Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments

Layal Chahwane

▶ **To cite this version:**

Layal Chahwane. Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENA017 . tel-00701170

HAL Id: tel-00701170

https://theses.hal.science/tel-00701170v1

Submitted on 24 May 2012

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.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Civil et Sciences de l'Habitat**

Arrêté ministérial : Arrêté ministériel : 7 Août 2006

Présentée par

LAYAL CHAHWANE

Thèse dirigée par **Etienne WURTZ**
et codirigée par **Bruno ZUBER**

préparée au sein **LOCIE UMR CNRS 5271**
et de **SISEO**

Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments

Thèse soutenue publiquement le **21/10/2011**,
devant le jury composé de :

M. Bruno PEUPORTIER
Professeur, MINES ParisTech, Rapporteur
M. Stéphane LASSUE
Professeur, Université d'Artois, Rapporteur
M. Jean-Jacques ROUX
Professeur, INSA Lyon, Examinateur
M. Nathan MENDES
Professeur, PUCPR Brésil, Examinateur
M. Etienne WURTZ
Directeur de Recherche, CEA-INES, Directeur de thèse
M. Bruno ZUBER
Docteur, Lafarge LCR , Co-Directeur de thèse

A Louis,
A ma famille.

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse Etienne WURTZ qui m'a proposé ce sujet riche en opportunités et a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux tout en y gardant un oeil critique et avisé. Je le remercie pour les échanges que nous avons eus et les perspectives que ce travail a apportées. Ses qualités humaines et son écoute ont été très appréciables. Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans l'appui du Centre de Recherche Lafarge (LCR) de l'Isle d'Abeau qui a financé ces trois années de recherche. Je tiens à manifester ma gratitude pour l'accueil chaleureux que j'ai reçu ainsi que pour la confiance qui m'été accordée au cours de cette période.

Je souhaite remercier Bruno ZUBER qui a été mon co-directeur de thèse et à la fois mon responsable au sein du groupe Lafarge. Ses conseils ont été très enrichissants et formateurs tant bien du côté scientifique que du côté de l'entreprise. Je remercie également Messieurs Bruno PEUPORTIER, professeur à MINES ParisTech et Stéphane LASSUE, professeur à l'Université d'Artois pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ce manuscrit et pour avoir fait partie du jury de thèse. Je souhaite remercier M. Jean-Jacques ROUX, Professeur à l'INSA de Lyon, pour avoir accepté de présider ce jury de thèse ainsi que M. Nathan MENDES, Professeur à l'Université Catholique Pontificale de Paraña pour avoir été examinateur. Cette thèse a aussi été en grande partie réalisée au sein du laboratoire LOCIE de l'Université de Savoie dont je remercie les membres pour leur accueil et pour les bonnes conditions de travail, en particulier Mme Lingai LUO et M. Benoît STUTZ, directeurs successifs du laboratoire.

J'aimerais remercier également Pierre TITTELEIN pour son initiation à l'outil SimSPARK et pour son aide en ce qui concerne l'inversion de modèle. Sa bonne humeur et sa gentillesse ont été exemplaires au sein du laboratoire et j'apprécie l'amitié dont il a fait preuve, amitié allant au-delà du cadre de travail. Je remercie également Elise son épouse ainsi que leurs enfants pour les délicieux moments que nous avons partagés et pour leurs encouragements.

Je tiens à remercier Gianpiero EVOLA pour sa contribution dans la partie concernant la modélisation de l'installation solaire. Je le remercie aussi pour tous ces agréables moments que nous avons passés ensemble ainsi que Fabio SICURELLA, collègue de travail et ami pour avoir fait régner une ambiance très sympathique et

conviviale au sein des locaux de l'INES.

J'aimerais remercier aussi tout particulièrement Adrien BRUN et Clara SPITZ pour les échanges que nous avons eus durant ces trois ans et leur amitié qui m'a été d'un grand soutien.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler respectivement au sein de l'INES-LOCIE et au LCR. Je souhaite pour cela remercier tous mes collègues et amis Yu, Wassila, Yeweon, Xavier, Jeanne, Mickael, Sébastien, Edem ainsi que Céline CONRARDY, Fabienne BEGAUD, Hervé NOYALET, Emmanuel BONNET, Paul SICSIC, Qing et tous ceux que je n'ai pas mentionnés.

Je remercie également tous les collègues du CEA-LEB, merci à Valérie, Benjamin, Arnaud, Timea, Céline, Virginie, Anne-France, Jocelyn, François et tous ceux que je n'ai pas cités.

J'adresse un remerciement particulier à Khalil EL KHOURY qui m'a suivie lors de ma formation à l'Université Libanaise et durant ma demande de bourse de thèse.

J'aimerais remercier Rami, Farah, Mayada, Fakher ainsi que les autres compatriotes libanais de Chambéry pour leur soutien.

Je ne remercierai jamais assez ma famille, mes parents Jean et Hyam pour leur dévouement, leur amour inconditionnel et les sacrifices qu'ils ont fait ainsi que mes frères et soeurs, Maribelle, Dounia, Hala et Antoine pour leur réconfort sans lequel je n'en serai pas là aujourd'hui.

J'ai une pensée particulière pour ma grand-mère Isabelle qui a donné tant d'amour et de patience au cours des années, Nadia et Georgette qui ont été un appui important.

Merci à Rima, qui a été comme une soeur depuis que l'on s'est connues à la Faculté de Génie de l'Université Libanaise et pour tous les bons moments passés ensemble.

J'en profite pour remercier aussi Michel, Maguy, Jean-Claude et Carl pour leur sympathie et leur affection.

Je ne saurai clore cette page sans exprimer ma profonde gratitude à Louis STEPHAN mon collègue, fiancé et mon plus grand soutien. Merci Louis pour le temps que tu m'as accordé et pour tes encouragements, pour toutes ces soirées de travail passées ensemble durant notre parcours universitaire et pour ta patience durant les moments difficiles.

Tables des matières

Remerciements **iii**

Table des matières **viii**

Liste des tableaux **x**

Table des figures **xv**

Nomenclature **xvii**

Introduction **xxi**

1 Enjeux énergétiques de l'inertie thermique des bâtiments **1**

1.1 Caractérisation de l'inertie 1

1.1.1 Propriétés thermiques des matériaux 2

1.1.1.1 Diffusivité thermique 2

1.1.1.2 Effusivité thermique 3

1.1.2 Méthode des admittances 4

1.1.3 Constante de temps d'un bâtiment 6

1.1.3.1 Analogie avec les circuits électriques 6

1.1.3.2 Calcul de la constante de temps par une méthode dynamique 7

1.1.4 Capacité calorifique d'un bâtiment 8

1.1.4.1 Capacité calorifique journalière 8

1.1.4.2 Capacité calorifique apparente et effective 9

1.1.5 Caractéristiques de la réponse périodique 9

1.2 Rôle de l'inertie thermique dans la conception en climat chaud 11

1.2.1 Amélioration du confort d'été par la ventilation nocturne . . . 11

1.2.2 Influence du climat 12

1.2.2.1 Conditions climatiques requises pour une bonne utilisation de l'inertie 12

1.2.2.2 Classification des climats 13

1.3 Conception en climat tempéré 16

1.3.1 Incidence de l'inertie sur l'effet des apports solaires 16
1.3.1.1 Orientation du bâtiment 16
1.3.1.2 Effet de la tache solaire 17
1.3.2 Influence de l'isolation 18
1.3.2.1 Position de l'isolant 18
1.3.2.2 Isolation répartie 20
1.3.3 Exploitation des ressources énergétiques solaires par le bâtiment 21
1.4 Choix des matériaux de construction en phase de conception 23
1.4.1 Place des matériaux dans la conception 23
1.4.2 Méthode d'Ashby 25
1.5 Description des outils de simulation utilisés 27
1.5.1 Environnement de simulation SPARK 27
1.5.2 Présentation des algorithmes d'optimisation 28
1.5.2.1 Modèle de simulation de bâtiment pour fonction objective 28
1.5.2.2 Les algorithmes de recherche par motifs généralisés (GPS) 29
1.5.2.3 Optimisation par essaim de particules (PSO) 30
1.5.3 Choix du logiciel d'optimisation et couplage avec l'environnement de simulation 31
1.6 Conclusion 32

2 Confrontation des résultats du modèle numérique SimSPARK aux mesures issues de la plateforme INCAS 35
2.1 Présentation de la plateforme INCAS 35
2.2 Description de la maison en Béton Banché avec isolation extérieure . 37
2.2.1 Composition de l'enveloppe 37
2.2.2 Description des systèmes 39
2.2.3 Acquisition des données et suivi expérimental 40
2.3 Campagnes de mesure et simulation 42
2.3.1 Scénarios de mesures type " vacances " du 4 au 22 Février . . 42
2.3.2 Calcul de la constante de temps 43
2.4 Confrontation d'un modèle de simulation aux mesures 45
2.4.1 Hypothèses de simulation 45
2.4.2 Comparaison entre modèle et expérimentation 47
2.5 Optimisation des paramètres incertains pour une meilleure fiabilité du modèle 51
2.5.1 Présentation de la méthodologie 51
2.5.2 Pré-sélection des paramètres influents 51
2.5.3 Etude des effets des paramètres sur la constante de temps . . 54

2.5.4 Identification des paramètres incertains et analyse d'incertitude . . . 60
2.6 Conclusion . . . 61

3 Méthodologie de conception optimisée d'un bâtiment 65
3.1 Aide à la décision architecturale . . . 65
3.1.1 Rôle des outils de simulation . . . 65
3.1.2 Problématique de l'inertie dans la conception . . . 66
3.1.3 Pertinence d'un outil simplifié . . . 67
3.2 Développement de l'outil de conception architecturale . . . 67
3.2.1 Paramètres du modèle . . . 67
3.2.2 Réponse du bâtiment en évolution libre . . . 69
3.2.2.1 Expression de l'équation différentielle . . . 69
3.2.2.2 Expression de la température intérieure . . . 71
3.2.2.3 Prise en compte du coefficient de transmission de la chaleur U_{bat} dans le calcul de la température en évolution libre . . . 74
3.2.2.4 Expression simplifiée de la réponse thermique . . . 75
3.2.3 Maintien du bâtiment à une température de consigne donnée 76
3.2.3.1 Expression de l'équation différentielle . . . 76
3.2.3.2 Expression de la température intérieure . . . 77
3.2.4 Prise en compte des conditions initiales . . . 78
3.2.4.1 Période estivale . . . 78
3.2.4.2 Période hivernale . . . 81
3.2.5 Prise en compte des apports solaires . . . 82
3.2.6 Conclusion sur la formulation du modèle . . . 84
3.3 Confrontation du modèle simplifié de conception CoSPARK au modèle de simulation thermique dynamique SimSPARK . . . 84
3.3.1 Hypothèses de comparaison . . . 85
3.3.2 Comparaison des réponses thermiques des modèles . . . 87
3.3.3 Conclusion de la comparaison . . . 90
3.4 Effets des paramètres du modèle sur les indicateurs de performance et de leurs interactions avec l'inertie thermique . . . 90
3.4.1 Choix des paramètres significatifs vis-à-vis de la conception . 90
3.4.2 Impact du débit de ventilation nocturne . . . 92
3.4.3 Impact de la température extérieure . . . 97
3.4.4 Impact du coefficient global de déperditions U_{bat} . . . 97
3.4.5 Impact des charges internes . . . 102
3.4.6 Conclusion sur l'impact des différents paramètres . . . 102
3.5 Application du modèle CoSPARK à l'aide à la conception pour deux cas types de bâtiments . . . 105

3.5.1 Proposition d'une approche par inversion de modèle 105
3.5.2 Inversion de modèle d'un bâtiment 106
3.5.2.1 Définition des problèmes "direct" et "inverse" 106
3.5.2.2 Résolution du problème inverse 107
3.5.2.3 Définition des contraintes du problème inverse 108
3.5.3 Application à un bâtiment de la plateforme d'expérimentation INCAS 109
3.5.3.1 Analyse des contraintes pour le cas de la maison INCAS 109
Détermination des éléments architecturaux imposés . . 109
Sélection des températures extérieures à partir du fichier météo 111
Bilan des apports gratuits 113
3.5.3.2 Recherche des solutions du problème inverse appliqué à la maison de la plateforme INCAS 116
3.5.4 Application sur un logement collectif à Cargèse 119
3.5.4.1 Bilan des éléments clés de la conception 119
Éléments architecturaux imposés 119
Etude de l'évolution de la température extérieure pour le climat de Cargèse 119
Bilan des apports gratuits 121
3.5.4.2 Recherche des solutions du problème inverse appliqué sur un bâtiment à Cargèse 125
3.6 Conclusion sur la méthode de conception 126

4 Exploitation de l'inertie thermique pour l'amélioration du confort et la réduction des consommations 129
4.1 Etude de l'amélioration du confort d'été par le rafraîchissement passif nocturne 130
4.1.1 Enjeu de la ventilation nocturne et intérêt d'une gestion optimisée 130
4.1.2 Ventilation nocturne "adaptative" 133
4.1.2.1 Principe du confort adaptatif 133
4.1.2.2 Elaboration d'un algorithme de contrôle 135
4.1.2.3 Choix du coefficient "c" selon la constante de temps du bâtiment 137
4.1.2.4 Choix des températures "seuils" adéquates 139
Etude paramétrique sur $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ 139
Sélection des températures correspondant à la mise en route de la ventilation 139
4.1.3 Comparaison entre les surventilations classique et adaptative . 142
4.1.3.1 Performances annuelles globales des bâtiments . . . 142

4.1.3.2 Comportement des bâtiments en intersaison 142
4.1.4 Conclusion sur la stratégie de la ventilation nocturne adaptative 145
4.2 Etude d'une stratégie de chauffage solaire par activation d'un plancher chauffant 147
4.2.1 Modélisation de l'installation solaire 147
4.2.1.1 Modèle du plancher chauffant 148
Échanges de chaleur entre les tuyaux et la dalle 148
Échanges de chaleur aux surfaces du plancher 150
Caractéristiques des planchers 152
4.2.1.2 Modèle de capteur solaire thermique 152
Bilan énergétique extérieur 152
Bilan énergétique intérieur de l'absorbeur 159
4.2.1.3 Modèle des ballons de stockage 161
4.2.2 Description de la logique de fonctionnement 163
4.2.2.1 Mode 1 163
4.2.2.2 Modes 2 et 3 164
4.2.2.3 Modes 4 et 5 165
4.2.2.4 Modes 6, 7 et 8 165
4.2.3 Couplage de l'installation solaire au bâtiment 167
4.2.4 Evaluation des indicateurs de performance 168
4.2.4.1 Quantification des potentiels concomitant et exploité 168
4.2.4.2 Comparaison du taux de couverture et du taux d'exploitation par rapport au cas de référence 168
4.2.5 Conclusion sur la stratégie de l'activation de l'inertie pour le chauffage solaire 170

Conclusion **175**

Annexes **179**
Caractéristiques des maisons de la plateforme INCAS 179
Modélisation du bâtiment dans l'environnement SimSPARK 180
Modèle de zone 180
Bilan massique sur l'air 180
Bilan thermique 180
Modèles de transfert de chaleur 182
Transfert de chaleur par conduction dans les parois 182
Échanges par rayonnement 183
Rayonnement à l'intérieur du bâtiment 183
Rayonnement à l'extérieur du bâtiment 184
Échanges superficiels par convection 184

Résumé **191**

Abstract **193**

Liste des tableaux

1.1 Propriétés thermophysiques de matériaux de construction 2
1.2 Analyse climatique des pays chauds, *Traité d'Architecture et d'Urbanisme Bioclimatiques [2], Construire en Climat Chaud* 15
1.3 Composition des parois de la Figure(1.5) 20
1.4 Propriétés thermophysiques de matériaux de construction extraits de, [9]. 27

2.1 Catégorie 1 : Matériaux 52
2.2 Catégorie 2 : Aéraulique 52
2.3 Catégorie 3 : Déperditions 52
2.4 Catégorie 4 : Vitrages 53
2.5 Etude des facteurs de sensibilité des paramètres du modèle sur la constante de temps au cours de la période 1 dans les zones 1 et 2 pour des perturbations de plus ou moins 10% 56
2.6 Etude des facteurs de sensibilité des paramètres du modèle sur la constante de temps au cours de la période 2 dans les zones 1 et 2 pour des perturbations de plus ou moins 10% 59
2.7 Paramètres de l'optimisation et leurs domaines de variation 59
2.8 Paramètres de l'optimisation et leurs domaines de variation 61

3.1 *Description des principales hypothèses de simulation pour la maison en béton banché de la plateforme INCAS* 86
3.2 *Bilan des charges internes pour la maison béton banché de la plateforme INCAS* 115
3.3 *Solution trouvée avec la procédure de la figure 3.18* 116
3.4 *Description d'une tranche du bâtiment comprenant deux zones superposées* 120
3.5 *Bilan des charges internes dans le bâtiment de Cargèse* 124
3.6 *Solution trouvée pour le bâtiment de Cargèse* 126

4.1 *Caractéristiques de la maison avec isolation extérieure* 132
4.2 Modes de ventilation classique testés 132

4.3 Résultats de simulation pour les bâtiments à forte et à faible inertie pour les modes de ventilation classique 1, 2 et 3 133
4.4 Valeurs recommandées pour le confort adaptatif d'après la norme 15251134
4.5 Constantes de temps des maisons à isolation intérieure et extérieure . 137
4.6 **Valeurs de** c 138
4.7 *Propriétés thermiques de l'eau à 20°C et à pression constante* 150
4.8 Exploitation des potentiels par les maisons BBC et avant 1974 pour les climats de Chambéry et de Marseille 169
4.9 Taux de couverture des besoins et taux d'exploitation de la ressource en soleil pour un bâtiment BBC et un bâtiment avant 1974 en intégrant une installation solaire. 170

4.10 Propriétés thermophysiques des matériaux de construction de la maison Béton Banché (BB) 179
4.11 Propriétés de surface des parois opaques 180
4.12 Propriétés des vitrages 181
4.13 Propriétés des volets roulants 182
4.14 Scénario des volets roulants pour la période d'hiver 182
4.15 Dimensions des ouvertures comprenant vitrages + cadre 183
4.16 *Coefficients et exposants empiriques pour l'équation 4.66 [3]* 185

Table des figures

1.1 *Propagation de la chaleur pour différents matériaux en fonction du temps de diffusion* 3
1.2 *Ajustement par la somme des moindres carrés de l'équation 1.14 à la réponse en température d'un modèle de bâtiment en différences finies.* 8
1.3 *Déphasage et amortissement de la température extérieure* 10
1.4 *Carte du monde avec les différentes zones climatiques chaudes [2]* . . 16
1.5 *Description de quatre types de mur de compositions différentes [38]* . 19
1.6 *Comparaison des taux de couverture des besoins de chauffage et d'exploitation des ressources en soleil pour les bâtiments BBC et avant 1974 pour le climat de Marseille et de Chambéry* 23
1.7 *Méthodologie de sélection des matériaux de construction* 24
1.8 *Diagramme Conductivité-Diffusivité. Ashby [8]* 26
1.9 *Principe du couplage de GenOpt à la plateforme de simulation SimSPARK [24]* 32

2.1 *Plateforme INCAS, INES, Le Bourget-du-Lac* 36
2.2 *Maison en béton banché avec isolation par l'extérieur* 38
2.3 *Composition des murs de la maison béton avec isolation extérieure* . . 38
2.4 *Façade SUD de la maison BB* 39
2.5 *Mat équipé de capteurs de température* 41
2.6 *Boule noire* 41
2.7 *Campagne de mesure du 4 au 14-Fév : Phase de descente* 43
2.8 *Campagne de mesure du 14 au 22-Fév :Phase de remontée* 44
2.9 *Evolution de l'ensoleillement global du 4 au 22-Fév* 46
2.10 *Evolution de la température extérieure et de la température de vide sanitaire du 4 au 22-Fév* 47
2.11 *Plan du rez-de-chaussée dans la maison BB* 48
2.12 *Plan de l'étage dans la maison BB* 48
2.13 *Comparaison de la simulation de base avec les mesures du 4 au 22-Fév* 49
2.14 *Evolution de la puissance de chauffage du 4 au 22-Fév* 50
2.15 *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 1 dans la zone 1* 54

2.16 *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 1 dans la zone 2* 55
2.17 *Effet non symétrique de la conductivité du polystyrène* 57
2.18 *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 2 dans la zone 1* 58
2.19 *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 2 dans la zone 2* 58
2.20 *Description de la procédure d'optimisation par le couplage de* SIMSPARK *avec GenOpt* 60
2.21 *Optimisation de la somme des moindres carrés en variant les huit paramètres les plus influents sur la constante de temps* 62
2.22 *Optimisation de la somme des moindres carrés en variant les 9 paramètres les plus influents sur la constante de temps* 62

3.1 *Modélisation d'une zone de bâtiment* 68
3.2 *Scénario de ventilation en été* 79
3.3 *Températures intérieures des deux zones de la maison en béton banché évaluées par le modèle CoSPARK et le modèle SimSPARK respectivement pour un débit de ventilation nocturne V_n=3 vol/h et pour des charges internes de 1.5 W/m^2 pour le RDC et 2 W/m^2 pour l'étage.* 88
3.4 *Températures intérieures des deux zones de la maison en béton banché évaluées par le modèle CoSPARK et le modèle SimSPARK respectivement pour un débit de ventilation nocturne V_n=3 vol/h et pour des charges internes de 7.5 W/m^2 pour la RDC et 5 W/m^2 pour l'étage.* 88
3.5 *Températures intérieures des deux zones de la maison en béton banché évaluées par le modèle CoSPARK et le modèle SimSPARK respectivement pour un débit de ventilation nocturne V_n=3 vol/h et pour des charges internes de 15 W/m^2 pour le RDC et 10 W/m^2 pour l'étage.* 89
3.6 *Effet du débit de ventilation nocturne sur l'inconfort, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure* 93
3.7 *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une inertie "moyenne" (τ =100 h) et une forte inertie (τ =800 h) lorsque V_n varie de 0.6 à 10 vol/h* 94
3.8 *Effet de la variation de la moyenne de température extérieure en été sur l'inconfort, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure et la moyenne de température extérieure en hiver sur les besoins de chauffage* 95
3.9 *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une inertie "moyenne" (τ =100 h) et une forte inertie (τ =800 h) lorsque $\tilde{T}_o$ varie de 22 à 29 ° C.* 96

3.10 *Effet de la l'écart de température jour/nuit extérieure en été sur l'inconfort, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure et l'écart de température jour/nuit extérieure en hiver sur les besoins de chauffage* 98
3.11 *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une faible inertie (τ =25 h) et une inertie moyenne (τ =200 h) lorsque ΔT_o varie de 2 à 17 ° C.* 99
3.12 *Effet du coefficient d'échange global du bâtiment sur l'inconfort, les besoins de chauffage, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure* 100
3.13 *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une faible inertie (τ = 25 h) et une forte inertie (τ = 800 h) lorsque U_{bat} varie de 0.06 à 6 $W/(m^2.K)$.* 101
3.14 *Effet des charges internes sur l'inconfort, les besoins de chauffage, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure* 103
3.15 *Evolution de la température intérieure et la température opérative pour une inertie moyenne (τ =100 h) et une forte inertie (τ =800 h) lorsque les charges internes varient de 0 à 16 W/m^2* 104
3.16 *Schématisation du problème direct* 106
3.17 *Schématisation du problème inverse* 107
3.18 *Evaluation des constantes de temps $\{\tau_j\}$ et des coefficients de transmission $\{U_{bat,j}\}$ du bâtiment par optimisation* 110
3.19 *Représentation de la température extérieure moyenne $\tilde{T}_o$ et de l'écart de température jour/nuit ΔT_o pour le climat de Chambéry* 111
3.20 *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en été pour le climat de Chambéry* 112
3.21 *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en hiver pour le climat de Chambéry* 112
3.22 *Evolution de l'éclairement global et de ses composantes directe et diffuse pour Chambéry - fichier météo type tm2* 113
3.23 *Flux solaires transmis $E_{tr,f}$ au RDC avec prise en compte des casquettes en W/m^2* 114
3.24 *Distribution du flux solaire total transmis en W/m^2 de plancher durant les périodes d'été et d'hiver* 115
3.25 *Résultats de l'optimisation pour la maison individuelle - RDC* 117
3.26 *Résultats de l'optimisation pour la maison individuelle - Etage* 118
3.27 *Coupe verticale du bâtiment côté sud* 119
3.28 *Représentation de la température extérieure moyenne $\tilde{T}_o$ et de l'écart de température jour/nuit ΔT_o pour le climat de Cargèse* 121

3.29 *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en été pour le climat de Cargèse* 122
3.30 *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en hiver pour le climat de Cargèse* 122
3.31 *Evolution de l'éclairement global et de ses composantes directe et diffuse pour Cargèse - fichier météo type tm2* 123
3.32 *Flux solaire transmis $E_{tr,f}$ au RDC avec prise en compte des casquettes en W/m^2* 123
3.33 *Distribution du flux solaire total transmis en W/m^2 de plancher durant les périodes d'été et d'hiver* 124
3.34 *Résultats de l'optimisation pour le bâtiment collectif de Cargèse* . . . 125

4.1 *Schéma de la maison en béton banché avec isolation par l'extérieur, Plateforme INCAS, France* 131
4.2 *Schéma de la maison en béton banché avec isolation par l'intérieur* . 131
4.3 *Algorithme du contrôle adaptatif* 136
4.4 *Evolution de la constante de temps en fonction du débit de ventilation nocturne* 138
4.5 *Effet de $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ sur les performances énergétiques de la maison avec isolation par l'extérieur* 140
4.6 *Effet de $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ sur les performances énergétiques de la maison avec isolation par l'intérieur* 141
4.7 *Comparaison entre les modes de ventilation adaptative et classique sur la maison à forte inertie* 143
4.8 *Comparaison entre les modes de ventilation adaptative et classique sur la maison à faible inertie* 143
4.9 *Comparaison des débits entre le mode de ventilation classique 2 (Tableau (4.2)) et le mode de ventilation adaptative durant une période d'intersaison sur la maison à forte inertie* 144
4.10 *Comparaison des débits entre le mode de ventilation classique 3 (Tableau (4.2)) et un mode de ventilation adaptative durant une période d'intersaison sur la maison à faible inertie.* 146
4.11 *Coupe verticale du plancher chauffant* 149
4.12 *Vue en 3D de l'installation des planchers chauffants pour un bâtiment de la plateforme INCAS* 151
4.13 *Schéma du capteur solaire plan* 153
4.14 *Bilan énergétique global du capteur solaire plan* 154
4.15 *Prise en compte de l'inclinaison du capteur* 156
4.16 *Bilan énergétique externe du capteur solaire plan* 158
4.17 *Coupe de l'ensemble absorbeur-tube* 159
4.18 *Schéma de principe des ballons* 162

4.19 *Mode 1* 164
4.20 *Mode 2* 165
4.21 *Mode 4* 166
4.22 *Mode 6* 166
4.23 *Fonctionnement de l'installation solaire sur le bâtiment BBC Double Murs (zone 1) du 3 au 6 Février pour le climat de Chambéry* 172
4.24 *Taux de couverture et taux d'exploitation des bâtiments BBC et avant 1974 pour les climats de Chambéry et Marseille, avec et sans Installation Solaire (IS)* 173

Nomenclature

Lettres minuscules

Notation	Unité	Signification
a	[-]	Albedo
b	[$W.m^{-2}.K^{-1}.s^{\frac{1}{2}}$]	Effusivité thermique
c	[$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	Chaleur spécifique massique ou capacité calorifique
e	[m]	Epaisseur d'un composant de bâtiment
f	[$-$]	Facteur d'amortissement d'une onde thermique
f	[$-$]	Coefficient de frottement
h	[$W.m^{-2}.K^{-1}$]	Coefficient d'échange par convection
q	[$vol.h^{-1}$]	Taux de renouvellement d'air
t	[s]	Temps
h_t	[$W.K^{-1}$]	Coefficient de transfert thermique entre le fluide et la dalle

Lettres majuscules

Notation	**Unité**	**Signification**
A	[m^2]	Aire d'une surface
C	[$-$]	Constante d'intégration
D_{te}	[m]	Diamètre extérieur d'un tuyau
D_{ti}	[m]	Diamètre intérieur d'un tuyau
E	[$W.m^{-2}$]	Charges internes
$E_{tr,f}$	[$W.m^{-2}$]	Part du flux solaire incident sur une façade f
F_{pm}	[$-$]	Part du flux solaire demeurant après la prise en compte des protections solaires et des masques
F_s	[$-$]	Facteur solaire
H_{ii}	[-]	Fonction de transfert
L	[$W.m^{-2}.K^{-1}$]	Coefficient générique de déperditions au niveau d'une zone thermique
l	[m]	Longueur du tuyau noyé dans le plancher chauffant
Nu	[$-$]	Nombre de Nusselt
Pr	[$-$]	Nombre de Prandlt
P_{tr}	[W]	Puissance transportée par le fluide caloporteur vers la dalle
P_{dis}	[W]	Puissance dissipée dans la dalle par le fluide caloporteur
Q	[$J.K^{-1}$]	Capacité calorifique d'un composant de bâtiment
$\dot{Q}_u$	[W]	Puissance utile fournie par un collecteur
$\dot{Q}_s$	[W]	Flux solaire incident sur la surface d'un collecteur
$\dot{Q}_{l,o}$	[W]	Pertes optiques
$\dot{Q}_{l,t}$	[W]	Pertes thermiques
Q_{el}	[$KWh.an^{-1}$]	Consommation électrique annuelle du ventilateur
Q_{inf}	[vol/h]	Débit volumique d'infiltrations
Q_p	[W]	Consommation énergétique de chauffage ou de climatisation
R	[$K.W^{-1}$]	Résistance thermique d'un élément de bâtiment
Re	[$-$]	Nombre de Reynolds
R_t	[$K.W^{-1}$]	Résistance thermique du tuyau noyé dans le plancher chauffant
R_{ft}	[$K.W^{-1}$]	Résistance thermique entre le fluide et le tuyau
R_{se}	[$K.m^2.W^{-1}$]	Résistance à la surface extérieure
R_{si}	[$K.m^2.W^{-1}$]	Résistance à la surface intérieure

Notation	**Unité**	**Signification**
S_x	[−]	Indice de sensibilité du paramètre x
R_x	[−]	Indice de sensibilité absolu
T	[°C]	Température
T_C	[°C]	Température de confort
T_E	[°C]	Élévation en température intérieure due aux charges internes
T_{RM}	[°C]	Moyenne glissante de température (Running Mean Temperature)
T_{DM}	[°C]	Moyenne journalière de température (Daily Mean Temperature)
V	[m^3]	Volume
V	[vol/h]	Débit de ventilation
X, Z	[m^{-2}.K.W^{-1}]	Admittances d'un composant de bâtiment
X_s	[h.an^{-1}]	Nombre d'heures où le chauffage et la ventilation forte fonctionnent simultanément
Y	[m^{-2}.K.W^{-1}]	Transittance d'un composant de bâtiment
TL	[h]	Temps Local
OH	[h.an^{-1}]	Indice d'inconfort
HL	[-]	Demie Vie
CTB	[J.K^{-1}]	Capacité calorifique totale d'un bâtiment
DGB	[W.K^{-1}]	Capacité calorifique totale d'un bâtiment
GLO	[−]	Grande Longueur d'Onde
T_0	[°C]	Température initiale
T_f	[°C]	Température finale
T_i	[°C]	Température d'air intérieur
T_o	[°C]	Température extérieure
UA	[W.K^{-1}]	Coefficient de déperditions global d'un composant de bâtiment
U_{bat}	[W.K^{-1}]	Coefficient de déperdition du bâtiment défini par la RT 2005
U_v	[W.m^{-2}.K^{-1}]	Coefficient de déperditions global au niveau d'une fenêtre

Lettres grecques

Notation	Unité	Signification
α	[$m^2.s^{-1}$]	Diffusivité thermique
λ	[$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Conductivité thermique
λ_o	[$-$]	Coefficient d'échange convectif global à la surface extérieure
λ_i	[$-$]	Coefficient d'échange convectif global à la surface intérieure
ρ	[$kg.m^{-3}$]	Masse Volumique
θ	[°C]	Température de surface d'une paroi
ϕ	[$W.m^{-2}$]	Flux à la surface d'une paroi (admittances)
ϕ	[h]	Déphasage
ω	[$rad.s^{-1}$]	Pulsation
τ	[h]	Constante de temps du bâtiment
τ_{couv}	[$-$]	Taux de couverture des besoins
$\tau_{exploitation}$	[$-$]	Taux d'exploitation des ressources énergétiques
τ_{vi}	[$-$]	Transmittance du vitrage
τ_{vo}	[$-$]	Transmittance du volet roulant
Π	[W]	Potentiel énergétique
η	[-]	Efficacité de la VMC double flux
η	[-]	Efficacité du collecteur
$\gamma, \gamma', \sigma, \sigma', \psi$	[-]	Nombres adimensionnels
μ	[$kg.m^{-1}.s^{-1}$]	Viscosité dynamique

Indices

Notation	Signification
a	Relatif à l'air
cons	Consigne de chauffage ou de climatisation
e	Relatif à un élément
e	Relatif à l'extérieur (admittance)
f	Relatif au fluide caloporteur
i	Relatif à l'intérieur
j	Relatif à la période diurne
n	Relatif à la période nocturne
p	Relatif à une paroi
t	Relatif à un tuyau
v	Relatif au vitrage

Introduction

Le secteur du bâtiment en France représente le plus gros consommateur d'énergie et il est quasiment confirmé qu'il est responsable de 25 % des émissions de CO_2 et de 43 % de la consommation d'énergie finale[1]. Face à la réalité indéniable du dérèglement climatique et de l'épuisement des ressources en énergie fossile, les pouvoirs publics se sont engagés par la mise en oeuvre du Grenelle de l'Environnement dans une politique forte pour réduire ces émissions de gaz à effet de serre. D'ailleurs selon la commission de l'industrie du Parlement Européen[2], après le 31 décembre 2018, tous les nouveaux bâtiments construits devront être en mesure de produire leur propre énergie.

