de surface du soubassement de la menuiserie intérieure, de

la température de surface de la vitre intérieure et de celle de l'allège extérieure puisqu'on le rappelle, cette dernière est considérée comme partie intégrante du dispositif. U_{w1} et U_{w2} peuvent alors s'exprimer respectivement en fonction des sorties sous les formes des relations (VI-1) et (VI-2).

$$U_{w1} = \frac{(h_{c,ext} + h_{r,ext}) (A_{vitre,ext} (T_{s,vitre,ext} - T_{ext}) + A_{allège} (T_{s,allege,ext} - T_{ext})) + \rho c_p Q_v (T_{sortie} - T_{entrée})}{A_w (T_{int} - T_{ext})} \quad (VI-1)$$

$$U_{w2} = \frac{(h_{c,int} + h_{r,int}) (A_{vitre,int} (T_{s,vitre,int} - T_{int}) + A_{soub} (T_{s,soub} - T_{int}))}{A_w (T_{int} - T_{ext})} \quad (VI-2)$$

L'évaluation de l'influence s'est effectuée par le biais d'un coefficient d'influence présenté dans l'équation (VI-3).

$$IC = \frac{\frac{Sortie - Sortie_{réf}}{Sortie_{réf}}}{\frac{PI - PI_{réf}}{PI_{réf}}} \quad (VI-3)$$

Il s'agit du rapport de la variation de la grandeur de sortie *Sortie* par rapport à la grandeur de sortie de référence $Sortie_{réf}$ sur la variation du paramètre testé *PI* par rapport également à sa valeur de référence $PI_{réf}$. Ensuite, pour chaque paramètre testé, la moyenne des valeurs absolues des IC a été calculée de manière à obtenir un seul coefficient pour chaque paramètre et pour chaque scénario. Les résultats des IC sont affichés dans les Tableau E-1 à Tableau E-4 (Annexe E). Les valeurs supérieures ou égales à 5% sont surlignées en rouge car c'est la condition que nous avons fixée, arbitrairement, pour considérer le paramètre comme influent.

Les résultats montrent une grande influence de la température intérieure sur toutes les sorties puisque la plupart des valeurs dépassent 100%. La température extérieure influence aussi de manière importante toutes les sorties. Les paramètres influents supplémentaires sont la vitesse du vent qui modifie le coefficient d'échange convectif sur la face extérieure, le rayonnement solaire qui intervient dans les échanges CLO du modèle radiatif, le débit de ventilation et les propriétés des murs de la cavité que sont la masse volumique et la chaleur spécifique. Ces deux derniers modifient l'inertie thermique des parois opaques et leur capacité à stocker la chaleur et in fine à l'échanger avec l'air ventilé et indirectement avec les menuiseries. On remarque d'ailleurs que l'influence est logiquement plus forte pour les sorties directement liées aux parois murales (allège ou températures d'air). Concernant le débit, on peut constater qu'il a une influence notable presque exclusive pour des valeurs de 20 et 30 m³/h uniquement. Ainsi, plus le débit décroît plus son influence aussi.

Ces résultats sont aussi notables lorsqu'ils mettent en lumière les très faibles influences, dans les plages testées, des paramètres de dimensionnement que sont les rapports géométriques et les épaisseurs des vitres.

VI.2. Caractérisation des sorties par régression linéaire multiple

A présent que les facteurs influents ont été déterminés pour chaque sortie, nous allons exprimer chacune d'elles numériquement en fonction de ces facteurs. Pour résumer cette étape nous avons choisi de rassembler tous les PI de chaque sortie donnant ainsi la répartition du Tableau VI-2.

T_{sortie}	$T_{\text{entrée}}$	$T_{\text{s vitre ext}}$	$T_{\text{s soubassement}}$	$T_{\text{s vitre int}}$	$T_{\text{s allège ext}}$
P1	P1	P1	P1	P1	P1
P2	P2	P2	P2	P2	P2
P3	P3	P3	P3	P3	P3
P4	P4	P4	P4	P4	P4
P6	P6	P6	P6	P6	P6
P12	P12		P12	P13	P12
P13	P13		P13		P13

Tableau VI-2. Synthèse des PI pour chaque sortie.

VI.2.1. Recherche d'un modèle de régression adapté

Comme abordé en préambule, nous avons choisi d'utiliser une méthode de régression. Le but de ce type de méthode est d'établir une relation mathématique entre une grandeur connue (Sorties) et des variables (PI). Pour y parvenir, il faut choisir un modèle d'expression mathématique (linéaire, polynomiale, exponentielle, ...) avec lequel exprimer la fonction $\text{Sorties} = f(\text{PI})$, faisant ainsi apparaître un certain nombre de coefficients selon le modèle mathématique choisi. Ce sont ces coefficients qu'il faut ensuite déterminer par la minimisation de la différence entre les valeurs des grandeurs connues et celles estimées à l'aide de la fonction paramétrique. Comme précisé par Braun et al. [98], il est important de vérifier préalablement que les PI n'ont pas ou peu de corrélation les uns envers les autres. Ils préconisent un coefficient de corrélation inférieur à 0,7 ou supérieure à -0,7. Comme le montre le Tableau VI-3, tous les coefficients de corrélation respectent cette condition ce qui justifie le maintien des PI choisis.

	P2	P3	P4	P6	P12	P13
P1	0,67	0,11	0,63	-0,02	-0,03	-0,01
P2	-	0,03	0,31	-0,01	-0,02	-0,01
P3	-	-	0,16	-0,06	-0,07	-0,04
P4	-	-	-	-0,03	-0,04	-0,02
P6	-	-	-	-	-0,08	-0,05
P12	-	-	-	-	-	-0,05

Tableau VI-3. Coefficients de corrélation r entre les PI.

Ensuite, afin de choisir un modèle d'expression mathématique adéquat, il est recommandé de prévisualiser l'allure des courbes des Sorties en fonction des PI. Ces allures sont représentées de la Figure F-1 à la Figure F-6 (Annexe F). Elles sont représentées en fonction de chaque scénario de manière à visualiser correctement les tendances. En effet, on observe clairement des tendances linéaires pour quasiment chaque sortie en fonction de chaque paramètre. Les évolutions diffèrent selon les scénarios mais restent linéaires. Seules les évolutions des sorties en fonction de P6 (débit) dans les deux scénarios diurnes (S2 & S4) semblent tendre vers un comportement polynomial. Au regard de ces tendances, nous avons choisi un modèle mathématique de type linéaire multiple.

VI.2.2. Résultats du modèle de régression linéaire multiple et analyse de ses sorties

VI.2.2.a. Résultat des coefficients de régression

La régression linéaire multiple entraîne la formulation des sorties sous la forme de l'équation (VI-4). Le but est d'obtenir les valeurs des coefficients β_i . La régression a été effectuée à l'aide de la fonction « fitlm » sous MatlabR2017b. Les formulations trouvées pour les six sorties sont présentées dans les relations (VI-5) à (VI-10).

$$Sortie_i = \beta_{i,0} + \beta_{i,1}P1 + \beta_{i,2}P2 + \beta_{i,3}P3 + \beta_{i,4}P4 + \beta_{i,5}P6 + \beta_{i,6}P12 + \beta_{i,7}P13 \quad (VI-4)$$

$$T_{sortie} = 16,7982 + 0,4626T_{ext} + 0,5010T_{int} + 5,6049V_{vent} + 0,0134Ray + 0,1191Q_v - 0,0019\rho_{mur} - 0,0053c_{p,mur} \quad (VI-5)$$

$$T_{entrée} = 26,7627 + 0,6029T_{ext} + 0,3301T_{int} + 5,8021V_{vent} + 0,0128Ray + 0,1137Q_v - 0,0020\rho_{mur} - 0,0058c_{p,mur} \quad (VI-6)$$

$$T_{vitre,ext} = 38,3596 + 0,6675T_{ext} + 0,2082T_{int} + 4,0293V_{vent} + 0,0127Ray + 0,1216Q_v \quad (VI-7)$$

$$T_{soub} = -1,1430 + 0,2997T_{ext} + 0,7132T_{int} + 5,1815V_{vent} + 0,0499Ray + 0,2417Q_v - 0,0017\rho_{mur} - 0,0049c_{p,mur} \quad (VI-8)$$

$$T_{vitre,int} = 14,4322 + 0,5178T_{ext} + 0,4519T_{int} + 5,3212V_{vent} + 0,0198Ray + 0,1443Q_v - 0,0057c_{p,mur} \quad (VI-9)$$

$$T_{allège} = 65,1982 + 0,8186T_{ext} - 0,0149T_{int} + 4,2814V_{vent} + 0,0376Ray + 0,2085Q_v - 0,0025\rho_{mur} - 0,0065c_{p,mur} \quad (VI-10)$$

VI.2.2.b. Analyses statistique et graphique des formulations trouvées

Afin de critiquer les résultats obtenus, nous avons décidé de juger par rapport à trois critères que sont le coefficient de détermination R^2 , le *Root Mean Square Error* (RMSE) et le *p-values*. Ce dernier traduit ici la significativité de chaque coefficient β , comparé à une valeur nulle. Plus sa valeur est élevée, plus la probabilité d'avoir les mêmes résultats en le remplaçant par une valeur nulle est grande et donc moins il est judicieux de l'utiliser. Les valeurs de ces trois indices sont regroupées dans le Tableau VI-4.

		T _{sortie}	T _{entrée}	T _{vitre ext}	T _{soubassement}	T _{vitre int}	T _{allège}
	R ²	0,85	0,85	0,83	0,89	0,86	0,89
	RMSE [K]	3,19	3,62	3,94	3,89	3,51	4,50
p- values	β_0	4,75E-02	5,44E-03	6,63E-04	9,12E-01	1,34E-01	5,92E-08
	β_1	6,96E-152	9,48E-186	1,83E-162	1,00E-53	1,11E-146	7,62E-210
	β_2	4,59E-42	5,73E-16	4,32E-06	3,24E-55	1,17E-28	7,65E-01
	β_3	4,93E-15	8,30E-13	5,79E-06	2,45E-09	1,61E-11	1,90E-05
	β_4	7,32E-52	3,33E-38	8,55E-28	3,77E-285	3,85E-80	1,31E-160
	β_5	9,75E-30	7,91E-22	1,72E-20	7,74E-73	8,01E-35	1,02E-43
	β_6	7,67E-19	1,95E-16	-	4,50E-11	-	1,29E-15
	β_7	1,61E-07	4,79E-07	-	7,39E-05	2,98E-07	4,71E-06

Tableau VI-4. Résultats statistiques de coefficients de régression trouvés.

Les coefficients de détermination trouvés pour toutes sorties varient entre 0,83 et 0,89 ce qui montre la très bonne concordance des valeurs estimées avec les valeurs références simulées. Les valeurs du RMSE qui est inférieur ou égale à 4,5 K montre qu'un effort pourrait être fait de manière à réduire l'erreur entre les valeurs estimées et celles de référence bien qu'elles aient les mêmes tendances. Concernant les p-values, si l'on fixe le seuil de significativité à 5% on constate que trois coefficients peuvent jugés insignifiants. Il s'agit de l'ordonnée à l'origine pour $T_{\text{soubassement}}$ et $T_{\text{vitre int}}$ et du coefficient du paramètre T_{int} pour la température de l'allège. Pour les deux premières valeurs excédentaires, cela se comprend par le fait que les deux coefficients β_0 pour $T_{\text{soubassement}}$ et $T_{\text{vitre int}}$ (équations (VI-8) et (VI-9)) sont faibles devant les valeurs de sortie. C'est aussi le cas pour celui de T_{sortie} même sa valeur de p se situe juste en-dessous de 5%. Le cas du β_2 indiquerait que la dépendance de la température de l'allège vis-à-vis de la température intérieure est négligeable ce qui contredit l'étude des paramètres influents précédemment présentée. Les autres valeurs sont extrêmement faibles ce qui justifie pleinement l'utilisation des coefficients β trouvés par régression.

Afin de mieux visualiser les résultats, les comparaisons des valeurs estimées aux valeurs simulées sont montrées pour chaque sortie à travers les Figure F-7 à Figure F-12 (Annexe F). Toutes les valeurs ont été compilées les unes après les autres, PI après PI, scénario après scénario si bien que l'axe des abscisses ne représente que le simple indice du cas et non une évolution temporelle. On remarque d'ailleurs assez aisément le découpage des données selon les 78 configurations testées.

Ces graphiques montrent que pour les premières configurations, où les températures extérieures (#0 à #300 environ) et intérieures (#300 à #450) étaient les PI, les tendances des estimations sont très cohérentes. Cela se dégrade pour les PI suivant et notamment les dernières configurations (à partir de #1000) qui correspondent au P13 soit la chaleur spécifique de la paroi. Les tendances des valeurs estimées pour les configurations où le débit varie (#700 à #850) sont mêmes contraires à celles des valeurs simulées. Le choix du modèle mathématique n'est peut-être pas le meilleur pour ce paramètre, comme évoqué précédemment dans l'analyse des prévisualisations des Sorties en fonction des PI. On peut établir la même retenue quant aux tendances des configurations où la vitesse de vent varie (#450 à #550 environ). En définitive, les influences des températures extérieure, intérieure et du rayonnement solaire sont justement estimées alors que celles de la vitesse du vent, du débit et des deux propriétés des matériaux de façade offrent de moins bonnes estimations. Pour ces dernières il faut

tenir compte que la recherche des coefficients de régression a été effectuée en compilant toutes les configurations et avec un modèle mathématique linéaire exclusivement qui ne sont peut-être pas la méthode offrant les meilleurs résultats. Une distinction des cycles diurnes et nocturnes ainsi qu'une formulation polynomiale semblent être des pistes d'amélioration.

VI.3. Conclusion

Ce dernier chapitre a traité de la caractérisation numérique de la double-fenêtre à l'aide du modèle numérique validé DF/SV. Nous avons donc fait le choix de restreindre l'étude à la recherche de paramètres influençant les performances ce qui n'a pas pu être entièrement réalisé à l'aide des résultats expérimentaux. Ainsi, ce travail numérique complète celui des chapitres précédents.

Basé sur les données expérimentales, les paramètres influençant ont été recherchés parmi 20 paramètres soit liés au dimensionnement, soit aux conditions ambiantes, soit aux conditions d'utilisation. Une méthodologie liée à ce type de données a été mise en place intégrant la distinction de plusieurs scénarios météorologiques (été/hiver ; diurne/nocturne) et plusieurs débits de ventilation. La méthodologie comprend également l'utilisation d'un indice et d'un seuil d'influence. Enfin, les grandeurs de sortie sur lesquelles juger l'influence ont été sélectionnées de manière à correspondre aux grandeurs permettant la caractérisation des performances au travers des coefficients U_{w1} et U_{w2} présentés en IV.1.2. Cette étude a permis d'extraire 7 paramètres influençant selon la configuration et le scénario considérés. Ces paramètres sont les températures extérieure et intérieure, la vitesse du vent, le rayonnement solaire, le débit de ventilation, la densité de la façade ainsi que sa chaleur spécifique. Les absences d'influence de certains paramètres comme les rapports géométriques testés où l'épaisseur des vitrages ont enrichis l'analyse.