D'autre part dans les pays à climat chaud, le recours aux systèmes de climatisation sont souvent à l'origine de pics de consommations énergétiques très élevés conduisant parfois à des pénuries d'électricité. Durant le premier semestre de l'année 2011, la consommation électrique chinoise a été estimée à plus de 2000 millions de kWh, soit 12.2 % de plus qu'en 2010 à la même période[3], cette hausse résultant de l'importante utilisation de systèmes de climatisation en raison des conditions climatiques.

Afin de relever le défi des bâtiments zero énergie, l'inertie thermique constitue un atout essentiel pour stocker l'énergie reçue par le bâtiment et la restituer quand cela est nécessaire. En hiver elle permet d'emmagasiner les apports gratuits issus du rayonnement solaire et contribue à les conserver plus longtemps à l'intérieur du bâtiment collaborant de cette manière à réduire les consommations énergétiques liées au chauffage à condition qu'elle soit accompagnée d'une isolation performante. En été, elle garantit un meilleur confort en accumulant la chaleur au cours de la journée et en l'évacuant la nuit par la ventilation concourant de cette façon à réduire les pics de température à l'intérieur du bâtiment le jour suivant. De plus, l'inertie a la propriété de déphaser ces pics de températures intérieures, ce qui d'autant plus remédie à la limitation des surchauffes. Elle permet alors de réduire considérablement les consommations électriques et les émissions de CO_2 liées à la climatisation.

[1] Grenelle Environnement le défi du bâtiment, 2009

[2] http ://www.developpement-durable.gouv.fr/Production-par-les-batiments-de.html

[3] Forbes magazine, Août 2011, *China Braces for Escalating Power Shortages*

L'OPECST[4] évoque dans l'un de ses récents rapports [18] l'importance d'intégrer le besoin spécifique du confort d'été à la réglementation par l'inertie du bâti et prévoit son évolution dans la prise en compte des codes de calculs réglementaires.

Il est important de souligner qu'une construction à forte inertie n'est pas forcément adaptée au climat. En effet, une exploitation optimale de l'inertie thermique dépend en grande partie de la nature des interactions des matériaux de construction avec l'environnement. Ces interactions sont liées à de nombreux paramètres tels que leurs propriétés thermophysiques, leur disposition à l'intérieur de l'enveloppe, les caractéristiques architecturales du bâtiment ainsi que les conditions climatiques. Actuellement, très peu de méthodes existantes permettent de sélectionner les matériaux de construction de façon appropriée alors qu'ils ont un effet fondamental sur le comportement énergétique du bâtiment.

La motivation de ce travail a été en premier lieu de contribuer à pallier à l'absence de méthodologie permettant de concevoir un bâtiment en phase amont d'un projet. Les outils de simulation thermique dynamique dont on dispose aujourd'hui permettent de modéliser de façon assez précise les transferts de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment mais leur niveau de finesse n'est pas nécessairement adapté aux besoins des concepteurs en particulier durant la phase amont d'un projet. Pour cela, un outil simplifié à été réalisé sur la base d'un modèle thermique facilement exploitable pour répondre de manière efficace aux questions concernant le caractère inertiel de la construction, la stratégie de rafraîchissement à adopter pour le confort d'été ainsi que les mesures architecturales favorables au confort d'hiver. Cet outil se doit d'être cohérent avec les modèles de simulation thermique dynamique plus élaborés (ou plus fins) et c'est pourquoi on définira un modèle de référence en différences finies sur lequel on s'appuiera pour construire un modèle simplifié.

Le premier chapitre sera consacré à la caractérisation de l'inertie thermique et à la présentation de son intérêt dans la construction en climat chaud et en climat tempéré. On présentera le rôle des matériaux dans la conception et on proposera un raisonnement qui servira à leur sélection.

Dans le second chapitre, on présentera un modèle de simulation thermique dynamique développé dans l'environnement SimSPARK. Les résultats de ce modèle feront l'objet d'une comparaison avec les mesures issues de la plateforme expérimentale INCAS pour justifier sa pertinence dans la prédiction du comportement énergétique des bâtiments. On procédera également à une analyse de sensibilité sur la constante de temps du bâtiment afin de sélectionner les paramètres du modèle les plus influents sur son comportement.

Par la suite, on développe un outil simplifié appelé CoSPARK qui décrit la réponse en température dans le cas d'un bâtiment en évolution libre et dans le cas d'un maintien à une température de consigne. On étudiera les effets des paramètres

[4]Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques

sur sa réponse et on réalisera une comparaison des réponses du modèle CoSPARK avec celles du modèle de référence SimSPARK. En mettant en oeuvre une démarche fondée sur la définition d'un problème inverse, on s'attardera sur deux applications : dans la première il s'agira d'un bâtiment résidentiel situé à Chambéry et dans l'autre d'un logement collectif situé à Cargèse.

Le dernier chapitre exposera deux stratégies visant à exploiter l'activation de l'inertie thermique à travers deux types d'applications : dans le premier cas, on abordera l'amélioration des performances d'un bâtiment par une ventilation nocturne *adaptative* à l'aide d'un algorithme de contrôle. On étudiera le cas de deux constructions respectivement à faible et à forte inertie. Pour le second type d'application, on illustrera l'intérêt du couplage d'un bâtiment avec une installation solaire afin de réduire ses besoins de chauffage en hiver par une meilleure exploitation de l'énergie à travers trois types de planchers chauffants. On introduira des indicateurs qui permettront de quantifier pour un bâtiment les ressources en énergie solaire exploitables et la couverture des besoins de chauffage.

Chapitre 1

Enjeux énergétiques de l'inertie thermique des bâtiments

Dans ce chapitre, on cherche avant tout à définir ce qu'est l'inertie thermique et à faire un recensement des méthodes existantes afin de mieux comprendre cette propriété des bâtiments. On s'intéresse à l'inertie comme stratégie dans l'amélioration du confort d'été en dressant une analyse des climats chauds et des modes constructifs qui leur sont adaptés. Par ailleurs, on étend notre analyse à la conception dans les climats tempérés et à l'intérêt de l'inertie pour favoriser les apports gratuits et le stockage des apports solaires. Pour finir, on établit une mise en commun des notions évoquées dans ce chapitre pour décrire la fonction des matériaux dans la construction et tenter de créer une méthodologie pour les sélectionner dans la phase de conception. On s'attarde également sur la présentation des outils de simulation qui ont été utilisés lors de ce travail.

1.1 Caractérisation de l'inertie

La notion d'inertie thermique n'est pas facile à appréhender. La plupart du temps, elle est définie comme étant la vitesse avec laquelle le bâtiment réagit à des perturbations extérieures. La réponse du bâtiment face aux sollicitations dépend en grande partie des propriétés thermiques des matériaux qui le constituent. D'après leurs capacités à stocker et à véhiculer la chaleur, le bâtiment réagira différemment, d'où le problème couplé de la conductivité et de la capacité thermique, ce qui conduit à l'introduction des deux notions de diffusivité et d'effusivité.

1.1.1 Propriétés thermiques des matériaux

1.1.1.1 Diffusivité thermique

La propagation de la chaleur dans un matériau dépend de sa *diffusivité thermique*, qui est le rapport de la conductivité thermique λ en $W/(m.K)$ sur la capacité calorifique volumique :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \tag{1.1}$$

avec ρ la masse volumique en kg/m^3 et c la capacité calorifique en $J/(kg.K)$. La capacité calorifique volumique est le produit ρc exprimé en $J/(m^3.K)$. La diffusivité se mesure en m^2/s et détermine la vitesse avec laquelle la chaleur se propage dans le matériau.

Plus le matériau a une conductivité élevée et une faible capacité calorifique, plus la diffusivité est élevée.

La relation entre l'épaisseur sollicitée et le temps de diffusion de la chaleur à l'intérieur d'un composant de bâtiment homogène se formule en faisant le produit de la capacité calorifique par la résistance thermique de ce composant :

$$t = Q.R = (e.\rho c).\left(\frac{e}{\lambda}\right) \tag{1.2}$$

$$soit,\ t = \frac{e^2}{\alpha} \tag{1.3}$$

Matériaux de construction	$\lambda\ (W/m.K)$	$\rho\ (kg/m^3)$	$c\ (J/kg.K)$	$\alpha\ (m^2/s)$
Béton lourd	1.7	2200	1000	7.72 x 10^{-7}
Béton léger	1.0	1500	1000	6.77 x 10^{-7}
Bloc pierre	1.4	1895	1000	7.38 x 10^{-7}
Brique pleine	1.0	1850	1000	5.4 x 10^{-7}
Bois lourd (hêtre, chêne)	0.2	800	2700	9.25 x 10^{-8}
Bois léger (sapin, épicéa)	0.14	540	2400	1.08 x 10^{-7}
Granite	2.8	2600	1000	1.07 x 10^{-6}

Table 1.1 – Propriétés thermophysiques de matériaux de construction [a]

[a] http ://www.maison.com/architecture/maison-basse-consommation

Sur une période t donnée, la chaleur pénétrera davantage dans un matériau ayant une diffusivité plus importante (Figure (1.1)). Par exemple, en supposant une durée d'ensoleillement sur un cycle journalier égale à 12 h, l'*épaisseur caractéristique* atteinte est de 18 cm pour le béton lourd, de 6.7 cm pour le bois lourd et de 21.6 cm pour le granite.

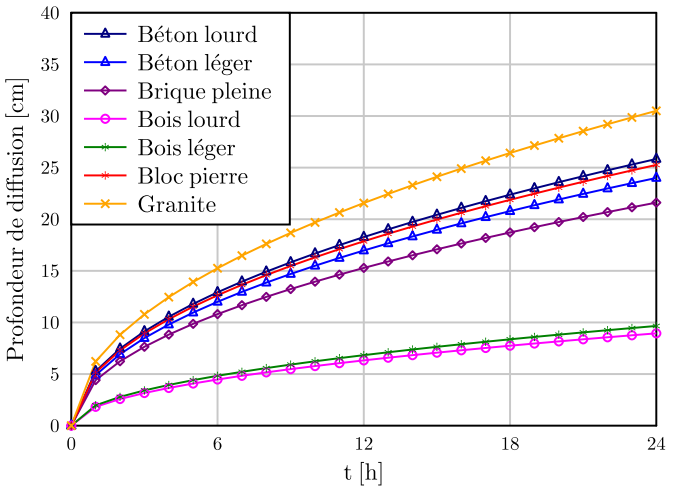

Figure 1.1 – *Propagation de la chaleur pour différents matériaux en fonction du temps de diffusion*

1.1.1.2 Effusivité thermique

L'effusivité est la capacité d'un matériau à absorber l'énergie et la restituer. Elle évolue en fonction de la conductivité thermique et de la capacité calorifique et s'exprime en $W.s^{(1/2)}/(m^2.K)$. Elle est calculée par la relation :

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \tag{1.4}$$

Le comportement ou la réaction des couches superficielles des parois, en particulier au niveau des surfaces à l'intérieur de la pièce est caractérisé par l'effusivité du matériau qui les constituent.

À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur. Ainsi une effusivité élevée limite les valeurs du gradient de température.

La diffusivité et l'effusivité thermiques donnent une information importante sur la transmission de la chaleur à l'échelle d'un matériau. Lorsqu'on passe à l'échelle des parois multicouches, l'assemblage des matériaux a aussi une influence non négligeable qui modifie totalement le comportement énergétique global de celles-ci. On introduit alors d'autres paramètres servant à les caractériser comme l'admittance, le déphasage, la constante de temps et la capacité calorifique.

1.1.2 Méthode des admittances

La méthode des admittances a été développée en Grande Bretagne dans les années 70. Elle sert à caractériser l'inertie thermique d'un bâtiment en considérant la réponse thermique à des sollicitations harmoniques. L'admittance mesure la capacité d'un élément de bâtiment à stocker et restituer l'énergie sur un cycle journalier et peut être définie comme le rapport de la variation de flux sur la variation de température durant une période de 24 h. Cette méthode a été développée par Loudon [23] puis par Pertherbridge [28] avant d'être adoptée par le CIBS en 1975 qui aujourd'hui est devenu le CIBSE (the Chartered Institution of Building Services Engineers).

Milbank [26] analyse la réponse thermique d'un bâtiment à une sollicitation périodique énergétique en utilisant la démarche des admittances. Il classifie les solutions aux équations, qui représentent l'évolution de la température due au phénomène de conduction à travers les éléments des bâtiments en deux types : dans le premier cas, la variation temporelle de la température et des flux énergétiques sont en régime périodique et se répètent au cours des journées tandis que dans le second cas, elles varient de façon imprévisible d'un jour à l'autre. Les solutions dans le premier cas ont la forme la plus simple et sont à la base de la méthode des admittances. Dans le second cas, les solutions sont plus complexes et sont à la base d'autres techniques comme les facteurs de réponse.

Les admittances sont des nombres complexes caractérisant le comportement thermique dynamique d'un composant de bâtiment. La norme ISO 13786 [1] fournit des méthodes pour le calcul de ces caractéristiques. Elle spécifie également l'information requise sur les matériaux de construction sachant que ces caractéristiques sont dépendantes de la façon dont les matériaux sont combinés pour constituer des composants de bâtiment.

Ces méthodes sont basées sur la modélisation du composant de bâtiment par la méthode des quadripôles issue de l'écriture du problème thermique sous forme de produits de matrices de transfert qui à l'origine est utilisée dans le domaine de l'électricité.

Le principe consiste, par l'intermédiaire de l'équation de la chaleur et la transformée de Fourier, à relier les flux et les températures des deux côtés d'une paroi homogène par la relation suivante [14] :

$$\begin{pmatrix} \theta_e \\ \phi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{pmatrix}$$

avec

$$\begin{aligned} A &= cosh\left(e\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right), \quad B = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}}\ sinh\left(e\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) \\ C &= b\sqrt{j\omega}\ sinh\left(e\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right), \quad D = cosh\left(e\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) \end{aligned} \tag{1.5}$$

Les couples (θ_e, ϕ_e) et (θ_i, ϕ_i) sont les variables d'état aux surfaces extérieure et intérieure. a est la diffusivité en m^2/s du matériau, b l'effusivité en $W.s^{(1/2)}/(m^2.K)$ et e l'épaisseur en m.

Pour une paroi multicouche, la matrice de transfert résultante du produit des matrices élémentaires de l'ensemble des couches s'écrit tel que :

$$M = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} .. \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix}$$

Une couche purement résistive (les couches superficielles par exemple) aura une matrice élémentaire égale à :

$$M = \begin{pmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad avec \quad R = R_{si} \quad ou \quad R_{se}.$$

Une couche purement capacitive s'écrit

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ j\omega Q & 1 \end{pmatrix}$$

Lorsque la paroi est symétrique, les éléments H_{12} et H_{21} sont identiques.

Les admittances dynamiques périodiques de la paroi s'expriment par :

$$X = \frac{H_{22}}{H_{12}}, \quad Y = \frac{1}{H_{12}}, \quad Z = \frac{H_{21}}{H_{12}} \tag{1.6}$$

X et Z représentent les admittances des côtés extérieur et intérieur et Y la transmittance. X, Y et Z s'expriment en $W/(m^2.K)$.

Les surfaces intérieures de parois exposées à l'air et constituées de matériaux lourds comme le béton, la brique ou la pierre ont une importante capacité à stocker les flux énergétiques périodiques. Leurs admittances sont alors élevées et en conséquence, les fluctuations de la température dans les pièces sont réduites.

1.1.3 Constante de temps d'un bâtiment

La constante de temps du bâtiment représente le rapport entre la somme de l'énergie emmagasinée dans le bâtiment et la somme algébrique des flux transmise de l'intérieur vers l'extérieur pour un écart de température de 1°C. Ainsi la constante de temps d'un bâtiment caractérise le temps de réponse de la température intérieure et son aptitude à résister aux perturbations externes.

1.1.3.1 Analogie avec les circuits électriques

Givoni[10] et Hoffman[17] ont introduit le calcul de la constante de temps d'un bâtiment dérivant de l'analogie entre le flux de chaleur diffusé dans les matériaux de construction correspondant à un circuit "thermique" et la constante de temps d'un circuit électrique, comme étant un unique paramètre pouvant être utilisé pour évaluer la performance thermique d'un bâtiment. Elle est définie comme étant la chaleur emmagasinée dans une enceinte, y compris l'air intérieur, par unité de chaleur transmis vers ou depuis l'extérieur par la ventilation.

La constante de temps d'un élément de bâtiment est la somme du produit de la capacité calorifique , Q, et de la résistance, R, des différentes couches de l'élément [12].

Si on considère un mur à n-couches, la quantité QR de la $j-$ème couche à partir de la surface extérieure est :

$$(QR)_j = [R_{se} + (1/\lambda)_1 + ... + ((1/2)/\lambda)_j] * e_j * (\rho * c)_j \tag{1.7}$$

avec R_{se} la résistance de surface extérieure en $(m^2.K)/W$, λ_j,ρ_j, c_j les propriétés thermophysiques de la couche j, et e_j l'épaisseur de la couche en m.

La quantité (QR) de l'élément de bâtiment est la somme des quantités (QR) de ses n couches

$$(QR)_e = \sum_n (QR)_j \tag{1.8}$$

Sachant que la résistance totale de la paroi est égale à

$$R_T = \sum_n \frac{e_j}{\lambda_j}, \tag{1.9}$$

la capacité totale de l'élément Q_e en Wh/K équivaut au rapport $(QR)_e$ par sa résistance totale :

$$Q_e = \frac{(QR)_e}{R_T} \tag{1.10}$$

La capacité calorifique totale du bâtiment (CTB) en J/K est définie alors comme étant la quantité d'énergie stockée par degré d'écart de température maintenue entre l'intérieur et l'extérieur. La quantité (CTB) est considérée comme la somme des capacités Q_e des m éléments constituants le bâtiment et de la capacité calorifique de l'air intérieur :

$$CTB = \sum_m Q_e + \rho_a c_a * V_i \tag{1.11}$$

où $\rho_a c_a$ est le produit de la densité et de la capacité calorifique de l'air et V_i est le volume de l'espace considéré.

Le coefficient global de déperditions DGB en W/K représentant la quantité de chaleur perdue par degré d'écart de température est exprimé par

$$DGB = \sum_m (UA)_e + q_a * \rho_a c_a \tag{1.12}$$

où $(UA)_e$ est le coefficient de déperditions d'un élément "e" et q_a est le débit de ventilation en vol/h.

Le paramètre DGB est plus couramment appelé U_{bat}.

On exprime la constante de temps du bâtiment comme étant le rapport de la capacité calorifique du bâtiment CTB par le coefficient de déperdition global DGB ou autrement dit, du rapport de l'énergie stockée sur l'énergie perdue par les déperditions.

$$\tau = \frac{\sum_m Q_e + \rho_a c_a * V_i}{\sum_m (UA)_e + q_a * \rho_a c_a} \tag{1.13}$$

1.1.3.2 Calcul de la constante de temps par une méthode dynamique

La constante de temps peut aussi être évaluée à partir de la réponse d'un modèle de simulation thermique dynamique du bâtiment.

En imposant au système bâtiment une variation d'un régime stationnaire à un autre, (autrement dit en imposant un créneau en température extérieure), la constante de temps est calculée en ajustant l'équation (1.14) avec la température intérieure T_i obtenue par la méthode des moindres carrés. L'équation 1.14 exprime la réponse thermique d'un système en état de décharge (analogie avec les circuits électriques) dans lequel on retrouve la constante de temps du circuit dans le terme

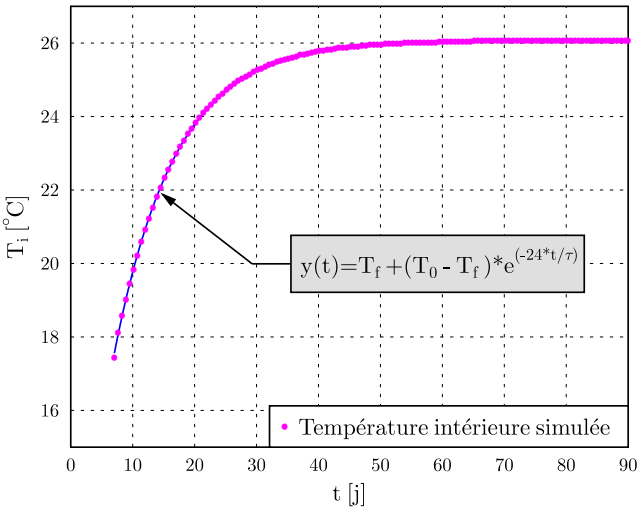

Figure 1.2 – *Ajustement par la somme des moindres carrés de l'équation 1.14 à la réponse en température d'un modèle de bâtiment en différences finies.*

exponentiel. T_0 et T_f sont les températures d'air intérieures initiale et finale avant et après la fluctuation de la température extérieure.

$$y(t) = T_f + (T_0 - T_f) * e^{(-24t/\tau)} \tag{1.14}$$

avec t et τ exprimés en heures.

La minimisation de l'équation (1.15) permet de calculer la constante de temps du bâtiment.

$$Err(t) = \sum T_i - [T_f + (T_0 - T_f) * e^{(-24t/\tau)}] \tag{1.15}$$

La température T_i a été calculée en ayant recours à un modèle de bâtiment développé avec la méthode des différences finies pour résoudre un ensemble d'équations différentielles exprimant le transfert de chaleur par conduction dans un élément d'envelope multi-couches. Ces équations sont couplées avec le bilan énergétique du volume d'air intérieur, en tenant compte des fluctuations aux surfaces intérieure et extérieure. Les échanges de chaleur par convection, par rayonnement courtes et grandes longueurs d'ondes aux surfaces sont considérés. Le modèle est développé dans l'environnement de simulation SimSPARK [21].

1.1.4 Capacité calorifique d'un bâtiment

1.1.4.1 Capacité calorifique journalière

En se basant sur le principe de la méthode des admittances, Balcomb [19] introduit le concept de *Capacité Calorifique Journalière* définie comme étant la quantité

d'énergie stockée par le bâtiment durant la première moitié du cycle journalier et restituée à l'intérieur au cours de la seconde moitié, ou encore la quantité de chaleur stockée par degré d'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Elle varie en fonction de l'épaisseur et des propriétés thermophysiques des matériaux. La capacité calorifique journalière (DHC) en Wh/K d'une pièce (ou d'un bâtiment) est la somme des capacités calorifiques journalières des parois qui la délimitent :

$$DHC = \Sigma A_i (dhc)_i \tag{1.16}$$

1.1.4.2 Capacité calorifique apparente et effective

Antonopoulos [4] développe le concept de *capacité thermique apparente* et *capacité thermique effective* d'un bâtiment. La *capacité apparente* est la somme des capacités calorifiques des matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment. La *capacité effective* est la part de la capacité apparente qui réellement contribue au stockage de la chaleur. En se basant sur le même principe que la méthode précédente (section (1.1.3.2)), elle est calculée en ajustant la réponse d'un modèle de bâtiment en différences finies à la réponse analytique de l'équation de la chaleur en mode de "décharge" (Equation (1.14)). L'auteur développe également une corrélation entre ces deux quantités pour différents types de bâtiments. Ultérieurement, il introduit le concept de *capacité thermique surfacique intérieure* correspondant à l'inertie thermique interne. Celle-ci représente la quantité d'énergie stockée dans l'air intérieur, les couches à la surface des parois et les meubles pour 1°C d'écart entre la température intérieure et la température moyenne de l'enveloppe du bâtiment ([5]).

1.1.5 Caractéristiques de la réponse périodique

La température extérieure peut être assimilée à une série de Fourier composée de plusieurs sinusoïdes de fréquence 24 h, 12 h, 6 h, etc. Une bonne approximation de celle-ci peut être faite en n'utilisant que la composante principale correspondant à une fréquence de 24 h. On peut écrire que :

$$T_o = \tilde{T_o} + \ \Delta T_o \ sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \tag{1.17}$$

avec $\tilde{T_o}$ et ΔT_o, respectivement la moyenne et l'amplitude de température extérieure.

La réponse du bâtiment peut être alors caractérisée par deux facteurs : le *déphasage* ϕ et le *facteur d'amortissement* f.

Le déphasage est le temps nécessaire pour que la température intérieure atteigne son maximum à partir du moment où a lieu le pic de température extérieure. Il évolue avec l'inertie du bâtiment.

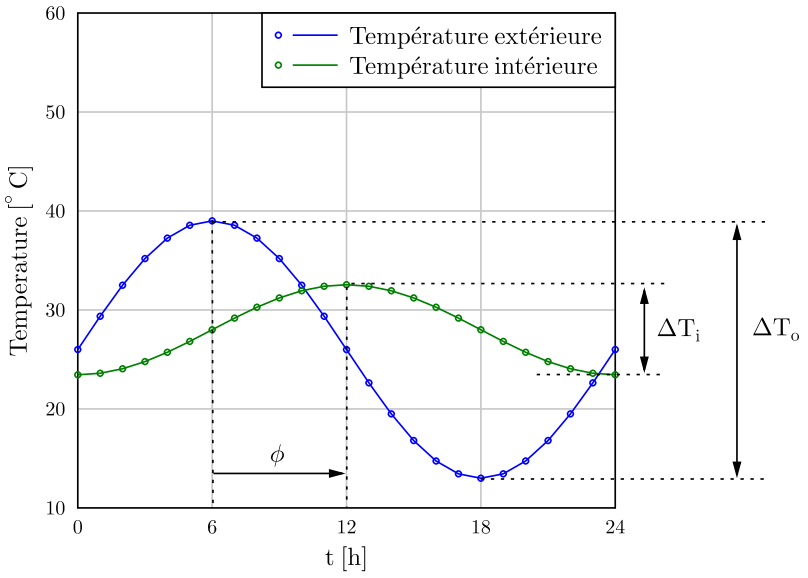

Figure 1.3 – *Déphasage et amortissement de la température extérieure*

$$\phi = t_{T_{i,max}} - t_{T_{o,max}} \quad en[h] \tag{1.18}$$

Le facteur d'amortissement est le rapport des amplitudes de la température intérieure et de la température extérieure. Plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties.

$$f = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_o} \tag{1.19}$$

Ces propriétés de l'enveloppe du bâtiment sont intéressantes car d'une part elles peuvent être évaluées en fonction de la température intérieure et fournissent des informations sur le comportement de celle-ci. D'autre part, elles peuvent aussi être calculées à partir des propriétés thermophysiques des matériaux constituant l'enveloppe.

On peut évaluer le déphasage et le facteur d'amortissement d'une paroi multicouche en se servant des expressions des admittances développées précédemment (section (1.1.2)).

Pour le facteur d'amortissement, il est égal à

$$f = \frac{|Y|}{U_p} \tag{1.20}$$

avec U_p le coefficient d'échange global de la paroi en $W/(m^2.K)$.

Quant au déphasage, il est évalué par

$$\phi = \frac{P}{2\pi}\ arg[Y] \tag{1.21}$$

avec ϕ en h et P = 24 h.

En étudiant le comportement d'une paroi homogène, Ulgen [40] développe les expressions analytiques du déphasage et de l'amortissement en fonction des propriétés du matériau qui la constitue. Il réalise aussi une étude expérimentale de l'effet des conditions extérieures sur le comportement de dix types de murs. Il place le mur entre deux enceintes dont la première représente un environnement extérieur où il reproduit une variation sinusoïdale de la température et la seconde un intérieur de bâtiment où il observe l'effet produit par la première. Il montre à travers une comparaison avec les résultats expérimentaux sur les différents types de murs qu'on arrive plus ou moins à bien approcher les caractéristiques de la réponse périodique en fonction de la composition des parois. Il affirme par ailleurs que les meilleures conditions de confort étaient obtenues pour des murs à forte inertie associés à des couches de matériaux isolants.

Tsilingiris [38] a défini pour une paroi donnée, deux constantes de temps : la constante de temps relative à la surface intérieure de la paroi et celle liée à la surface extérieure. Il montre que pour une paroi donnée, ces deux constantes de temps peuvent être considérablement différentes en fonction de la disposition des matériaux dans la paroi (isolation par l'extérieur, par l'intérieur, en sandwich...). Pour une paroi symétrique, ces deux constantes deviennent égales. Ultérieurement [39], l'auteur fait une analyse des déperditions à travers une paroi isolée soumise d'un côté à la variation des conditions météorologiques et de l'autre à un chauffage intermittent. Il montre que pour des espaces chauffés ou climatisés par intermittence, il est préférable d'utiliser des parois ayant une faible constante de temps relative à la surface intérieure.

Cependant, pour certaines conditions, une forte inertie pourrait s'avérer bénéfique, notamment en présence de forts apports solaires ou encore lorsqu'il est possible d'appliquer une surventilation nocturne.(ajouter références).

Après avoir présenté les différentes propriétés permettant de caractériser l'inertie dans un bâtiment, on va regarder comment elle doit être prise en compte au moment de la conception.

1.2 Rôle de l'inertie thermique dans la conception en climat chaud

1.2.1 Amélioration du confort d'été par la ventilation nocturne

Le rôle de l'inertie thermique est souvent associé aux périodes nocturnes par sa propriété à stocker les apports excédentaires durant la journée et de les restituer plus tard lorsqu'il fait plus froid la nuit en ayant recours à la ventilation. Durant les nuits

d'été, lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment, il est possible d'appliquer une ventilation naturelle. L'air ventilé favorise par la convection la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur. En outre, l'usage de brasseurs d'air permet d'accentuer le mouvement de l'air intérieur et d'intensifier les échanges convectifs.

Cette stratégie permet ainsi de réduire considérablement les pics de chaleur dans le bâtiment.

Dans les bâtiments non climatisés, elle contribue à amortir les fortes fluctuations de température extérieure et à maintenir la température intérieure dans la zone de confort [7] de manière à limiter les surchauffes.

Néanmoins, l'amélioration du confort d'été par l'association de l'inertie thermique et de la ventilation nocturne donne de bons résultats lorsque certaines conditions sont satisfaites :

- tout d'abord, il existe une condition sur le type du climat car la contribution d'une forte inertie varie profondément en fonction de la nature des cycles des sollicitations extérieures auxquelles le système est soumis [30].

- d'autre part, l'état des surfaces d'échanges entre l'air et les matériaux constituant l'enveloppe doit être optimisé. La plupart du temps, l'efficacité des échanges est pénalisée par les finitions intérieures : les plaques de plâtre, faux-plafond [24]

1.2.2 Influence du climat

1.2.2.1 Conditions climatiques requises pour une bonne utilisation de l'inertie

Givoni [11] affirme que la température maximale pour laquelle la stratégie du stockage par l'inertie est encore possible dépend de la limite supérieure de confort thermique dans les bâtiments non-climatisés. Cette limite dépend d'une part de la pression de vapeur ambiante et d'autre part de la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment. D'après l'auteur, cette limite pourrait varier de 25°C pour un climat semi-humide (avec une pression de vapeur de 18 mmHg à 20 mmHg) à 28°C pour un climat aride (avec une pression de vapeur inférieure à 15 mmHg). De plus, cette limite peut encore être repoussée en augmentant la vitesse de l'air intérieur sans pour autant laisser entrer l'air extérieur. Par brassage de l'air intérieur à une vitesse de 2 m/s, cette limite est repoussée à 28°C pour un climat semi-humide et 30°C pour un climat aride.

Pour un climat humide, si la pression de vapeur devient supérieure à 22 mmHg, et que la température extérieure minimale est insuffisante et que l'amplitude jour/nuit trop faible on ne peut assurer le rafraîchissement nocturne par la ventilation. Pour

que la condition sur la variation de température entre le jour et la nuit soit satisfaite, celle-ci doit être supérieure à 10°C. De même, Van der Maas [41] déclare que pour une stratégie de rafraîchissement nocturne, la variation de température extérieure doit être suffisamment importante avec une température et une humidité moyennes comprises dans la zone de confort, tout en évitant les infiltrations d'air durant la journée.

Shaviv [32] démontre qu'il existe une relation linéaire entre la température intérieure maximale et l'écart de température jour/nuit. Il s'en sert comme outil de conception pour prédire l'efficacité d'une stratégie de rafraîchissement nocturne par l'inertie et la ventilation.

1.2.2.2 Classification des climats

Dans l'ouvrage intitulé *Traité d'Architecture Bioclimatique* [2], est proposée une classification de climats dont on retient les principes suivants. Il est possible de distinguer quatre types de climats en fonction de la température :

- *froid*, pour des températures moyennes annuelles de moins de 10°C,
- *tempéré*, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 10 et 20°C,
- *chaud*, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 20 et 30°C,
- *très* chaud, pour des températures moyennes annuelles supérieures à 30°C.