Une fois cette étape terminée, nous avons tenté d'exprimer ces grandeurs de sortie en fonction des paramètres influents à l'aide d'un modèle de régression linéaire multiple. Il a permis d'exprimer avec justesse chaque sortie en fonction des paramètres influents. De l'utilisation des résultats résultent plusieurs observations. Premièrement, les valeurs estimées et les valeurs de références ont montré des tendances proches validées par des coefficients de détermination élevés (>83%). De plus, les déviations des erreurs sont également satisfaisantes. Cependant, nous avons repérés à l'aide d'une analyse graphique que les résultats pouvaient être améliorés en changeant le modèle mathématique utilisé pour le débit en optant vers un modèle polynomial ou encore en distinguant des sorties pour chaque scénario diurne et nocturne.

Ainsi, en supplément des résultats numériques, ce travail montre également une méthodologie adaptée à la caractérisation des performances dynamiques du dispositif de double-fenêtre ventilée.

Conclusions, améliorations et
perspectives

Ce travail de recherche montre que la double-fenêtre est une réponse possible à la double problématique de rénovation énergétique des bâtiments et de conservation du patrimoine architectural. Elle permet d'augmenter la résistance thermique en créant un espace tampon d'une part et de préserver, bien souvent, l'aspect extérieur de la façade en conservant la menuiserie d'origine. La veille scientifique présentée dans cette thèse a montré les nombreuses possibilités de conception et d'utilisation d'une double-fenêtre montrant ainsi la large adaptabilité de ce dispositif. L'étude de la littérature scientifique a mis en avant les problématiques de recherche comprenant la caractérisation thermique, l'étude de la ventilation dans la cavité, l'impact sur le confort mais aussi les problèmes liés à la condensation. Cependant, cette étude bibliographique a aussi souligné les questions encore en suspens comme celle de l'utilisation de doubles-fenêtres adaptées au bâti historique, qui demeure peu étudiée alors que l'on peut trouver de nombreux cas de doubles-fenêtres.

Ainsi, l'état-de-l'art complété par des échanges avec des partenaires professionnels du bâtiment ont permis d'orienter nos choix quant au type de double-fenêtre étudiée dans ce travail. Cette thèse se concentre donc sur une double-fenêtre ventilée en insufflation avec des caractéristiques de dimensionnement et de conception adaptés à une utilisation dans un bâtiment du XIX^{ème} siècle lyonnais. Ces caractéristiques regroupent à la fois la taille et les proportions de la géométrie que le choix des matériaux aussi bien ceux composant les menuiseries que ceux composant la façade. En effet, nous avons considéré les parois murales de la façade afin d'examiner la double-fenêtre dans son environnement architectural. L'objectif est la caractérisation thermo-aéraulique de cette double-fenêtre innovante.

Pour y parvenir nous avons décidé de réaliser l'étude en deux volets : l'un expérimental, l'autre numérique. Les dispositifs expérimentaux de l'ENTPE étant conçus pour d'autres usages, nous les avons adaptés à notre dispositif et à notre problématique. Au total, nous avons mis au point deux dispositifs expérimentaux. Le premier pour mener des tests en conditions contrôlées et le second en conditions in situ. Pour chacun de ces outils, des protocoles expérimentaux ont été mis en place de manière à extraire des recommandations et observations en conditions estivales, hivernales, à débit variable, à type de vitrage variable ou à écart de fenêtre variable. L'utilisation de ces outils expérimentaux ont alors entraîné une base de données de mesure importante qu'il a fallu méthodiquement exploiter. Cette exploitation a donné lieu à des observations portant aussi bien sur des grandeurs de sortie directement mesurées permettant de dresser le

comportement thermo-aéraulique selon le large panel de scénario de test, que sur indices de performances adaptés à ce type de système dynamique.

Nous avons observé qu'en conditions contrôlées, et pour des débits compris entre 4,5 et 13,5 m³/h, les coefficients de transmission thermique surfacique varient entre 2,4 et 3,2 W/(m².K) si l'on considère le flux traversant la menuiserie intérieure et entre 2,0 et 2,9 W/(m².K) si l'on considère le flux à travers la menuiserie extérieure et l'allège. Dans les mêmes conditions, l'efficacité des échanges thermiques varie entre 36 et 49% et la majorité du chauffage consommé est perdue par la menuiserie extérieure à raison de 69 à 84% et récupérée par la ventilation à hauteur de 9 à 23%.

En conditions in situ estivales, nous avons constaté que la double fenêtre ventilée permet un refroidissement de l'air ventilé au contact des parois murales de la cavité. En étudiant les ambiances thermiques intérieures, aucune différence n'a été observée entre l'utilisation d'un simple ou d'un double vitrage dans la menuiserie intérieure. En conditions hivernales, l'efficacité du préchauffage plafonne, à l'instar des tests en conditions contrôlées, à 50%. Pour les deux saisons, aucune tendance paramétrique n'a été observée.

Ainsi, nous avons montré le caractère dynamique du comportement thermo-aéraulique de cette double-fenêtre ventilée. Par conséquent, les seuils règlementaires en vigueur concernant les doubles-fenêtres fermées (non ventilées), étant fixes, ne peuvent être appliqués pour notre système à moins de pouvoir estimer les performances thermiques dynamiques et de dresser des seuils moyens selon certains paramètres d'usage par exemple. Pour finir, il s'est avéré que les tests in situ n'ont permis l'entière caractérisation paramétrique.

Nous avons donc décidé de mettre au point un outil numérique reproduisant fidèlement et rapidement le comportement thermo-aéraulique de la double-fenêtre, observé lors des campagnes expérimentales. Notre modèle numérique a notamment la particularité d'intégrer les parois murales comprises entre les menuiseries dans les bilans d'énergie. Ces derniers regroupent les échanges conductifs, convectifs et radiatifs. Afin de tester le modèle numérique créé, nous avons mis au point une méthode de validation reposant à la fois sur des outils statistiques et un découpage temporel adaptés aux bases de données de mesures importantes et sur des analyses graphiques. En raison, de l'absence de guide de validation, cette méthode a également fait l'objet d'une analyse critique sur son utilisation. De ce travail, il ressort que le modèle numérique reproduit de manière

fiable le comportement thermique des surfaces et de l'air ventilé au sein de la double-fenêtre en particulier pour prototype muni de deux simples vitrages. Ses forces sont l'estimation des températures des surfaces opaques et les températures d'air des sous-volumes supérieures. Les périodes de la journée durant lesquelles le modèle est le plus juste sont celles où il n'y a pas d'irradiation solaire directe sur la double-fenêtre. A contrario les faiblesses du modèle sont l'estimation des températures de surface des vitrages et la température de sortie d'air. Selon notre méthode de validation et certains critères trouvés dans la littérature scientifique notre modèle numérique est validé pour la double-fenêtre en simple vitrage offrant notamment une très bonne estimation des tendances caractérisées par un coefficient de détermination moyen de 91%. Par conséquent, la caractérisation du dispositif a pu se poursuivre numériquement.

Nous avons concentré l'étude numérique sur la recherche des paramètres influents les performances de la double-fenêtre. Encore une fois, un panel de scénario a été mis en place, intégrant les variations d'une vingtaine de paramètres soit liés à la conception, au fonctionnement ou à l'environnement. Cette recherche a permis d'extraire sept paramètres influents que sont les températures extérieures et intérieures, la vitesse du vent, le rayonnement solaire, le débit de ventilation, la densité de la façade ainsi que sa chaleur spécifique. Les rapports géométriques ou encore l'épaisseur des vitrages se sont révélés insuffisamment influents. Enfin, nous avons cherché à exprimer les indices de performance en fonction de ces paramètres influents. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser une méthode de régression. Après une étude préalable, il s'est avéré qu'un modèle de régression linéaire multiple était adéquat pour ce travail. Les résultats des régressions ont montré des tendances des valeurs estimées très proches de celles des valeurs simulées se traduisant notamment par des coefficients de détermination compris entre 83 et 89%. Les déviations des erreurs sont également satisfaisantes bien qu'elles soient encore améliorables comme nous l'avons expliqué dans le dernier chapitre. De plus, l'utilisation de 42 coefficients de régression sur 45 est justifiée à l'aide des facteurs de significativité. En définitive, nous proposons dans ce travail une démarche permettant de quantifier les performances thermiques de la double-fenêtre ventilée pour bâtiments historiques.



A l'issue de ce travail de thèse nous pouvons toutefois émettre quelques pistes d'amélioration et donner aux travaux menés plusieurs perspectives. Premièrement, concernant le volet expérimental :

- Augmenter le nombre de tests permettrait de confirmer les tendances et/ou de les élargir notamment pour les tests en conditions contrôlées. Pour ces derniers, tester des débits plus élevés serait complémentaire à ceux déjà menés. De plus, tester la double-fenêtre munie d'un double vitrage intérieur permettrait la comparaison avec le simple vitrage.
- En outre, densifier les prises de mesure auraient plusieurs retombées importantes. Cela détaillerait les phénomènes thermo-aérauliques ainsi que la prise en compte du cadre des fenêtres. De plus, cela éviterait de considérer un seul capteur pour des grandes surfaces. Densifier les mesures de vitesse d'air permettrait de mieux cerner la ventilation dans la double-fenêtre.
- Spécifiquement aux tests in situ, il serait enrichissant de réussir à tester le dispositif dans des conditions estivales plus chaudes et dans des conditions hivernales plus froides. En effet, durant les deux campagnes les conditions météorologiques n'ont pas été très rudes comme on a pu l'observer sur les relevés de température extérieure.

Concernant le volet numérique et plus particulièrement le modèle numérique :

- tout d'abord le modèle de rayonnement constituant un point faible, pourrait être amélioré en considérant les irradiations sur chaque surface au moyen d'un calcul des tâches solaires par méthode de lancer de rayon par exemple.
- Également, l'intégration du calcul de la convection naturelle par le biais d'un code en pression ou d'un modèle zonal offrirait la possibilité de détailler les échanges aérauliques et convectifs au sein de la double-fenêtre.
- Les mesures des conditions météorologiques au plus proche de la cellule permettrait une meilleure connaissance des conditions limites. En effet, nous avons constaté que la position de la station météo pouvait avoir une incidence sur les résultats. Ainsi, la

mesure du flux solaire directement sur la façade permettrait de s'affranchir du calcul des masques solaires.

- En lien avec la densification des points de mesure, la considération des cadres des menuiseries au lieu de surfaces totalement vitrées affinerait les résultats.
- Dans cette optique le calcul des ponts thermiques améliorerait peut-être la précision du modèle.

Concernant la caractérisation numérique où nous avons mis au point des relations entre les grandeurs de sortie apparaissant dans les calculs des performances de la double-fenêtre et certains paramètres influents, la prochaine étape serait de valider l'utilisation des indices de performance paramétriques. Pour cela, il suffirait de les intégrer dans un modèle à l'échelle du bâtiment et de confronter les données simulées aux données mesurées (température intérieure en été et consommation de chauffage en hiver par exemple). Tout cela permettrait de savoir si l'on peut remplacer le modèle numérique du composant de double-fenêtre par les indices de performances paramétriques.

Comme évoqué dans le dernier chapitre, le modèle mathématique de régression peut être amélioré. Nous avons proposé l'utilisation d'un modèle polynomial pour la dépendance au débit, qui serait peut-être plus appropriée, en particulier pour les faibles débits.

En définitive, l'ensemble de ce travail, exploratoire, a permis de mettre en lumière le comportement thermo-aéraulique et les performances dynamiques d'un système de double-fenêtre active, hiérarchisant dans le même temps les questions pour lesquelles approfondir les analyses. Les méthodologies et les différentes approches utilisées tout au long de ce travail constituent également une base pour des futurs travaux. Ces derniers permettant une meilleure compréhension du système favorisant ainsi sa valorisation et utilisation comme solution de rénovation énergétique pour les bâtiments historiques.

Références

- [1] LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte 2015.
<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2015/8/17/DEVX1413992L/jo/texte> (accessed June 24, 2019).
- [2] Commissariat général au développement durable. Bilan énergétique de la France pour 2017. 2019.
- [3] Economidou M, Laustsen J, Ruyssevelt P, Staniaszek D, Strong D, Zinetti S. Europe’s buildings under the microscope - A country-by-country review of the energy performance of buildings. Buildings Performance Institute Europe (BPIE); 2011.
- [4] Caisse des dépôts. Analyse de la mise en place d’une nouvelle sous-boucle locale optique (BLO) en France. Caisse des dépôts; 2007.
- [5] Code de la construction et de l’habitation n.d.
https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=DA4919D75A62ABD3945D5426CC8BD0E3.tplgr32s_3?cidTexte=LEGITEXT000006074096&dateTexte=20190605 (accessed June 24, 2019).
- [6] Arrêté du 22 mars 2017 modifiant l’arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants 2017.
<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2017/3/22/LHAL1614615A/jo/texte> (accessed June 24, 2019).
- [7] Plan rénovation énergétique des bâtiments. 2018.
- [8] Gustavsen A, Jelle BP. State-of-the-art highly insulating window frames – Research and market review. University of California: Lawrence Berkeley National Laboratory; 2008.
- [9] Martínez-Molina A, Tort-Ausina I, Cho S, Vivancos JL. Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;61:70–85. doi:10.1016/j.rser.2016.03.018.

-
- [10] Webb AL. Energy retrofits in historic and traditional buildings : A review of problems and methods. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;77:748–59. doi:10.1016/j.rser.2017.01.145.
- [11] Conseil de l'Europe. Convention pour la sauvegarde du patrimoine architectural de l'Europe. Grenade: Conseil de l'Europe; 1985.
- [12] UNESCO. Recommendation on the Historic Urban Landscape. 2011.
- [13] UNESCO. New life for historic cities. the historic urban landscape approach explained. 2013.
- [14] UNESCO. WHAT is the Historic Urban Landscape? n.d. <http://historicurbanlandscape.com/index.php?classid=5352&id=29&t=show> (accessed June 24, 2019).
- [15] Belmont Y. Esthétique des sites. Architecture du paysage urbain. Site aesthetic : architecture of townscape. Jean Moulin University of Lyon 3, 1996.
- [16] Mazzarella L. Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view. *Energy Build* 2015;95:23–31. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.073.
- [17] Litti G, Audenaert A, Braet J. Energy Retrofitting in Architectural Heritage, Possible Risks Due to the Missing of a Specific Legislative and Methodological Protocol. *Eur Conf Sustain Energy Environ 2013 Off Conf Proc* 2013. doi:10.13140/2.1.2326.1445.
- [18] Parlement Européen, Conseil de l'Union européenne. Directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments. *J Off l'Union Eur* 2010:23.
- [19] Ue D, Parlement DU, Et E, Conseil DU. Directive 2012/27/UE du parlement européen et du conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique, modifiant les directives 2009/125/CE et 2010/30/UE et abrogeant les directives 2004/8/CE et 2006/32/CE. *J Off l'Union Eur* 2012:1–56.
- [20] Parlement européen. Directive (UE) 2018/844 du parlement européen et du conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique

- des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique. *J Off l'Union Eur* 2018;2018:75–91.
- [21] Sandt N, Coillot M. REACTIVE research project (2016-2019). Cahier des charges pour la conception de prototypes. University of Lyon - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat; 2017.
- [22] Le périmètre UNESCO n.d. <https://www.lyon.fr/projets-urbains/perimetre-unesco/le-perimetre-unesco> (accessed September 18, 2019).
- [23] Binda L, Cardani G, Saisi A, Groot C. A classification of structures and masonries for the adequate choice of repair. Delft: International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry; 2005.
- [24] Vissilia A. Evaluation of a sustainable Greek vernacular settlement and its landscape: architectural typology and building physics. *Build Environ* 2009;44:1095–106. doi:10.1016/j.buildenv.2008.05.026.
- [25] Cantin R, Burgholzer J, Guarracino G, Moujalled B, Tamelikecht S, Royet BG. Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France. *Build Environ* 2010;45:473–84. doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.010.
- [26] Sedovic W, Gotthelf JH. What replacement windows can't replace: the real cost of removing historic windows. *APT Bull* 2005;36:25–9.
- [27] Park CS, Augenbroe G, Messadi T, Thitisawat M, Sadegh N. Calibration of a lumped simulation model for double-skin façade systems. *Energy Build* 2004;36:1117–30. doi:10.1016/j.enbuild.2004.04.003.
- [28] Klems JH. Measured winter performance of storm windows 2002.
- [29] Drumheller SC, Köhler C, Minen S. Field evaluation of low-E storm windows. University of California: Lawrence Berkeley National Laboratory; 2007.
- [30] Smith N. A Cost Benefit Analysis of Secondary Glazing as a Retrofit Alternative for New Zealand Homes. Victoria University of Wellington. School of Architecture, 2009.
- [31] Smith N, Isaacs N, Burgess J, Cox-Smith I. Thermal performance of secondary

- glazing as a retrofit alternative for single-glazed windows. *Energy Build* 2012;54:47–51. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.038.
- [32] Barakat SA. Thermal Performance of a Supply-Air Window. 12th Annu. Passiv. Sol. Conf., 1987, p. 152–8.
- [33] Bhamjee M, Nurick A, Madyira DM. An experimentally validated mathematical and CFD model of a supply air window: forced and natural flow. *Energy Build* 2013;57:289–301. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.043.
- [34] Michaux G, Greffet R, Salagnac P, Ridoret JB. Modelling of an airflow window and numerical investigation of its thermal performances by comparison to conventional double and triple-glazed windows. *Appl Energy* 2019;242:27–45. doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.029.
- [35] Gloriant F, Tittlein P, Joulin A, Lassue S. Modeling a triple-glazed supply-air window. *Build Environ* 2015;84:1–9. doi:10.1016/j.buildenv.2014.10.017.
- [36] Baker P, McEvoy M. An investigation into the use of a supply air window as a heat reclaim device. *Build Serv Eng Res Technol* 1999;20:105–12. doi:10.1177/014362449902000302.
- [37] McEvoy ME, Southall RG. Validation of a Computational Fluid Dynamics Simulation of a Supply Air ‘ Ventilated ’ Window Validation of a Computational Fluid Dynamics Simulation of a Supply Air ‘ Ventilated ’ Window n.d.:10.
- [38] Boehm RF, Brandle K. Testing of air-flow windows for evaluation and application 1980.
- [39] Gosselin J, Chen Q. A dual airflow window for indoor air quality improvement and energy conservation in buildings. *HVAC&R Res* 2008;14:359–72. doi:10.1080/10789669.2008.10391014.
- [40] Raffnsøe LM. Thermal Performance of Air Flow Windows 2007:115.
- [41] Haddad KH, Elmahdy AH, Leal V, Maldonado E, Erell E, Etzion Y, et al. Modelling a reversible ventilated window for simulation within ESP-R - the solvent case. Eighth Int IBPSA Conf 2015;104:713–20. doi:10.1016/j.buildenv.2015.02.005.

-
- [42] Appelfeld D, Svendsen S. Experimental analysis of energy performance of a ventilated window for heat recovery under controlled conditions. *Energy Build* 2011;43:3200–7. doi:10.1016/j.enbuild.2011.08.018.
- [43] Carlos JS, Corvacho H, Silva PD, Castro-Gomes JP. Modelling and simulation of a ventilated double window. *Appl Therm Eng* 2011;31:93–102. doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.08.021.
- [44] Leal V, Sandberg M. An analytical model for the airflow in a ventilated window with known surface temperatures. *Proc ...* 2004:2–7.
- [45] Coillot M, El Mankibi M, Cantin R. Heating, ventilating and cooling impacts of double windows on historic buildings in Mediterranean area. *Energy Procedia*, vol. 133, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.367.
- [46] Quesada G, Rouse D, Dutil Y, Badache M, Hallé S. A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:2643–51. doi:10.1016/j.rser.2012.02.059.
- [47] Ismail KAR, Salinas CT, Henriquez JR. A comparative study of naturally ventilated and gas filled windows for hot climates. *Energy Convers Manag* 2009;50:1691–703. doi:10.1016/j.enconman.2009.03.026.
- [48] Onur N, Sivrioglu M, Turgut O. An experimental study on air window collector having a vertical blind for active solar heating. *Sol Energy* 1996;57:375–80. doi:10.1007/978-1-4614-5806-7.
- [49] Etzion Y, Erell E. Controlling the transmission of radiant energy through windows: a novel ventilated reversible glazing system. *Build Environ* 2000;35:433–44. doi:10.1016/S0360-1323(99)00039-6.
- [50] Christensen G, Brown W, Wilson A. Thermal performance of idealized double windows, unvented. vol. 223. Ottawa: National Research Council. Division of Building Research; 1964.
- [51] Carlos JS, Corvacho H, Silva PD, Castro-Gomes JP. Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air. *Energy Build* 2010;42:928–34. doi:10.1016/j.enbuild.2010.01.003.

-
- [52] Carlos JS, Corvacho H, Silva PD, Castro-Gomes JP. Heat recovery versus solar collection in a ventilated double window. *Appl Therm Eng* 2012;37:258–66. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.11.027.
- [53] Carlos JS, Corvacho H. Ventilated double window for the preheating of the ventilation air comparison of its performance in a northern and a southern european climate. *J Renew Energy* 2013;2013:11.
- [54] Carlos JS, Corvacho H. Evaluation of the thermal performance indices of a ventilated double window through experimental and analytical procedures: U_w -values. *Renew Energy* 2014;63:747–54. doi:10.1016/j.renene.2013.10.031.
- [55] Baker P, McEvoy M. Test cell analysis of the use of a supply air window as a passive solar component. *Sol Energy* 2000;69:113–30. doi:10.1016/S0038-092X(00)00048-7.
- [56] McEvoy M, Southall R. Validation of a computational fluid dynamics simulation of a supply air “ventilated” window. Dublin: CISBE Conference; 2000.
- [57] McEvoy M, Southall R, Baker P. Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by the use of modelling techniques. *Energy Build* 2003;35:1009–20. doi:10.1016/S0378-7788(03)00042-2.
- [58] Southall R, McEvoy M. Investigations into the functioning of a supply air window in relation to solar energy as determined by experiment and simulation. *Sol Energy* 2005;80:512–23. doi:10.1016/j.solener.2005.04.016.
- [59] El Mankibi M, Cantin R, Zoubir A. Contribution to the thermal renovation of old buildings: numerical and experimental approach for characterizing a double window. *Energy Procedia* 2015;78:2470–5. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.231.
- [60] Gloriant F, Tittlein P, Joulin A, Lassue S. Study of the performances of a supply-air window for air renewal pre-heating. *Energy Procedia* 2015;78:525–30. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.727.
- [61] Tanimoto J, Kimura K. Simulation study on an air flow window system with an integrated roll screen. *Energy Build* 1997;26:317–25.
- [62] Kim J, Kim T, Leigh SB. Double window system with ventilation slits to prevent window surface condensation in residential buildings. *Energy Build* 2011;43:3120–

30. doi:10.1016/j.enbuild.2011.08.012.
- [63] Chow TT, Lin Z, Fong KF, Chan LS, He MM. Thermal performance of natural airflow window in subtropical and temperate climate zones - A comparative study. *Energy Convers Manag* 2009;50:1884–90. doi:10.1016/j.enconman.2009.04.028.
- [64] Diomidov M V., Nizovtsev MI, Terekhov VI. Ventilation of window interpane cavity aimed at a higher temperature of the inner pane. *Therm Sci* 2002;6:15–22.
- [65] Wei J, Zhao J, Chen Q. Energy performance of a dual airflow window under different climates. *Energy Build* 2010;42:111–22. doi:10.1016/j.enbuild.2009.07.018.
- [66] Greffet R. Études expérimentale et numérique des performances énergétiques d'une fenêtre pariétodynamique. Université de La Rochelle, 2016.
- [67] Kim MH, Yang WJ. An optimum design on the triple-glazed exhaust airflow window. *Int J Energy Res* 2002;26:355–64. doi:10.1002/er.789.
- [68] Wilson AG, Nowak ES. Condensation between the panes of double windows. *Arch Des Publ Du CNRC* 1960;65:551–70. doi:10.1039/B910216G.
- [69] Sasaki JR. Condensation performance of metal-framed double windows with and without thermal breaks. vol. 13. Ottawa: National Research Council. Division of Building Research; 1971. doi:10.1039/B910216G.
- [70] Janssens B, Bosschaerts W. Study of the Airflow Window. *Energy Procedia* 2016;85:303–10. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.256.
- [71] Wei J, Zhao J, Chen Q. Optimal design for a dual-airflow window for different climate regions in China. *Energy Build* 2010;42:2200–5. doi:10.1016/j.enbuild.2010.07.016.
- [72] Carlos JS. Optimizing the ventilated double window for solar collection. *Sol Energy* 2017;150:454–62. doi:10.1016/j.solener.2017.04.063.
- [73] McEvoy M, Southall R. Comparison of the performance of a whole house low energy ventilation system in contrasting European climatic regions. *Build Serv Eng Res Technol* 2005;26:213–27. doi:10.1191/0143624405bt131oa.
- [74] Carlos JS, Corvacho H. Evaluation of the performance indices of a ventilated double

- window through experimental and analytical procedures: SHGC-values. *Energy Build* 2015;86:886–97. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.002.
- [75] Gloriant F, Tittlein P, Joulin A, Lassue S. Modelling supply-air window in a building simulation code. *Proc BS 2013 13th Conf Int Build Perform Simul Assoc* 2013:16–22.
- [76] Gosselin JR, Chen Q (Yan). A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window. *Energy Build* 2008;40:452–8. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.010.
- [77] Haddad KH, Elmahdy AH. Comparison of the monthly thermal performance of a conventional window and a supply-air window. *ASHRAE Trans* 1998;104:1–10.
- [78] Klems JH. Measured winter performance of storm windows. 2002.
- [79] Leal V, Maldonado E, Erell E, Etzion Y. Modelling a reversible ventilated window for simulation within ESP-R - the solvent case. *Eigth Int. IBPSA Conf., Eindhoven: 2003*, p. 713–20.
- [80] Leal V, Maldonado E. The role of the PASLINK test cell in the modelling and integrated simulation of an innovative window. *Build Environ* 2008;43:217–27. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.025.
- [81] Skaff MC, Gosselin L. Summer performance of ventilated windows with absorbing or smart glazings. *Sol Energy* 2014;105:2–13. doi:10.1016/j.solener.2013.08.025.
- [82] Takashi M, Shuichi H, Daisuke O, Masahiko T, Jun S. Improvement of thermal environment and reduction of energy consumption for cooling and heating by retrofitting windows. *Front Archit Res* 2013;2:1–10. doi:10.1016/j.foar.2012.10.006.
- [83] European Committee for Standardization. NF EN ISO 12567-1 - Isolation thermique des fenêtres et portes - Détermination de la transmission thermique par la méthode à la boîte chaude - Partie 1: Fenêtres et portes complètes 2013.
- [84] Bahrar M. Contribution au développement et à la conception d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle dans le cadre de l'optimisation du confort dans l'habitat. University of Lyon, 2018.

-
- [85] Frutos Dordelly JC. Active Solar Chimney (ASC) - Numerical and Experimental Study of Energy Storage and Evaporative Cooling. University of Lyon, 2018. doi:10.18086/swc.2017.12.03.
- [86] El Mankibi M. Développement et évaluation numérique et expérimentale de stratégies de régulation de la ventilation hybride. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2003.
- [87] ISO International Organization for Standardization. ISO 15099 - Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations 2003.
- [88] AFNOR. NF ISO/IEC GUIDE 98-3 (juillet 2014) - Incertitude de mesure — Partie 3 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure 2014.
- [89] European Committee for Standardization. NF EN ISO 10077-1 - Performance thermique des fenêtres, portes et fermetures - Calcul du coefficient de transmission thermique - Partie 1: Généralités 2017.
- [90] Roccamena L. Optimization of an innovative thermal energy storage technology at low temperatures when coupled to multi-source energy architectures. University of Lyon, 2017. doi:NNT: 2017LYSET010.
- [91] Eymard R, Gallouët T, Herbin R. Finite volume methods. *Handb Numer Anal* 2000;7:713–1018. doi:10.1016/S1570-8659(00)07005-8.
- [92] ISO International Organization for Standardization. Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations. 1999.
- [93] Ritoux G. Evaluation numérique des facteurs de forme. *Rev Phys Appliquée* 1982;17:503–15.
- [94] Clarke JA. Energy simulation in building design. Bristol and Boston: Adam Hilger Ltd; 1985.
- [95] ASHRAE. Measurement of Energy and Demand Savings. Guide 14. ASHRAE. vol. 8400. 2002.
- [96] Lam JC, Wan KKW, Liu D, Tsang CL. Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates. *Energy Convers Manag*

- 2010;51:2692–7. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.004.
- [97] Aghdaei N, Kokogiannakis G, Daly D, McCarthy T. Linear regression models for prediction of annual heating and cooling demand in representative Australian residential dwellings. *Energy Procedia* 2017;121:79–86. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.482.
- [98] Braun MR, Altan H, Beck SBM. Using regression analysis to predict the future energy consumption of a supermarket in the UK. *Appl Energy* 2014;130:305–13. doi:10.1016/j.apenergy.2014.05.062.

Annexes

Annexe A. Graphiques du comportement thermique estival

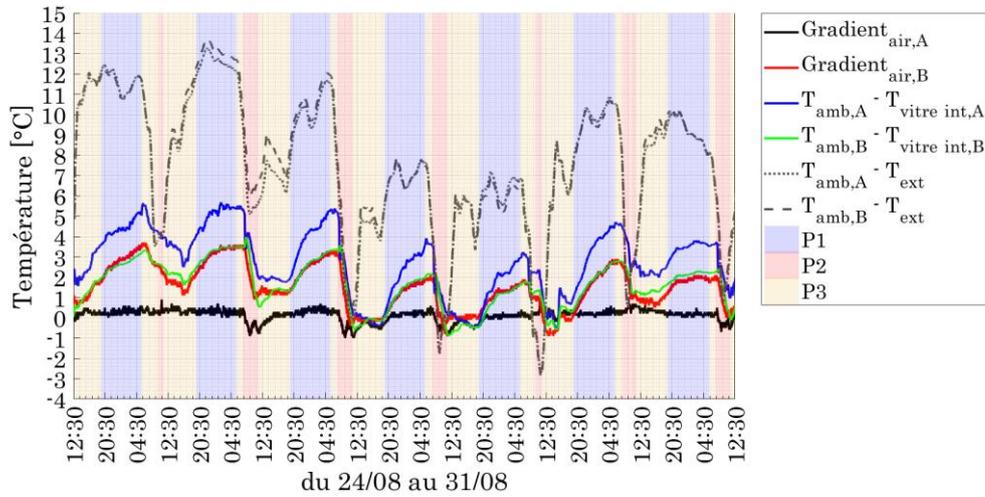


Figure A-1. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 4.