Ensuite, en fonction de l'humidité, il est aussi possible de discerner deux catégories de climats :

- *sec*, pour une humidité relative inférieure à 55%,
- *humide*, pour une humidité relative supérieure à 55%.

Dans le tableau 1.2, on a récapitulé les principaux types de climats chauds, avec leurs localisations géographiques que l'on peut voir sur la carte du monde de la figure 1.4 avec leurs caractéristiques ainsi que des recommandations sur le choix de l'inertie thermique des constructions dans chacun des cas.

La conception en climat chaud et humide présente certaines difficultés dans la mesure où la construction doit satisfaire des exigences qui varient d'une saison à l'autre : les hivers étant doux, une forte inertie peut être avantageuse, en même temps, cela peut être un inconvénient en été où le climat devient chaud et humide.

D'autre part, il y a une certaine préférence des occupants à l'ouverture des espaces vers l'extérieur durant la journée bien que la température extérieure soit plus élevée qu'à l'intérieur.

Climat	Zone géographique	Caractéristiques	Amplitude jour/nuit	Humidité	Préconisations	Exemples
Equatorial	Autour de l'équateur	Température varie de 22 à 32°C toute l'année	$\leq$ 5°C	très importante, proche de la saturation	Éviter les matériaux susceptibles de stocker la chaleur	Belem (Amazonie), Singapour (Indonésie), Afrique centrale...
Tropical (humide + mousson)	22°N à 20°S	précipitations abondantes, vents forts,..	$\leq$ 10°C (saisons de pluies), $\leq$ 15°C (saisons sèche)	humidité relative très élevée (entre 60 et 90% toute l'année)	favoriser les constructions légères	Jakarta, Caracas, Bombay (mousson)..
Tropical sec	10°N à 15°N et 15°S à 30°S	savane sèche, 3 saisons	$\leq$ 7°C (saisons de pluies), $\leq$ 11°C (saisons sèche)	entre 20 et 55% en saison sèche et 95% en saison des pluies	favoriser les constructions légères	Nord Mexique, Burkina Faso, Centre-Nord Australie, Nord-Est Namibie, Sénégal...
Désertique	15°N à 30°N	températures élevées, vents chauds et violents..	$\leq$ 25°C (saison chaude), $\leq$ 17°C (saison froide)	entre 1à et 45% toute l'année, les variations journalières peuvent atteindre 15%	Construction verniculaire, murs à forte inertie	Algérie, Assouan (Egypte), Phoenix (USA), Namibie, Bagdad (Irak), pays du Golfe...

Climat	Zone géographique	Caractéristiques	Amplitude jour/nuit	Humidité	Préconisations	Exemples
Climat chaud d'altitude	la même que le climat équatorial mais en altitude		$\leq 14°C$	uniforme et presque constante, ne dépasse pas les limites de confort	Grande inertie	Nairobi
Méditerranéen	30°N à 40°N	Été très chaud, hiver tempéré voire froid	En été, en jour de 25 à 38°C, la nuit de 16 à 30°C , En hiver l'amplitude est plus faible	entre 60 et 70%	Constructions à forte inertie pour atténuer les fluctuations importantes de la température, aussi pour la mi-saison	Sud de la France, Tunis,...

Table 1.2 – Analyse climatique des pays chauds, *Traité d'Architecture et d'Urbanisme Bioclimatiques [2], Construire en Climat Chaud*

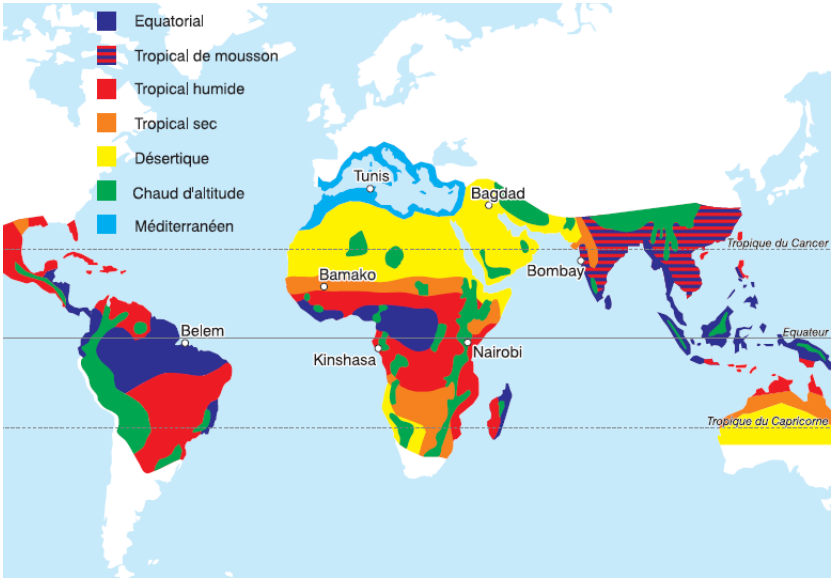

Figure 1.4 – *Carte du monde avec les différentes zones climatiques chaudes [2]*

En conclusion, dans les climats chauds et humides où l'écart de température jour/nuit est relativement faible et que le taux moyen d'humidité est proche de 80%, les constructions à forte inertie sont à éviter.

Voyons maintenant comment est réalisée la conception d'un bâtiment en climat tempéré.

1.3 Conception en climat tempéré

1.3.1 Incidence de l'inertie sur l'effet des apports solaires

1.3.1.1 Orientation du bâtiment

Les besoins énergétiques en hiver peuvent être considérablement réduits par une bonne exposition du bâtiment au rayonnement solaire. En particulier les planchers sont les parties les plus exposées et le plus souvent dotées d'une plus forte inertie par rapport au reste des parois. Également, les partitions intérieures contribuent à augmenter la capacité de stockage du bâtiment de par leur contact des deux côtés avec l'air intérieur. C'est pourquoi certaines stratégies de conception favorisent l'inertie des dalles et des cloisons internes en laissant les parois extérieures plutôt légères mais isolantes avec de grandes surfaces vitrées afin de favoriser l'exposition au rayonnement solaire. Actuellement, on voit apparaître de plus en plus une volonté de réduire les séparations des espaces intérieurs afin de créer de grands volumes qui esthétiquement sont plus attrayants et socialement plus conviviaux (bureaux en open-space, cuisines ouvertes sur séjour...). Dans ce cas la conservation de l'énergie

solaire captée à l'intérieur du bâtiment peut être compensée par un renforcement de l'inertie dans les dalles et les parois avec une meilleure isolation par l'extérieur.

La favorisation des apports solaires est optimisée lorsque l'orientation du bâtiment est au Sud avec l'utilisation de protections solaires. Il est possible en hiver de profiter de ces apports car la hauteur du soleil demeure suffisamment basse pour que l'ensoleillement pénètre à l'intérieur du bâtiment. En été, la hauteur du soleil étant plus élevée, l'exposition du bâtiment au rayonnement est moins importante grâce à la réflexion des rayons par le dispositif de protections solaires.

1.3.1.2 Effet de la tache solaire

Il existe une interaction entre l'inertie interne du bâtiment et la tache solaire. Seulement celle-ci est rarement bien prise en compte dans les outils de simulation. Pour les uns, tout le flux arrive au sol, pour les autres, le flux radiatif est pris en compte comme une source de flux convectif ce qui est une approximation grossière qui néglige l'effet du déphasage et de l'amortissement des gains solaires par l'inertie interne du bâtiment avant que ceux-ci ne deviennent des charges convectives. Dans d'autres logiciels encore, le pourcentage de flux arrivant sur chaque paroi est laissé à l'appréciation de l'utilisateur et gardé constant pendant toute la durée de la simulation. Une règle couramment adoptée est alors de considérer que 60% du flux arrive sur le sol. Wray et Balcomb [45] présentent le logiciel SUNSPOT qui évalue la position de la tache solaire et qui a été validé expérimentalement sur des cellules de test. Ils ont conclu que le comportement thermique n'était pas sensible à la distribution du rayonnement solaire. Wall [43], quant à lui, a mis en évidence le fait que les besoins de chauffage dans des espaces fortement vitrés étaient sous-estimés dans la plupart des logiciels à cause de la mauvaise prise en compte du rayonnement solaire. Serre et Trombe [31] proposent une méthode de calcul plus détaillée basée sur la projection de l'ouverture de la fenêtre sur des plans infinis verticaux et horizontaux. Le logiciel Energy Plus [22] est probablement, aujourd'hui, le logiciel prenant en compte la tache solaire de la façon la plus complète ; un module permet en effet d'en calculer la position et la surface dans une pièce convexe de géométrie quelconque.

Tittelein [36] a démontré que l'évolution de la tache solaire avait un impact non négligeable sur le comportement des bâtiments basse consommation. Il développe et intègre un modèle dans l'environnement de simulation SimSPARK permettant de faire un calcul géométrique de la tache solaire évaluant les flux primaires arrivant sur les parois. La méthode qu'il développe est plus précise que celle qui consiste à répartir le flux de façon forfaitaire à l'intérieur du bâtiment et constante dans le temps. Il constate d'une part que l'écart entre les besoins de chauffage avec et sans prise en compte de la position de la tache solaire peut atteindre 9%. D'autre part, il montre que l'estimation des besoins de chauffage varie peu quand le bâtiment possède une faible inertie.

Dans les climats chauds, il y a lieu d'orienter les bâtiments suivant un axe Est-Ouest afin de réduire l'exposition au soleil. En même temps, il convient de tenir compte de l'exposition des masses inertielles aux vents afin de favoriser la ventilation traversante et les passages d'airs d'une façade à l'autre. Les tailles des ouvertures doivent être dimensionnées de façon à exploiter ces flux d'air [34] tout en gardant des proportions de surfaces vitrées modérées.

On s'intéresse à présent à l'importance de l'isolation dans les parois et à son influence sur l'inertie.

1.3.2 Influence de l'isolation

Avant l'apparition des matériaux isolants, la construction traditionnelle avait privilégié deux types de systèmes constructifs : la construction massive en pierre ou en brique (à forte inertie) et la construction légère en bois (à faible inertie). Avec l'apparition des isolants, l'ambiance intérieure est à présent plus ou moins découplée des conditions climatiques extérieures. La présence d'isolant dans l'enveloppe contribue à réduire considérablement la transmittance des parois. Par ailleurs, les finitions dans le bâtiment, comme on l'a déjà vu, peuvent aussi agir comme des isolants. Par conséquent, les masses inertielles recouvertes par un revêtement ou une couche d'isolant à l'intérieur du bâtiment ne doivent pas être prise en compte dans son inertie.

1.3.2.1 Position de l'isolant

Dans une construction isolée, l'isolation peut se placer de diverses manières dans un mur : à l'extérieur, en sandwich ou à l'intérieur. Pour ces trois cas, la valeur des transmittances des parois restent les mêmes et par conséquent les déperditions à travers l'enveloppe également. Cependant, la position de l'isolant modifie l'inertie de la paroi : seule la masse située à l'intérieur de l'isolation contribue à une inertie utile pour le volume intérieur.

Comme énoncé précédemment, Tsilingiris [38] montre qu'une paroi de bâtiment pouvait se caractériser par deux constantes de temps différentes selon que l'on s'intéresse à l'effet des perturbations extérieures ou intérieures. La constante de temps relative aux sollicitations extérieures est celle qui nous intéresse car elle donne une information sur la conservation de l'énergie stockée à l'intérieur du bâtiment. L'auteur calcule l'évolution des constantes de temps pour un mur en béton de 28 cm d'épaisseur à l'intérieur duquel est progressivement déplacée une couche d'isolant de 4 cm d'épaisseur. On peut constater que la constante de temps relative aux perturbations extérieures est maximale lorsque l'isolation est placée du côté extérieur.

Par ailleurs, on peut noter que l'addition d'isolant à la surface extérieure d'une paroi contribue à augmenter le temps de dissipation de la chaleur par rapport au

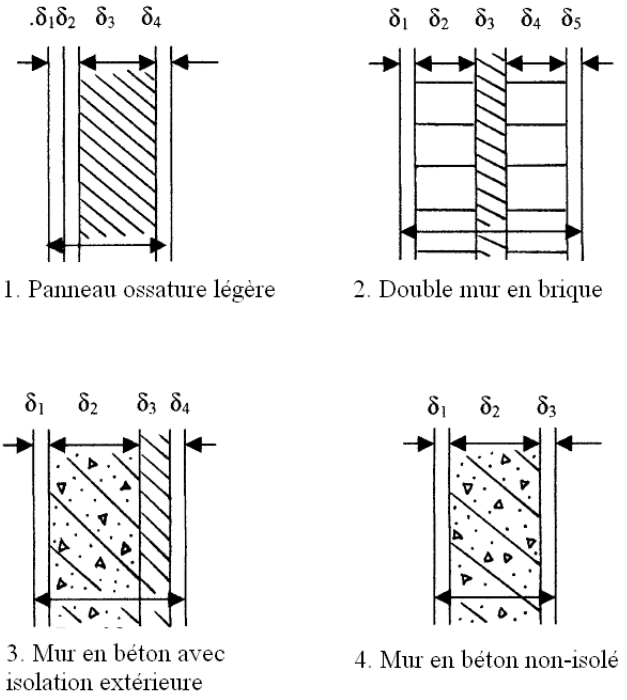

Figure 1.5 – *Description de quatre types de mur de compositions différentes [38]*

cas où la paroi n'est pas isolée. Une paroi en béton de 20 cm d'épaisseur non isolée (Figure (1.5)) avec des finitions intérieures et extérieures en plâtre a une constante de temps égale à 4.4 h (Tableau (1.3)), le béton ayant pour propriétés thermophysiques $\lambda = 1.7\ W/(m.K)$, $\rho = 2300\ kg/m^3$ et $C_p = 920\ J/(kg.K)$. En ajoutant 4 cm d'isolant, la constante de temps devient égale à 19.4 h. Pratiquement pour la même quantité de masse inertielle, le coefficient de transmission U_p de la paroi a été considérablement modifié. La meilleure conservation de la chaleur à l'origine de la réduction des déperditions à contribué au renforcement de l'inertie.

Ultérieurement [39], l'auteur fait une analyse des déperditions à travers une paroi isolée soumise d'un côté à la variation des conditions météorologiques et de l'autre à un chauffage intermittent. Il montre que pour des espaces chauffés ou climatisés par intermittence, il est préférable d'utiliser des parois ayant une masse inertielle interne plus faible afin de réduire les consommations.

Avec la réduction des déperditions thermiques par l'isolation, la construction massive exposée au rayonnement solaire permet d'accumuler la chaleur le jour et de la restituer la nuit en hiver. En été, si on favorise la stratégie de la ventilation nocturne, le rafraîchissement dont le bâtiment bénéficie la nuit est conservé plus longtemps le lendemain au cours de la journée. Ainsi, l'association de l'inertie et de l'isolation contribue indéniablement à améliorer les performances énergétiques du bâtiment.

	$N°$ couche	Matériaux	Épaisseur [cm]	U_p $[W/(m^2.K)]$	τ_p [a] [h]
1. Paroi ossature légère	δ_1	Finition bois	2	0.74	1.1
	δ_2	Fibre de bois	2		
	δ_3	Isolant	4		
	δ_4	Plaque de plâtre	2		
2. Double murs en brique	δ_1	Enduit	2	0.67	6.3
	δ_2	Brique	9		
	δ_3	Isolant	4		
	δ_4	Brique	9		
	δ_5	Enduit	2		
3. Paroi béton avec isolation extérieure	δ_1	Enduit	2	0.77	19.4
	δ_2	Béton	20		
	δ_3	Isolant	4		
	δ_4	Enduit	2		
4. Paroi béton non isolée	δ_1	Enduit	2	3/11	4.4
	δ_2	Béton	20		
	δ_3	Enduit	2		

[a] constante de temps de la paroi relative aux sollicitations extérieures

Table 1.3 – Composition des parois de la Figure(1.5)

1.3.2.2 Isolation répartie

L'isolation répartie consiste à disposer plusieurs couches d'isolant à l'intérieur de l'enveloppe. Asan [6] a cherché à optimiser la position de deux panneaux d'isolant de 2 cm à l'intérieur d'une paroi à forte inertie de manière à maximiser le déphasage de la paroi et à minimiser le facteur d'amortissement. En testant respectivement le polyuréthane et le polystyrène sur un mur en brique puis un mur en granite, il montre que la configuration la plus favorable consiste à répartir la moitié de l'épaisseur d'isolant au milieu du mur et l'autre moitié à l'extérieur au lieu de regrouper l'isolant en une seule couche (mis à part le cas de l'isolation par l'extérieur).

Bien que l'inertie thermique et l'isolation soient deux notions opposées, les parois en blocs alvéolés ont la propriété d'être isolantes tout en ayant une inertie thermique importante. Dans ses travaux, Sambou [42] a étudié le comportement d'une cavité partitionnée en régime variable. Il en optimise la forme géométrique par les algorithmes génétiques en faisant varier le nombre de cloisons, leurs épaisseurs ainsi que les épaisseurs des cloisons extérieures d'un élément alvéolé. Il montre que pour cet élément alvéolé dont les dimensions sont constantes, au-delà d'un certain nombre de cloisons, la capacité calorifique de l'élément reste la même. Cela dit, les parois

en blocs alvéolés offrent un bon compromis isolation/inertie d'autant plus que les échanges convectifs entre le matériau et l'air sont optimisés grâce à une plus grande surface d'échange .

1.3.3 Exploitation des ressources énergétiques solaires par le bâtiment

Le soleil constitue une source d'énergie fondamentale dont la partie interceptée par la terre représente une quantité équivalente à 10000 fois la puissance totale installée par l'homme aujourd'hui [2]. Le progrès des technologies solaires a conduit à la convergence vers des systèmes plus performants permettant de mieux exploiter cette ressource propre et gratuite. Cependant le déploiement des technologies solaires n'est pas suffisant pour aboutir au développement des bâtiments zero énergie. Il est capital que la conception même du bâtiment soit optimisée pour améliorer sa demande en énergie tout en ayant un confort d'été satisfaisant.

Dans le cadre d'un programme de recherche ANR HABISOL (projet ANR VALERIE) portant principalement sur la rénovation des bâtiments, on s'est intéressé à quantifier les ressources énergétiques disponibles et exploitables par un bâtiment. Dans cette perspective, une étude à été menée sur une maison individuelle que l'on a définie suivant deux versions : une version BBC et une version avant 1974. Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer et d'observer la concordance des besoins énergétiques des bâtiments avec les potentiels des ressources exploitables par ceux-ci. Pour cela, il a été nécessaire de définir un ensemble d'indicateurs [13] dont on expose ici ceux concernant les ressources énergétiques solaires :

Le *potentiel solaire total* représente la totalité de l'énergie solaire échangée avec le bâtiment. Il est égal à la somme des flux solaires (directs, diffus et réfléchis par l'environnement) reçus par toutes les parois du bâtiment.

$$\Pi_{soleil} = \sum_{Parois} (\phi_{direct} + \phi_{diffus} + \phi_{réfléchi}) \tag{1.22}$$

Le *potentiel solaire concomitant* représente la quantité d'énergie solaire incidente sur le bâtiment au moment où il en a besoin. Il est défini comme étant le potentiel total si, au même instant, les besoins correspondants existent. Sinon le potentiel concomitant est nul.

Le *potentiel solaire exploité* est évalué de manière à comparer les besoins de chauffage du bâtiment dans le cas où il n'exploite pas du tout la ressource en soleil et dans le cas où il l'exploite. Il est donc égal à la différence des besoins de chauffage lorsque le bâtiment ne reçoit pas de flux solaire et des besoins lorsqu'il en reçoit.

$$\Pi_{exploité} = Besoins_{sans-soleil} - Besoins_{avec-soleil} \tag{1.23}$$

Le *taux de couverture* des besoins du bâtiment par le soleil est le pourcentage des besoins de chauffage du bâtiment couverts par les ressources en énergie solaire arrivant sur celui-ci lorsqu'il en a besoin.

Le taux de couverture permet ainsi d'estimer l'influence de la source sur le bâtiment. Il est évalué par :

$$\tau_{couv} = \frac{\Pi_{exploité}}{Besoins_{sans-soleil}} \tag{1.24}$$

$$\tau_{couv} = \frac{Besoins_{sans-soleil} - Besoins_{avec-soleil}}{Besoins_{sans-soleil}} \tag{1.25}$$

Le *taux d'exploitation* compare le potentiel exploité au potentiel concomitant. Il dérive de la formule d'efficacité solaire présentée par Tittelein [36] et s'exprime de la manière suivante :

$$\tau_{exploitation} = \frac{\Pi_{exploité}}{\Pi_{concomitant}} \tag{1.26}$$

$$\tau_{exploitation} = \frac{(Besoins_{sans-soleil} - Besoins_{avec-soleil})}{\Pi_{concomitant}} \tag{1.27}$$

L'évaluation de ces indicateurs pour le bâtiment BBC et avant 1974 a été faite dans le cas du climat de Chambéry et de Marseille. Sur la figure 1.6, on a représenté le taux d'exploitation en fonction du taux de couverture.

On voit nettement que dans le cas d'un bâtiment BBC, le taux de couverture des besoins est supérieur à un bâtiment ancien, et même pour un climat ensoleillé comme celui de Marseille, ce taux de couverture avoisine les 100 %. Cependant, on constate aussi que le taux d'exploitation de la ressource en soleil est plus importante dans le cas du bâtiment avant 1974 que dans le cas du bâtiment BBC. En effet, lorsque le niveau d'isolation est élevé, l'ambiance intérieure des bâtiments devient indépendante des sollicitations extérieures. Or ces sollicitations ne vont pas nécessairement à l'encontre des critères de confort et en isolant le bâtiment on le prive des ressources potentielles de l'environnement.

L'objet du programme de recherche consiste par la suite à dresser une base de données de solutions dites "innovantes" qui permettraient de profiter au mieux des ressources disponibles et immédiatement exploitables par le bâtiment. Parmi ces solutions, on a envisagé celle qui consiste à coupler des capteurs solaires thermiques avec l'inertie thermique d'un plancher solaire.

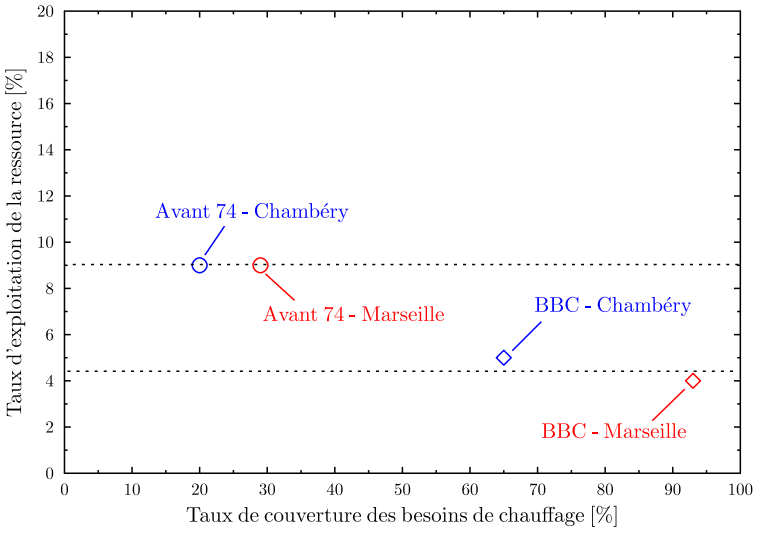

Figure 1.6 – *Comparaison des taux de couverture des besoins de chauffage et d'exploitation des ressources en soleil pour les bâtiments BBC et avant 1974 pour le climat de Marseille et de Chambéry*

L'inertie thermique est une stratégie incontournable pour réduire les besoins énergétiques du bâtiment car elle permet de capter les apports solaires et de les conserver le plus longtemps possible à l'intérieur du bâtiment. La solution qui consiste à associer la performance des capteurs solaires thermiques à capturer l'énergie solaire et la capacité de stockage des dalles activées pour stocker cette chaleur présente un enjeu intéressant. C'est pourquoi dans ce travail, on va s'attarder à l'étude de l'amélioration de la performance du bâtiment par le chauffage solaire.

Pour terminer ce chapitre, on va évoquer la nécessité d'optimiser le choix des matériaux en phase de conception.

1.4 Choix des matériaux de construction en phase de conception

1.4.1 Place des matériaux dans la conception

Les propriétés thermiques des matériaux de construction ont une influence considérable sur le comportement énergétique du bâtiment que ce soit en terme d'inertie thermique ou de propriété isolante. En effet, les propriétés des matériaux et la façon dont ils sont agencés définissent les caractéristiques qu'aura l'enveloppe du bâtiment. Malgré l'importante avancée que connaît aujourd'hui le secteur du bâtiment, il n'existe pas une réelle méthodologie qui permette de mettre en oeuvre une sélection convenable de ces matériaux. On est obligé de choisir la composition de l'enveloppe

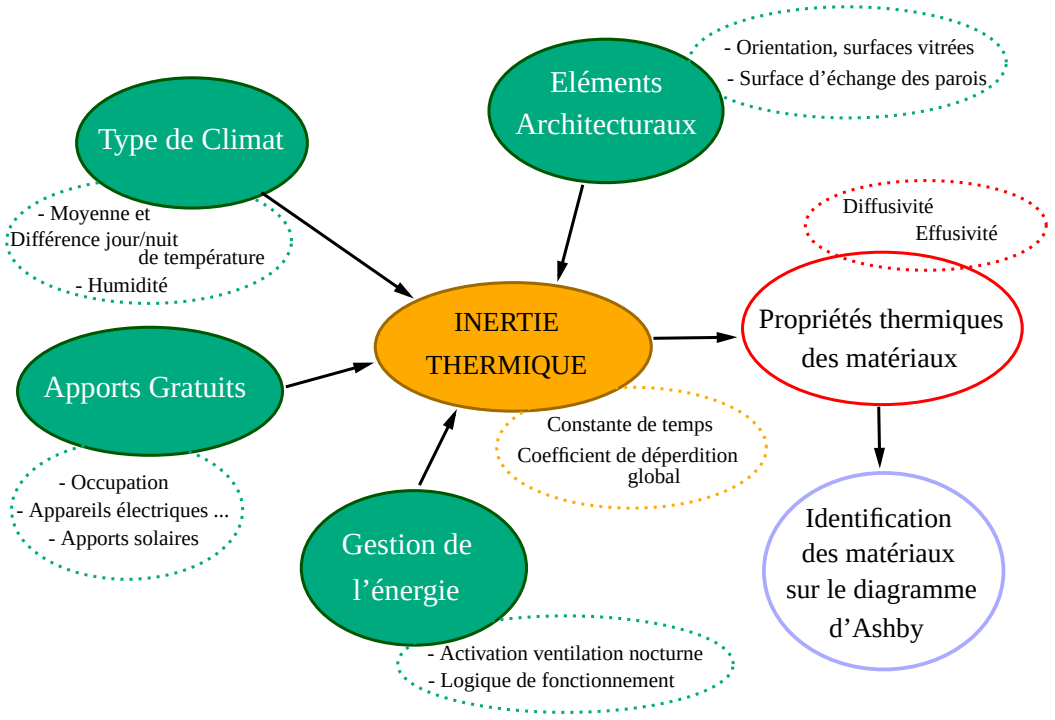

Figure 1.7 – *Méthodologie de sélection des matériaux de construction*

de manière intuitive ou de procéder à de nombreux tests pour évaluer une solution qui soit meilleure parmi d'autres.

En réalité, il existe une difficulté à faire apparaître le lien entre les propriétés des matériaux et les performances énergétiques globales du bâtiment. Peut-être est-ce dû à une différence d'échelle ?

En établissant un schéma de synthèse qui reprend les différentes notions énoncées dans ce chapitre sur la figure (1.7), on tente de mettre en relief les principaux paramètres intervenant entre l'échelle des matériaux et du bâtiment et d'identifier la place des matériaux dans le processus de conception.

Pour pallier à cet obstacle de la différence d'échelles, il est nécessaire de définir des paramètres génériques liant directement les propriétés des matériaux aux performances globales du bâtiment. Pour cela, la constante de temps que l'on a définie en première partie de ce chapitre a la particularité à la fois de pouvoir être évaluée par les propriétés des matériaux et d'autre part à partir du temps caractéristique de la réponse du bâtiment à des perturbations.

Une autre propriété fondamentale de l'enveloppe n'est autre que le coefficient global de déperditions U_{bat} qui correspond à la quantité de chaleur en $W/(m^2.K)$ perdue par le bâtiment pour une différence de 1 ° en température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

En se basant sur ces paramètres génériques, il est possible d'une part de carac-

tériser les performances globales du bâtiment et d'autre part, de s'en servir pour identifier par la suite la ou les combinaisons les plus favorables en termes de propriétés thermiques des matériaux.

Dans la conception mécanique, il existe une méthode permettant de sélectionner les matériaux en respectant un certain nombre de critères définis dans un cahier des charges. On présente dans la partie suivante un aperçu de cette méthode afin de s'en inspirer par la suite pour tenter de définir une démarche semblable pour les matériaux de construction uniquement du point de vue thermique.

1.4.2 Méthode d'Ashby

M. Ashby [8] a développé une approche de la sélection des matériaux en distinguant les univers "fonction", "matériaux", "géométries", "procédés" et en leur attribuant des classes et sous-classes. La classification des matériaux se résume essentiellement aux six familles suivantes : les métaux, les céramiques, les matériaux vitreux, les polymères, les élastomères et les matériaux hybrides résultant de la combinaison de deux autres familles ou plus. Il représente l'ensemble de ces familles en fonction de leurs propriétés intrinsèques sur des diagrammes en deux dimensions. Il se base sur ces diagrammes pour identifier l'ensemble des régions "solutions" propres à un problème de conception après avoir dressé une analyse complète du cahier des charges de la pièce à concevoir.

Dans cet ensemble de diagrammes destinés à rendre les propriétés des matériaux mieux accessibles durant la phase de conception, le diagramme conductivité/diffusivité met en évidence le positionnement de la plupart des matériaux autour d'un axe pour lequel $\rho C_p \simeq 3.10^6\ J/m^3.K$ (Figure 1.8). Toutefois, on constate que certains matériaux dont les capacités calorifiques sont nettement plus faibles que les autres matériaux poreux, dévient de manière significative de cet axe. C'est le cas des mousses utilisées dans l'isolation thermique par exemple qui ont de faibles conductivités et qui donc, n'ont pas nécessairement de faibles diffusivités. Ces matériaux ne transmettent pas la chaleur mais ils atteignent rapidement leur régime permanent.

Quelques années plus tard [9], Ashby ajoute à cette palette de propriétés mécaniques, thermiques et électriques, d'autres propriétés devenant désormais essentielles dans le choix des matériaux en conception qui sont *l'énergie grise* et *le bilan carbone* des matériaux qu'il appelle les "écopropriétés". Contrairement aux propriétés précédentes que l'on peut caractériser de manière exacte par des standards internationaux, celles-ci ne le sont pas, mais lorsque nécessaire, la fiabilité de leurs valeurs est précisée.

Après avoir proposé une méthodologie de sélection des matériaux de construction, on se soucie à présent des outils de simulation et d'optimisation dont on sert pour la conception des bâtiments.

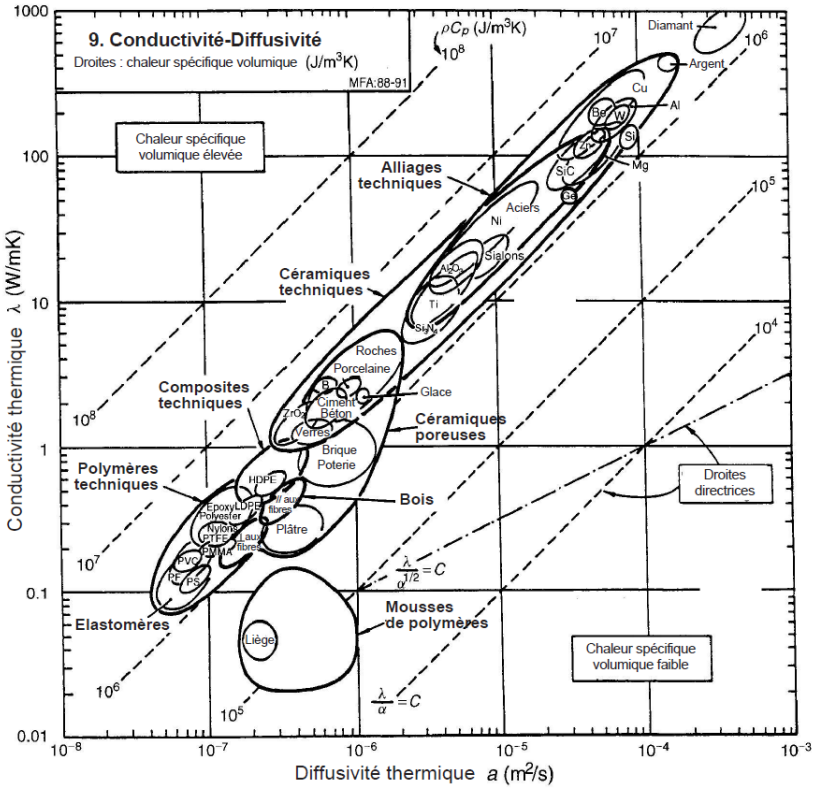

Figure 1.8 – *Diagramme Conductivité-Diffusivité. Ashby [8]*

Matériaux de construction	λ $(W/m.K)$	ρ (kg/m^3)	C_p $(J/kg.K)$
Aluminium	76-240	2500-2900	860-990
Béton	0.8-2.4	2300-2600	835-1050
Brique	0.46-0.73	1600-2100	750-850
Polystyrène	0.121-0.131	1040-1050	1690-1760
Mousse de Polymère Rigide	0.027-0.038	78-165	1120-1910
Papier, Carton	0.06-0.17	480-860	1340-1400
Bois	0.3-0.5	700-800	1660-1710
Caoutchouc	0.1-0.14	920-930	1800-2500

Table 1.4 – Propriétés thermophysiques de matériaux de construction extraits de, [9].