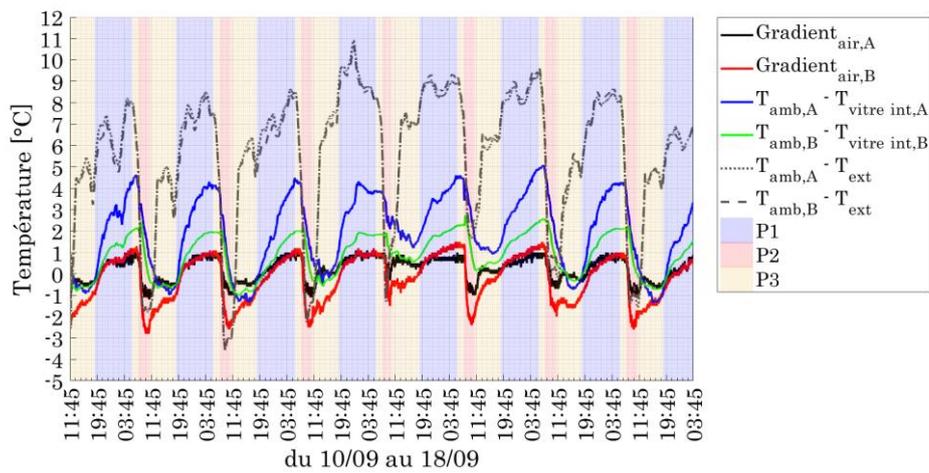


Figure A-2. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 5.

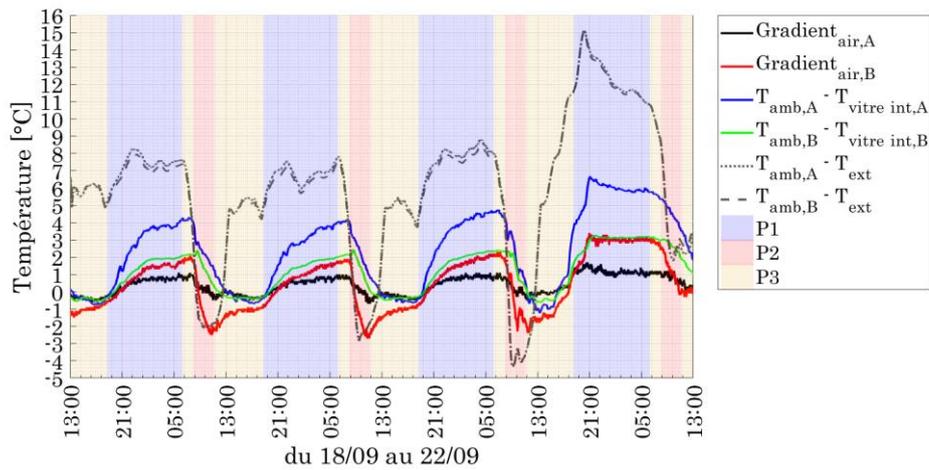


Figure A-3. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 6.

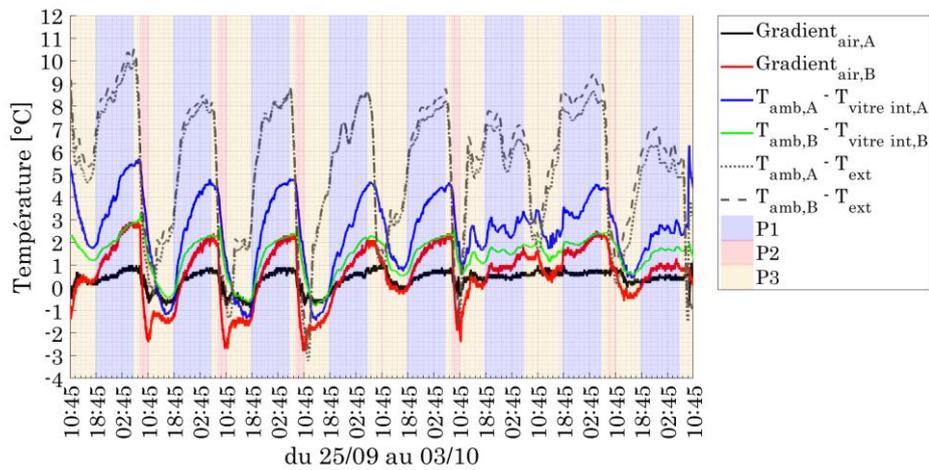


Figure A-4. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 7.

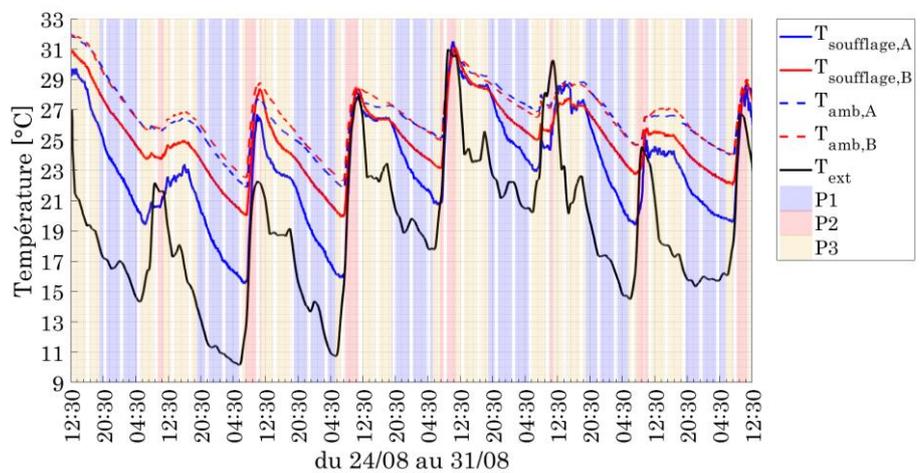


Figure A-5. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 4.

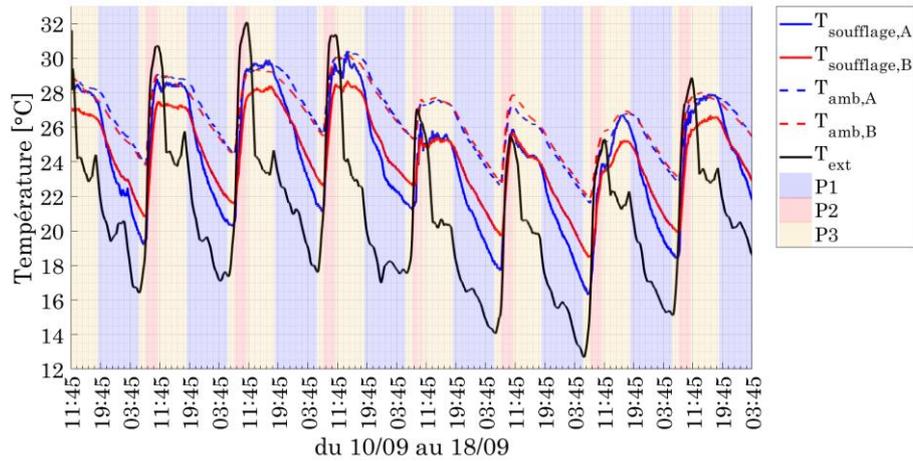


Figure A-6. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 5.

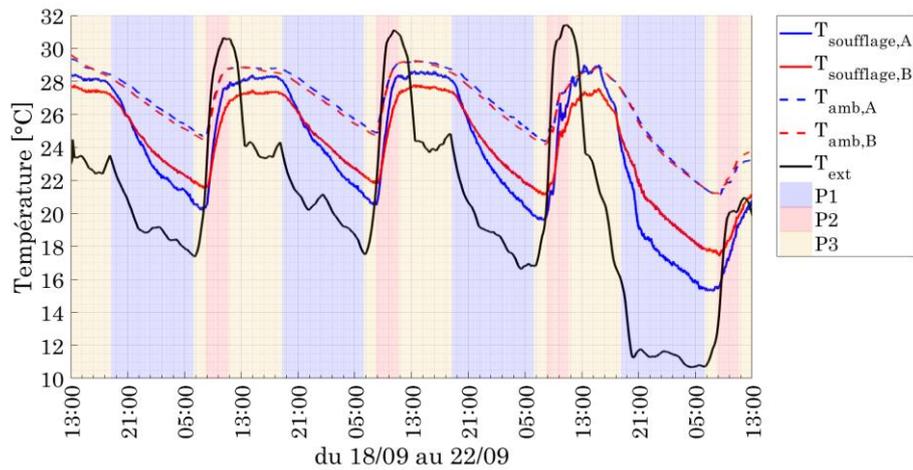


Figure A-7. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 6.

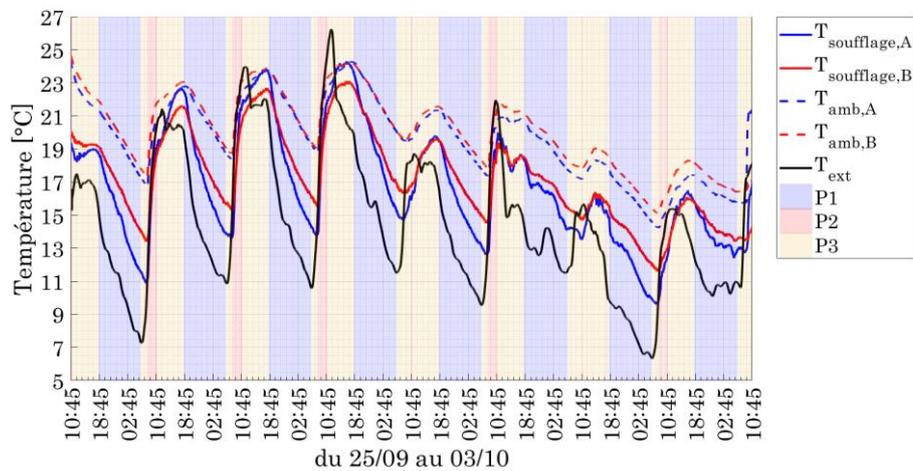


Figure A-8. Evolutions des températures de soufflage et ambiantes lors du Test 7.

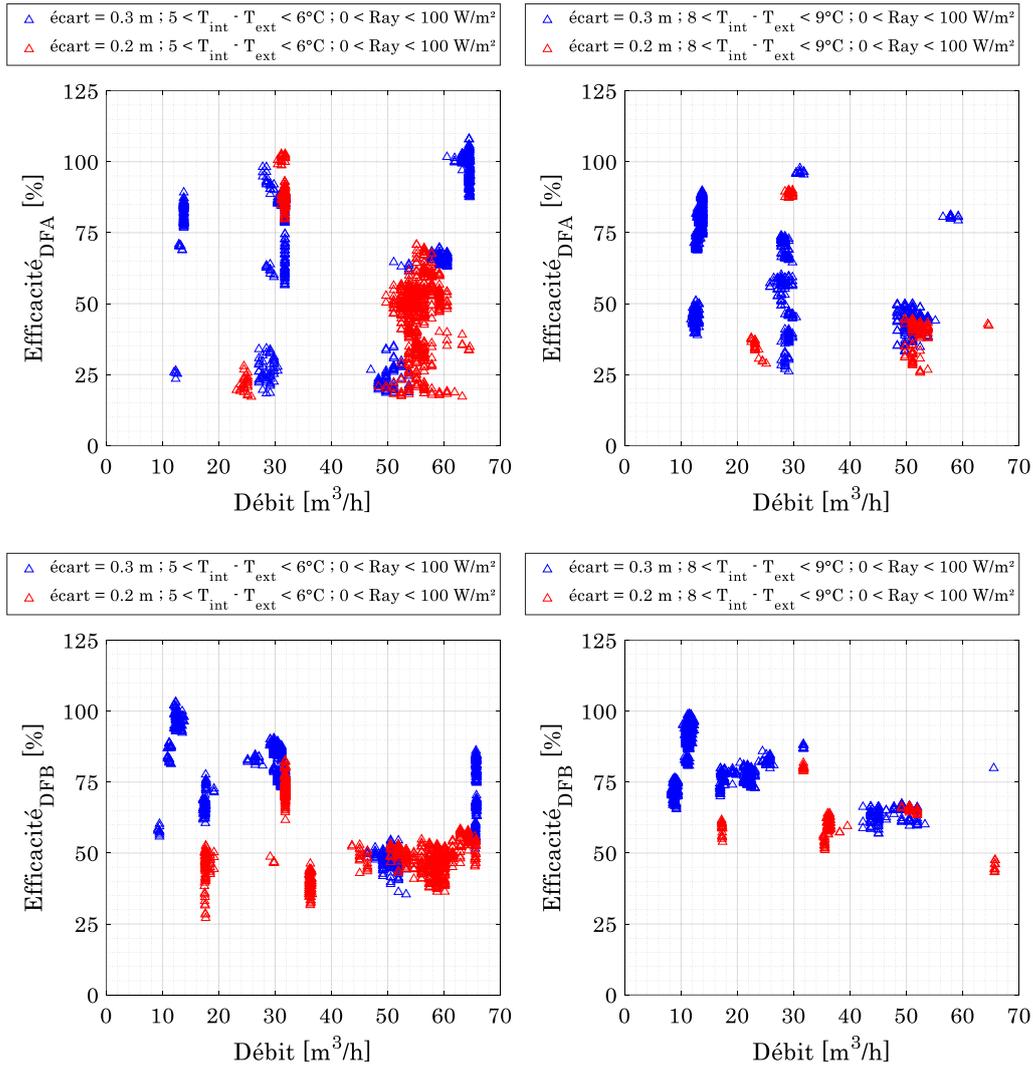


Figure A-9. Evolutions estivales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA et la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur avec un rayonnement solaire compris entre 0 et 100 W/m².

Annexe B. Graphiques du comportement thermique hivernal

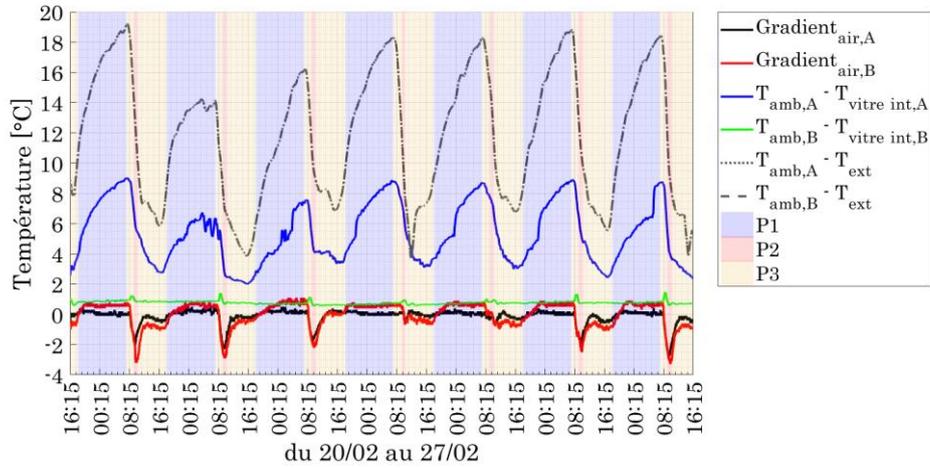


Figure B-1. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 9.