1.5 Description des outils de simulation utilisés

1.5.1 Environnement de simulation SPARK

Les modèles qui ont été développés au cours de ce travail on été implémentés dans l'environnement de simulation SPARK[1] [21] qui est un environnement généraliste basé sur la résolution de systèmes d'équations algébro-différentielles discrètes.

La plateforme de simulation SimSPARK a été construite autour de cet environnement de simulation. Elle comprend une bibliothèque de modèles qui ont fait l'objet de nombreux travaux antécédents (Wurtz 1995, Musy 1999, Mora 2003, Cordeiro Mendonça 2004, Maalouf 2006, Bourdoukan 2008, Tittelein 2009, Stephan 2010, Brun 2011) [47], [48].

Bien que SPARK ait été développé dans l'optique de simuler le comportement thermique des bâtiments, il peut être utilisé pour résoudre des systèmes d'équations de n'importe quel domaine scientifique.

Son développement a été réalisé principalement par le Simulation Research Group (SRG) au Lawrence Berkeley National Laboratory (Californie, Etats Unis).

Les principales propriétés de SPARK sont les suivantes :

- la modularité, lié au fait que la structure du développement des équations est orienté objet,

- la réduction du temps de calcul et la robustesse grâce à la résolution des systèmes d'équations par la méthode des graphes,

[1] Simulation Problem Analysis and Research Kernel SPARK

- la possibilité de couplage avec d'autres logiciels, car il peut être transcrit complètement en langage C++ ce qui lui permet d'être connecté à d'autres programmes développés dans un langage compatible avec le C++ (C, Fortran,etc.)

Après avoir présenté l'environnement de simulation dans lequel on a implémenté nos modèles, on s'attarde maintenant à la présentation de l'outil d'optimisation dont on s'est servi durant ce travail.

1.5.2 Présentation des algorithmes d'optimisation

1.5.2.1 Modèle de simulation de bâtiment pour fonction objective

Vu la complexité du système "bâtiment", il est pratiquement impossible de trouver une relation directe permettant de relier les variables indépendantes à la fonction coût qu'on cherche à optimiser. Par exemple, si on veut optimiser les besoins de chauffage (P) en fonction de l'épaisseur d'isolant (e), de la taille (s) et du type (t) du vitrage, on n'aura pas une relation directe du type $P = g(e, s, t)$, mais un système d'équation algébro-différentielles qu'il faut résoudre. Dans ce cas, la fonction coût ne peut pas être "évaluée" mais "approximée" numériquement. Ainsi, les techniques d'optimisation à utiliser doivent pouvoir utiliser l'approximation d'une fonction coût f sans avoir besoin de la valeur de sa dérivée. Pour cela, le choix se porte sur les algorithmes d'optimisation d'"*ordre zéro*" qui ne requièrent que l'évaluation de la fonction coût et non pas celle des dérivées. On peut noter dès à présent deux problèmes qui peuvent intervenir et qui seront indépendants du choix de l'algorithme :

- Il est fréquent que le critère d'arrêt, employé par les solveurs utilisés pour résoudre les équations différentielles et les équations algébriques, soit dépendant de la variable indépendante "x". Ce qui fait qu'une perturbation de la variable x peut causer un changement dans la séquence des itérations et faire en sorte que l'approximation f^* de la fonction f soit discontinue et entraîner un dysfonctionnement de l'algorithme d'optimisation.

- Si le solveur utilise des pas d'intégration variables, alors le changement de la valeur de f^* peut être dû au changement du pas d'intégration et l'algorithme d'optimisation peut s'arrêter sur un "mauvais" optimum.

Les méthodes locales d'ordre zéro les plus répandues sont les méthodes de *recherches directes* (direct search) telles que définies par Wright [46] : un algorithme de recherche directe est un algorithme qui *utilise seulement les valeurs de la fonction* et *n'approxime pas de gradient*. On peut distinguer plusieurs groupes de méthodes de recherche directe : les méthodes de recherche par motifs généralisés (GPS[2]), les

[2]Generalized Pattern Search methods

méthodes des directions conjuguées (algorithme de Powell et ses variantes), et les méthodes basées sur la figure géométrique d'un simplexe (méthode de Nelder-Mead et ses variantes), les méthodes à base de population (algorithmes évolutionnaires, algorithmes de Colonies de fourmis, algorithmes d'optimisation par essaim de particules (PSO[3])...).

Pour la suite on va évoquer les algorithmes employés dans nos prochaines études à savoir : les algorithmes de recherches par motifs généralisés (GPS), et algorithmes d'optimisation par essaim de particules (PSO).

1.5.2.2 Les algorithmes de recherche par motifs généralisés (GPS)

Les algorithmes de recherche par motifs généralisés (GPS) sont une généralisation de la méthode de Hooke et Jeeves (1961) [37]. En effet la méthode de Hooke et Jeeves comporte deux étapes principales qui consistent en une recherche de la direction de descente et le déplacement dans cette direction. À partir d'un point initial ou point de référence, l'algorithme effectue une recherche exploratoire par perturbation d'un incrément Δ_i d'une variable, les autres variables restant fixes. Si le coût de la fonction f à optimiser est meilleur, alors cette nouvelle composante est conservée. Dans le cas contraire, la variable est perturbée en -Δ_i et conservée en cas d'amélioration de la fonction f. Si les deux incréments n'apportent aucune amélioration, la composante reste inchangée. A la fin du processus, toutes les composantes ont été perturbées une fois, et nous obtenons soit un point pour lequel la fonction coût f a été améliorée, soit le point de référence lui-même. Dans ce dernier cas, le processus est réitéré avec un pas Δ_i plus petit précisé par l'utilisateur. Dans le cas contraire, le point obtenu et le point de référence sont utilisés pour définir une nouvelle direction de recherche par extrapolation. Un déplacement peut alors être effectué le long de cette direction. Le nouveau point ainsi obtenu devient le point de référence. La procédure est en général arrêtée lorsque les incréments Δ_i deviennent inférieurs à une précision donnée. Cependant, pour les algorithmes de recherche par motifs généralisés (GPS), les directions de recherche ne changent pas avec les itérations. Les GPS sont caractérisés par une série de déplacements exploratoires autour du point courant. Ces déplacements forment des motifs qui présentent une disposition invariable (d'où le mot motifs ou patterns). A chaque itération la fonction coût f est évaluée sur les points du motif. Si une amélioration est trouvée, le point associé est accepté comme nouveau point courant, et la taille du prochain motif est conservée ou augmentée. Sinon, la taille du nouveau motif, généré autour de l'ancien point courant, est réduite. Les GPS présentent des propriétés de convergence robustes pour des fonctions continues, différentiables et bornées.

[3]Particle Swarm Optimization

1.5.2.3 Optimisation par essaim de particules (PSO)

L'optimisation par essaim de particules (PSO - Particle Swarm Optimization) est une technique d'optimisation stochastique à base de population introduite par Eberhart et Kennedy en 1995 [15]. Cet algorithme s'inspire à l'origine du monde du vivant et s'appuie notamment sur un modèle développé par le biologiste Craig Reynolds à la fin des années 1980, permettant de simuler le déplacement d'un groupe d'oiseaux. Cette méthode d'optimisation se base sur la collaboration des individus entre eux sur la base qu'un groupe d'individus "peu intelligents" peut posséder une organisation globale complexe "intelligente".

Intuitivement, chaque jeu de paramètres définit la position d'une particule, qui se déplace dans l'espace avec une certaine vitesse. Au départ de l'algorithme chaque particule est positionnée (aléatoirement ou non) dans l'espace de recherche du problème. La meilleure des particules joue le rôle de pôle d'attraction, et infléchit les trajectoires des autres, qui restent partiellement attirées par leur meilleure position passée.

On vise ainsi à converger vers des optimum locaux des jeux de paramètres. Un problème PSO est défini par une fonction objective sur un espace multidimensionnel $f : R^m \rightarrow R$, avec $[min_j, max_j]$, $0 <= j < m$ comme borne des domaines pour chaque dimension j. Soit n particules p_i tel que chaque particule représente une solution potentielle et est définie par une position $x_i \in R^m$ et une vitesse $vi \in R^m$. La position est l'affectation courante. La vitesse est la direction courante de la particule dans l'espace du problème. Chaque particule a la connaissance de sa meilleure position et de la meilleure position globale.

Cela donne l'équation de mouvement suivante :

$$v_{i,j} = \omega v_{i,j} + b_1 * r_1 * (x_{i,j_m} - x_{i,j}) + b_2 * r_2 * (x_{g,j} - x_{i,j}) \tag{1.28}$$

$$x_{i,j} = x_{i,j} + v_{i,j} \tag{1.29}$$

ω est une constante d'inertie, généralement de valeur légèrement inférieure à 1 et décroissante au cours du temps. b_1 et b_2 sont des constantes respectivement appelées composantes "cognitive" et "sociale", et contrôlant l'attrait des positions optimales pour une particule. Les valeurs $b_1 = b_2 = 2$ sont habituellement retenues. r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires dans [0,1]. La position d'une particule $x_{i,j}$ est généralement initialisée aléatoirement, alors que sa vitesse $v_{i,j}$ est initialisée à 0. Les conditions d'arrêt sont généralement déterminées par un nombre donné d'itérations de l'algorithme.

Ainsi, chaque itération fait bouger les particules en fonction de trois composantes :

- Sa vitesse actuelle $v_{i,j}$

- La position de Sa meilleure solution x_{i,j_m},
- La position de La meilleure solution obtenue dans son voisinage $x_{g,j}$.

D'une manière générale les algorithmes évolutionnaires permettent de réaliser des recherches globales. Leur intérêt pratique réside dans leur applicabilité à une très large gamme de problèmes et la possibilité de traiter facilement des *variables discrètes*. Cependant, pour trouver un optimum, ils ont besoin d'un grand nombre d'évaluations de la fonction coût. Ainsi, ils ne sont considérés directement utilisables que pour les problèmes où le calcul de la fonction ne nécessite pas de ressources importantes.

Ainsi pour augmenter la vitesse de la recherche de l'algorithme PSO, on peut soit ajouter de la connaissance spécifique, soit le combiner à des algorithmes locaux (efficaces) et notamment les algorithmes GPS. La façon la plus simple de réaliser cette association est d'effectuer les recherches en *série*, c'est-à-dire qu'une optimisation globale à coût limité par l'algorithme PSO est d'abord exécutée pour effectuer une recherche large, puis cette solution est raffinée par une recherche locale.

1.5.3 Choix du logiciel d'optimisation et couplage avec l'environnement de simulation

Pour réaliser nos optimisations, on a choisi d'utiliser le logiciel GenOpt[4][44] développé au LBNL[5]. GenOpt peut être couplé à n'importe quel logiciel de simulation à condition que les entrées et les sorties de ce logiciel soit des fichiers textes. De plus, GenOpt possède une librairie d'algorithmes d'optimisation locale (GPS[6], DAG[7], SA[8]) et globale (PSO) ainsi qu'un algorithme de couplage en série du GPS et du PSO (GPSPSOCCHJ). De plus, GenOpt est écrit en language JAVA ce qui assure une meilleure portabilité et permet à l'utilisateur de rajouter et de coder d'autres algorithmes d'optimisation.

La figure (1.9) montre le principe de couplage de GenOpt à la plateforme de simulation SimSPARK : les entrées des modèles numériques décrites dans SimSPARK sont générées par GenOpt en fonction des résultats de sorties récupérées de SimSPARK. Une fois le fichier d'entrée est créé par GenOpt, ce dernier lance automatiquement une simulation avec SimSPARK et attend la fin de la simulation pour récupérer les résultats. En même temps, GenOpt va vérifier si des erreurs de convergence ou des erreurs majeures ont eu lieu et ceci à l'aide de mots clés que l'utilisateur va préciser en fonction du logiciel de simulation utilisé.

[4]Generic Optimization
[5]Lawrence Berkeley National Laboratory
[6]Generalized Pattern Search
[7]Discrete Armijo Gradient
[8]Simplex Algorithm of Nelder and Mead with the Extension of O'Neill

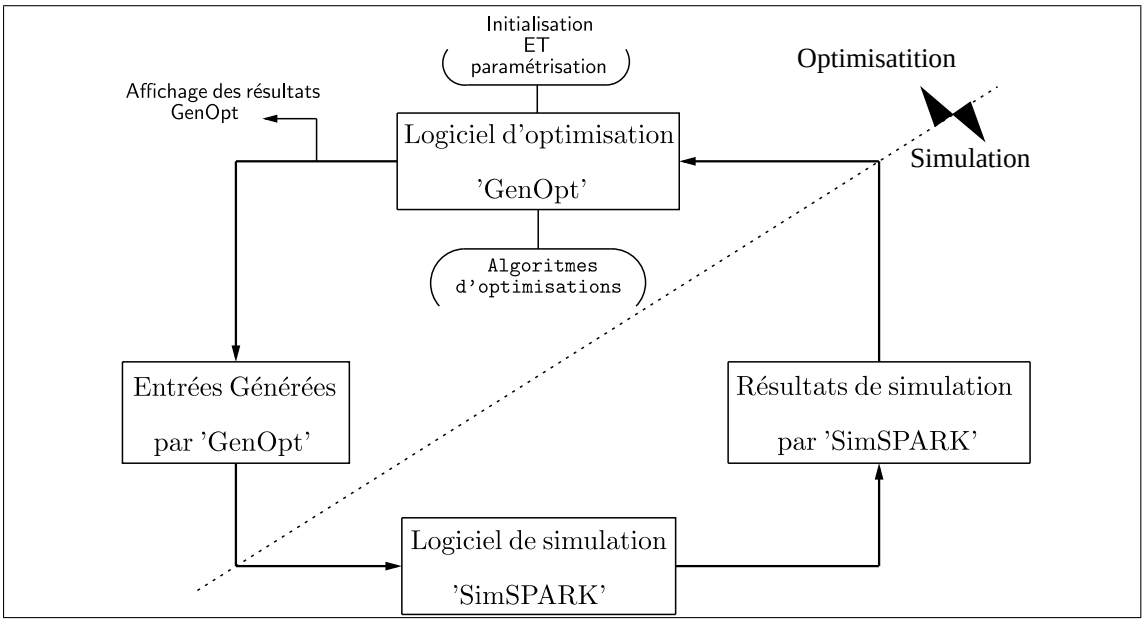

Figure 1.9 – *Principe du couplage de GenOpt à la plateforme de simulation SimSPARK [24]*

Pour obtenir de meilleurs résultats de convergence vers un optimum, on va régler le solveur de SimSPARK de manière à ce que le critère de convergence et que le pas de temps de calcul restent constants. En effet, on veut être sûr qu'une variation Δ_r sur le résultat r ne soit pas due à ces perturbations numériques et fausser le fonctionnement des algorithmes d'optimisation. De plus on a décidé d'opter pour l'algorithme (GPSPSOCCHJ [44]) afin de réaliser une étude large sur le domaine mais à "bas coût" à l'aide de l'algorithme PSO et ensuite raffiner localement le résultat par l'algoritme GPS basé sur la méthode de Hooke et Jeeves généralisée.

1.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un état de l'art autour des enjeux de l'inertie thermique dans la conception des bâtiments. Tout d'abord, on a fait l'inventaire des méthodes existantes pour caractériser l'inertie thermique respectivement à l'échelle des matériaux, des parois et du bâtiment. On a étudié la possibilité d'améliorer le confort d'été par la stratégie de la ventilation nocturne, qui est un moyen de rafraîchissement passif efficace lorsque la différence de température jour/nuit est suffisamment importante (au-dessus de 10 °C) et que le niveau d'humidité ne dépasse pas un certain seuil.

Une construction à forte inertie n'est pas toujours adaptée au climat. Pouvoir identifier le niveau d'inertie adéquat d'une construction au moment de sa réalisation représente un enjeu considérable car il permettrait d'atteindre un comportement

énergétique optimal en réduisant les consommations liées au chauffage et au maintien de la température intérieure dans la zone de confort en été. Les outils de simulation dont on dispose actuellement et permettant de modéliser de façon précise les transferts de chaleur ne répondent pas nécessairement au besoin qui se présente ici, à savoir l'identification de grandes lignes de comportement ainsi que la détermination des propriétés thermiques des matériaux. Comme énoncé précédemment, l'objet de ce travail sera de proposer une méthodologie permettant une aide à la conception en phase amont d'un projet en regard des critères énoncés dans la partie 1.4.1. On abordera deux approches, l'une appelée SimSPARK décrivant le comportement détaillé d'un bâtiment et la seconde appelée CoSPARK proposant une approche de conception optimisée simplifiée. De manière à obtenir un outil de référence, le prochain chapitre va être consacré à la confrontation des résultats issus de SimSPARK à ceux de la plateforme expérimentale INCAS.

Chapitre 2

Confrontation des résultats du modèle numérique SimSPARK aux mesures issues de la plateforme INCAS

Ce chapitre est consacré à la comparaison d'un modèle de simulation thermique dynamique développé et implémenté dans l'environnement de simulation SimSPARK avec des mesures expérimentales fournies par la plateforme INCAS de l'INES. Malgré le bon niveau de connaissance des caractéristiques des maisons, il existe des paramètres qu'on ne maîtrise pas complètement. Pour cela une méthodologie a été développée afin dans un premier temps de discerner les paramètres les plus influents du modèle à travers une analyse de sensibilité sur la constante de temps du bâtiment et dans un second d'essayer de déterminer ces paramètres par optimisation. On montre qu'avec les réponses d'un modèle de simulation implémenté dans l'environnement SimSPARK il était possible de représenter le comportement thermique du bâtiment.

2.1 Présentation de la plateforme INCAS

L'intérêt de cette partie est de montrer dans quelle mesure les outils de simulation qu'on a développés durant ce travail sont capables de prédire le comportement thermique des bâtiments [33].

La plateforme expérimentale INCAS de l'INES met à disposition des chercheurs des bâtiments conçus, réalisés et instrumentés dont le comportement des occupants

Figure 2.1 – *Plateforme INCAS, INES, Le Bourget-du-Lac*

est simulé et les conditions climatiques subies.

Les maisons passives ont été conçues et réalisées à l'INES et sont destinées à l'étude de nouvelles technologies solaires ainsi qu'à la validation d'outils de simulation qui puissent permettre de concevoir des bâtiments à forte efficacité énergétique ; cela sans pour autant nécessiter d'importants investissements sur les équipements pour atteindre un bilan énergétique équilibré sur l'année.

L'intérêt de cette plateforme (Figure (2.1)) est de pouvoir suivre expérimentalement ces bâtiments afin d'améliorer les codes de calcul et les rendre capables d'analyser, avec un niveau de précision satisfaisant, le comportement d'habitation basse et très basse énergie de différentes structures et notamment l'optimisation du facteur inertie/isolation permettant de récupérer un maximum d'énergie solaire de façon passive.

La plateforme comprend actuellement trois maisons dont les caractéristiques diffèrent par leurs propriétés d'inertie.

- La première maison sur le premier plan à droite correspond à une structure en blocs de béton sur le principe de double mur avec isolation intégrée du type de constructions réalisées dans le quartier de Bedzed en Angleterre. L'ensemble des composants de la maison a été optimisé de manière à limiter les besoins autour de 15 kWh/(m^2.an) de manière à faciliter la compensation des consommations énergétiques par l'intermédiaire de la production solaire.

- La seconde maison au premier plan à gauche est une structure en béton banché à isolation extérieure avec des caractéristiques identiques à la première maison la différence essentielle étant liée à l'inertie ce qui devrait permettre, en raison de la surface Sud particulièrement vitrée, d'évaluer le potentiel de récupération des apports gratuits en hiver.

- La troisième maison conçue avec une structure ossature bois et une dalle en béton au rez-de-chaussée possède la même géométrie que les deux premières, mais une inertie très différente pour réaliser une comparaison des comportements thermiques.

Cette géométrie commune est basée sur des principes relativement simples. Il s'agit d'une habitation de type individuel de deux étages avec une surface habitable de 89 m^2, une proportion de surface vitrée relativement importante orientée Sud. Le rapport de surface de vitrage sur plancher est de 32% au RDC et de 21% à l'étage dont plus de la majorité se trouve sur la façade Sud.

2.2 Description de la maison en Béton Banché avec isolation extérieure

2.2.1 Composition de l'enveloppe

La structure des murs extérieurs de la maison Béton Banché (BB) (Figure 2.2) est réalisée avec 15 cm de béton et isolée par l'extérieur avec 20 cm de polystyrène extrudé comme sur la Figure (2.3). Le plancher bas est constitué d'une dalle en béton de 16 cm d'épaisseur surmontée d'une chape de 4 cm et isolé par le bas avec 20 cm de polystyrène. Le plafond haut consiste en l'assemblage de deux couches de laine de verre de 20 cm chacune. L'inertie de la maison est renforcée par le plancher intermédiaire constitué d'une dalle en béton de 22 cm. Les propriétés des matériaux de construction se trouvent en annexe.

La maison repose sur un vide sanitaire dont les murs verticaux sont isolés de chaque côté avec 20 cm de polystyrène et les combles, non aménagés, sont également bien isolés avec 20 cm de polystyrène de manière à limiter le plus possible les influences venant du sol et de la toiture.

Les fenêtres ont toutes été conçues de manière identique sur les trois maisons. Sur les façades Est, Sud (Figure (2.4)) et Ouest, on a un double vitrage 4 /16 /4 à faible émissivité avec un remplissage à 90% d'argon. Sur la façade Nord, on a posé un triple vitrage 4 /12 /4 /12 /4, avec un remplissage à 90% d'argon avec deux couches à faible émissivité.

Au niveau des protections solaires, toutes les menuiseries sont équipées de volets roulants automatisés selon des scénarios différents pour l'hiver et l'été. Le rez-de-

Figure 2.2 – *Maison en béton banché avec isolation par l'extérieur*

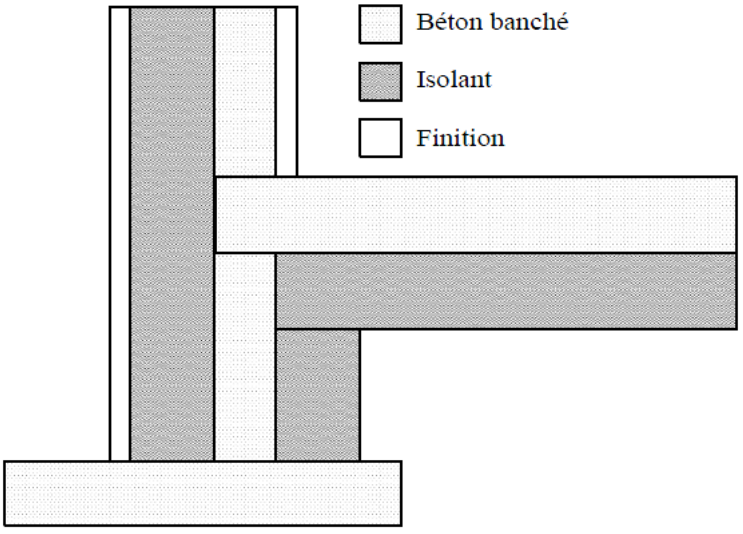

Figure 2.3 – *Composition des murs de la maison béton avec isolation extérieure*

Figure 2.4 – *Façade SUD de la maison BB*

chaussée est protégé par un balcon en façade sud sur une profondeur de 1.7 m (1.3 m de balcon + les capteurs solaires thermiques). L'étage est protégé par le débord de toiture Sud de longueur 1 m. En façade Est, une plateforme d'accès aux combles d'une largeur de 1.11 m protège les fenêtres de l'étage.

D'après les tests de perméabilité à l'air qui ont été réalisés par le CETE sur les deux premières maisons, on a constaté une bonne étanchéité à l'air. Les infiltrations sont estimées à 0.04 vol/h pour la maison BB.

Les ponts thermiques ont été particulièrement bien traités lors de la construction des maisons. Durant la phase de conception, un coefficient de 0.16 W/(m.K) a été retenu pour le périmètre du plancher bas puis arrondi à 0.2 W/(m.K) afin de prendre en compte les ponts thermiques résiduels en particulier au niveau des vitrages.

2.2.2 Description des systèmes

Les maisons sont toutes les trois équipées :

- d'une VMC double flux installée dans le cellier du RDC.
- d'un Chauffe Eau Solaire Individuel (CESI) à capteurs plans. Le système est composé de 8 m^2 de capteurs plans vitrés et d'un ballon de stockage de 395 litres avec une résistance électrique d'appoint d'une puissance nominale de 3000 W.
- de 40 m^2 de surface de panneaux photovoltaïques en toiture.

- de résistances électriques permettant de reproduire des scénarios de charges internes, localisées à différents endroits dans les maisons afin de réaliser dans des études futures des scénarios de charges sensibles (occupation, éclairage,...) et de charges latentes par puisage d'eau chaude (cuisson, douches...)

La VMC double flux permet la récupération d'énergie sur air vicié pendant les périodes de chauffage avec un rendement de récupération de chaleur étant de 0.92 (donnée constructeur). Le débit soufflé peut varier de 90 à 165 m^3/h. La VMC est dotée d'un bypass en pilotage automatique qui s'active en été, afin de permettre le fonctionnement en mode simple flux lorsque la température extérieure devient supérieure à la consigne de chauffage. Le pilotage se fait par des sondes de température de l'air neuf et l'air extrait. Le débit de renouvellement d'air est fixé en temps normal à 135 m^3/h.

Le chauffage est assuré uniquement avec la VMC par des résistances électriques de chauffage d'appoint présentes à l'intérieur des gaines de soufflage avec une puissance nominale de 1200 W au total. La consigne de chauffage est généralement fixée à 20°C.

2.2.3 Acquisition des données et suivi expérimental

La plateforme est située sur le site de Savoie Technolac, au Bourget-du-Lac ayant les coordonnées géographiques suivantes : Longitude, -5.88° , Latitude 45.65° et Altitude 270 m. Une station météo implantée sur le site des maisons permet de mesurer la température extérieure, le rayonnement solaire (global, direct, diffus), ... Étant donné la proximité de la statio météo, les données concernant le rayonnement prennent déjà en compte les masques du site (*Massif du Revard (Est)*, *Belledonne et Chartreuse (Sud)*, *montagne de l'épine (Ouest)*). L'albedo du sol est supposé constant et égal à 0.2.

Près de 200 capteurs par maison ont été installés afin de prélever le maximum d'informations sur leur comportement thermoaéraulique. Les données sont collectées toutes les minutes sur sept centrales d'acquisition par maison.

Mesures de température d'air Afin de pouvoir caractériser un gradient vertical de température à l'intérieur des pièces, les maisons sont équipées de mâts sur lesquels sont installés trois capteurs de température de type PT100. Chacun est inséré dans un tube en PVC avec isolation pour être protégé du rayonnement solaire. Un thermomètre à boule noire est également installé sur le mât afin de mesurer la température radiante. Plusieurs mâts identiques sont placés dans les différentes pièces et permettent de suivre l'évolution de la tache solaire au cours de la journée.

Figure 2.5 – *Mat équipé de capteurs de température*

Figure 2.6 – *Boule noire*

Mesures de température de surfaces Les températures de surface des parois sont mesurées des côtés intérieur et extérieur par une fibre optique. Les températures des vitrages sont également mesurées.

Vitesse d'air Elle est mesurée grâce à des anémomètres de type fil chaud installés sur les mâts à l'intérieur des pièces.

Humidité relative Afin de mesurer l'humidité relative dans les pièces, des hygromètres à condensation sont aussi installés.

La maison est aussi équipée de Wattmètres pour mesurer les puissances électriques générées à l'intérieur de celle-ci, notamment par les résistances électriques d'appoint présentes dans les gaines de soufflage de la VMC double flux.

2.3 Campagnes de mesure et simulation

2.3.1 Scénarios de mesures type " vacances " du 4 au 22 Février

Avant le 4 Février, les maisons étaient maintenues à une température de consigne de 20°C, le débit de renouvellement d'air à 135 m^3/h et les volets restaient ouverts durant la journée de 7 h à 20 h.

A partir du 4 Février, une campagne de mesures de type "vacances" a été menée sur la maison double murs (i-DM) et la maison avec isolation par l'extérieur (i-BB) du 4 au 14 Février. Durant cette période, la température a été fixée à une consigne de 10°C (théorique). Le débit de renouvellement d'air a été fixé à 90 m^3/h et les volets ont été fermés en continu.

A partir du 14 Février, les maisons ont retrouvé le fonctionnement "normal", c'est-à-dire que le chauffage a de nouveau été réglé à une consigne de 20°C, le débit de renouvellement d'air à 135 m^3/h et les volets ouverts de 7 h à 20 h.

Avant de lancer la campagne "vacances", les premières observations faites sur l'évolution de température d'air de manière globale sur le RDC et l'étage montrent un écart de 2°C en moyenne.

Les débits d'air ne sont mesurés que sur la maison Double Murs (i-DM) par la présence de débitmètres sur le reseau de ventilation. Par contre, ce n'est pas le cas dans la maison (i-BB). Pour cela, des mesures ponctuelles ont été effectuées au niveau des bouches de soufflage et d'aspiration dans la maison (i-BB). Les résultats ont montré que 75% du débit total était soufflé au niveau de la zone à l'étage et que 25% au RDC avec une incertitude de plus ou moins 5%. Comme les résistances de chauffage se trouvent dans les gaines de soufflage de la VMC, cette pondération a aussi une influence sur la puissance injectée dans chaque zone.

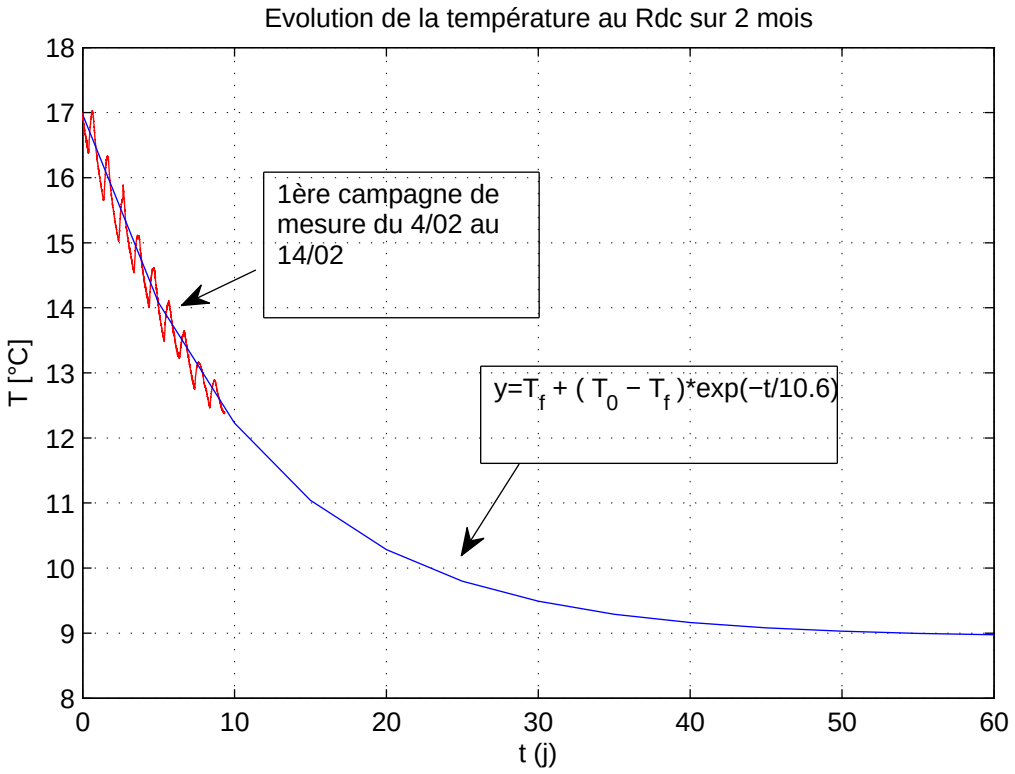

Figure 2.7 – *Campagne de mesure du 4 au 14-Fév : Phase de descente*

2.3.2 Calcul de la constante de temps

A travers les deux précédentes campagnes menées sur les maisons, il a été possible d'observer le phénomène de "charge" et "décharge" que l'on peut rencontrer de façon analogue en électricité avec un circuit RC. La température a tout d'abord chuter de façon exponentielle du 4 au 14 Février (Figure 2.7) avant de remonter du 14 Février de manière exponentielle (Figure 2.8), malgré les variations jours/nuits et l'ouverture des volets dans la journée. Bien que la constante de temps soit supérieure à la durée de chaque campagne, il a été possible de la calculer par minimisation de la somme des moindres carrés avec l'équation suivante :

$$T(t) = T(\infty) + (T(0) - T(\infty))e^{-t/\tau} \tag{2.1}$$

Cette définition générique est applicable pour la montée comme pour la descente.

Les résultats obtenus et reportés sur la Figure 2.7 et la Figure 2.8 montrent que pendant la phase de descente, la constante de temps τ du bâtiment est égale à 10.6 jours alors que pendant la phase de montée, τ était égale à 8.75 jours. La différence entre les deux valeurs de τ est due à une différence des scénarios de ventilation et d'ouverture des volets

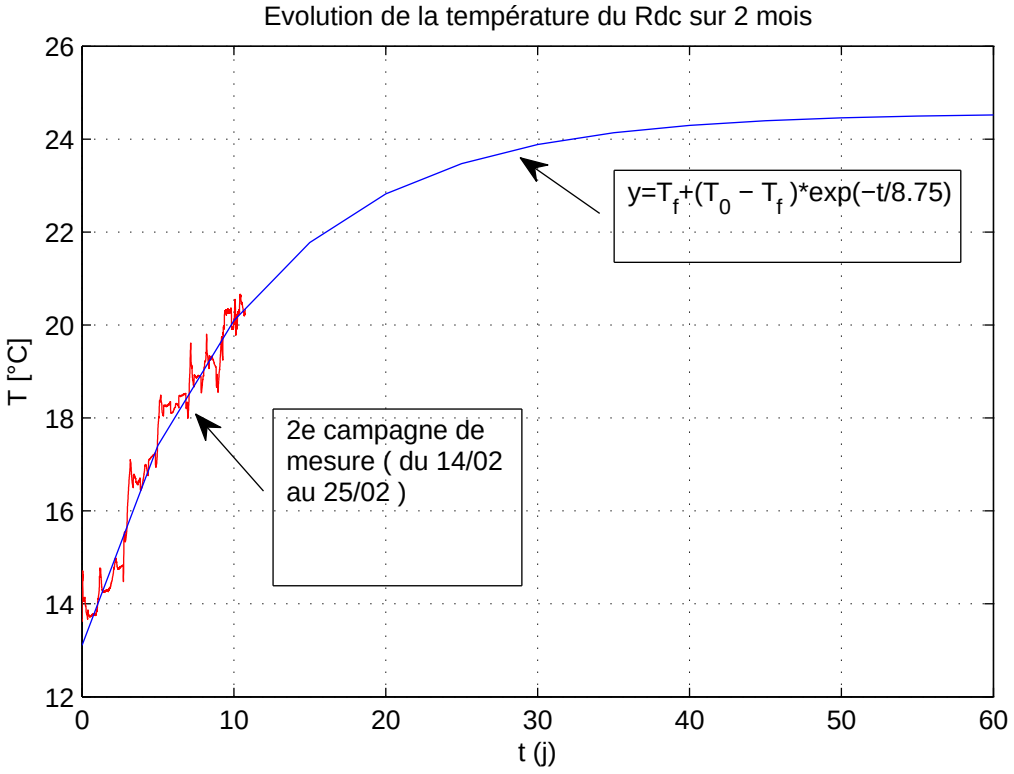

Figure 2.8 – *Campagne de mesure du 14 au 22-Fév :Phase de remontée*

2.4 Confrontation d'un modèle de simulation aux mesures

2.4.1 Hypothèses de simulation

Pour le modèle de la maison, on a adopté un modèle à deux zones non communicantes du point de vue aéraulique. Le modèle de bâtiment est implémenté dans l'environnement SimSPARK ; les équations du modèle sont présentées en annexe (voir annexe 3). Les combles ventilés ne sont pas modélisés ; on considère qu'on a une toiture terrasse et que le plancher haut est directement relié à la température extérieure avec un rayonnement solaire arrivant sur le toit considéré nul. De manière similaire, le vide sanitaire n'est pas modélisé ; en revanche, on a une condition aux limites de $1^{ère}$ espèce sachant que la température de surface au niveau du vide sanitaire est connue par la mesure.

Protections solaires On n'a pris en compte que les casquettes en façade sud et on a négligé le débord de toiture sur les autres façades ainsi que les masques formés par l'épaisseur des murs sur les menuiseries.

Masques proches et lointains Du fait de l'implantation de la station météo sur le site même, les masques proches et lointains ne sont pas pris en compte dans la modélisation.

Menuiserie Toutes les menuiseries ont été considérées comme étant en double vitrage avec 15% de fraction de cadre. On a modélisé l'occultation des fenêtres par les volets roulants ainsi que leur pilotage. Les propriétés des vitrages et des volets sont mises en annexe.

Suite aux premières comparaisons entre le modèle numérique et les mesures, on a constaté qu'il était nécessaire d'apporter quelques améliorations au niveau du modèle. Les principales ont été les suivantes : la prise en compte des ponts thermiques et la prise en compte de coefficients de convection variables.

Pour la prise en compte des ponts thermiques, on a considéré un facteur global au niveau de chaque zone exprimé en W/(m.K), qui regroupe les pertes par les contours des planchers mais aussi par les cadres des fenêtres. Le produit de ce facteur par l'écart de température entre la zone et l'extérieur est directement retranché du bilan énergétique de la zone.

En ce qui concerne les coefficients de convection, leurs formules détaillées sont présentées en annexe.

Le pas de temps de la simulation a été pris constant et égal à cinq minutes.

Il est important de faire attention à la cohérence entre le type de temps du fichier météo et celui utilisé dans l'outil de simulation. Il existe trois types de temps :

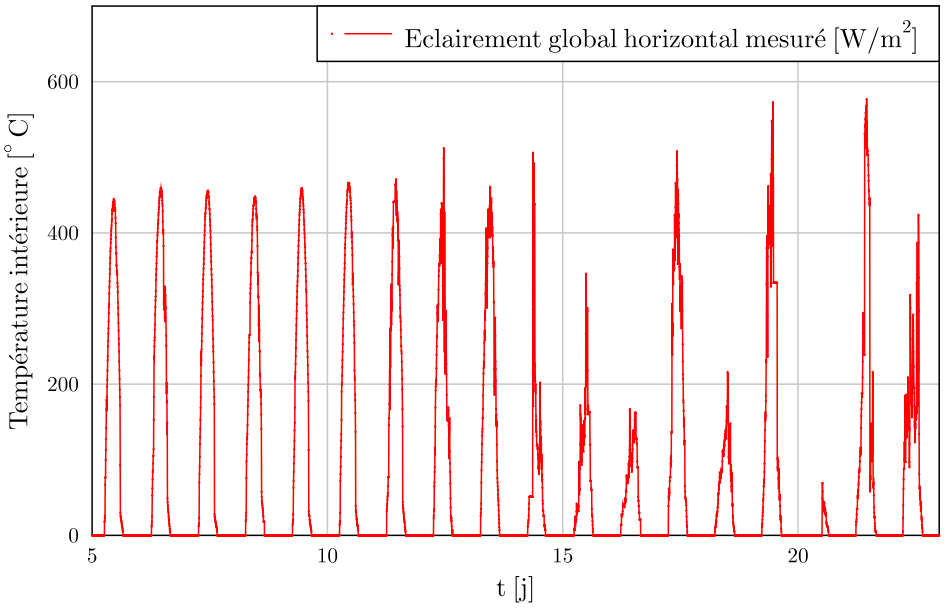

Figure 2.9 – *Evolution de l'ensoleillement global du 4 au 22-Fév*

Temps GMT ou le *"Temps Moyen solaire de Greenwich"* ou *"Temps Universel"* qui correspond à une mesure de temps où la hauteur du Soleil devient maximale lorsqu'il est midi au Méridien de Greenwich (à Londres).

Temps Local ou aussi appelé *"Temps Légal"* qui est l'heure lue sur la montre. Il tient généralement compte du fuseau horaire dans lequel se situe en majeure partie le pays et se trouve donc décalée d'un nombre entier d'heures par rapport au fuseau origine (Méridien de Greenwich).

Temps Solaire ou *"Temps Vrai"* qui est une mesure du temps basée sur la définition de midi solaire. C'est l'instant où le Soleil atteint son point le plus élevé dans le ciel, en un endroit donné de la Terre.

Les données de la station météo sont fournies avec un Temps GMT, ce qui est cohérent avec le type de fichier utilisé par le modèle.

Les figures (2.9) et (2.10) montrent l'évolution du rayonnement solaire global horizontal et de la température extérieure mesurés par la station météo du site ainsi que la température mesurée dans le vide sanitaire au cours de la période étudiée.

On constate que durant la période allant du 4 au 14 Février, la température extérieure et le flux solaire étaient assez réguliers, ce qui n'est pas le cas de la période allant du 14 au 22 Février.

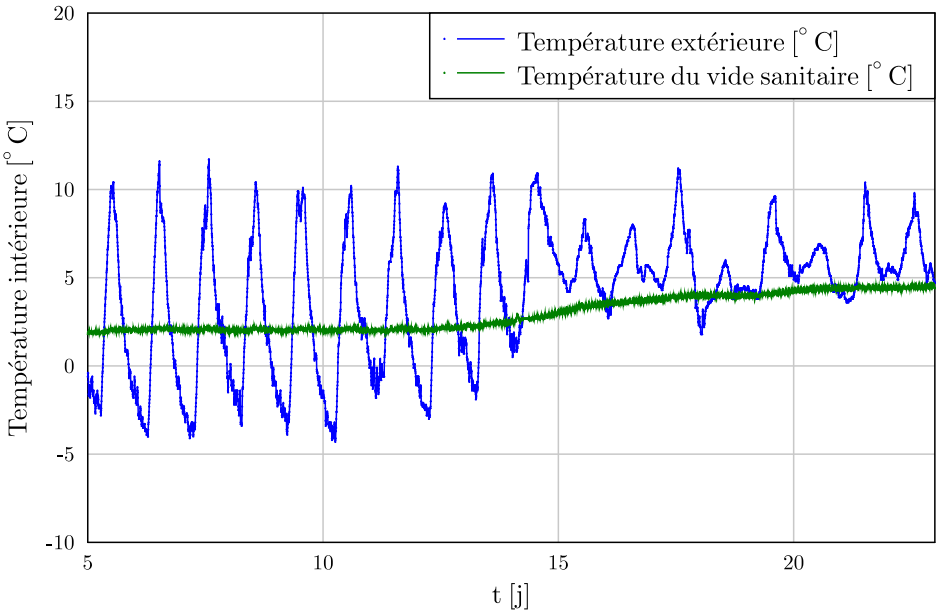

Figure 2.10 – *Evolution de la température extérieure et de la température de vide sanitaire du 4 au 22-Fév*

2.4.2 Comparaison entre modèle et expérimentation

Les deux points forts de la plateforme INCAS permettent la validation de modèles, un niveau de connaissance précis du descriptif des bâtiments et d'autre part une simplicité de construction qui facilite l'implémentation de modèles numériques variés. La quantité de données disponibles est considérable en termes de mesures que ce soit à l'intérieur des maisons ou en données météorologiques. La plateforme recense en moyenne 200 capteurs par maison, ce qui laisse la possibilité de confronter une large gamme de modèles numériques allant des modèles nodaux jusqu'aux modèles ayant des niveaux de finesse plus élevés.

Dans ce travail, on a opté pour la simplicité du modèle en choisissant un modèle nodal avec une température homogène par zone. En réalité dans chaque zone la température change sensiblement dans l'espace selon que le capteur soit situé dans l'éclairement d'une fenêtre ou non, à la sortie d'une bouche de soufflage, ou encore dans une pièce confinée en présence d'équipement qui génère une charge interne sensible...

Pour être cohérent avec la simplicité du modèle, on a pris soin de choisir des mesures de températures les moins influencées possible. Pour cela, on a choisi au RDC la température entre l'entrée et le séjour (Figure 2.11) , et la température de la chambre 1 à l'étage (Figure 2.12).

Le modèle numérique tel qu'il a été décrit a été comparé aux mesures expéri-

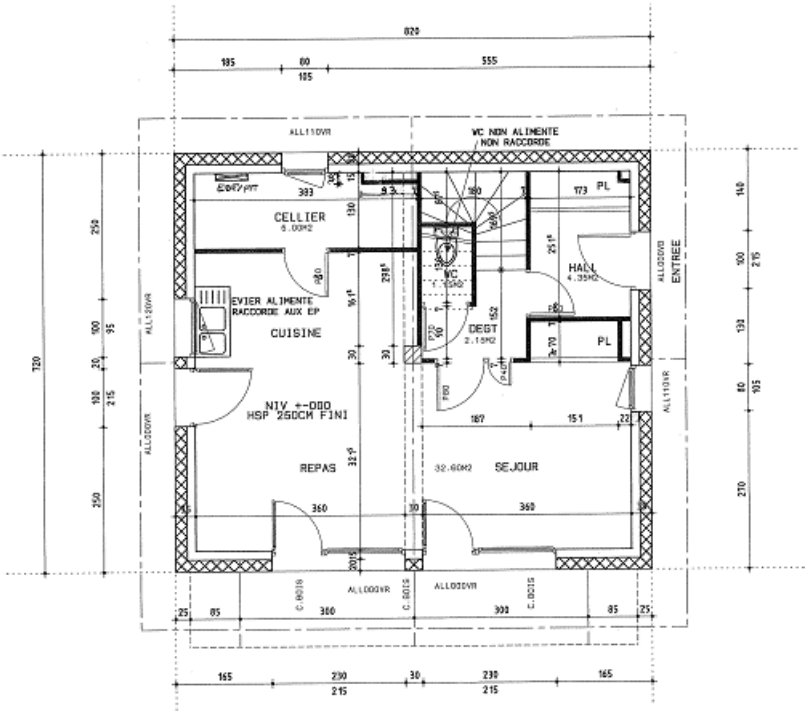

Figure 2.11 – *Plan du rez-de-chaussée dans la maison BB*

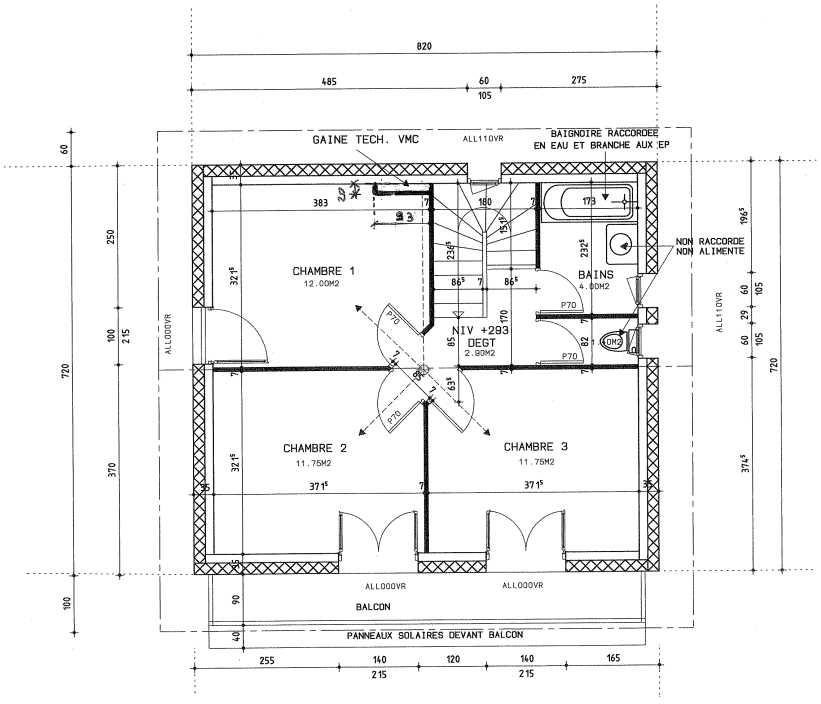

Figure 2.12 – *Plan de l'étage dans la maison BB*

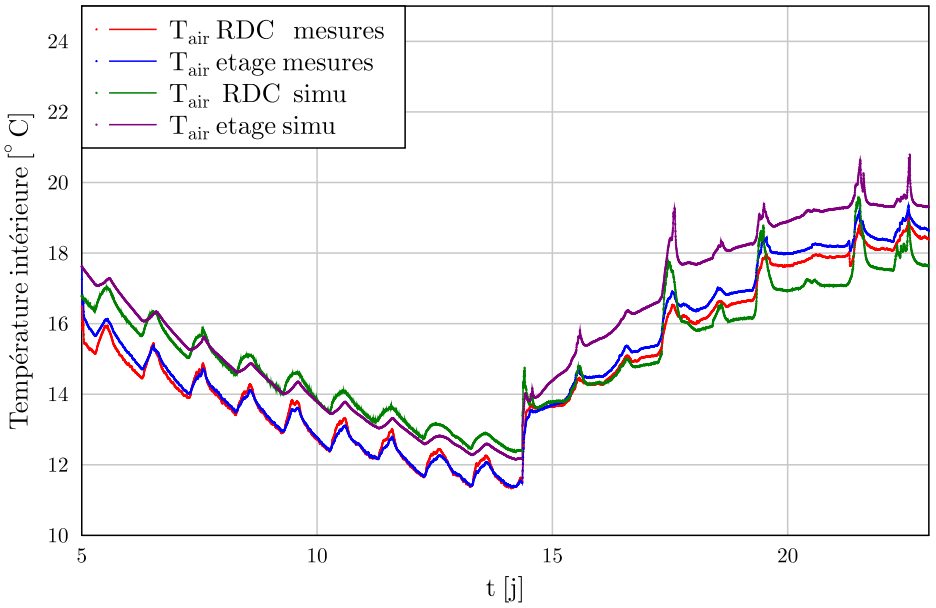

Figure 2.13 – *Comparaison de la simulation de base avec les mesures du 4 au 22-Fév*

mentales prélevées au cours des campagnes du 4 au 22 Février. On définit cette configuration comme étant le cas "de base" auquel on fera référence pour la suite de l'étude. Dans cette simulation de base, on a considéré que le débit de ventilation insufflé était le même dans les deux zones. Les résultats de simulation pour le cas de base sont présentés sur la Figure 2.13 avec les mesures des températures d'air sèches.

Sur la Figure 2.14, sont représentées les puissances de chauffage pour la période allant du 4 au 22 Février.

Pour la première partie, la simulation et les mesures semblent varier dans le même sens : les tendances sont identiques et dans les deux cas la température au RDC est supérieure à la température à l'étage. Pour la seconde partie, on constate quelques différences : on note que la mesure au RDC remonte plus vite que la température simulée, ce qui est l'inverse pour l'étage où on constate que la réponse du modèle remonte plus vite et demeure plus élevée que la mesure. Les principales raisons pouvant être à l'origine de cette différence sont liées au changement de régime de fonctionnement qui peuvent être les suivantes :

- il existe une répartition non-équitable des débits de ventilation soufflés dans les zones
- les consignes de chauffage sont différentes de celles annoncées

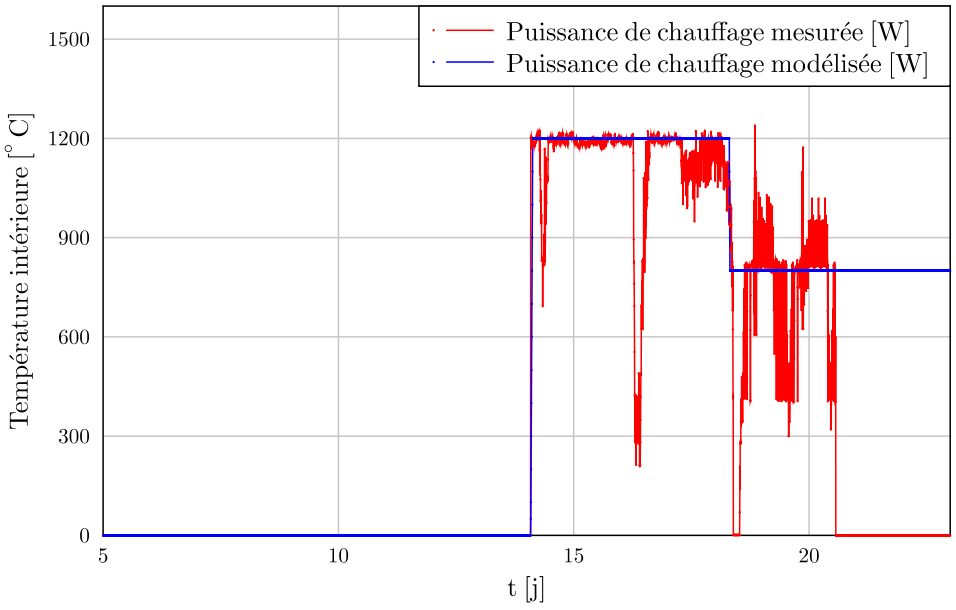

Figure 2.14 – *Evolution de la puissance de chauffage du 4 au 22-Fév*

- l'ouverture/fermeture des ouvrants est non conforme au scénario annoncé
- la prise en compte des apports solaires est délicate

Après avoir constaté que les ouvrants fonctionnent conformément au scénario au cours de la campagne, on a retenu comme raison la répartition non-équitable du débit de ventilation entre les zones. Le chauffage étant assuré par une résistance électrique dans les gaines de soufflage de la VMC double flux, la puissance de chauffage arrivant dans chaque zone serait aussi répartie de la même manière. On ajoute alors sur le modèle la prise en compte d'une variable pondérant à la fois le débit de ventilation et la puissance de chauffage injectés dans chaque zone.

D'autre part, on peut remarquer dans les mesures de la seconde période que les pics de température sont plus importants au RDC qu'à l'étage. Ceci s'explique par le fait que la mesure du RDC a été relevée au niveau du palier, juste à côté du séjour, qui est davantage exposé aux flux solaires tandis que la mesure au premier étage correspond à la chambre 1, située côté Nord. Les pics en journée prélevés au RDC peuvent atteindre 2°C d'amplitude pour 1°C au même moment dans la chambre 1. Ceci n'est pas visible dans la réponse du modèle étant donné qu'on fait l'hypothèse d'homogénéité des températures dans chaque zone.

De plus, les mesures de consommation sur cette période (voir Figure (2.14)) sont difficiles à utiliser. Le chauffage fonctionnant en tout ou rien, on devrait pouvoir lire à chaque pas de mesure soit une puissance de chauffe nulle, soit une puissance

nominale de 1200 W, ce qui n'est pas le cas à cause de la fréquence de la mesure. Pour cela, on a effectué une correction sur les profils des puissances injectées qui a semblé par la suite apporter plus de justesse.

2.5 Optimisation des paramètres incertains pour une meilleure fiabilité du modèle

2.5.1 Présentation de la méthodologie

Malgré le bon niveau de connaissance des caractéristiques des maisons, il subsiste des données qu'on ne maîtrise pas complètement et qui peuvent influencer le comportement global du bâtiment de manière significative. Actuellement sur le site de l'INES, des travaux en cours sont portés sur le développement de méthodes d'évaluation servant à identifier l'origine des écarts entre performances énergétiques estimées et mesurées. En utilisant cette approche, on a cherché à déterminer les paramètres incertains étant à l'origine des écarts entre la mesure et la simulation comme par exemple le coefficient de pondération du débit d'air soufflé que nous venons de définir dans le paragraphe précédent. Sous peine de devoir donner à certaines variables des valeurs de manière intuitive pouvant modifier le comportement du modèle par rapport à la réalité et fausser la comparaison, on a choisi d'adopter une démarche qui consiste à rapprocher la réponse du modèle aux mesures en ayant recours à l'optimisation afin d'identifier ces paramètres "mal connus".

La méthodologie que nous avons suivie se déroule en deux étapes.

Tout d'abord, on fait une pré-sélection des paramètres les moins maîtrisés du modèle susceptibles d'avoir un effet sur la réponse du bâtiment. Par une analyse de sensibilité de ces paramètres sur la constante de temps du bâtiment caractérisant la tendance de l'évolution des températures comme on l'a vu sur les Figures (2.7) et (2.8), on cherche à observer leur influence sur celle-ci. Puis on sélectionne parmi ces paramètres incertains ceux qui sont les plus influents.

Ainsi, en se limitant à huit paramètres, on procède à l'ajustement de la réponse du modèle et de la mesure en les identifiant par minimisation de la somme des moindres carrés.

2.5.2 Pré-sélection des paramètres influents

Les paramètres entrant dans le modèle numérique sont nombreux, il est donc nécessaire de choisir ceux qui semblent les plus pertinents à étudier. On sélectionne treize paramètres que l'on regroupe en quatre principales catégories : "Matériaux", "Aéraulique", "Déperditions", "Vitrages".

Pour la catégorie "Matériaux", on a retenu la capacité calorifique du béton qui

caractérise l'aspect inertiel de l'enveloppe et la conductivité du polystyrène extrudé qui caractérise la résistance thermique de celle-ci. Le polystyrène étant fourni sous forme de panneaux, l'épaisseur de l'isolation est plutôt bien maîtrisée.

		Période 1	Période 2
C_b	Capacité calorifique du béton dans les murs verticaux [a] $[J/(m^3.K)]$	$2.3 * 10^6$	$2.3 * 10^6$
λ_p	Conductivité du polystyrène extrudé dans les murs verticaux $[W/(m^2.K)]$	0.029	0.029

[a] produit de la densité et de la chaleur spécifique

Table 2.1 – Catégorie 1 : Matériaux

En ce qui concerne le volet "Aéraulique", on a retenu le taux de renouvellement d'air , le coefficient de pondération des débits dans les zones et le rendement de la VMC double flux.

		Période 1	Période 2
V	Débit de renouvellement d'air $[vol/h]$	0.6	0.9
P_{V_0}	Pourcentage du débit de renouvellement d'air soufflé au RDC [-]	0.5	0.5
η	Rendement de la ventilation double flux [-]	0.8	0.8

Table 2.2 – Catégorie 2 : Aéraulique

Pour la partie "Déperditions", on a considéré les coefficients de déperditions linéiques pouvant provenir au niveau des liaisons du plancher bas et du plafond et autour des fenêtres et sont pris égaux à 0.2 $W/(m.K)$. On a également tenu compte des débits d'infiltrations qu'on a pris égaux aux valeurs qui ont été annoncées lors du test d'étanchéité à l'air.

		Période 1	Période 2
L_0	Coefficient générique des pertes au RDC $[W/(m.K)]$	0.2	0.2
L_1	Coefficient générique des pertes à l'étage $[W/(m.K)]$	0.2	0.2
$Q_{inf,0}$	Débit d'infiltration au RDC [vol/h]	0.04	0.04
$Q_{inf,1}$	Débit d'infiltration à l'étage [vol/h]	0.04	0.04

Table 2.3 – Catégorie 3 : Déperditions

Dans la catégorie des paramètres liés aux caractéristiques des "Vitrages", on a considéré le coefficient d'échange global des vitrages. On a aussi choisi le coefficient de transmittance des vitrages, le coefficient de transmittance des volets et l'albedo.

		Période 1	Période 2
U_{vi}	Coefficient d'échange des vitrages $[W/(m^2.K)]$	1.3	1.3
τ_{vi}	Transmittance du vitrage [-]	0.588	0.588
τ_{vo}	Transmittance du volet [-]	0.01	0.01
α	Albedo [-]	0.2	0.2

Table 2.4 – Catégorie 4 : Vitrages

L'analyse de sensibilité consiste ensuite à effectuer une perturbation de chaque paramètre de plus ou moins 10% et d'observer l'effet engendré sur la réponse du bâtiment. On calcule la constante de temps de chaque zone pour chaque réponse à une perturbation par la méthode présentée au chapitre 1 (1.1.3.2). Pour évaluer la variation provoquée sur la constante de temps par rapport à la simulation de base, on définit le *facteur de sensibilité* S_τ tel que :

$$S_\tau = \frac{\Delta\tau}{\tau} \tag{2.2}$$

Ce facteur de sensibilité exprime l'intensité de la variation provoquée sur la constante de temps par rapport à sa valeur initiale. On définit de la même façon la variation relative du paramètre étudié par :

$$S_{x,i} = \frac{\Delta x_i}{x_i} \tag{2.3}$$

x_i étant un des paramètres étudiés.

Afin de généraliser le facteur de sensibilité dans le cas où les variations relatives des paramètres sont différentes, on définit le *facteur de sensibilité absolu* tel que :

$$R_{x,i} = \frac{S_\tau}{S_{x,i}} = \frac{\frac{\Delta\tau}{\tau}}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} \tag{2.4}$$

Dans notre cas, comme on génère des perturbations de plus ou moins 10% sur les paramètres, $S_{x,i} = 0.1$.

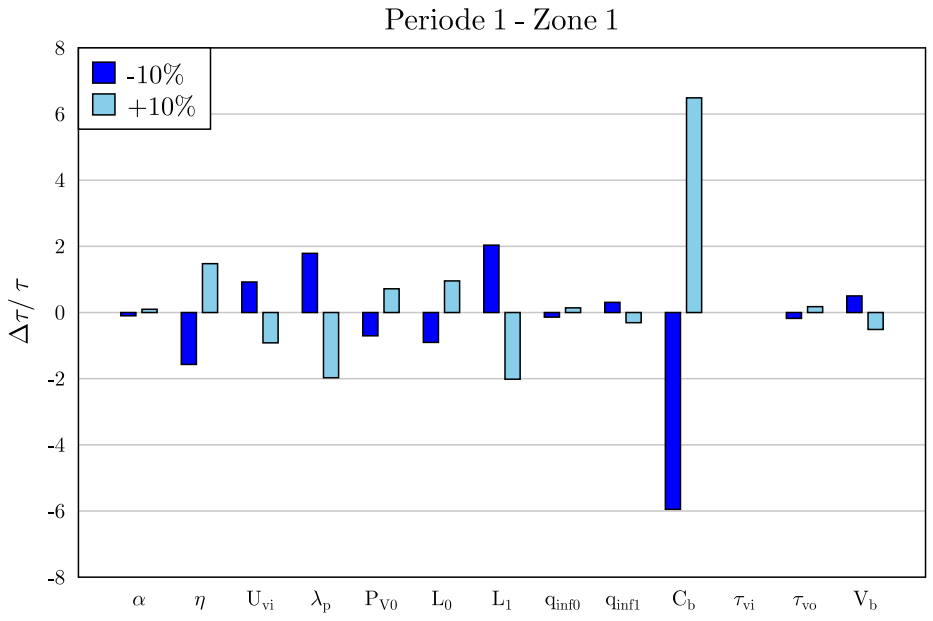

Figure 2.15 – *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 1 dans la zone 1*

2.5.3 Etude des effets des paramètres sur la constante de temps

L'objectif de l'analyse de sensibilité est de pouvoir repérer parmi les nombreux paramètres du modèle numérique, ceux qui ont le plus d'influence sur le comportement du bâtiment afin de mieux comprendre d'où peuvent provenir les écarts entre le modèle numérique et les mesures expérimentales. Elle constitue une étape fondamentale avant la mise en place d'une optimisation et permet d'orienter la recherche des valeurs des paramètres de simulation incertains. On présente dans ce qui suit l'étude de sensibilité qu'on a effectuée respectivement dans chaque zone pour chacune des périodes de la campagne de mesure à savoir, la période de décharge (période 1) et la période de relance (période 2).

Les figures (2.15) et (2.16) montrent les résultats de l'étude sensibilité au cours de la période 1 pour les zones 1 et 2 où l'on peut voir les indices de sensibilité de la constante de temps par rapport à chacun des paramètres.

Pour la zone 1, on constate que l'effet de la variation de la capacité calorifique du béton C_b est prépondérant dans les deux zones. On remarque ensuite à un même ordre de grandeur les effets de la conductivité du polystyrène λ_p et du coefficient global de déperditions puis l'effet du rendement de la ventilation double flux η.

A priori on remarque que la constante de temps (ou le temps de réponse du

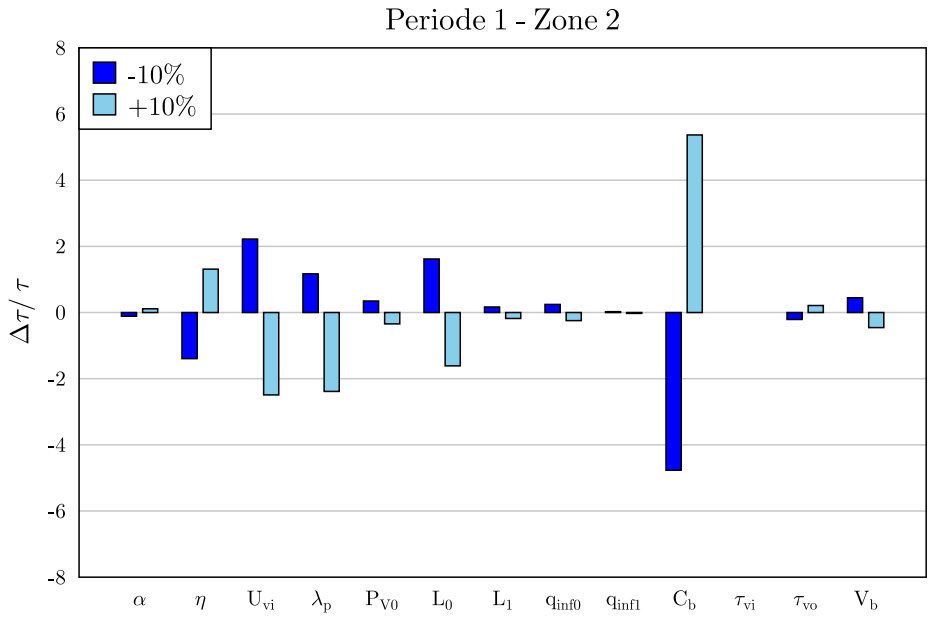

Figure 2.16 – *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 1 dans la zone 2*

bâtiment) évolue avec la capacité calorifique du béton, et le rendement de la VMC, ce qui est attendu : d'une part la capacité de stockage est augmentée et d'autre part, la récupération de la chaleur sur air vicié est améliorée, et donc la conservation de celle-ci. Par ailleurs, les évolutions du coefficient U global des vitrages, de la conductivité du polystyrène, et du coefficient de déperditions linéiques favorisent les pertes de chaleur et contribuent à une chute plus rapide de la température intérieure, et donc à réduire la constante de temps du bâtiment.