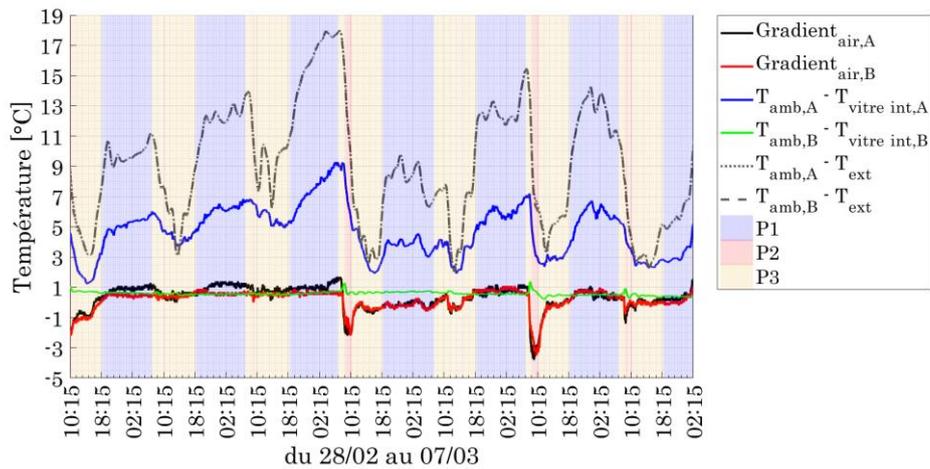


Figure B-2. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 10.

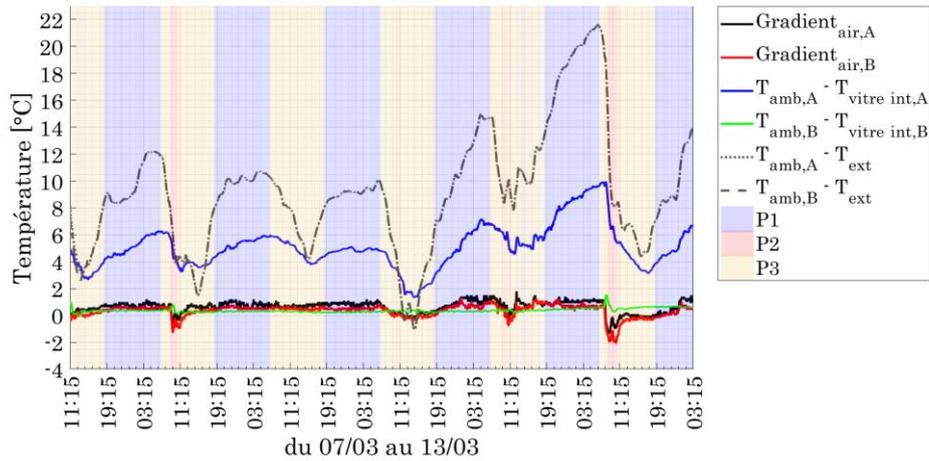


Figure B-3. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 11.

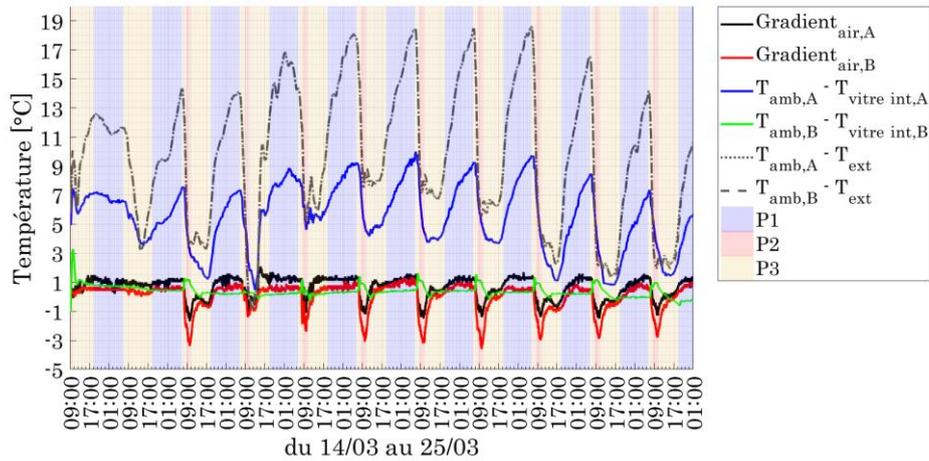


Figure B-4. Evolutions du gradient thermique vertical et de l'effet de paroi froide lors du Test 12.

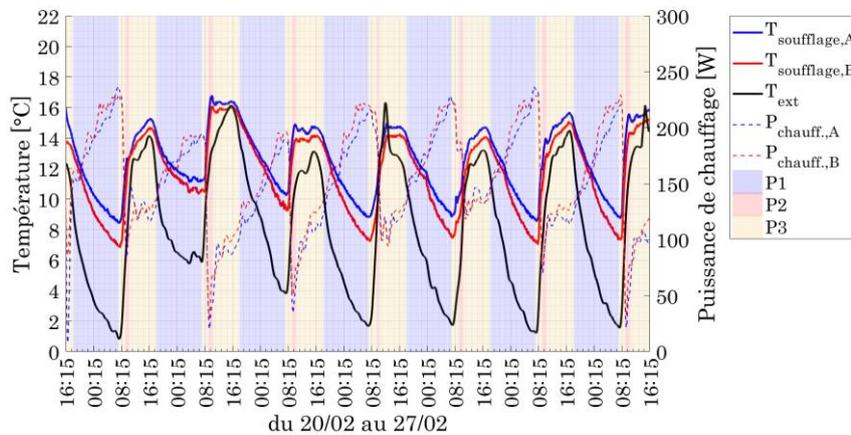


Figure B-5. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 9.

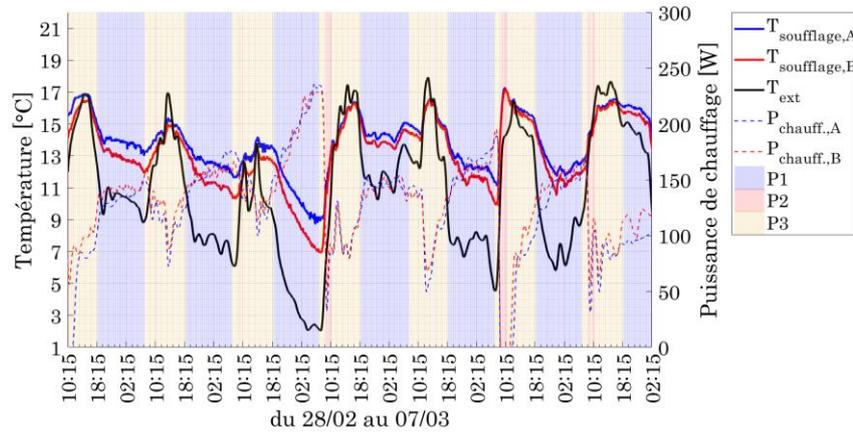


Figure B-6. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 10.

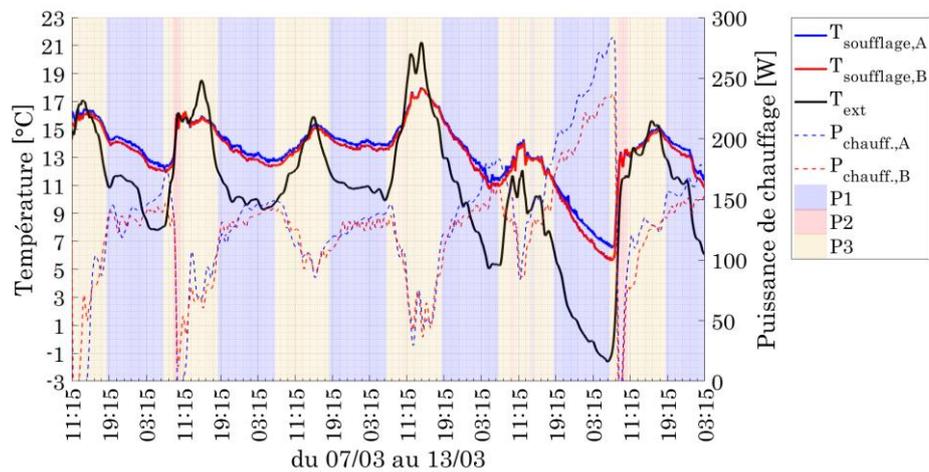


Figure B-7. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 11.

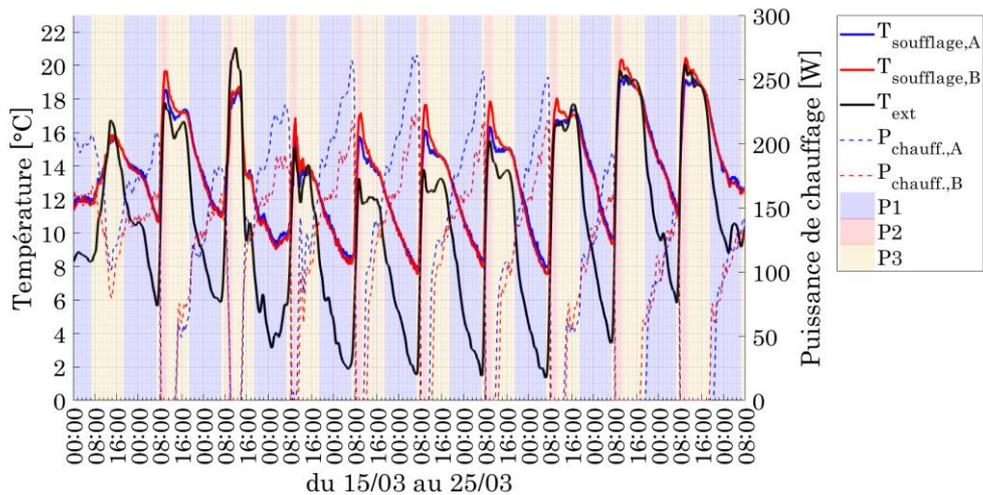


Figure B-8. Evolutions de la température de soufflage et de la puissance de chauffage lors du Test 12.

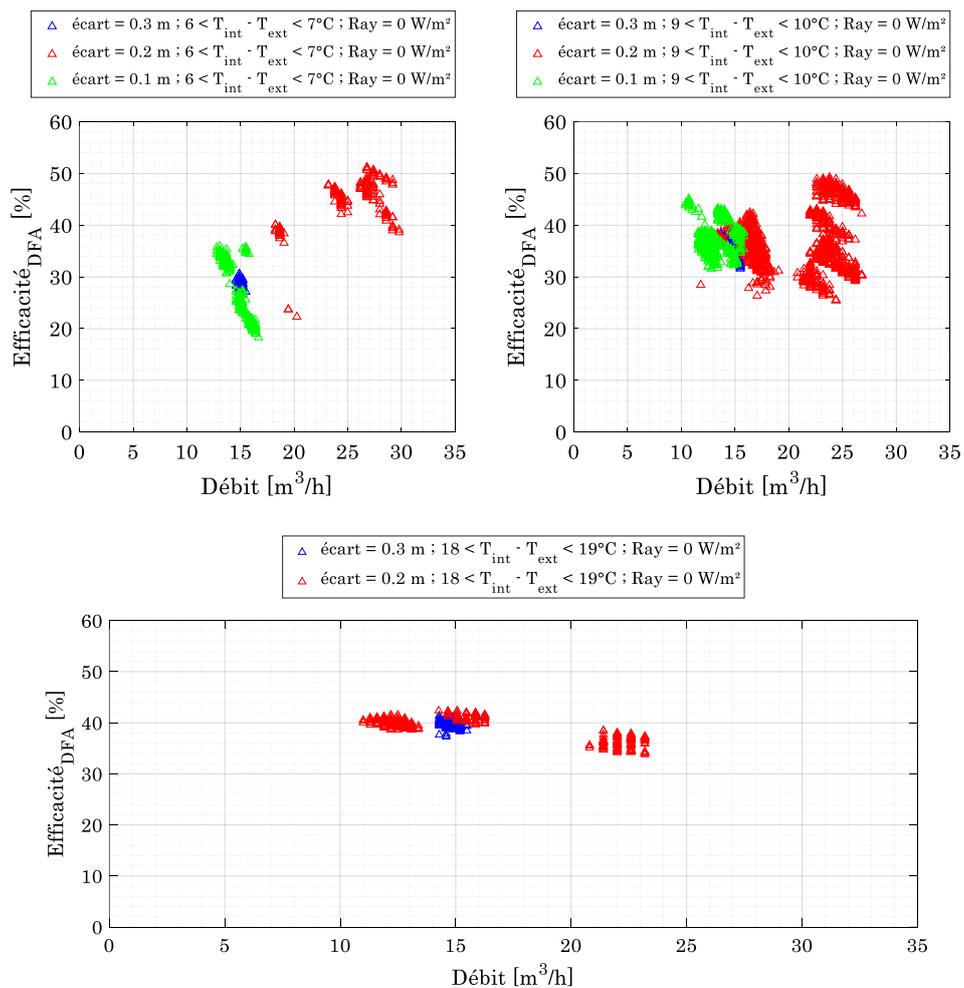


Figure B-9. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur en l'absence de rayonnement solaire.

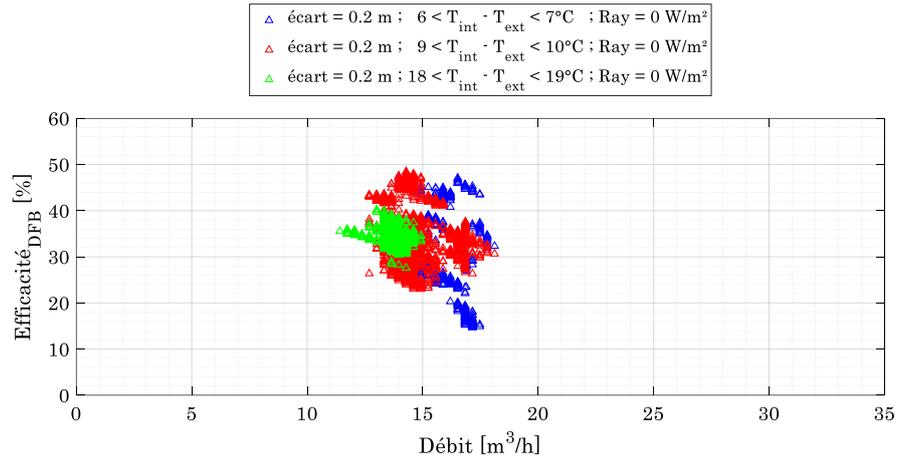


Figure B-10. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur en l'absence de rayonnement solaire.