On observe les mêmes comportements dans la zone 2 : tout d'abord, l'effet de la capacité calorifique du béton est aussi le plus important, puis l'effet du coefficient global des fenêtres U_{vi}, l'effet de la conductivité du polystyrène, et du coefficient global de déperditions. On remarque également que la capacité calorifique du béton et le rendement de la VMC contribuent à ralentir la chute de température du bâtiment et le reste des paramètres dont les effets sont significatifs lorsqu'ils évoluent à savoir, le coefficient U des vitrages, la conductivité du polystyrène et le coefficient de déperditions linéiques vont réduire la constante de temps.

Le tableau 2.5 expose les valeurs des indices de sensibilité absolus $R_{x,i}$ des paramètres étudiés sur la constante de temps dans les zones 1 et 2. Le signe de l'indice $R_{x,i}$ permet de montrer le sens de l'évolution de la constante de temps par rapport au paramètre. On s'intéresse aussi à la valeur absolue du rapport des indices sur à la valeur maximale c'est-à-dire celle de la capacité calorifique du béton.

	Zone 1				Zone 2			
	-10%		+10%		-10%		+10%	
	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$
α	-0.01	1.66	0.01	1.51	-0.01	2.4	0.01	2.1
η	-0.16	26.4	0.15	22.8	-0.14	29.2	0.14	24.4
U_{vi}	0.09	15.5	-0.09	14.1	0.22	46.4	-0.25	46.6
λ_p	0.18	30.1	-0.18	30.4	0.12	24.5	-0.24	24.5
P_{V_0}	-0.07	11.8	0.07	11.1	0.03	5.1	-0.03	6.4
L_0	-0.09	15.2	0.09	14.8	0.16	34.0	-0.16	30.1
L_1	0.2	34.2	-0.2	31.1	0.02	3.35	-0.02	3.35
q_{inf0}	-0.01	2.4	0.01	2.2	0.02	5.1	-0.02	4.6
q_{inf1}	0.03	5.2	-0.03	4.7	0.0	0.5	0.0	0.55
ρc_b	**-0.59**	**100.0**	**0.65**	**100.0**	**-0.54**	**100.0**	**0.48**	**100.0**
τ_{vi}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
τ_{vo}	-0.02	2.9	0.02	2.7	-0.02	4.4	0.02	4.0
V_b	0.05	8.5	-0.05	7.9	0.05	9.4	-0.05	8.5

Table 2.5 – Etude des facteurs de sensibilité des paramètres du modèle sur la constante de temps au cours de la période 1 dans les zones 1 et 2 pour des perturbations de plus ou moins 10%

Il est important de souligner que pour chaque perturbation du paramètre, la constante de temps a été évaluée par ajustement des températures d'air intérieures avec la méthode des moindres carrés (voir procédure au chapitre 1), donc par un procédé itératif qui s'arrête lorsqu'un seuil de tolérance sur la différence est atteint.

Ce qui fait qu'il existe une incertitude sur la détermination de la constante de temps et si la perturbation du paramètre n'a pas un effet suffisamment important sur celle-ci, le signe de son indice de sensibilité n'est pas du tout significatif. Comme par exemple le taux d'infiltration au RDC, q_{inf0} pour la zone 1. On considère que l'effet du paramètre devient significatif lorsque le rapport $R_{x,i}$ sur $R_{x,max}$ est supérieur à 30% (voir tableau 2.5).

On peut remarquer que l'indice de sensibilité de la conductivité du polystyrène λ_p n'a pas la même intensité lorsque celle-ci varie de plus ou de ou moins 10%. En effet, lorsqu'on réduit la conductivité de l'isolant, la résistance thermique est par conséquent augmentée et à partir d'un certain niveau d'isolation, son influence est plus importante lorsqu'elle est diminuée.

On vérifie bien que le coefficient de transmission des vitrages τ_{vi} n'a absolument aucun effet puisque les volets sont fermés.

La figure (2.18) et (2.19) représentent les résultats de l'étude de sensibilité sur la période 2 dans les zones 1 et 2.

Ici on constate dans la zone 1 que le coefficient de pondération P_{V_0} du débit d'air

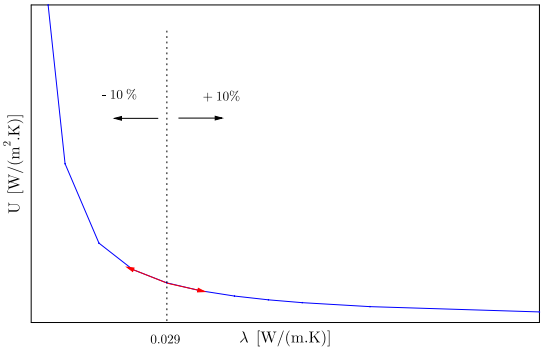

Figure 2.17 – *Effet non symétrique de la conductivité du polystyrène*

soufflé entre les zones est le paramètre le plus influent. L'effet du rendement de la VMC double flux η vient juste après, puis la capacité calorifique du béton C_p, le coefficient de transmission du vitrage τ_{vi} et le coefficient global d'échange U_{vi} des fenêtres.

De la même manière que pour la période 1, on a détaillé les valeurs des facteurs de sensibilité absolus $R_{x,i}$ dans le tableau 2.6 pour les paramètres étudiés sur la constante de temps dans les zones 1 et 2. On rapporte leurs valeurs à la valeur maximale à savoir celle de la variable P_{V_0} pour la zone 1 et pour la zone 2, celle du rendement η de la VMC dans le cas d'une perturbation de 10% et celle du coefficient de transmission des vitrages τ_{vi} pour une perturbation de -10%.

Les paramètres contribuant à ralentir la réponse du bâtiment sont : la capacité calorifique du béton, les paramètres liés aux déperditions, le coefficient U des vitrages et la conductivité du polystyrène. Ces paramètres s'opposant à la remontée du bâtiment en température, ils augmentent le temps de réponse du bâtiment et de ce fait sa constante de temps. L'évolution du coefficient P_{V0} a des effets opposés sur les zones 1 et 2 : il contribue à baisser la constante de temps de la zone en rez-de-jardin et augmenter le temps de réponse de la zone à l'étage. Le rendement de la VMC double flux a un effet opposé dans ce cas : son augmentation permet de réchauffer plus vite le bâtiment et de ce fait, de réduire sa constante de temps.

Après avoir évalué les effets des treize paramètres pré-sélectionnés sur le comportement du bâtiment et observé lesquels étaient les plus influents, on en sélectionne huit que l'on étudie plus profondément.

Les paramètres qu'on a choisis pour l'optimisation sont : le rendement de la VMC double flux η, le coefficient de pondération de la ventilation et du chauffage P_{V_0}, la transmittance globale des fenêtres τ_{vi}, le coefficient U global des fenêtres U_{vi}, les coefficients de déperdition L_0 et L_1 qui entrent dans l'estimation des ponts thermiques.

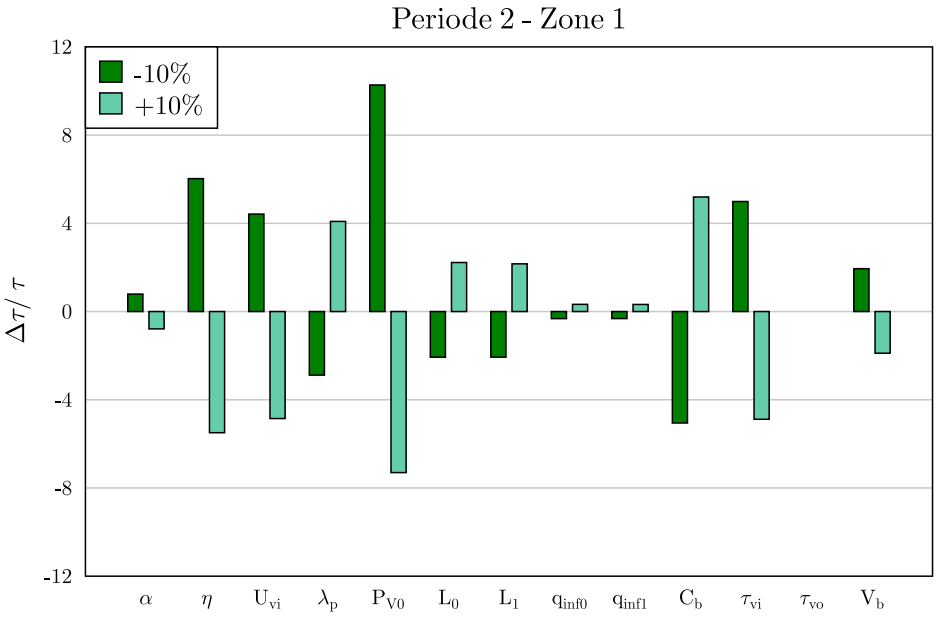

Figure 2.18 – *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 2 dans la zone 1*

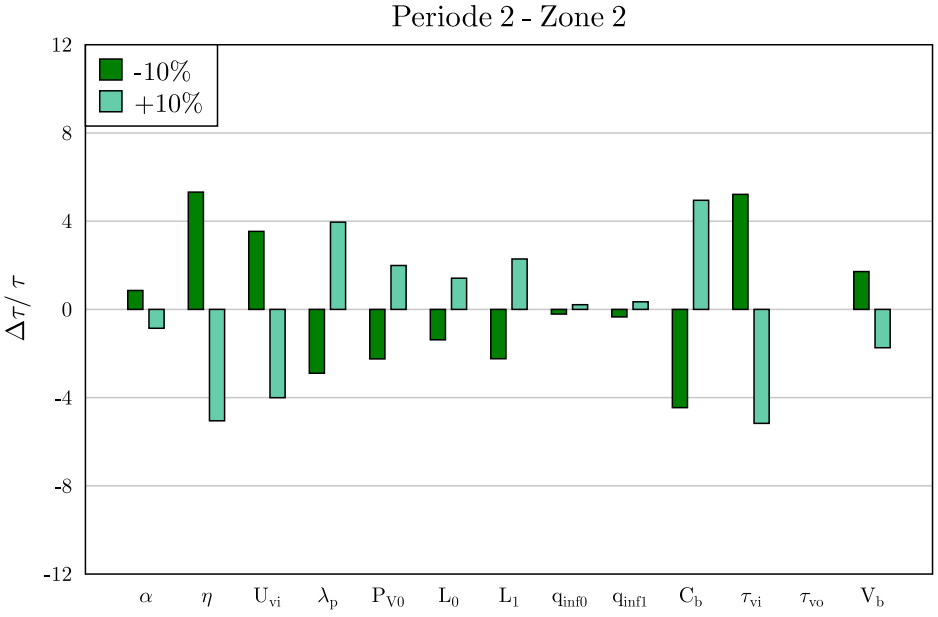

Figure 2.19 – *Effet d'une perturbation de 10% de chacun des treize paramètres sur la constante de temps au cours de la période 2 dans la zone 2*

	Zone 1				Zone 2			
	-10%		+10%		-10%		+10%	
	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$	$R_{x,i}$	$\|\frac{R_{x,i}}{R_{x,max}}\|$
α	0.08	7.7	-0.08	10.8	0.09	16.6	-0.09	16.6
η	0.6	58.7	-0.6	75.2	**0.53**	**100**	**0.51**	**97.8**
U_{vi}	0.44	43.0	-0.49	66.5	0.35	66.5	-0.4	77.5
λ_p	-0.29	28.1	0.41	55.9	-0.29	54.4	0.4	76.5
P_{V_0}	**1.0**	**100.0**	**-0.73**	**100.0**	-0.22	42.2	0.22	38.5
L_0	-0.22	21.6	0.21	30.4	-0.14	25.9	-0.14	27.4
L_1	-0.22	21.0	0.21	29.6	-0.22	42.2	-0.22	44.3
q_{inf0}	-0.03	3.2	0.03	4.4	-0.02	4.1	-0.02	4
q_{inf1}	-0.03	3.1	0.03	4.3	-0.03	6.4	-0.03	6.7
ρc_b	-0.52	49.2	0.51	71.2	-0.5	83.7	0.49	95.7
τ_{vi}	0.49	48.6	-0.5	66.3	**0.52**	**98.1**	**-0.52**	**100.0**
τ_{vo}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V_b	0.19	18.9	-0.19	25.9	0.17	32.2	-0.17	33.7

Table 2.6 – Etude des facteurs de sensibilité des paramètres du modèle sur la constante de temps au cours de la période 2 dans les zones 1 et 2 pour des perturbations de plus ou moins 10%

Les domaines de variation ont été pris de façon suivante :

Variables	Simulation de base	Borne INF	Borne SUP	Pas de variation	Résultat optimisé
η	0.75	0.7	0.8	0.05	0.77
P_{V_0}	0.5	0.3	0.4	0.05	0.32
L_0	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
L_1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
τ_{vi}	0.588	0.47	0.7056	0.0589	0.47
U_{vi}	1.3	1.1	1.625	0.13	1.1

Table 2.7 – Paramètres de l'optimisation et leurs domaines de variation

La première colonne du tableau (2.7) correspond à la valeur prise par les variables dans la simulation de base. Les bornes inférieure (INF) et supérieure (SUP) déterminent les intervalles dans lesquels on fait varier ces paramètres.

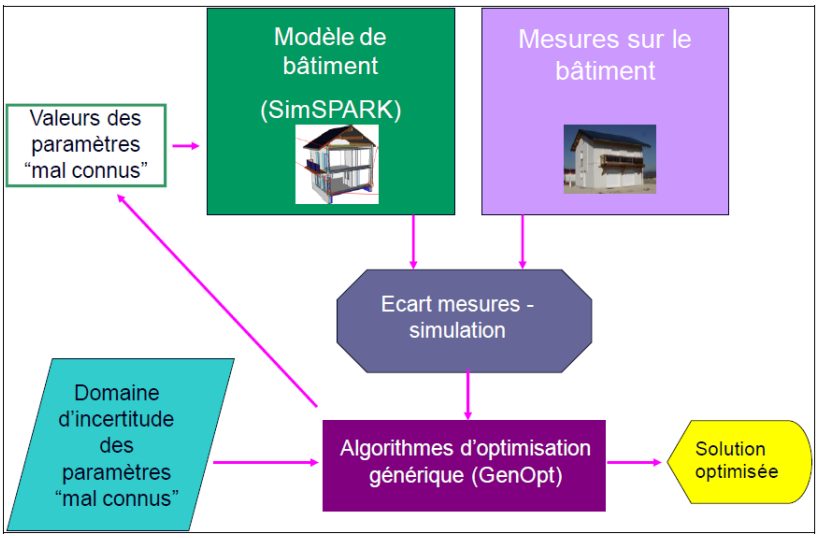

Figure 2.20 – *Description de la procédure d'optimisation par le couplage de* SimSPARK *avec GenOpt*

2.5.4 Identification des paramètres incertains et analyse d'incertitude

La fonction objective à minimiser est la somme des moindres carrés entre les températures d'air simulées et mesurées qui correspond à la somme des surfaces entre deux courbes pour chaque zone. La procédure de la recherche des paramètres incertains a été réalisée par un couplage du modèle de simulation implémenté dans SimSPARK avec l'outil d'optimisation GenOpt dont a décrit le fonctionnement au chapitre 1 (1.5.3) comme sur la Figure (2.20).

On peut comparer les résultats de la simulation optimisée et de la simulation de base avec les mesures sur les figures (2.21) et (2.22).

Le tableau (2.7) affiche les configurations des paramètres de la simulation optimisée et de la simulation de base. On observe que :

- la pondération du débit de ventilation/chauffage est passée de 50%-50% à 32%-68% respectivement dans les zones 1 et 2,
- le rendement de la VMC double flux et les coefficients de déperditions linéiques ne varient presque pas,
- la transmittance des vitrages est passée de 0.588 à 0.47 et le coefficient U global des vitrages 1.3 à 1.1.

Les critères que nous cherchons à comparer sont les tendances et les pics des températures.

Au cours de la période 1, les tendances des réponses des zones 1 et 2 par la simulation optimisée se sont davantage rapprochées des mesures lorsque le coefficient U des vitrages U_{vi} a été réduit : la chute de température devient moins marquée ce qui correspond à une constante de temps plus élevée.

Au cours de la période 2, la solution optimisée montre un équilibrage des températures dans les zones dues à une meilleure répartition des puissances injectées.

Par ailleurs, ce que montre également la comparaison des réponses du modèle avec la mesure c'est que en ce qui concerne les pics de température, notamment durant la période de remontée lorsque les volets sont à nouveau ouverts, la prise en compte du rayonnement dans le modèle numérique nécessite d'être améliorée. En effet, on constate durant la journée du 17/02, l'écart des pics des températures mesurées et simulées dans les zones 1 et 2.

Ainsi en rectifiant principalement la répartition de la chaleur générée dans les zones au cours de la période 2 et les caractéristiques des vitrages, on constate que le modèle de simulation thermique est capable de fournir des réponses cohérentes avec les mesures.

En procédant à une analyse d'incertitude sur les paramètres du modèle, on a représenté en pointillé le domaine dans lequel les résultats de la simulation peuvent varier en fonction de la précision des données.

Dans le tableau (2.8), on détaille les incertitudes des paramètres et leurs lois de comportement. Par la suite, à l'aide d'outils de calcul d'incertitude développés au sein de l'INES (travaux de Clara Spitz), en procédant à un échantillonnage des paramètres du modèle, le domaine d'incertitude sur les réponses de celui-ci est évalué à plus ou moins 2*σ de la réponse optimisée.

Paramètre	Valeur moyenne	Incertitude	Loi de comportement
λ_p	0.03	±5%	normale
η	0.77	±20%	uniforme
P_{V_0}	0.32	±20%	uniforme
L_0	0.2	±20%	uniforme
L_1	0.2	±20%	uniforme
τ_{vi}	0.47	±10%	normale
U_v	1.1	±5%	normale

Table 2.8 – Paramètres de l'optimisation et leurs domaines de variation

2.6 Conclusion

En conclusion, ce travail a permis de montrer qu'il était possible d'approcher le comportement réel d'un bâtiment à l'aide d'un modèle nodal implémenté dans

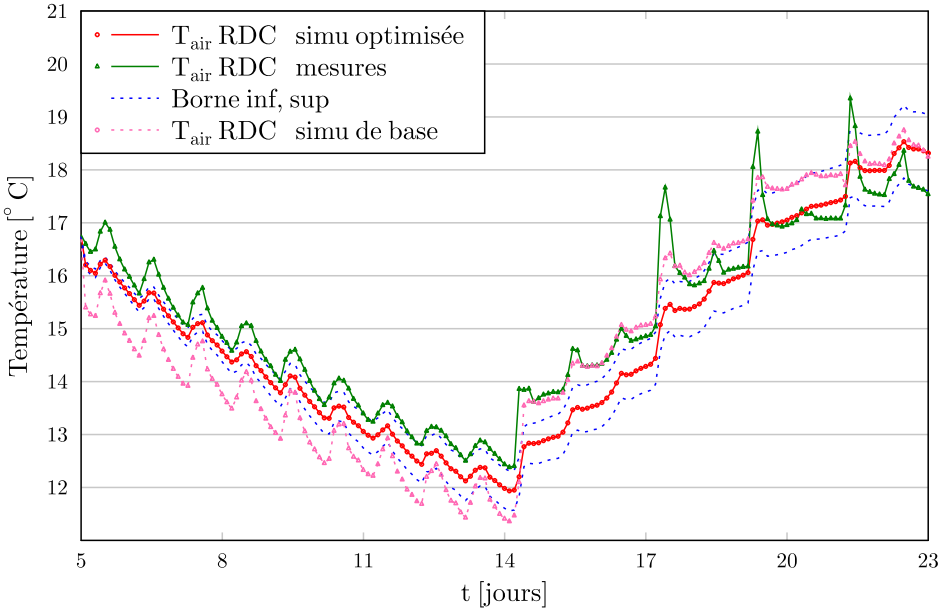

Figure 2.21 – *Optimisation de la somme des moindres carrés en variant les huit paramètres les plus influents sur la constante de temps*

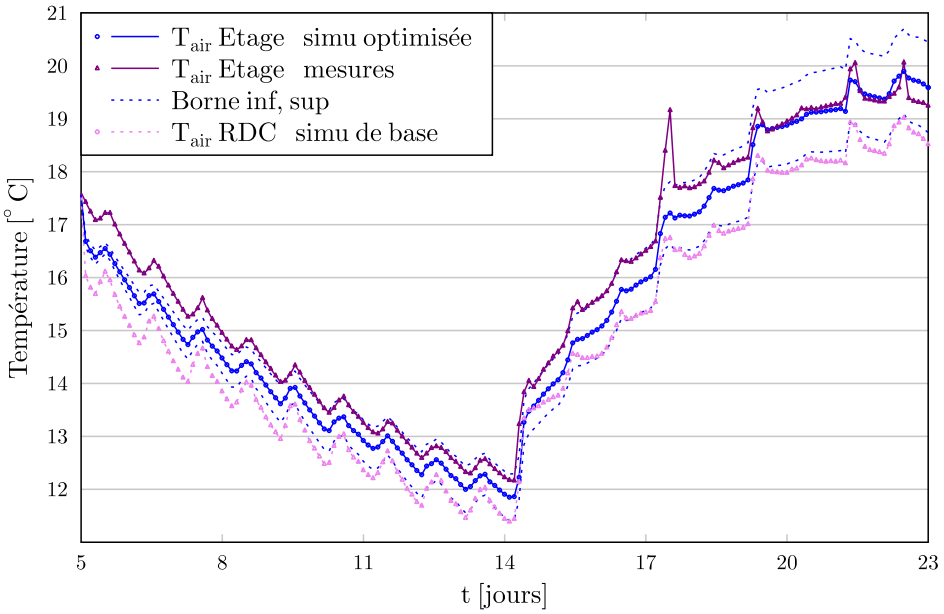

Figure 2.22 – *Optimisation de la somme des moindres carrés en variant les 9 paramètres les plus influents sur la constante de temps*

l'environnement SimSPARK. En adoptant une démarche consistant à faire une analyse de sensibilité sur la constante de temps du bâtiment, on a pu déterminer les paramètres les plus influents sur le temps de réponse de celui-ci. On a étudié le comportement de la maison en béton banché de la plateforme INCAS respectivement en régime de décharge et de remontée en température. Il s'est avéré que les paramètres dont l'effet s'opposait à l'évolution de la température contribuaient à augmenter la constante de temps du bâtiment. En ayant recours à l'optimisation, il a été possible de rectifier la répartition du débit de ventilation soufflé entre les deux zones ainsi que la répartition de la puissance de chauffage. La qualité des résultats obtenus permet de considérer le modèle de simulation SimSPARK comme référence à l'occasion du développement d'un outil simplifié de conception (CoSPARK) présenté dans le chapitre suivant.

Le modèle SimSPARK servira également à développer et tester des stratégies d'activation de l'inertie thermique abordés dans le dernier chapitre.

Chapitre 3

Méthodologie de conception optimisée d'un bâtiment

Ce chapitre présente le développement d'un outil simplifié d'aide à la conception (CoSPARK) servant à orienter les choix à faire durant la phase d'avant projet en ayant connaissance d'un minimum de paramètres sur le bâtiment. En s'inspirant des travaux de L. Yang et Y. Li [49] sur la modélisation simplifiée d'un bâtiment tertiaire climatisé, on a élaboré un modèle de bâtiment en évolution libre rafraîchi par ventilation nocturne en été et soumis à une consigne de chauffage en hiver durant la journée. On introduit la prise en compte du coefficient U_{bat} et des apports gratuits dans le bilan énergétique du bâtiment. Par la suite, on s'est attardé dans un premier temps à la comparaison des résultats du modèle CoSPARK à ceux du modèle de simulation SimSPARK qu'on a présenté dans le chapitre précédent, puis dans un second temps à l'étude des effets des paramètres du modèle sur sa réponse thermique. D'autre part, l'outil CoSPARK propose une approche par inversion de modèle permettant d'identifier la ou les solutions génériques optimisant les performances énergétiques du bâtiment ce qui sera appliqué sur deux cas concrets de bâtiments.

3.1 Aide à la décision architecturale

3.1.1 Rôle des outils de simulation

La phase de conception d'un bâtiment se déroule selon un processus itératif qui débute lorsque l'ensemble des caractéristiques morphologiques, esthétiques et fonctionnelles ont été spécifiées et au cours duquel on tend à se rapprocher suc-

cessivement par étapes d'une solution, satisfaisant une palette de critères souvent contradictoires tenant compte des exigences environnementales, énergétiques, structurelles, socio-culturelles et économiques. Du point de vue énergétique, c'est durant les premiers stades qu'auront lieu généralement les décisions qui impactent profondément le comportement du bâtiment. En effet, la phase fondamentale d'avant-projet permet de déterminer les aspects généraux de dimension, d'orientation et de forme de la construction sur lesquels seront basés les calculs ultérieurs.

Quant à la sélection des matériaux et des modes constructifs, ceux-ci jouent un rôle décisif sur la performance énergétique. Pour tenter d'identifier les solutions les mieux adaptées, on peut avoir recours à la simulation thermique dynamique afin d'évaluer différentes possibilités d'optimisation par rapport à la nature des matériaux, leur disposition et leur quantité. Les outils de simulation actuels deviennent de plus en plus performants et grâce au niveau de finesse des modèles et aux moyens informatiques disponibles, on peut se permettre de modéliser de manière plus précise les transferts de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment et les volumes d'air intérieurs. Toutefois, ceci peut s'avérer onéreux en temps de calcul car le fait de disposer de très peu d'éléments, nécessite d'avoir une représentation a priori assez élaborée voire finalisée du bâtiment afin de pouvoir le modéliser alors que les plans peuvent être modifiés de nombreuses fois. C'est pourquoi la plupart du temps, ce choix est fait au préalable de manière instinctive ou alors de façon à répondre à d'autres critères qui peuvent être économiques ou politiques.

3.1.2 Problématique de l'inertie dans la conception

Plusieurs études ont montré que l'usage de l'inertie thermique dans la conception peut se révéler un atout pour le confort d'été, en particulier lorsque l'inertie est couplée à une ventilation nocturne (1.2). D'autre part, dans les climats où l'amplitude de température jour/nuit est prononcée, les constructions à forte inertie sont souvent préconisées afin de contribuer à l'amortissement des fluctuations de température intérieure. Le tableau (1.2) du chapitre 1 montre une synthèse de recommandations en matière de conception de l'inertie en fonction des caractéristiques du climat. Les climats chauds et très humides sont souvent associés à un faible écart de température jour/nuit : en effet, l'humidité contribue à élever la température ressentie et celle-ci reste élevée même la nuit, constituant ainsi un frein au rafraîchissement nocturne : la chaleur stockée au cours de la journée sera difficilement déstockée au cours des périodes nocturnes et on aura tendance à se tourner davantage vers des constructions légères afin d'éviter tout stockage de chaleur inutile dans la structure.

D'autre part, pour le confort d'hiver, une construction à forte inertie couplée à d'importantes surfaces vitrées et à une isolation par l'extérieur peut se révéler un atout pour réduire les consommations énergétiques de chauffage : les surfaces vitrées favorisant l'exposition des masses inertielles au rayonnement solaire, celles-ci

permettront de stocker les apports gratuits et de les restituer plus tard et d'autre part, l'isolation servira à conserver plus longtemps ces apports dans le bâtiment.

Ainsi, il n'est pas toujours aisé de connaître le niveau d'inertie optimal. Or cette propriété du bâtiment a un effet considérable sur le comportement thermique et donc sur ses performances globales. Il est donc primordial de pouvoir fournir plus d'informations à ce stade sans toutefois chercher à réaliser un calcul détaillé des performances thermiques, les incertitudes inhérentes au projet ne permettant pas un calcul précis.

3.1.3 Pertinence d'un outil simplifié

L'approche la plus appropriée serait d'introduire dès la phase d'avant-projet des procédés de calculs qui aideraient à la décision quant au choix des modes constructifs et permettraient de réduire les effets négatifs éventuels. En d'autres termes, éviter autant que possible des erreurs de conception venant compromettre la qualité du bâtiment et discerner les grandes lignes concernant les comportements thermiques.

Pour cela, l'élaboration d'un outil simplifié à été envisagé afin d'assister les concepteurs. Il a été développé sur la base d'un modèle thermique facilement exploitable pour répondre de manière efficace aux questions que l'on se pose au cours de cette étape notamment sur le caractère inertiel de la construction, la stratégie de rafraîchissement à adopter pour le confort d'été ainsi que les mesures architecturales favorables au confort d'hiver. Il permet de qualifier, par l'intermédiaire de paramètres génériques, la réponse thermique du bâtiment aux sollicitations à partir de sa capacité à déphaser et à amortir les pics de température intérieure. En outre, il sert aussi à évaluer les performances énergétiques du bâtiment au cours de l'année.

Par la suite, l'outil est exploité de manière à identifier un ensemble de combinaisons de paramètres génériques qui seraient les mieux adaptés pour un bâtiment à partir des données climatiques présentes sur le site et de la connaissance des charges internes liées à l'utilisation de celui-ci (occupation, éclairage, appareils électriques...). Ces paramètres génériques pourront par la suite orienter le choix des matériaux de construction en fonction de leur capacité à stocker/restituer la chaleur ou de leur propriété isolante.

3.2 Développement de l'outil de conception architecturale

3.2.1 Paramètres du modèle

Le modèle de bâtiment considéré est un modèle multizone (Figure 3.1) avec une température d'air homogène à l'intérieur de chaque pièce. Chacune des zones est

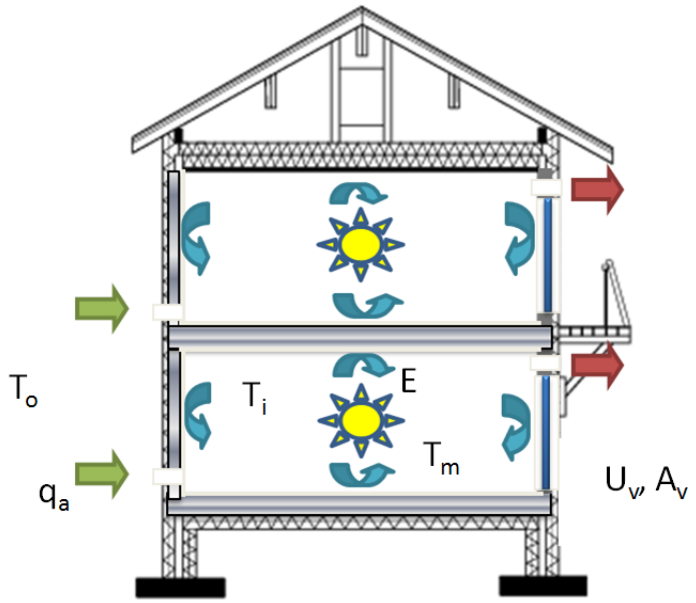

Figure 3.1 – *Modélisation d'une zone de bâtiment*

associée à une capacité calorifique globale MC_m relative à la somme des capacités des matériaux constituant l'enceinte. En présence d'une éventuelle couche d'isolant, on ne tient compte que des matériaux situés à l'intérieur . En considérant que cette partie de l'enceinte est composée de p parois qui chacune comprend n_p couches :

$$MC_m = \sum_{i=1}^{n_1}(\rho_i c_i e_i)A_1 + \sum_{i=2}^{n_2}(\rho_i c_i e_i)A_2 + \ldots + \sum_{i=1}^{n_p}(\rho_i c_i e_i)A_p \tag{3.1}$$

avec ρ_i, la masse volumique en kg/m^3, c_i, la chaleur spécifique en $J/(kg.K)$, e_i l'épaisseur d'une couche i en m.

A_1, A_2,... A_p sont les surfaces des p parois en m^2 qui ne tiennent compte que des parties opaques de celles-ci (les parties vitrées sont retranchées).

La température de la masse interne de la zone thermique est considérée homogène et égale à une température moyenne T_m. Au sein de chaque zone, est générée une puissance interne E due aux apports gratuits et représentant la somme des charges issues de l'occupation, des appareils électriques et de l'éclairage.

La température extérieure T_o a la forme d'une fonction périodique caractérisée par une fréquence $\omega = \frac{2\pi}{T}$ avec T = 24h, une moyenne $\tilde{T_o}$ et une amplitude ΔT_o.

$$T_o = \tilde{T_o} + \Delta T_o \; sin(\omega t) \tag{3.2}$$

3.2.2 Réponse du bâtiment en évolution libre

3.2.2.1 Expression de l'équation différentielle

La formulation du modèle repose sur l'expression de deux bilans énergétiques au niveau de la zone : d'une part, celui du volume d'air intérieur, et d'autre part celui des échanges de chaleur entre les parois et l'air.

Le bilan énergétique de la pièce tient compte du renouvellement d'air, de l'échange convectif entre les parois et l'air intérieur et de la génération de chaleur dans la pièce. Il s'écrit :

$$\rho_a c_a q_a (T_o - T_i) + \ h_i A_i (T_m - T_i) + E = 0 \tag{3.3}$$

$$MC_m \frac{\partial T_m}{\partial t} + h_o A_o (T_m - T_o) + h_i A_i (T_m - T_i) = 0 \tag{3.4}$$

avec

- $\rho_a c_a$, les propriétés de l'air,
- q_a, le débit de renouvellement d'air en m^3/h,
- h_i, le coefficient d'échange convectif à la surface intérieure des parois en $W/(m^2.K)$,
- A_i, la surface d'échange intérieure entre les parois et l'air en m^2
- E, les charges internes en W/m^2,

On divise les équations (3.3)et (3.4) par $\rho_a c_a q_a$ et on définit les nombres adimensionnels suivants

$$\tau = \frac{MC_m}{\rho_a c_a q_a}, \quad \lambda_o = \frac{h_o A_o}{\rho_a c_a q_a}, \quad \lambda_i = \frac{h_i A_i}{\rho_a c_a q_a}, \ et \ T_E = \frac{E}{\rho_a c_a q_a}. \tag{3.5}$$

τ correspond à la constante de temps de la zone et est exprimé en h,
λ_o et λ_i sont les coefficients d'échanges convectifs globaux aux surfaces extérieures et intérieures et sont tous les deux adimensionnels,
T_E représente l'élévation en température intérieure due aux charges internes et s'exprime en $°C$. D'où

$$T_o - T_i + \lambda_i(T_m - T_i) + T_E = 0 \tag{3.6}$$

$$\tau\frac{\partial T_m}{\partial t} + \lambda_o(T_m - T_o) + \lambda_i\left(T_m - T_i\right) = 0 \tag{3.7}$$

A partir de l'équation (3.6), la température intérieure T_i s'exprime par

$$T_i = \frac{T_o + T_E + \lambda_i T_m}{(1 + \lambda_i)} \tag{3.8}$$

L'équation (3.8) est remplacée dans le bilan (3.7)

$$\tau\frac{\partial T_m}{\partial t} + \lambda_o(T_m - T_o) + \lambda_i\left(T_m - \frac{T_o + T_E + \lambda_i T_m}{(1 + \lambda_i)}\right) = 0 \tag{3.9}$$

puis l'équation (3.9) s'écrit

$$\tau\frac{\partial T_m}{\partial t} + \lambda_o(T_m - T_o) + \frac{\lambda_i}{1 + \lambda_i}(T_m - T_o - T_E) = 0 \tag{3.10}$$

On définit le nombre adimensionnel

$$\lambda_i' = \frac{\lambda_i}{1 + \lambda_i} \tag{3.11}$$

$$\tau\frac{\partial T_m}{\partial t} + (\lambda_o + \lambda_i')T_m - (\lambda_o + \lambda_i')T_o - \lambda_i' T_E = 0 \tag{3.12}$$

En remplaçant la variable t par ωt, et T_o par son expression en fonction de ωt, on obtient

$$\omega\tau\frac{\partial T_m}{\partial(\omega t)} + (\lambda_o + \lambda_i')\ T_m = (\lambda_o + \lambda_i')\tilde{T_o} + (\lambda_o + \lambda_i')\ \Delta T_o\ sin(\omega t) + \lambda_i' T_E \tag{3.13}$$

Le bilan énergétique de la zone de bâtiment a été ramené à une équation différentielle qui s'exprime en fonction de la constante de temps τ, des coefficients d'échanges convectifs globaux λ_i' et λ_o, de l'élévation en température T_E due aux charges internes et des caractéristiques $(\tilde{T_o}, \Delta T_o)$ de la température extérieure. On cherche à exprimer la solution de cette équation différentielle qui est la température intérieure T_i de la zone en fonction du temps.

3.2.2.2 Expression de la température intérieure

La solution de l'équation différentielle est la somme de la solution de l'équation homogène $T_{m,1}$ et de la solution particulière $T_{m,2}$:

$$T_m(\omega t) = \ T_{m,1}(\omega t) + \ T_{m,2}(\omega t) \tag{3.14}$$

La solution générale de l'équation homogène $T_{m,1}$ s'écrit

$$T_{m,1} = Ce^{-\left(\frac{\lambda_o + \lambda_i'}{\omega\tau}\right)\omega t} \tag{3.15}$$

D'autre part, la forme de la solution particulière $T_{m,2}$ s'exprime par :

$$T_{m,2}(\omega t) = Asin(\omega t - \alpha) + B \tag{3.16}$$

On détermine les coefficients A, B et α tels que $T_{m,2}$ soit solution de l'équation (3.13). On dérive $T_{m,2}$:

$$\frac{\partial T_{m,2}(\omega t)}{\partial \omega t} = Acos(\omega t - \alpha) \tag{3.17}$$

puis on remplace l'expression de $T_{m,2}$ (3.16) et de sa dérivée (3.17) dans l'équation différentielle (3.13) et on obtient la forme suivante :

$$\begin{aligned} A\ [\omega\tau cos(\omega t-\alpha)+(\lambda_o+\lambda_i')\ sin(\omega t-\alpha)]+B\ (\lambda_o+\lambda_i')= \\ (\lambda_o+\lambda_i')\ \tilde{T_o}+(\lambda_o+\lambda_i')\ \Delta T_o\ sin(\omega t)+\lambda_i'\ T_E \end{aligned} \tag{3.18}$$

Pour des commodités de calcul, on réécrit l'équation (3.18) ainsi :

$$\begin{aligned} A\ [\omega\tau sin(\frac{\pi}{2}-\omega t+\alpha)+(\lambda_o+\lambda_i')\ cos(\frac{\pi}{2}-\omega t+\alpha)]+B\ (\lambda_o+\lambda_i')= \\ (\lambda_o+\lambda_i')\ \tilde{T_o}+(\lambda_o+\lambda_i')\ \Delta T_o\ sin(\omega t)+\lambda_i'\ T_E \end{aligned} \tag{3.19}$$

Dans le 1^{er} membre de (3.23), le terme

$$\omega\tau sin(\frac{\pi}{2}-\omega t+\alpha)+(\lambda_o+\lambda_i')\ cos(\frac{\pi}{2}-\omega t+\alpha) \tag{3.20}$$

est de la forme

$$R_1\ cosx+R_2\ sinx=R_0\ cos(x-\beta) \tag{3.21}$$

avec

$$R_0=\sqrt{R_1^2+R_2^2}\ \ et\ \ \beta=arctan\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \tag{3.22}$$

d'où (3.18) devient

$$\begin{aligned} A\ [\sqrt{\omega^2\tau^2+(\lambda_o+\lambda_i')^2}\ cos(\frac{\pi}{2}-\omega t+\alpha-\beta)]+B\ (\lambda_o+\lambda_i') \\ =(\lambda_o+\lambda_i')\ \tilde{T_o}+(\lambda_o+\lambda_i')\ \Delta T_o\ sin(\omega t)+\lambda_i'\ T_E \end{aligned} \tag{3.23}$$

avec

$$\beta = \ arctan\left(\frac{\omega\tau}{\lambda_o + \lambda_i'}\right) \tag{3.24}$$

On note que β n'est autre que le *déphasage* de T_m par rapport à T_o et il s'exprime en rad. En convertissant β en h, on détermine alors le décalage temporel entre T_m et T_o.

En remplaçant $cos(\frac{\pi}{2} - \omega t + \alpha - \beta)$ par $sin(\omega t - \alpha + \beta)$ et par identification des deux membres de 3.23, on déduit

$$A = \frac{\Delta T_o \ (\lambda_o + \lambda_i')}{\sqrt{\omega^2\tau^2 + (\lambda_o + \lambda_i')^2}} \tag{3.25}$$

$$\alpha = \beta \tag{3.26}$$

$$B = \ \tilde{T_o} + \left(\frac{\lambda_i'}{\lambda_o + \lambda_i'}\right) \ T_E \tag{3.27}$$

La solution générale $T_m(\omega t)$ de l'équation (3.23) s'exprime alors par

$$\begin{aligned} T_m(\omega t) = \ \tilde{T_o} + \frac{\lambda_i'}{\lambda_o + \lambda_i'} \ T_E + \Delta T_o \frac{(\lambda_o + \lambda_i')}{\sqrt{\omega^2\tau^2 + (\lambda_o + \lambda_i')^2}} \ sin(\omega t - \beta) \\ + \ Ce^{-\left(\frac{\lambda_o + \lambda_i'}{\omega\tau}\right)\omega t} \end{aligned} \tag{3.28}$$

La température intérieure $T_i(\omega t)$ se déduit par

$$T_i = \tilde{T_o} \; + \; T_E \; (\frac{\lambda_i'}{\lambda_i} + \frac{\lambda_i'^2}{\lambda_o + \lambda_i'}) + \; \frac{\lambda_i'}{\lambda_i} \; \Delta T_o \; sin(\omega t) + \Delta T_o \frac{\lambda_i'(\lambda_o + \lambda_i)}{\sqrt{\omega^2 \tau^2 + (\lambda_o + \lambda_i')^2}} \; sin(\omega t - \beta) + \lambda_i' C e^{-\left(\frac{\lambda_o + \lambda_i'}{\omega \tau}\right)\omega t} \tag{3.29}$$

3.2.2.3 Prise en compte du coefficient de transmission de la chaleur U_{bat} dans le calcul de la température en évolution libre

Le développement du modèle thermique de la zone de bâtiment dans la partie précédente permet de prendre en compte les transferts de chaleur aux surfaces des parois par convection, le transport de l'air et la dissipation de puissance générée dans le volume intérieur. Les transferts de chaleur par conduction ont été négligés afin de simplifier la résolution de l'équation différentielle issue du bilan énergétique.

Cependant afin d'améliorer le modèle tel que présenté, on propose d'ajouter la prise en compte des échanges de chaleur par conduction dans l'enveloppe et la présence de surfaces vitrées, ce qui a un impact non négligeable sur le comportement thermique global. En considérant que l'enveloppe de la zone étudiée est composée de k parois opaques et de l surfaces vitrées, le bilan (3.3) s'écrit :

$$\rho_a c_a q_a (T_o - T_i) + (\sum U_{p,k} A_{ip,k} + \sum U_{v,l} A_{v,l})(T_o - T_i) + h_i A_i (T_m - T_i) + E = 0 \tag{3.30}$$

avec $U_{p,k}$ et $A_{ip,k}$, le coefficient d'échange global et la surface intérieure de la paroi k, et $U_{v,l}$ et $A_{v,l}$ le coefficient d'échange global et la surface de la paroi vitrée l,

$$[\rho_a c_a q_a + U_{bat}(\sum A_{ip,k} \; + \sum A_{v,l})](T_o - T_i) + \; h_i A_i (T_m - T_i) + E = 0 \tag{3.31}$$

La suite du développement de la solution $T_i(\omega t)$ reste similaire au paragraphe précédent.

La constante de temps τ, les coefficients d'échange globaux aux surfaces intérieures et extérieures λ_o, λ_i et le coefficient de charge interne T_E deviennent respectivement :

$$\tau = \frac{Mc_m}{\rho_a c_a q_a + U_{bat}(\sum A_{ip,k} \ + \sum A_{v,l})} \tag{3.32}$$

$$\lambda_o = \frac{h_o A_o}{\rho_a c_a q_a + U_{bat}(\sum A_{ip,k} \ + \sum A_{v,l})} \tag{3.33}$$

$$\lambda_i = \frac{h_i A_i}{\rho_a c_a q_a + U_{bat}(\sum A_{ip,k} \ + \sum A_{v,l})} \tag{3.34}$$

$$T_E = \frac{E}{\rho_a c_a q_a + U_{bat}(\sum A_{ip,k} \ + \sum A_{v,l})} \tag{3.35}$$

3.2.2.4 Expression simplifiée de la réponse thermique

Afin de faciliter la lisibilité du modèle, on pose

$$\gamma = \frac{(\lambda_o + \lambda_i')}{\sqrt{\omega^2\tau^2 + (\lambda_o + \lambda_i')^2}} \tag{3.36}$$

$$\sigma = \frac{\lambda_o + \lambda_i'}{\omega\tau} \tag{3.37}$$

$$\psi = \frac{\lambda_i'}{\lambda_o + \lambda_i'} \tag{3.38}$$

D'où l'expression de T_m

$$T_m(\omega t) = \ \tilde{T_o} + \psi \ T_E + \gamma \ \Delta T_o \ sin(\omega t - \beta) + \ Ce^{-\sigma\omega t} \tag{3.39}$$

On peut noter que :

- le terme $\tilde{T_o} + \psi\ T_E$ est un terme constant qui détermine la moyenne de T_m au cours du temps autour de laquelle $T_m(t)$ va osciller et qui dépend essentiellement de la température extérieure et des charges internes,
- le terme $\gamma\ \Delta T_o\ sin(\omega t - \beta)$ est le terme lié à l'oscillation et au déphasage de T_m qui dépend de la constante de temps, des échanges convectifs et des fluctuations de la température extérieure,
- le terme $Ce^{-\sigma\omega t}$ s'annule lorsque t devient suffisamment grand, autrement dit, lorsque le régime permanent est atteint et que t devient supérieur à 5 τ. En effet, ce terme est lié aux conditions initiales du système qui disparaissent alors lorsque le régime est établi.

3.2.3 Maintien du bâtiment à une température de consigne donnée

3.2.3.1 Expression de l'équation différentielle

Lorsque le bâtiment est soumis à un système de chauffage ou de climatisation, un flux de chaleur Q_p est ajouté au bilan énergétique de la pièce afin de maintenir la température intérieure égale à une consigne T_{cons}. Comme dans le cas précédent, on dresse le bilan énergétique du volume d'air intérieur et celui des échanges de chaleur entre les parois et l'air :

$$Q_p + \ h_i A_i(T_m - T_{cons}) + E + U_{bat}(\sum A_{ip,k}\ + \sum A_{v,l})(T_o - T_{cons}) = 0 \qquad (3.40)$$

$$MC_m \frac{\partial T_m}{\partial t} + h_o A_o(T_m - T_o) + h_i A_i(T_m - T_{cons}) = 0 \qquad (3.41)$$

De la même manière, on pose

$$\tau = \frac{MC_m}{\rho_a c_a q_a}, \quad \lambda_o = \frac{h_o A_o}{\rho_a c_a q_a}, \quad \lambda_i = \frac{h_i A_i}{\rho_a c_a q_a}, \ et\ T_E = \frac{E}{\rho_a c_a q_a}. \qquad (3.42)$$

et les équations (3.40) et (3.41) donnent respectivement

$$Q_p = -\rho_a c_a q_a \{\lambda_i (T_m - T_{cons}) + T_E\} - U_{bat} (\sum A_{ip,k} \ + \sum A_{v,l})(T_o - T_{cons}) \quad (3.43)$$

qui est l'expression en W du flux nécessaire pour chauffer ou climatiser la pièce à la température de consigne T_{cons}, valable dans le cas du chauffage en hiver ou de la climatisation en été, et

$$\tau \frac{\partial T_m}{\partial t} + \lambda_o (T_m - T_o) + \lambda_i (T_m - T_{cons}) = 0 \quad (3.44)$$

qui est l'équation différentielle décrivant le comportement thermique de la pièce.

3.2.3.2 Expression de la température intérieure

L'équation différentielle (3.44) s'écrit également

$$\omega\tau \frac{\partial T_m}{\partial \omega t} + (\lambda_o + \lambda_i)\ T_m = \lambda_o\ \tilde{T}_o + \lambda_o\ T_{cons} + \lambda_o\ \Delta T_o\ sin(\omega t) \quad (3.45)$$

En suivant la même démarche que dans le paragraphe précédent, la résolution de l'équation (3.45) conduit à la réponse thermique suivante :

$$T_m(\omega t) = \frac{\lambda_o}{\lambda_o + \lambda_i}\ \tilde{T}_o + \frac{\lambda_i}{\lambda_o + \lambda_i}\ T_{cons} + \frac{\lambda_o \Delta T_o}{\sqrt{(\lambda_o + \lambda_i)^2 + \omega^2 \tau^2}}\ sin(\omega t - \beta) + Ce^{-\frac{(\lambda_o + \lambda_i)}{\omega\tau}\omega t} \quad (3.46)$$

Afin de simplifier l'expression, on définit

$$\lambda'_o = \frac{\lambda_o}{\lambda_o + \lambda_i},\ \lambda''_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_o + \lambda_i},\ \gamma' = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\omega^2\tau^2 + (\lambda_o + \lambda_i)^2}}\ \ et\ \sigma' = \frac{\lambda_o + \lambda_i}{\omega\tau} \quad (3.47)$$

d'où

$$T_m(\omega t) = \lambda'_o\ \tilde{T}_o + \lambda''_i\ T_{cons} + \gamma'\ \Delta T_o\ sin(\omega t - \beta)\ +\ Ce^{-\sigma'\omega t} \quad (3.48)$$

3.2.4 Prise en compte des conditions initiales

L'ensemble du système bâtiment est constamment susceptible de changer de régime de fonctionnement. Ceci se produit souvent et pour différentes raisons, notamment lorsque le taux de renouvellement d'air évolue (ouverture d'une fenêtre, fonctionnement d'un brasseur d'air...) ou alors en hiver lorsque la température de consigne de chauffage est modifiée.

Au moment d'un changement de régime, l'expression de la température intérieure change ; la constante d'intégration C qui apparaît dans la solution générale de l'équation différentielle 3.15 aura une expression différente qui dépend de l'état du système au moment de ce changement.

Dans ce travail, deux types de fonctionnement du bâtiment ont été considérés selon qu'on soit en été ou en hiver :

- En été, le bâtiment est en évolution libre le jour et la nuit. En journée, le taux de renouvellement d'air reste plutôt faible et ne dépasse pas 1 vol/h. la nuit, on opte pour une stratégie de rafraîchissement passif par la surventilation nocturne : le débit de ventilation peut être trois ou quatre fois plus important que dans la journée.

- En hiver, le bâtiment est chauffé au cours de la journée à une température de consigne T_{cons}. La nuit, on coupe le chauffage et le bâtiment est en évolution libre.

Dans ce paragraphe, on développe les expressions du coefficient C pour l'été et l'hiver lors du passage de régime entre le jour et la nuit et vice-versa.

3.2.4.1 Période estivale

Le couplage inertie/ventilation nocturne est un choix de rafraîchissement passif qui s'avère intéressant en climat chaud car il est avantageux d'un point de vue économique et environnemental. Son principe est le suivant (Figure 3.2) :

- Durant la journée, le régime de ventilation modérée est appliqué entre les instants t_1 et t_2 : $q_a = V_j$,

- Pendant la nuit, on impose un régime de ventilation forte de t_2 à $t_1 + 24$: $q_a = V_n > V_j$.

De ce fait, le régime de ventilation variera deux fois au cours d'un cycle journalier et on aura alors deux expressions différentes de C : C_j, au cours de la journée et C_n, durant la nuit.

En reprenant la formulation du modèle en évolution libre (3.39) dans le paragraphe (3.2.2.4), et sachant que $T_m(t)$ est continue lors du passage de régime,

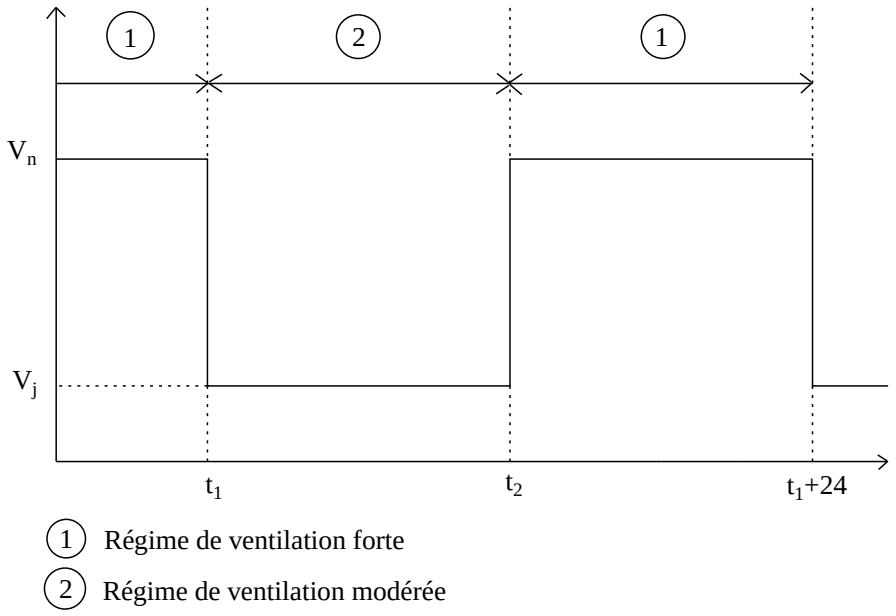

Figure 3.2 – *Scénario de ventilation en été*

on peut écrire respectivement en t = t_2 et t = t_1 + 24, qui sont les instants de démarrage et d'arrêt de la surventilation nocturne :

$$T_m(t_2^+) = T_m(t_2^-) \tag{3.49}$$

$$\begin{aligned} &\tilde{T_o} + \psi_n\ T_E + \ \gamma_n\ \Delta T_o\ sin(\omega t_2 - \beta_n) + \ C_n\ e^{-\sigma_n \omega t_2} \\ &= \tilde{T_o} + \psi_j\ T_E + \ \gamma_j\ \Delta T_o\ sin(\omega t_2 - \beta_j) + \ C_j\ e^{-\sigma_j \omega t_2} \end{aligned} \tag{3.50}$$

$$\begin{aligned} C_j\ e^{-\sigma_j \omega t_2} - \ C_n\ e^{-\sigma_n \omega t_2} = \Delta T_o\ [\gamma_n\ sin(\omega t_2 - \beta_n) - \ \gamma_j\ sin(\omega t_2 - \beta_j)] \\ -\psi_j\ T_E + \psi_n\ T_E \end{aligned} \tag{3.51}$$

et de la même manière, en t= t_1 + 24,

$$T_m(t_1 + 24^+) = T_m(t_1 + 24^-) \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned} &\tilde{T_o} + \psi_n\ T_E + \ \gamma_n\ \Delta T_o\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_n) + \ C_n\ e^{-\sigma_n \omega (t_1+24)} \\ &= \tilde{T_o} + \psi_j\ T_E + \ \gamma_j\ \Delta T_o\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_j) + \ C_j\ e^{-\sigma_j \omega (t_1+24)} \end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned} C_j\ e^{-\sigma_j \omega (t_1+24)} - \ C_n\ e^{-\sigma_n \omega (t_1+24)} = \Delta T_o\ (\gamma_n\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_n) \\ - \ \gamma_j\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_j)) - \psi_j\ T_E + \psi_n\ T_E \end{aligned} \tag{3.54}$$

Soient

$$X_1 = e^{-\sigma_j \omega t_2},\ X_2 = e^{-\sigma_n \omega t_2},\ et\ Y_1 = e^{-\sigma_j \omega (t_1+24)},\ Y_2 = e^{-\sigma_n \omega (t_1+24)} \tag{3.55}$$

$$\begin{aligned} Z_1 = \Delta T_o\ (\gamma_n\ sin(\omega t_2 - \beta_n) - \ \gamma_j\ sin(\omega t_2 - \beta_j)) - \psi_j\ T_E + \psi_n\ T_E \\ Z_2 = \Delta T_o\ (\gamma_n\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_n) - \ \gamma_j\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_j)) - \psi_j\ T_E + \psi_n\ T_E \end{aligned} \tag{3.56}$$

Les équations (3.51) et (3.54) s'écrivent

$$\begin{cases} C_j X_1 - C_n X_2 = Z_1 \\ C_j Y_1 - C_n Y_2 = Z_2 \end{cases}$$

d'où

pendant la journée,

$$C_j = \frac{Z_2 X_2 - Z_1 Y_2}{Y_1 X_2 - X_1} \tag{3.57}$$

pendant la nuit,

$$C_n = \left(\frac{Z_2 X_2 - Z_1 Y_2}{Y_1 X_2 - X_1}\right) \frac{X_1}{X_2} - \frac{Z_1}{X_2} \tag{3.58}$$

3.2.4.2 Période hivernale

Durant cette période, les régimes de chauffage et d'évolution libre fonctionnent en alternance. Ce type de scénario est le plus courant dans les bâtiments résidentiels ou tertiaires car dans les deux cas, on maintient les espaces chauffés durant la journée, et on coupe le chauffage la nuit lorsque les occupants sont couchés ou absents.

Entre les instants t_1 et t_2 de démarrage et d'arrêt du chauffage, la réponse du bâtiment est semblable à l'expression (3.48) du paragraphe (3.2.3) :

$$T_{m,j}\ (\omega t) = \lambda'_{o,j}\ \tilde{T}_o + \lambda''_{i,j}\ T_{cons} + \gamma'_j\ \Delta T_o\ sin(\omega t - \beta_j)\ +\ C_j\ e^{-\sigma'_j \omega t} \tag{3.59}$$

A partir de l'instant t_2, le bâtiment est en évolution libre et d'après l'équation (3.39) du paragraphe (3.2.2.4),

$$T_{m,n}\ (\omega t) =\ \tilde{T}_o + \psi_n\ T_E + \gamma_n\ \Delta T_o\ sin(\omega t - \beta_n) +\ C_n\ e^{-\sigma_n \omega t} \tag{3.60}$$

T_m est continue au moment du démarrage t = t_2 et l'arrêt du chauffage t = t_1 + 24, donc

$$T_{m,j}\ (t_2^+) = T_{m,n}\ (t_2^-)\ \ et\ \ T_{m,j}\ (t_1 + 24^-) = T_{m,n}\ (t_1 + 24^+) \tag{3.61}$$

on en déduit le système d'équations suivant

$$\begin{aligned} \lambda'_{o,j}\ \tilde{T}_o + \lambda''_{i,j}\ T_{cons} + \gamma'_j\ \Delta T_o\ sin(\omega t_2 - \beta_j)\ +\ C_j\ e^{-\sigma'_j \omega t_2} =\ \tilde{T}_o + \psi_n\ T_E \\ +\gamma_n\ \Delta T_o\ sin(\omega t_2 - \beta_n) +\ C_n\ e^{-\sigma_n \omega t_2} \end{aligned} \tag{3.62}$$

$$\begin{aligned} \lambda'_{o,n}\ \tilde{T}_o + \lambda''_{i,j}\ T_{cons} + \gamma'_j\ \Delta T_o\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_j)\ +\ C_j\ e^{-\sigma'_j \omega (t_1+24)} =\ \tilde{T}_o + \psi_n\ T_E \\ +\gamma_n\ \Delta T_o\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_n) +\ C_n\ e^{-\sigma_n \omega (t_1+24)} \end{aligned} \tag{3.63}$$

Comme pour la période d'été, on définit

$$X'_1 = e^{-\sigma'_j \omega t_2},\ X'_2 = e^{-\sigma_n \omega t_2},\ et\ Y'_1 = e^{-\sigma'_j \omega (t_1+24)},\ Y'_2 = e^{-\sigma_n \omega (t_1+24)} \tag{3.64}$$

$$\begin{aligned} Z'_1 = \tilde{T}_o(1-\lambda'_{o,j}) + \psi_n\ T_{E,n} - \lambda''_{i,j}\ T_{cons} + \Delta T_o\ (\gamma_n\ sin(\omega t_2 - \beta_n) \\ - \gamma'_j\ sin(\omega t_2 - \beta_j)) \\ Z'_2 = \tilde{T}_o(1-\lambda'_{o,n}) + \psi_n\ T_{E,n} - \lambda''_{i,j}\ T_{cons} + \Delta T_o\ (\gamma_n\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_n) \\ - \gamma'_j\ sin(\omega t_1 + 24\omega - \beta_j)) \end{aligned} \tag{3.65}$$

et on retrouve le même système d'équations (3.51) et (3.54) que dans le cas précédent

$$\begin{cases} C_j X'_1 - C_n X'_2 = Z'_1 \\ C_j Y'_1 - C_n Y'_2 = Z'_2 \end{cases}$$

On en déduit les expressions des constantes liées aux conditions initiales pour la journée,

$$C_j = \frac{Z'_2 X'_2 - Z'_1 Y'_2}{Y'_1 X'_2 - X'_1} \tag{3.66}$$

et pour la nuit,

$$C_n = \left(\frac{Z'_2 X'_2 - Z'_1 Y'_2}{Y'_1 X'_2 - X'_1} \right) \frac{X'_1}{X'_2} - \frac{Z'_1}{X'_2} \tag{3.67}$$

3.2.5 Prise en compte des apports solaires

Les apports solaires constituent un élément déterminant dans la conception, que ce soit pour le confort d'été ou durant les périodes de chauffe.

Tel que formulé, le modèle permet de tenir compte des apports solaires transmis par les vitrages à l'intérieur de la zone thermique en l'ajoutant au reste des apports gratuits. Le principal inconvénient réside dans le fait que cette quantité doit être prise constante au cours du temps afin que les hypothèses émises lors de la formulation

du modèle restent valides. Pour une zone i, la puissance interne générée E_i en W/m^2 est égale à :

$$E_i = E_{sol,i} + E_{int,i} \tag{3.68}$$

avec $E_{sol,i}$, la part de puissance générée due aux apports solaires en W/m^2 et $E_{int,i}$, la part de puissance due à l'occupation, l'éclairage, les appareils électriques...

On définit l'*irradiation solaire* la quantité d'énergie reçue par une surface sur une période donnée en Wh/m^2. On note I_j l'irradiation solaire reçue au cours d'une journée et E_{sol} en W/m^2 le rayonnement solaire équivalent pour une irradiation uniformément répartie sur la journée :

$$E_{sol,f} = \frac{I_j}{24} \tag{3.69}$$

La part du flux solaire incident sur la façade f, transmise à l'intérieur de la zone est évaluée en tenant compte de la présence des casquettes ainsi que du facteur solaire :

$$E_{tr,f} = F_{pm} * F_s * E_{sol,f} \tag{3.70}$$

avec F_{pm}, la part de flux solaire demeurant après la prise en compte des protections solaires et des masques et F_s, le facteur solaire correspondant à la part de flux solaire transmis par le vitrage et les cadres des fenêtres. $E_{tr,f}$

La somme $E_{sol,i}$ des apports solaires transmis à une zone i en W/m^2

$$E_{sol,i} = \sum_f E_{tr,f} \tag{3.71}$$

$$E_{sol,i} = \sum_f F_{pm,f} * F_{s,f} * \frac{I_{j,f}}{24} * \frac{A_{v,f}}{A_p} \tag{3.72}$$

avec $A_{v,f}$ la surface vitrée à la façade f et A_p la surface de plancher en m^2.

Par conséquent, dès que le choix de l'orientation du bâtiment est fait, que les fenêtres et le dispositif de protections solaires sont dimensionnés, il est aisé d'estimer les apports solaires transmis à chaque zone thermique au cours de la période sur

laquelle on se base pour étudier la performance du bâtiment en regard du confort d'été.

3.2.6 Conclusion sur la formulation du modèle

Dans cette partie, un modèle dynamique de bâtiment multizone a été formulé afin de déterminer la température moyenne de la masse interne et la température d'air à l'intérieur de chaque zone en se servant d'un minimum de paramètres pouvant être défini durant la phase d'avant-projet.

On s'est attardé sur le développement des réponses lorsque celui-ci est en évolution libre ainsi que dans le cas où ces espaces intérieurs sont chauffés ou climatisés (maintien à une température de consigne). Par la suite, il est envisageable d'adapter les expressions que nous avons développées en fonction de l'utilisation qu'on veut faire du bâtiment en calculant les coefficients C d'intégration liés aux conditions initiales lorsqu'on change le régime de fonctionnement. Par la suite, on a opté en été pour une stratégie de rafraîchissement passif par la ventilation nocturne et en hiver pour un chauffage activé en journée et coupé la nuit.

Bien que le modèle comporte un maximum de paramètres clés, afin de pouvoir le développer, il a été nécessaire d'apporter de nombreuses simplifications sur la modélisation thermique du bâtiment, particulièrement au niveau de la prise en compte des apports solaires et de l'homogénéité de la température au niveau des parois. Il est alors crucial de savoir dans quelle mesure l'outil de conception est capable de représenter le comportement de celui-ci.

3.3 Confrontation du modèle simplifié de conception CoSPARK au modèle de simulation thermique dynamique SimSPARK

En regard de la nécessité de connaître la fiabilité de l'outil de conception qu'on a développé en ayant recours à quelques simplifications, on s'est attardé à réaliser une comparaison de cet outil avec un modèle de simulation thermique dynamique. Ce dernier permet d'une part, d'évaluer de façon plus précise le champ de température dans les parois, autorisant ainsi une meilleure prise en compte des échanges par conduction et d'autre part, une meilleure prise en compte des échanges de chaleur par rayonnement au niveau des parois et des vitrages.