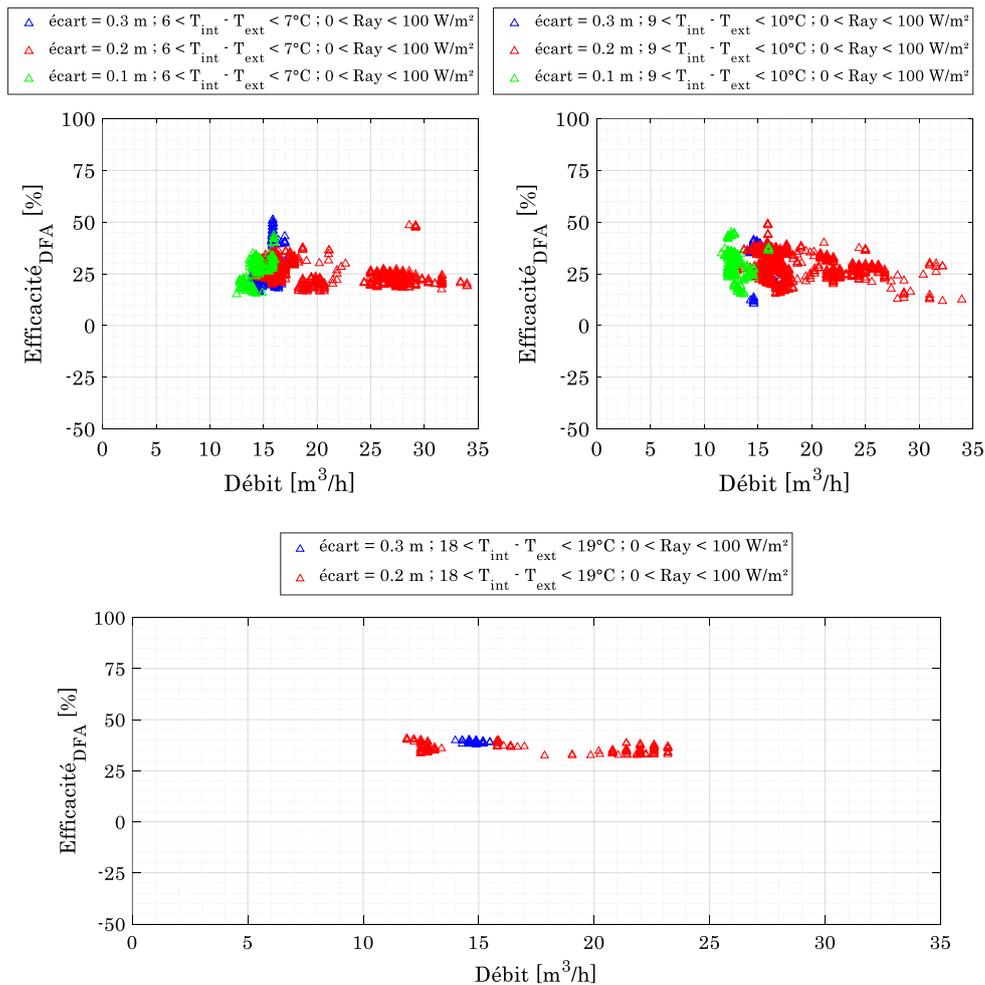


Figure B-11. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFA selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur avec un rayonnement solaire compris entre 0 et 100 W/m².

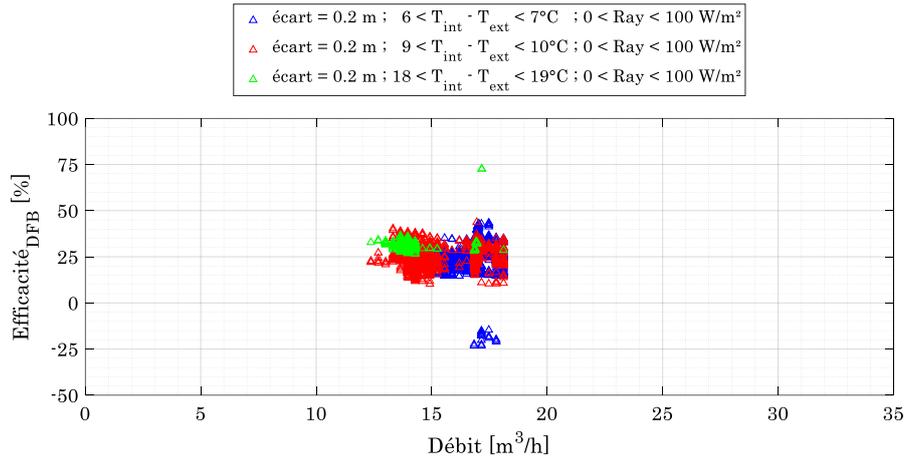


Figure B-12. Evolutions hivernales de l'efficacité des échanges thermiques de l'air ventilé dans la DFB selon l'écart entre les fenêtres, la différence de température intérieur/extérieur avec un rayonnement solaire compris entre 0 et 100 W/m².

Annexe C. Résultats de la validation de DF/SV

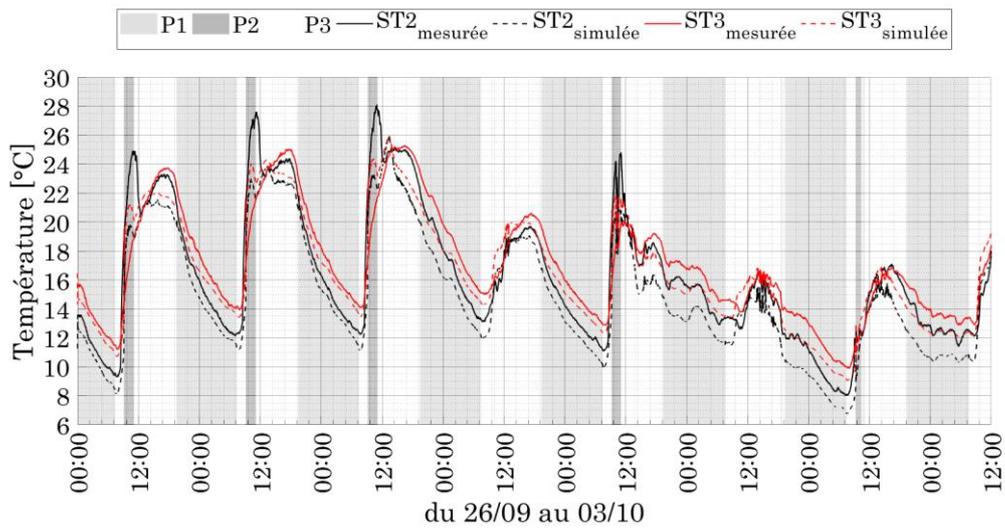


Figure C-1. Allures de ST2 et ST3 du test 7.

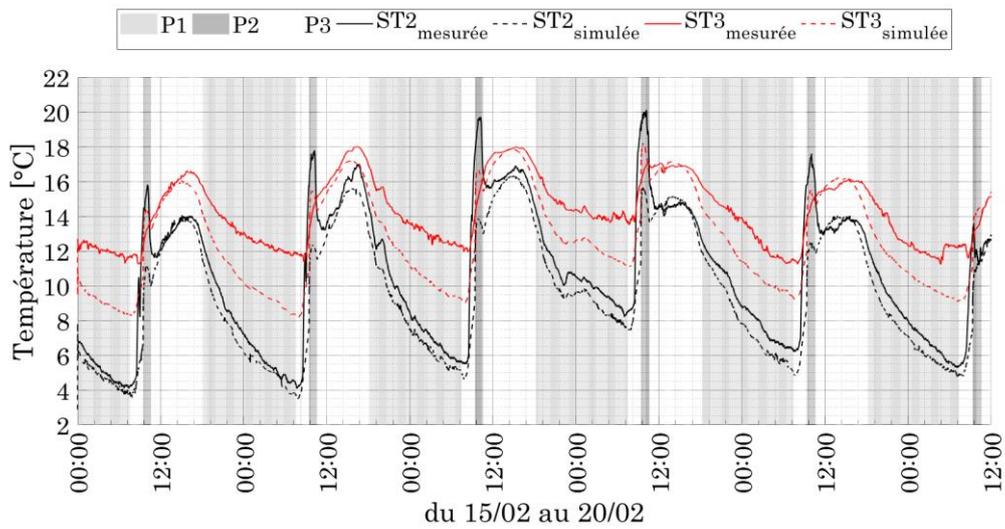


Figure C-2. Allures de ST2 et ST3 du test 8.

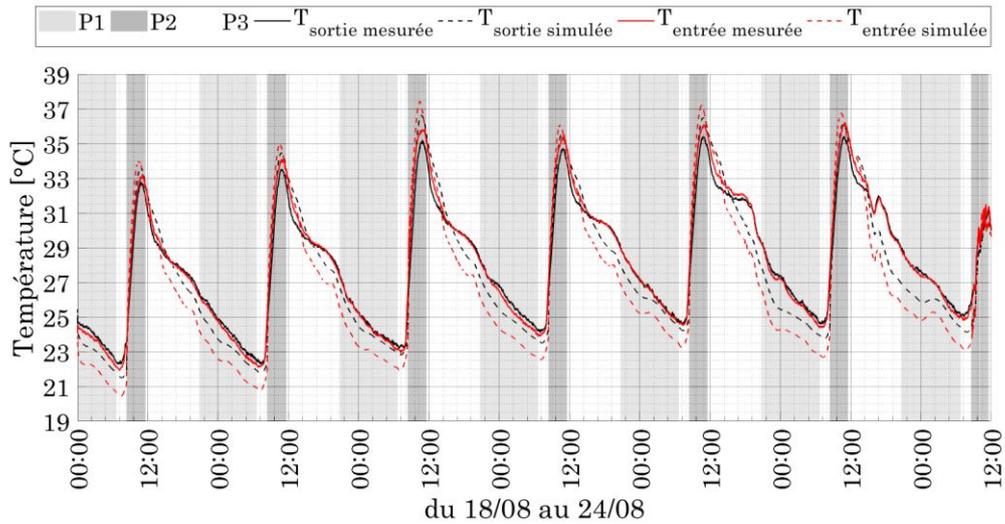


Figure C-3. Allures des températures d'entrée et de sortie du test 3.

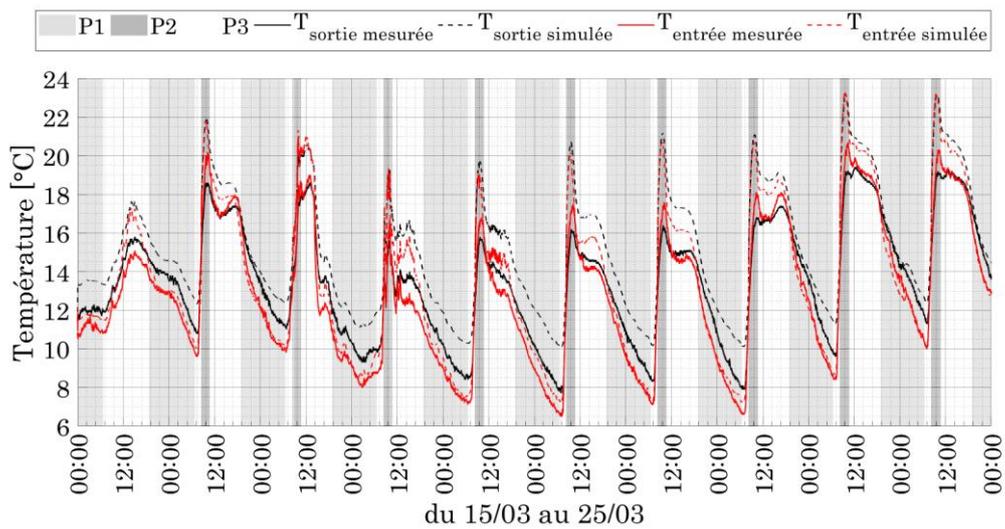


Figure C-4. Allures des températures d'entrée et de sortie du test 12.

Annexe D. Résultats de la validation de DF/DV

	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}	ST ₁	ST ₂	ST ₃	T _{entrée}	T _{mid}	T _{sortie}
	Test 3						Test 4						Test 5						Test 6						Test 7					
	NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)					
P1	5,8	15,0	5,4	8,4	9,9	9,1	6,9	17,3	5,0	9,5	10,1	12,4	5,9	13,5	5,2	9,6	8,5	9,3	3,6	10,3	4,1	8,2	10,4	9,9	3,0	10,8	5,3	12,0	11,6	8,0
P2	1,7	-7,0	-11,5	-6,9	-14,7	-4,3	2,4	-8,7	-12,8	-2,6	-9,6	-0,8	2,8	-7,9	-10,9	-2,2	-7,3	1,6	-1,3	-13,7	-12,1	-8,0	-12,1	3,2	2,7	-13,5	-14,1	-3,4	-10,7	13,7
P3	2,7	6,6	3,1	3,6	1,4	2,4	3,4	6,7	2,0	5,0	2,2	4,3	3,3	3,6	2,3	5,3	1,6	2,8	0,7	0,4	0,7	1,7	-1,1	1,9	-0,7	-1,4	-0,2	2,1	-1,7	0,5
WP	3,8	7,9	1,8	4,0	2,5	4,0	4,7	9,5	1,7	6,1	4,2	7,0	4,4	7,1	2,4	6,6	3,9	5,7	1,7	3,4	1,0	3,7	3,1	5,6	1,2	3,7	1,8	6,5	4,3	4,7
	CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)					
P1	6,0	15,2	5,5	8,6	10,1	9,3	7,2	18,2	5,1	9,9	10,6	13,3	6,3	14,0	5,4	9,9	8,9	9,7	4,3	11,4	4,4	9,0	11,5	10,8	3,7	11,2	5,5	12,3	12,1	8,5
P2	3,3	9,3	13,6	8,7	16,7	6,7	4,0	12,5	15,4	4,7	11,6	5,1	4,2	10,0	12,1	4,6	8,4	4,0	4,0	16,4	13,9	10,2	14,9	5,3	4,6	15,8	15,9	5,2	12,5	14,9
P3	3,8	8,2	3,6	5,2	5,9	4,9	5,1	10,3	3,4	7,1	6,5	7,4	5,2	7,6	4,0	7,9	6,0	5,6	4,6	7,8	4,1	7,3	8,2	5,5	4,7	8,2	4,0	7,6	9,0	6,6
WP	4,6	11,5	6,8	7,2	9,9	7,1	5,9	14,1	6,5	8,1	8,9	9,9	5,6	11,0	5,9	8,6	7,6	7,5	4,4	10,5	6,0	8,4	10,5	8,1	4,3	10,2	5,9	9,9	10,8	8,2
	R²						R²						R²						R²						R²					
	0,97	0,85	0,77	0,89	0,74	0,92	0,97	0,84	0,82	0,93	0,88	0,93	0,94	0,85	0,83	0,88	0,86	0,93	0,96	0,85	0,87	0,88	0,83	0,95	0,96	0,89	0,91	0,91	0,85	0,89
	Test 8						Test 9						Test 10						Test 11						Test 12					
	NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)						NMBE (%)					
P1	0,0	-15,4	24,7	-1,4	-4,8	-30,4	-3,0	-12,3	8,0	9,7	-18,9	0,2	-2,7	-6,4	5,7	6,5	-10,7	0,3	-0,3	-4,2	6,8	9,7	-9,8	2,0	0,7	-7,7	7,7	12,7	-12,9	1,8
P2	3,9	15,5	7,0	-5,8	12,3	11,4	-1,8	11,2	-6,9	-10,9	-17,1	-3,6	-2,6	7,4	-8,1	-12,5	-10,6	-5,1	-5,8	3,7	-11,0	-16,5	-11,7	-7,6	-13,0	2,6	-23,0	-31,6	-17,3	-19,4
P3	-10,8	-5,3	10,6	-9,0	-2,3	-13,3	-12,5	-9,2	-0,6	-12,6	-10,4	-8,5	-9,8	-7,4	-0,3	-7,9	-10,1	-5,2	-8,0	-6,4	0,2	-5,6	-9,5	-3,6	-8,4	-5,7	-0,5	-7,8	-8,5	-6,5
WP	-4,4	-7,6	18,2	-5,4	-2,4	-20,1	-7,1	-8,8	3,5	-1,4	-14,6	-3,7	-5,8	-6,2	2,6	-0,6	-10,4	-2,3	-4,0	-4,7	3,0	1,5	-9,8	-1,0	-4,8	-5,3	1,3	-0,7	-11,3	-3,8
	CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)						CV(RMSE) (%)					
P1	4,7	16,0	25,5	4,0	5,3	31,1	5,0	12,6	8,1	11,4	19,5	2,6	4,5	7,1	6,1	9,3	11,6	2,8	4,1	5,6	7,3	11,6	10,9	3,3	4,0	8,8	8,0	14,0	13,7	3,3
P2	5,7	17,3	8,7	6,6	12,8	12,6	5,0	13,8	9,5	13,7	18,3	6,6	6,5	12,7	11,9	16,0	14,2	8,5	7,7	9,3	14,9	19,0	14,3	9,0	14,9	10,7	25,9	33,9	19,9	21,3
P3	15,2	15,5	14,5	10,8	11,0	16,6	15,1	13,9	4,4	17,4	12,0	10,9	11,6	10,2	3,7	12,7	11,5	7,2	10,7	10,4	4,4	12,6	11,6	6,8	10,8	12,0	4,4	13,7	11,3	9,2
WP	11,1	16,5	21,1	8,8	9,8	23,8	11,1	13,9	6,9	14,7	15,7	7,7	8,6	9,4	5,5	11,3	11,8	5,4	8,1	8,9	6,8	12,6	11,6	5,5	9,6	11,4	10,2	17,3	14,0	9,3
	R²						R²						R²						R²						R²					
	0,90	0,88	0,05	0,96	0,90	0,88	0,93	0,91	0,86	0,77	0,97	0,96	0,92	0,93	0,85	0,74	0,94	0,96	0,92	0,93	0,79	0,72	0,94	0,95	0,96	0,93	0,77	0,73	0,93	0,95

Tableau D-1. Résultats de la validation statistique de DF/DV.

Annexe E. Résultats des paramètres d'influences sur les grandeurs de sortie

S1b	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S1a	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S1c	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}
P1	49%	61%	74%	27%	52%	96%	P1	49%	67%	76%	27%	55%	96%	P1	50%	70%	78%	27%	57%	96%
P2	200%	249%	306%	119%	210%	389%	P2	199%	273%	314%	119%	221%	389%	P2	199%	286%	319%	119%	227%	389%
P3	7%	8%	8%	7%	7%	9%	P3	7%	8%	8%	7%	7%	9%	P3	7%	8%	8%	7%	7%	9%
P4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P4	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P5	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P6	4%	4%	4%	3%	4%	4%	P6	9%	9%	9%	8%	9%	10%	P6	13%	14%	15%	12%	14%	16%
P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P10	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P12	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P13	0%	0%	0%	0%	0%	1%	P13	0%	0%	0%	0%	0%	1%	P13	0%	0%	0%	0%	0%	1%
P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P17	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P18	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P19	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P20	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau E-1. Résultats des IC pour les scénarios 1.

S2b	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S2a	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S2c	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}
P1	51%	61%	72%	28%	51%	87%	P1	52%	69%	76%	28%	56%	88%	P1	52%	72%	77%	29%	56%	88%
P2	45%	32%	23%	66%	45%	4%	P2	45%	26%	20%	66%	42%	4%	P2	45%	24%	19%	66%	42%	4%
P3	4%	3%	2%	6%	4%	1%	P3	4%	3%	2%	6%	4%	1%	P3	4%	2%	1%	6%	3%	1%
P4	4%	3%	2%	8%	4%	7%	P4	4%	3%	2%	8%	4%	7%	P4	4%	3%	2%	8%	4%	7%
P5	1%	1%	1%	4%	1%	0%	P5	1%	1%	1%	4%	1%	0%	P5	0%	0%	0%	4%	1%	0%
P6	2%	2%	2%	6%	3%	2%	P6	5%	5%	4%	13%	6%	4%	P6	8%	7%	6%	20%	10%	6%
P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P9	0%	0%	0%	1%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	1%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	1%	0%	0%
P10	0%	0%	1%	0%	0%	0%	P10	0%	0%	1%	0%	0%	0%	P10	0%	0%	1%	0%	0%	0%
P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P12	12%	6%	3%	7%	4%	9%	P12	7%	4%	2%	4%	3%	8%	P12	5%	3%	2%	3%	3%	8%
P13	16%	8%	4%	9%	6%	13%	P13	10%	5%	3%	6%	4%	12%	P13	7%	4%	3%	5%	3%	12%
P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P16	1%	0%	0%	1%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	1%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	1%	0%	0%
P17	1%	1%	0%	1%	1%	0%	P17	1%	1%	1%	1%	1%	0%	P17	1%	1%	1%	1%	1%	0%
P18	1%	1%	0%	1%	0%	0%	P18	1%	1%	0%	1%	1%	0%	P18	1%	1%	1%	1%	1%	0%
P19	1%	1%	0%	1%	0%	0%	P19	1%	1%	0%	1%	1%	0%	P19	1%	1%	0%	1%	1%	0%
P20	1%	1%	1%	1%	1%	0%	P20	1%	2%	1%	2%	2%	0%	P20	1%	2%	1%	2%	2%	0%

Tableau E-2. Résultats des IC pour les scénarios 2.

S3b	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S3a	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S3c	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}
P1	48%	59%	72%	26%	51%	96%	P1	49%	65%	75%	27%	54%	96%	P1	49%	69%	77%	27%	56%	96%
P2	438%	544%	668%	237%	461%	859%	P2	439%	597%	688%	238%	487%	860%	P2	441%	628%	700%	240%	502%	860%
P3	6%	7%	8%	4%	6%	9%	P3	6%	7%	8%	4%	6%	9%	P3	6%	7%	8%	4%	6%	9%
P4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P4	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P5	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P6	3%	3%	4%	2%	3%	5%	P6	7%	8%	9%	5%	7%	11%	P6	11%	14%	15%	7%	12%	17%
P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P10	0%	0%	0%	0%	1%	0%	P10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P10	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P12	7%	4%	2%	4%	3%	5%	P12	5%	3%	2%	3%	2%	5%	P12	4%	2%	2%	2%	2%	5%
P13	9%	5%	3%	5%	4%	7%	P13	6%	4%	3%	4%	3%	7%	P13	5%	3%	2%	3%	3%	7%
P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P17	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P18	0%	1%	0%	0%	0%	0%	P18	0%	1%	0%	0%	0%	0%
P19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P19	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P20	0%	1%	0%	0%	0%	0%	P20	0%	1%	0%	0%	0%	0%	P20	0%	1%	0%	0%	0%	0%

Tableau E-3. Résultats des IC pour les scénarios 3.

S4b	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S4a	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}	S4c	T _{sortie}	T _{entrée}	T _{s,vitre ext}	T _{s,soubassement}	T _{s,vitre int}	T _{s,allège ext}
P1	49%	58%	72%	26%	51%	89%	P1	49%	64%	75%	27%	55%	90%	P1	49%	68%	76%	28%	57%	90%
P2	244%	290%	365%	133%	259%	450%	P2	243%	318%	377%	131%	274%	450%	P2	244%	339%	391%	129%	290%	451%
P3	3%	3%	4%	2%	3%	4%	P3	3%	4%	4%	2%	3%	4%	P3	3%	4%	4%	2%	3%	4%
P4	6%	7%	7%	6%	6%	5%	P4	6%	7%	7%	6%	7%	6%	P4	6%	8%	7%	6%	7%	6%
P5	0%	1%	0%	3%	1%	0%	P5	0%	0%	0%	3%	1%	0%	P5	0%	0%	0%	3%	0%	0%
P6	3%	3%	4%	5%	4%	4%	P6	7%	8%	8%	12%	9%	10%	P6	11%	12%	13%	19%	13%	16%
P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P7	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P8	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P9	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P10	1%	1%	1%	0%	1%	0%	P10	0%	0%	1%	0%	1%	0%	P10	0%	0%	1%	0%	0%	0%
P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P11	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P12	1%	0%	0%	0%	0%	0%	P12	1%	1%	0%	1%	0%	1%
P13	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P13	1%	1%	0%	1%	0%	0%	P13	1%	1%	0%	1%	1%	1%
P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P14	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P15	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	P16	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P17	1%	1%	1%	1%	1%	0%	P17	1%	1%	1%	1%	1%	0%	P17	1%	1%	1%	1%	1%	0%
P18	1%	1%	0%	0%	1%	0%	P18	1%	1%	1%	0%	1%	0%	P18	1%	1%	1%	0%	1%	0%
P19	0%	1%	0%	0%	1%	0%	P19	0%	1%	0%	0%	1%	0%	P19	0%	1%	0%	0%	1%	0%
P20	1%	2%	1%	1%	1%	0%	P20	1%	2%	1%	1%	1%	0%	P20	1%	2%	1%	1%	1%	0%

Tableau E-4. Résultats des IC pour les scénarios 4.

Annexe F. Résultats de la régression linéaire multiple

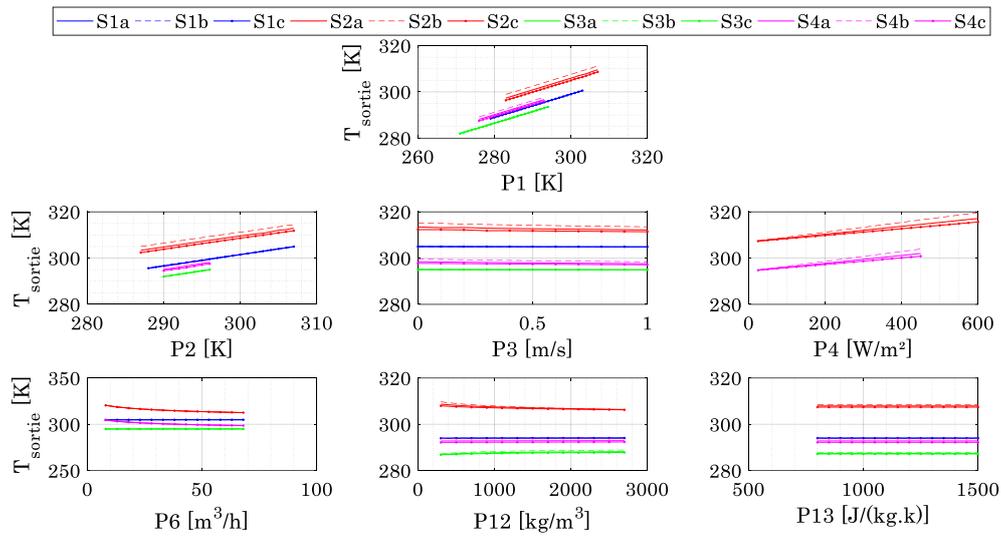


Figure F-1. Evolutions de la température de sortie en fonction des PI pour chaque scénario.

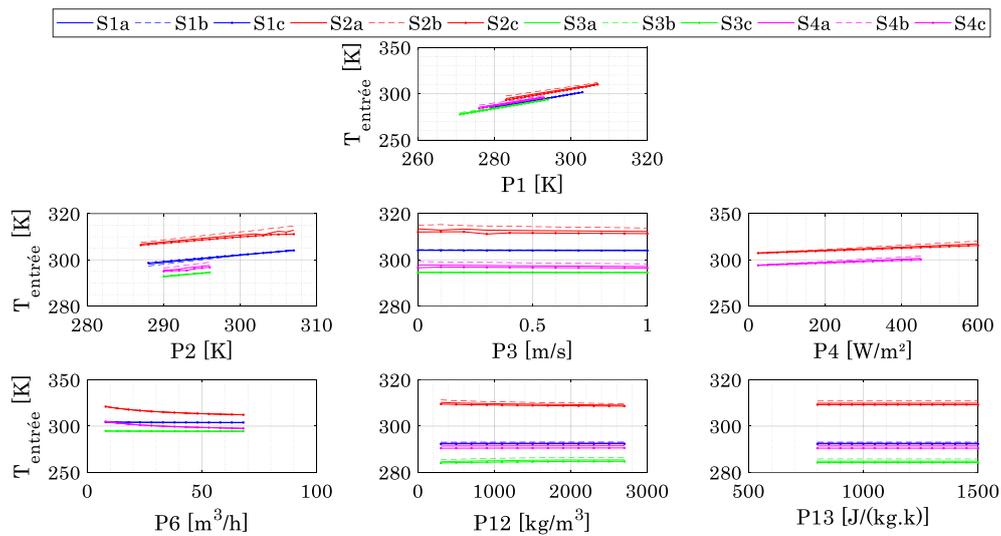


Figure F-2. Evolutions de la température d'entrée en fonction des PI pour chaque scénario.

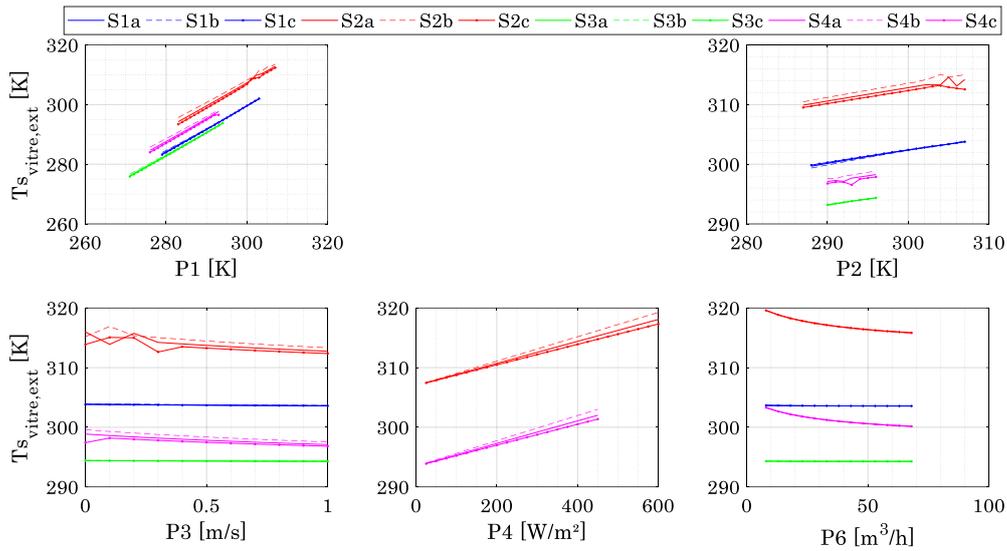


Figure F-3. Evolutions de la température de vitre extérieure en fonction des PI pour chaque scénario.

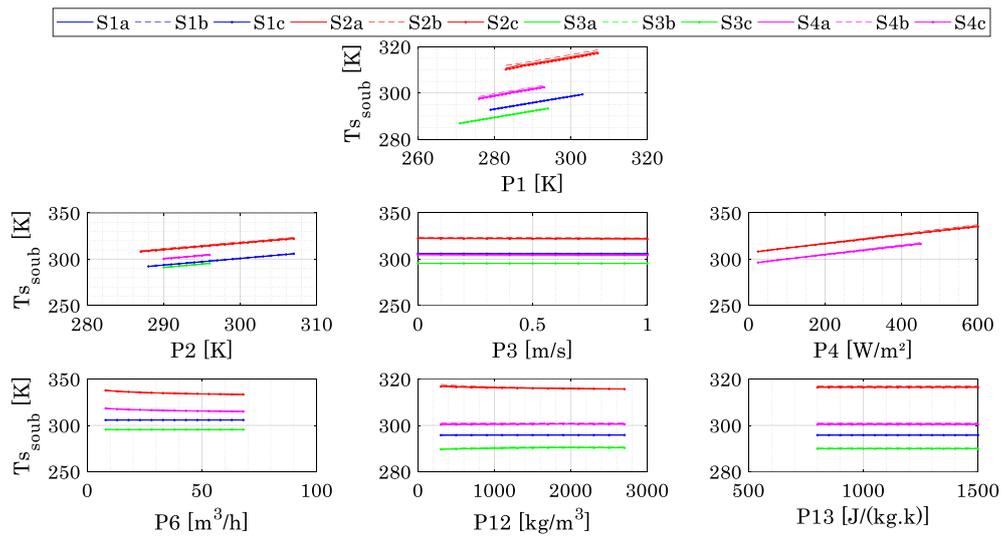


Figure F-4. Evolutions de la température du soubassement en fonction des PI pour chaque scénario.

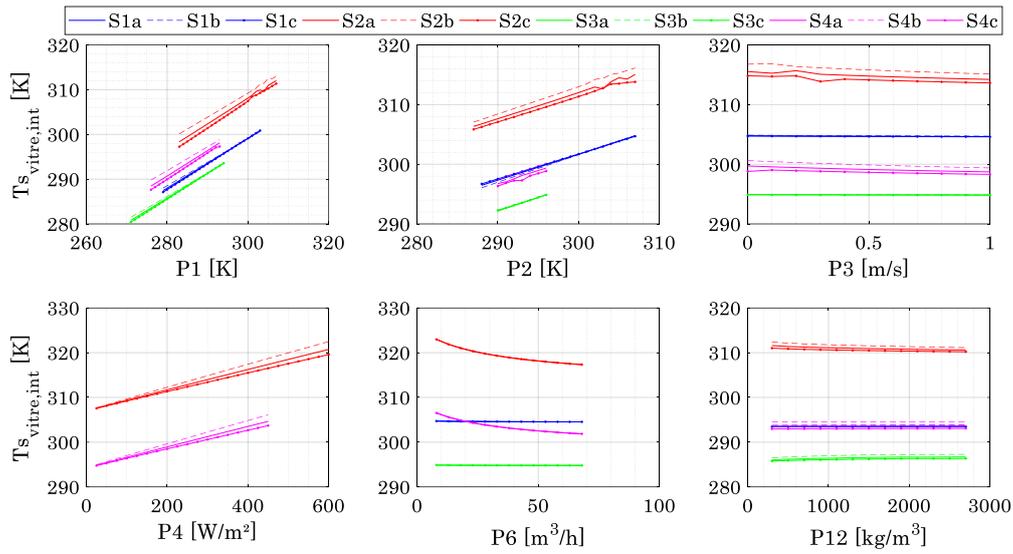


Figure F-5. Evolutions de la température de vitre intérieure en fonction des PI pour chaque scénario.

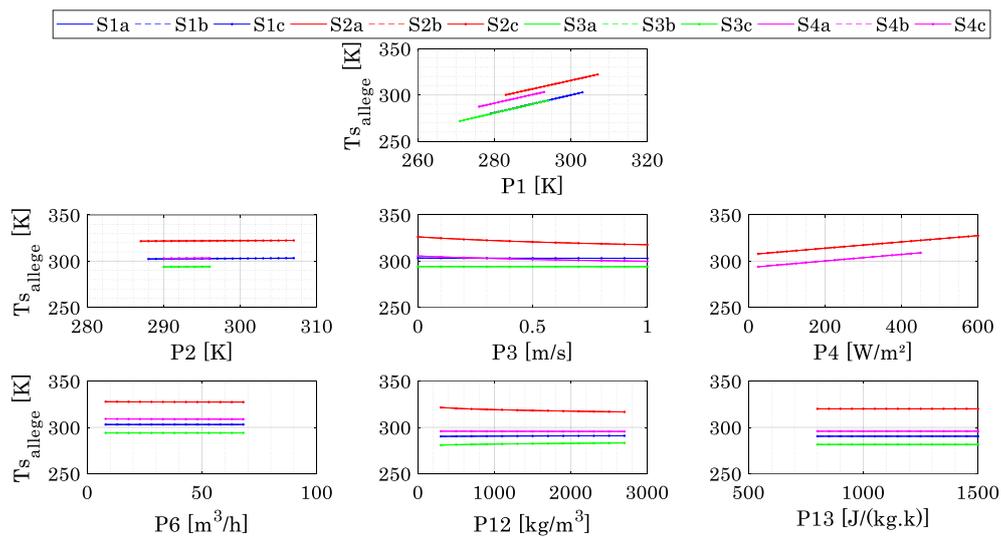


Figure F-6. Evolutions de la température d'allège en fonction des PI pour chaque scénario.

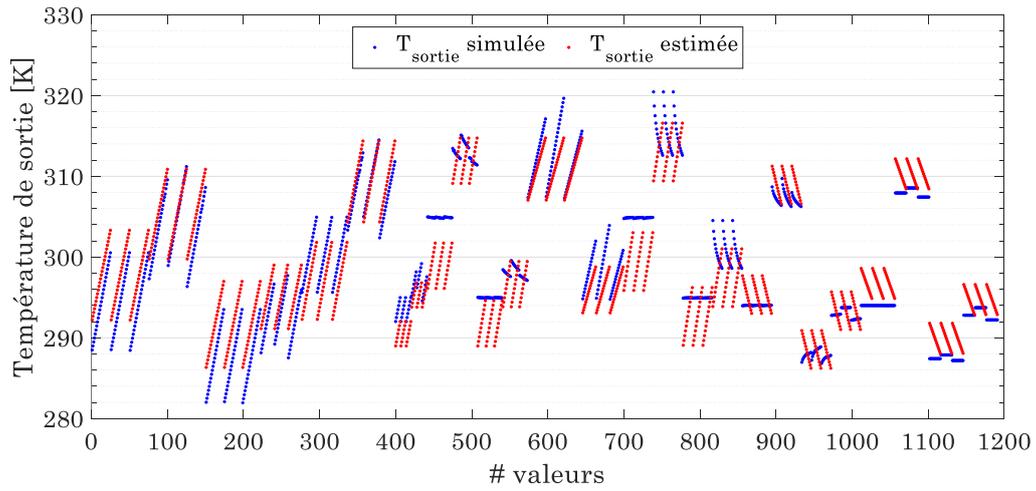


Figure F-7. Comparaison des températures de sortie simulées (bleu) et estimées (rouge).

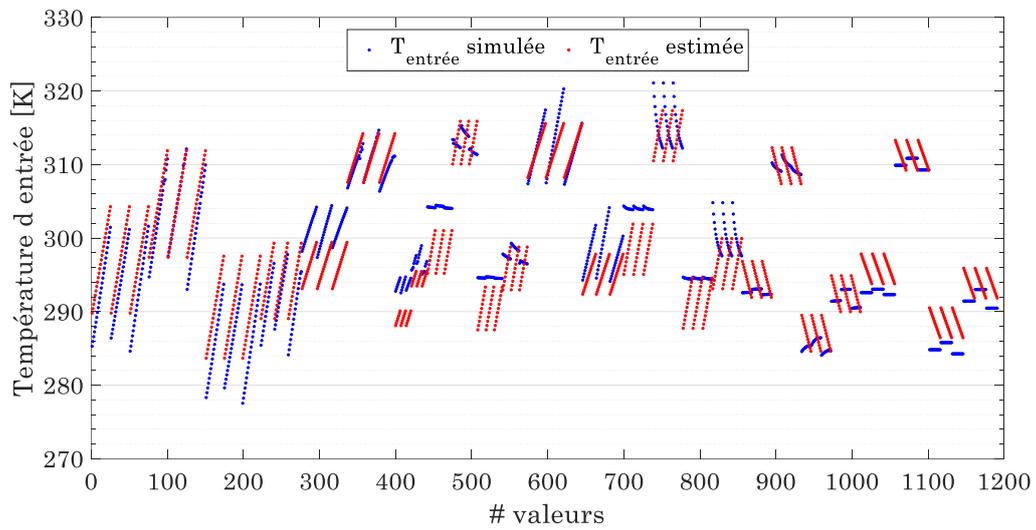


Figure F-8. Comparaison des températures d'entrée simulées (bleu) et estimées (rouge).

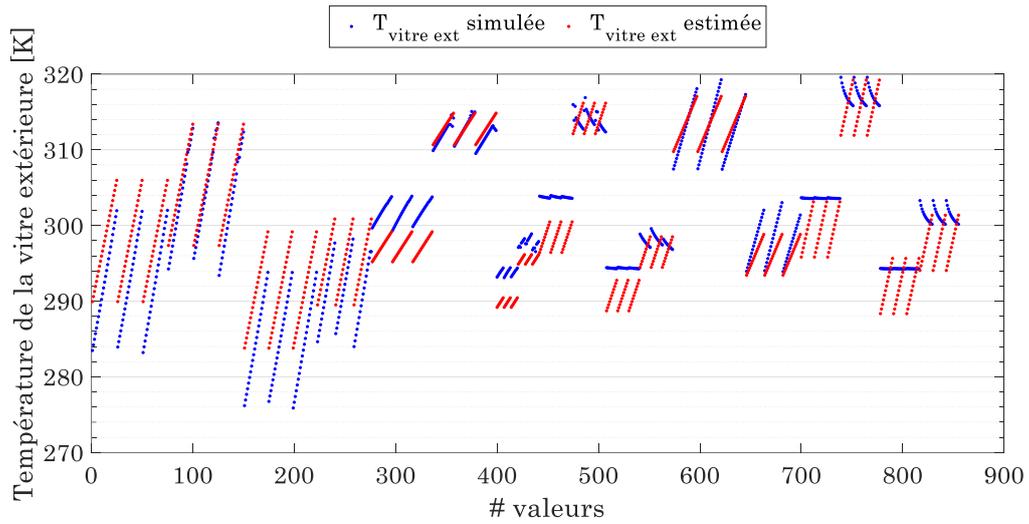


Figure F-9. Comparaison des températures de la vitre extérieure (bleu) et estimées (rouge).

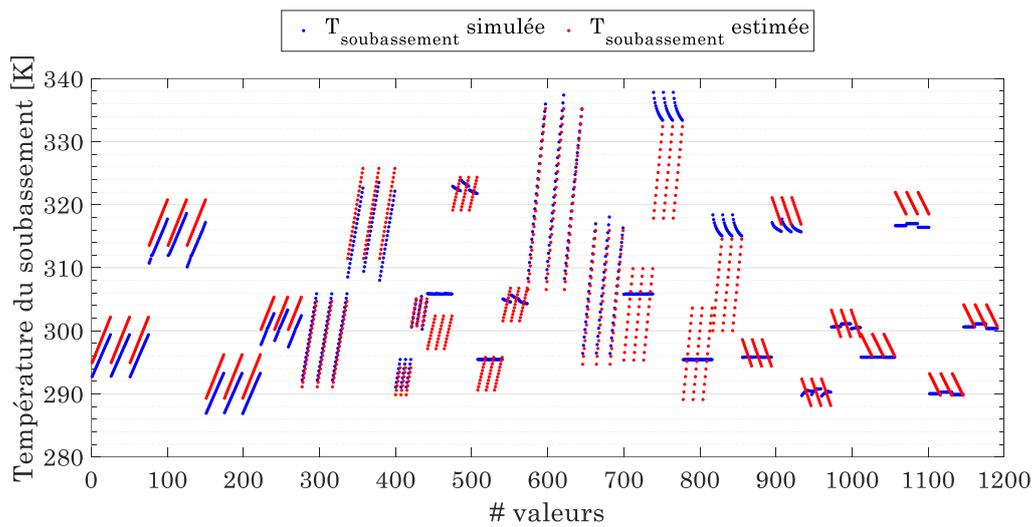


Figure F-10. Comparaison des températures du soubassement (bleu) et estimées (rouge).

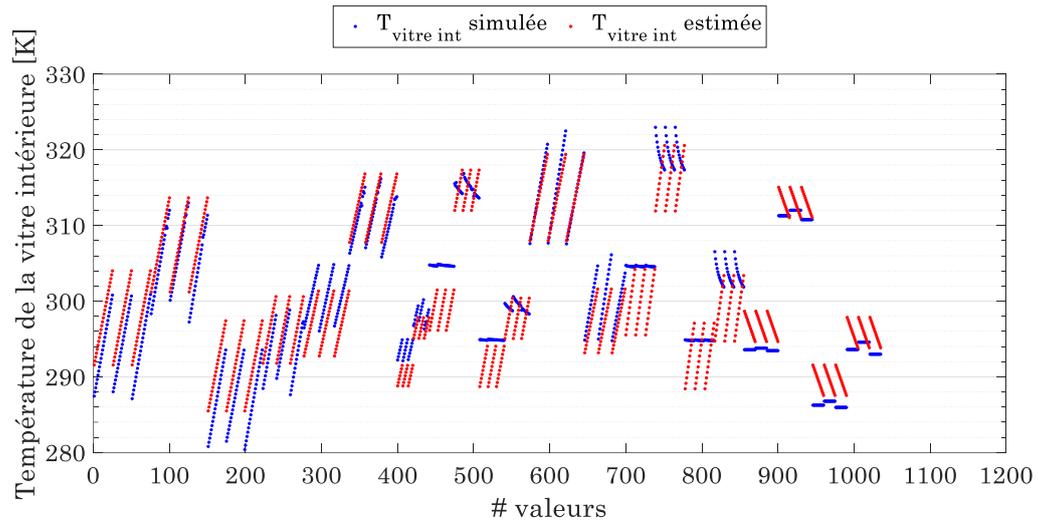


Figure F-11. Comparaison des températures de la vitre intérieure (bleu) et estimées (rouge).

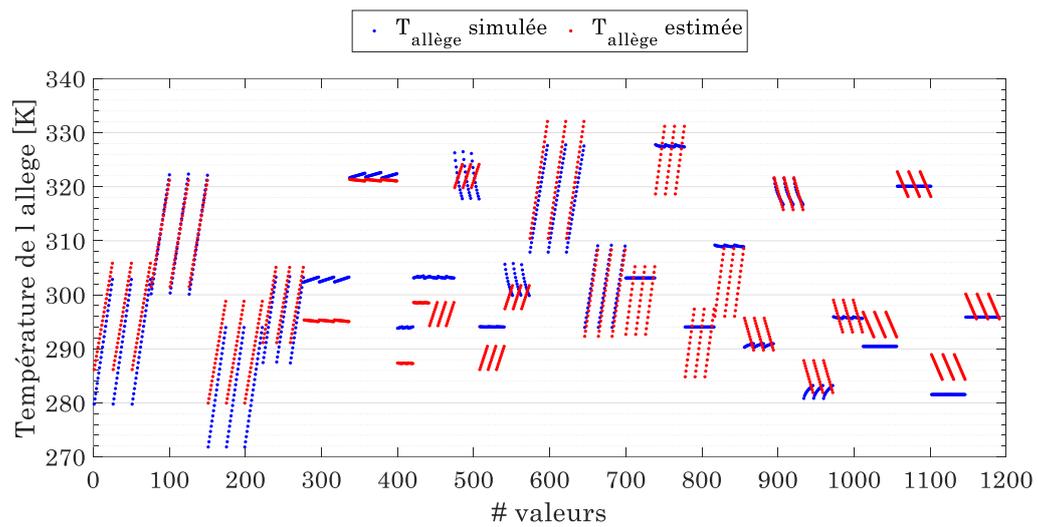


Figure F-12. Comparaison des températures de l'allège extérieure (bleu) et estimées (rouge).