On a considéré le cas où le bâtiment est en évolution libre (période d'été) et on compare les réponses des deux types de modèles sur une maison individuelle à deux étages.

3.3.1 Hypothèses de comparaison

La maison Béton Banché (I-BB), décrite plus loin en annexe (4.2.5) représente un type de bâtiment à forte inertie avec isolation par l'extérieur destiné à être à basse consommation. La particularité d'un tel édifice est de favoriser les apports solaires par de grandes surfaces vitrées, puis leur stockage grâce à une structure à inertie renforcée et leur conservation par la présence de l'isolation extérieure. De la même manière en été, l'inertie du bâtiment étant importante, elle permettra de stocker la chaleur au cours de la journée et de la déstocker la nuit par l'intermédiaire d'une ventilation nocturne.

Le bâtiment est dans un premier temps modélisé en différences finies selon le type de modèle que l'on dit détaillé et implémenté dans l'environnement de simulation SimSPARK puis dans un second temps en se servant de l'outil de conception simplifié présenté dans ce chapitre que l'on développe aussi sous SimSPARK.

Les caractéristiques communes aux deux modèles sont décrites dans le tableau (3.1) regroupant un descriptif succinct de la maison sur laquelle on établit la comparaison.

Les conditions aux limites des zones au Rez-de-Chaussée et à l'étage sont différentes et sont décrites de la manière suivante :

- la zone au RDC dispose d'une plus grande surface vitrée et donc d'une surface d'échange entre les parois et l'air de la pièce plus réduite
- la surface commune entre les deux zones correspond au plafond du RDC et au plancher de l'étage
- les parois en contact avec l'extérieur ne sont pas de même nature : le plancher du RDC est en béton et le plafond de l'étage en structure légère.

La température extérieure varie autour d'une moyenne de 25 °C avec un écart jour/nuit de 10°C et l'ensoleillement correspond à celui d'une journée type de juillet correspondant au climat de Chambéry.

Les figures (3.3), (3.4) et (3.5) montrent les températures intérieures de chaque zone pour les deux types de modèle pour un taux de renouvellement d'air de 0.6 vol/h dans la journée et d'une surventilation nocturne de 3 vol/h. Dans chacun des cas on a considéré des niveaux de charges internes différents :

- dans le premier cas, la charge interne est de l'ordre de 3 W/m^2 et correspond à une moyenne de la puissance dissipée par les appareils électroménagers, dans le cas où les occupants sont absents et les volets fermés (le standard maison passive suggère une moyenne de 2.5 W/m^2).

Table 3.1 – *Description des principales hypothèses de simulation pour la maison en béton banché de la plateforme INCAS*

	RDC	**Etage**
Dimensions	L=7.5 m ; W=6.5 m ; H=2.7 m	
Température extérieure	$\tilde{T}_o = 25$ ° C ; $\Delta T_o = 10$° C	
τ	300 h	215 h
U_{bat}	35.6 W/K	26.8 W/K
Surface vitrée		
Sud	10.3 m^2	6 m^2
Est	1 m^2	1.3 m^2
Ouest	3.5 m^2	2.3 m^2
Nord	0.9 m^2	0.9 m^2
Totale	15.7 m^2	10.5 m^2
Coefficient de transmission des vitrages U_v	1.3 $W.m^2/K$	
Protection solaire	Présence d'une casquette au sud	
Profondeur	1 m	1 m
Distance entre la casquette et le haut de la fenêtre	0.2 m	0.1 m
Taux de renouvellement d'air dans la journée V_j	0.6 vol/h	
Débit de surventilation nocturne V_n	3 vol/h	
Heure d'arrêt de la surventilation $Timestop$	7 h AM	
Heure de démarrage de la surventilation $Timestart$	21 h PM	

- dans le second cas, on a pris en compte une charge de 7 W/m^2 au RDJ et de 5 W/m^2 à l'étage, pouvant être assimilé à :
  - une présence de deux personnes par étage à raison de 80 W/pers, soit 3.8 W/m^2
  - une puissance dissipée par des appareils électriques de 3 W/m^2 au RDJ et la moitié à l'étage

  Les volets sont également fermés durant la journée afin de négliger les apports solaires.

- dans le dernier cas, on a pris en compte les apports solaires maximales qu'on peut atteindre en été. Ceci équivaut après la prise en compte des protections solaires et de la transmission des flux à l'intérieur du bâtiment, à un apport respectivement de 15 et de 10 W/m^2 de plancher pour le RDC et l'étage.

3.3.2 Comparaison des réponses thermiques des modèles

Les bornes du domaine en pointillé correspondent aux températures du modèle détaillé à plus ou moins 2 °C. En se basant sur le principe du confort adaptatif dans un bâtiment de catégorie 2 (Section 4.1.2.1, Tableau 4.4), ce domaine constitue la région dans laquelle les réponses du modèle simplifié sont considérées acceptables.

Sur la figure (3.3) on a représenté le cas où les charges internes sont prises égales à 3 pour le RDC et 1.5 W/m^2 pour l'étage. Le graphique montre que durant les périodes de forte ventilation, les réponses des modèles présentent davantage de similarités que durant la journée, où l'écart moyen entre les températures passe de 1 à 2 °C. Bien que les pics de température se produisent quasiment au même moment (et donc un déphasage égal dans les deux modèles), la réponse du modèle simplifié tend vers la limite supérieure du domaine durant la journée. Quand on passe d'un régime de ventilation à un autre, la constante de temps de la zone varie aussi et celle-ci devient plus faible la nuit lors d'une forte ventilation (c'est d'ailleurs ce que montre l'équation 3.32). Durant ce passage, les températures de l'outil de conception connaissent des chutes et des remontées plus prononcées probablement liées aux simplifications que l'on a fournies au cours de l'élaboration du modèle.

La figure (3.4) expose le cas où l'on a pris en compte non seulement les appareils électriques mais aussi la présence de deux occupants par étage. On observe des comportements similaires au cas précédent : des températures d'air plus homogènes en régime de forte ventilation et un écart de 2°C entre les pics de températures au cours de la journée. La réponse du modèle simplifié remonte plus rapidement durant la première moitié de la journée et notamment pour le RDC, bien que celle-ci ait une constante de temps supérieure à l'étage, elle a aussi un coefficient de transmission U_{bat} supérieur dû à une fenestration plus importante. Comme signalé

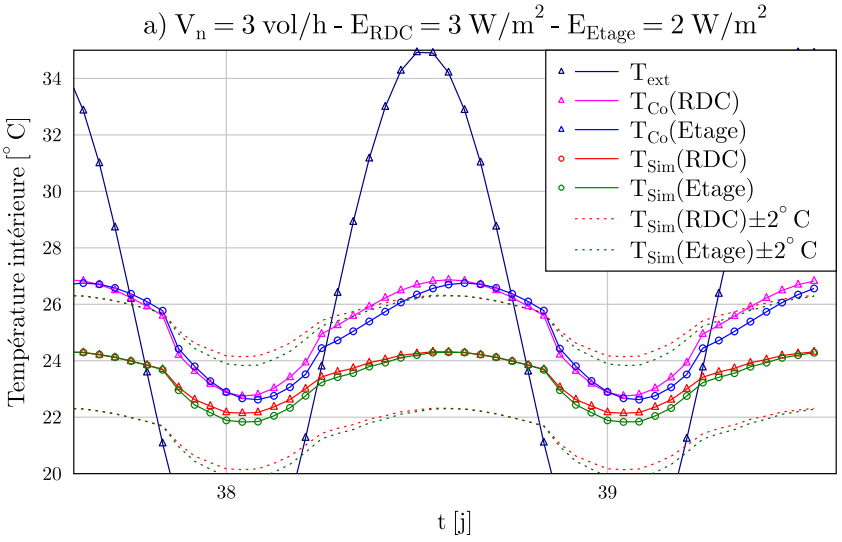

Figure 3.3 – *Températures intérieures des deux zones de la maison en béton banché évaluées par le modèle CoSPARK et le modèle SimSPARK respectivement pour un débit de ventilation nocturne V_n=3 vol/h et pour des charges internes de 1.5 W/m^2 pour le RDC et 2 W/m^2 pour l'étage.*

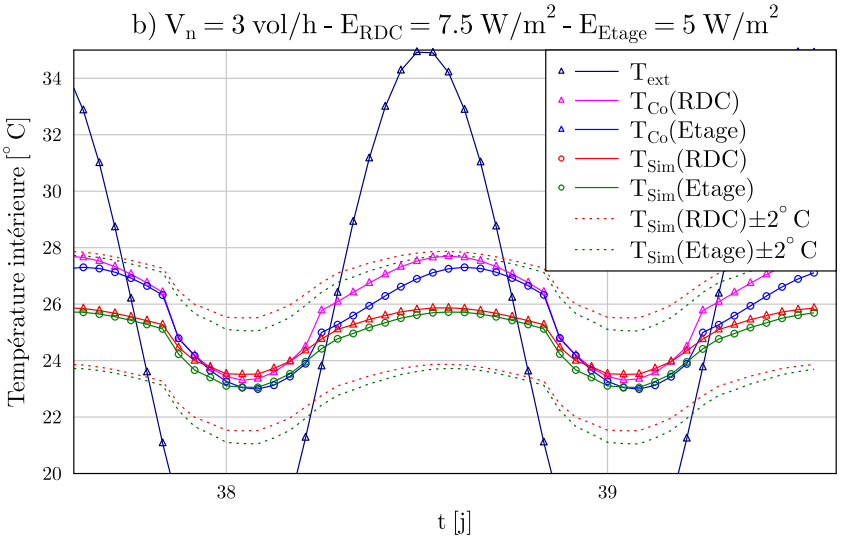

Figure 3.4 – *Températures intérieures des deux zones de la maison en béton banché évaluées par le modèle CoSPARK et le modèle SimSPARK respectivement pour un débit de ventilation nocturne V_n=3 vol/h et pour des charges internes de 7.5 W/m^2 pour la RDC et 5 W/m^2 pour l'étage.*

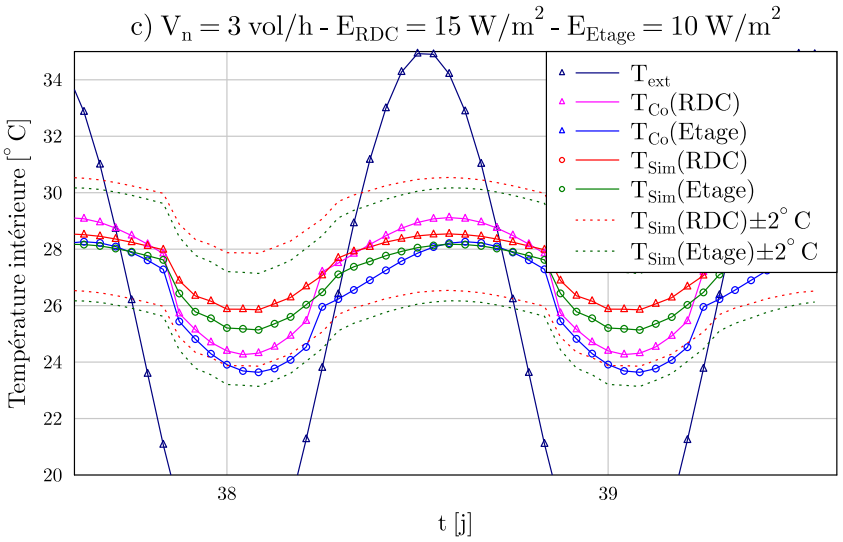

Figure 3.5 – *Températures intérieures des deux zones de la maison en béton banché évaluées par le modèle CoSPARK et le modèle SimSPARK respectivement pour un débit de ventilation nocturne V_n=3 vol/h et pour des charges internes de 15 W/m^2 pour le RDC et 10 W/m^2 pour l'étage.*

précédemment, le coefficient U_{bat} équivaut à la quantité de flux échangé à travers l'enveloppe du bâtiment pour un 1 °C d'écart entre les températures intérieures et extérieures. Il décrit l'intensité des échanges entre le volume intérieur et l'air ambiant : l'augmentation du coefficient U_{bat} entraîne l'accroissement de l'influence des sollicitations extérieures sur la réponse de la zone thermique.

Sur la figure 3.5, les apports solaires ont été pris en compte avec les occupants et les appareils électriques. Les quantités de flux solaires pénétrant chaque zone ont été comptabilisées en fonction de la proportion de surfaces vitrées, du dispositif de protections solaires et du coefficient de transmission des fenêtres, d'où une température de la zone au RDJ supérieure à celle de la zone à l'étage pour les deux modèles.

En observant l'évolution des températures sur les trois figures, on constate que la sensibilité de la réponse aux charges internes est différente pour les deux modèles : quand on passe d'un cas à un autre, le modèle détaillé évolue progressivement de 2 °C par rapport au cas précédent tandis que la réponse du modèle simplifié évolue à chaque fois de 1 °C. Celui-ci aurait tendance à sous-estimer les charges internes dans la réponse mais étant donné que les limites du domaine de validité que nous avons défini sont toujours respectées, il continue à fournir des prédictions acceptables sur lequel nous pouvons nous baser.

3.3.3 Conclusion de la comparaison

De manière générale, pour des charges internes tenant compte des appareils électriques et de l'occupation comme dans le premier et le second cas, le modèle simplifié représente de manière assez fiable le comportement thermique du bâtiment.

On rappelle que ce modèle constitue un outil d'aide à la conception qui sert uniquement à orienter les décisions faites en phase initiale d'un projet. Bien qu'il soit simplifié, la précision apportée par le modèle est suffisante pour déterminer les paramètres dits "génériques" tels que la constante de temps ou le coefficient d'échange global U_{bat}. Au moment où le choix des modes constructifs est fait, le recours à la simulation thermique dynamique demeure toutefois indispensable pour mieux prédire le comportement énergétique du bâtiment et valider les prises de décision.

3.4 Effets des paramètres du modèle sur les indicateurs de performance et de leurs interactions avec l'inertie thermique

3.4.1 Choix des paramètres significatifs vis-à-vis de la conception

Après avoir développé l'outil de conception et comparé avec un modèle de simulation thermique dynamique en différences finies on souhaite s'en servir pour étudier l'impact de certains paramètres qui serviront à établir un cahier des charges du bâtiment et qui permettront de guider le processus de conception.

Les principaux paramètres que l'on a retenu et dont on a étudié les effets sont :

La température extérieure : sa moyenne $\tilde{T}_o$ et son amplitude jour/nuit ΔT_o qui définissent la nature du climat. Celui-ci peut être chaud et humide, avec des températures moyennes élevées et de faibles variations jour/nuit, ou alors modéré avec des températures moyennes plus douces et des amplitudes jour/nuit susceptibles d'apporter de la fraîcheur nocturne (Chapitre 1 paragraphe 1.5.2).

La ventilation nocturne : le débit de surventilation nocturne V_n si l'on considère que le bâtiment est rafraîchi par une ventilation naturelle ou mécanique sur une période donnée au cours d'un cycle journalier.

Le coefficient de transmission global du bâtiment : il s'agit du coefficient U_{bat} en $W/(m^2.K)$. Dans la définition que l'on s'est donné, il ne tient pas compte du renouvellement d'air et des ponts thermiques mais seulement d'une moyenne surfacique des coefficients d'échange des parois opaques et vitrées.

Les charges internes : elles comprennent les charges dues à l'occupation, l'éclairage, les appareils électriques, et les apports solaires.

On procède à une analyse paramétrique où l'on fait varier simultanément la constante de temps τ avec l'un de ces paramètres, puis on observe l'effet de cette variation simultanée sur les *indicateurs de performance* suivants :

L'inconfort en $°.h$: égal à l'intégrale de la différence entre la température de confort T_C et la température opérative T_{op} lorsque celle-ci dépasse la température de confort en été.

$$IDH = \int max((T_{op} - T_C), 0)dt \tag{3.73}$$

T_{op} est la moyenne de la température radiative moyenne et la température d'air intérieure, soit :

$$T_{op} = \frac{T_m + T_i}{2} \tag{3.74}$$

T_C correspond à la température de confort évaluée par le critère de confort adaptatif et dépend principalement de la moyenne glissante de la température extérieure et de la catégorie du bâtiment sur l'échelle d'acceptabilité de l'inconfort.

Les besoins de chauffage en kWh/m^2 :maintenant la température intérieure à une consigne de 20°C durant la journée en hiver, ils sont calculés en faisant la somme du flux Q_p sur une période de trente jours.

Le déphasage β : correspondant à l'écart temporel entre les pics de température extérieure et intérieure, exprimé en [h].

D'après l'équation du déphasage (3.24), β défini en *rad* est compris sur $[\frac{-\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ comme la fonction *arctangente*. Comme le déphasage représente le retard du pic de chaleur à l'intérieur du bâtiment, β est réellement compris sur $[0; \frac{\pi}{2}]$, soit sur l'intervalle $[0; 6]$ en *heures* .

Le rapport $\frac{\Delta T_i}{\Delta T_o}$: correspondant au rapport des amplitudes des températures intérieures et extérieures et représente la capacité du bâtiment à amortir les fluctuations de la température intérieure.

On étudie successivement une période estivale pour le confort d'été et une période hivernale pour l'analyse des besoins de chauffage. On définit alors deux cas de référence :

- pour la période estivale, les caractéristiques de la température extérieure sont $\tilde{T_o} = 26°C$, $\Delta T_o = 15°C$. Le coefficient de transmission du bâtiment $U_{bat} = 0.3\ W/m^2.K$, le débit de surventilation nocturne $V_n = 3$ vol/h.
- pour la période hivernale, $\tilde{T_o} = 5°C$, $\Delta T_o = 5°C$, $U_{bat} = 0.3\ W/(m^2.K)$.

3.4.2 Impact du débit de ventilation nocturne

Au cours de la journée, le bâtiment est ventilé avec un débit $V_j = 0.6$ vol/h qui correspond au taux de renouvellement d'air minimal pour des conditions d'hygiène acceptables. Durant la période nocturne prise entre 21h PM et 7h AM, on applique un débit de ventilation V_n variable entre 0.6 et 8 vol/h.

Le graphique en haut à gauche de la figure (3.6) montre pour chaque variation de V_n, l'influence de la surventilation sur le confort pour différentes constantes de temps. En évaluant les indicateurs de performance énoncés plus haut, on a constaté que le critère d'inconfort tel que défini empêchait de bien visualiser l'effet de la ventilation couplée à l'inertie. Pour ce cas précis, au lieu de prendre la température de confort selon la théorie du confort adaptatif, on l'a prise égale à la moyenne de température extérieure à savoir $\tilde{T_o} = 26°C$, afin de surestimer les heures de surchauffe. Ceci n'a aucune influence sur les conclusions que l'on peut tirer quant à l'effet de la ventilation sur le confort.

Tout d'abord on remarque que pour des constantes de temps inférieures à 100 h, quelque soit le débit de surventilation nocturne, l'inconfort est réduit de manière considérable lorsque l'inertie est renforcée : on passe de 2500 à 1000 deg.h lorsque τ varie de 25 à 100 h soit 60% en moins de surchauffe.

A partir de $\tau > 100$ h, il est nécessaire d'appliquer un débit de surventilation supérieur à V_j si l'on veut réduire les surchauffes. En effet,

- pour $V_n = V_j$, l'inconfort reste égal à 750 deg.h quelque soit l'inertie du bâtiment,
- pour $V_n > V_j$, on arrive encore à réduire l'inconfort de manière significative et cela jusqu'à $\tau = 2000$ h (pour $\tau = 2000$ h et $V_n = 2$ vol/h , IDH = 400 deg.h).
- A partir de $V_n > 2$ vol/h, l'amélioration du confort devient presque négligeable quelque soit $\tau > 1000$ h.

Quant au déphasage, le second graphe de la figure (3.6) montre de manière générale que le retard du pic de chaleur dans le bâtiment augmente proportionnellement avec l'inertie et on constate qu'à partir de $\tau = 2000$ h, un maximum de 6 h de déphasage est atteint. On remarque également que le déphasage est réduit lorsque le débit

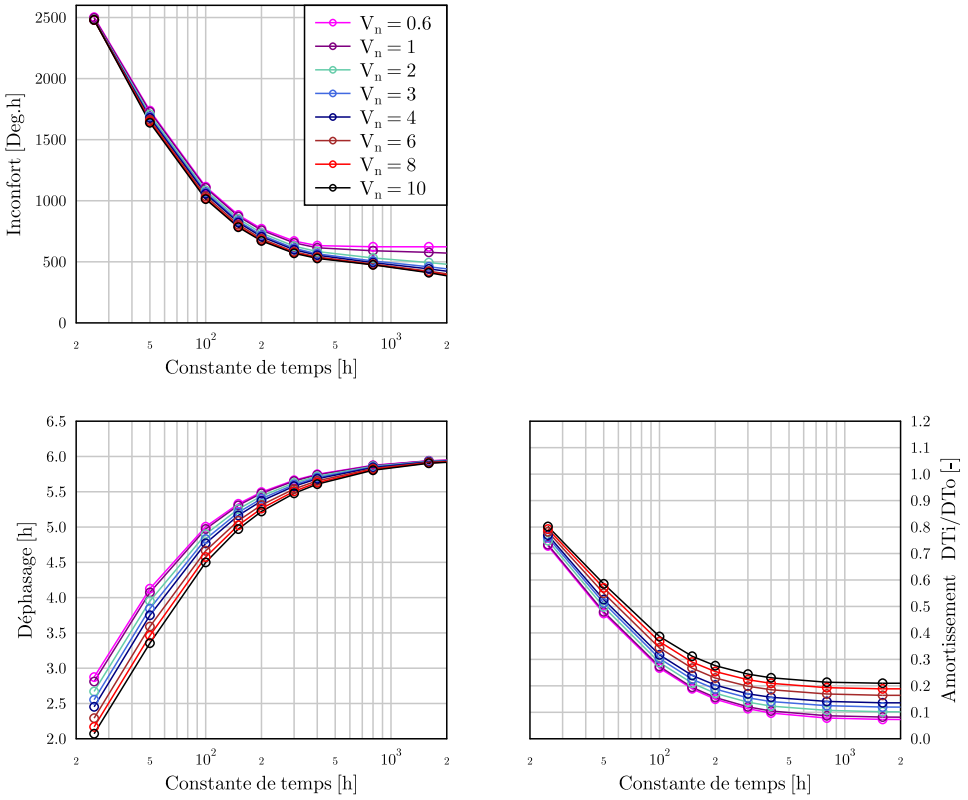

Figure 3.6 – *Effet du débit de ventilation nocturne sur l'inconfort, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure*

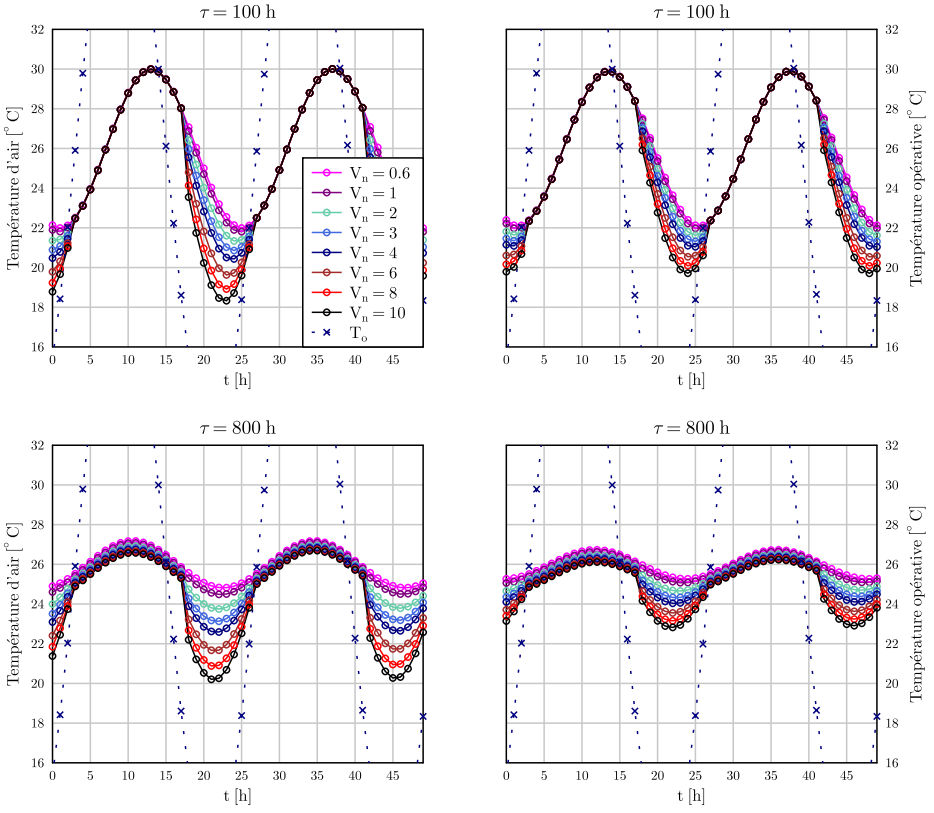

Figure 3.7 – *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une inertie "moyenne" (τ =100 h) et une forte inertie (τ =800 h) lorsque V_n varie de 0.6 à 10 vol/h*

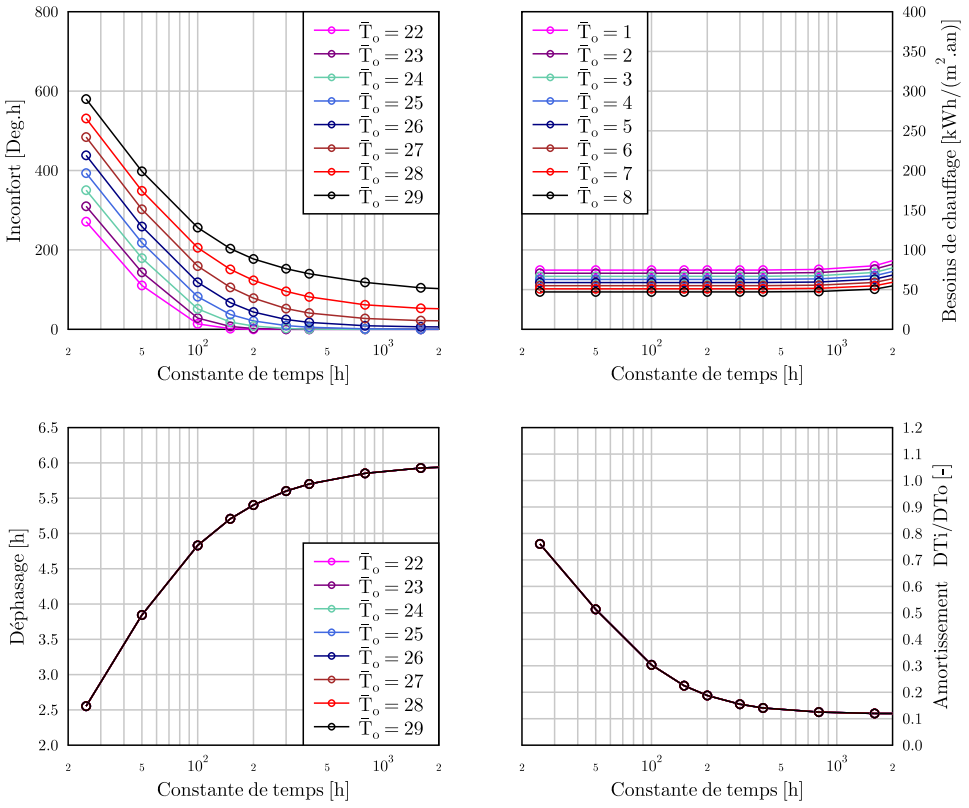

Figure 3.8 – *Effet de la variation de la moyenne de température extérieure en été sur l'inconfort, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure et la moyenne de température extérieure en hiver sur les besoins de chauffage*

de surventilation V_n croît et cela est davantage ressenti pour de faibles constantes de temps : pour $\tau = 25$ h, à $V_n = 0.6$ vol/h, le déphasage est de 5.3 h tandis qu'à V_n=10 vol/h, il est de 3.8 h.

Le dernier graphique de la figure (3.6) montre que de manière similaire pour toutes les constantes de temps, le débit de surventilation tend à accroître les fluctuations de la température intérieure T_i, ce qui contribue à un meilleur rafraîchissement la nuit comme on peut le voir sur la figure (3.7) montrant les évolutions de la température intérieure et de la température opérative, même si à partir de $\tau =$ 2000 h ces fluctuations demeurent constantes y compris pour $V_n = 10$ vol/h.

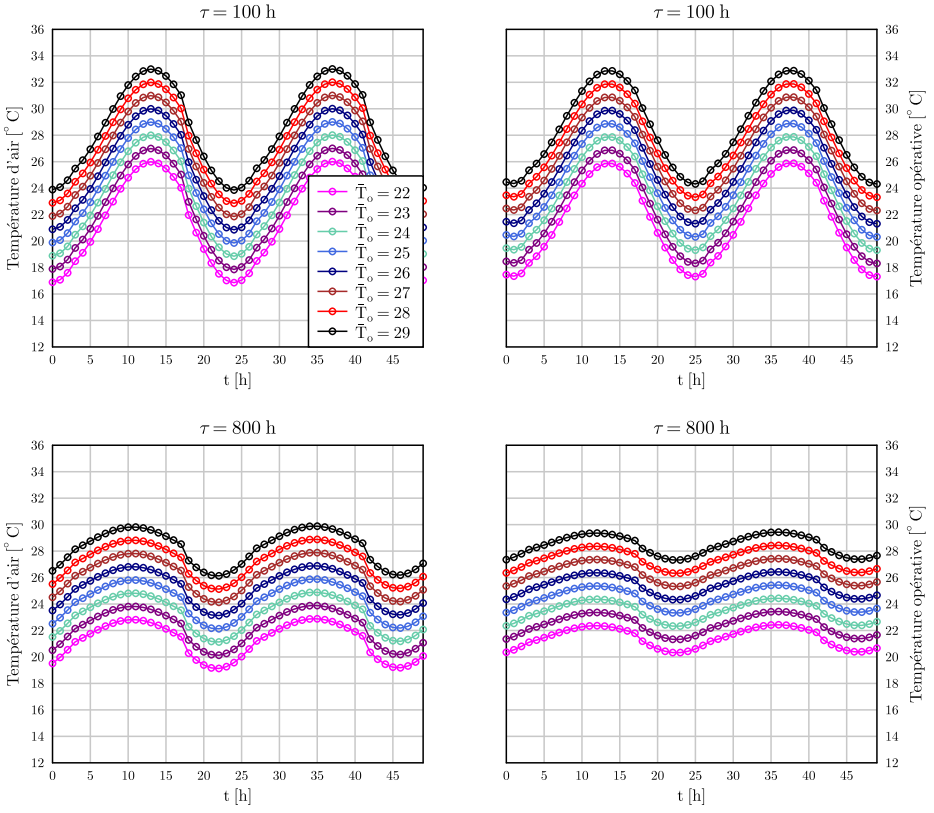

Figure 3.9 – *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une inertie "moyenne" (τ =100 h) et une forte inertie (τ =800 h) lorsque $\tilde{T}_o$ varie de 22 à 29 ° C.*

3.4.3 Impact de la température extérieure

Dans les figures (3.8) et (3.9), on étudie l'effet de l'évolution de la moyenne de la température extérieure. On se positionne dans le cas de base défini plus haut avec une moyenne de température extérieure $\tilde{T}_o$ variant de 22 à 29° C. De manière générale, l'accroissement de la moyenne de température extérieure va contribuer à élever la moyenne de la température intérieure comme on l'a vu dans l'équation (3.2.2.4), ce qui augmente l'inconfort quelque soit la valeur de τ (premier graphique en haut à gauche de la figure (3.8)). Ceci est aussi vérifié lorsqu'on observe les évolutions des températures intérieure et opérative sur la figure (3.9). En conséquence de l'évolution de la moyenne de température extérieure, les besoins de chauffage en hiver diminuent de façon symétrique comme on le voit en haut à droite sur la figure (3.8).

D'autre part, en ce qui concerne les effets de l'amplitude jour/nuit de la température extérieure (figures (3.10) et (3.11)), on a considéré le cas de base en faisant varier l'écart de température extérieure ΔT_o de 2 à 17° C. Contrairement à $\tilde{T}_o$, l'inconfort est d'autant plus important que l'inertie du bâtiment est faible : pour ΔT_o = 10° C, l'inconfort est divisé par dix quand on passe de τ = 25 h à τ = 100 h, ce qui est non négligeable. A partir de $\tau > 200$ h, la réduction de l'inconfort est moins sensible : il faut considérablement renforcer l'inertie afin de pouvoir gagner ne serait-ce que 10 % de temps de surchauffe.
En outre, le changement de l'amplitude de température jour/nuit n'a montré aucun effet sur les besoins de chauffage (figure (3.10) en haut à droite). En effet, comme le montre l'expression du flux Q_p (Equation (3.43)), l'amplitude jour/nuit de la température intervient dans le terme " $(T_o - T_{cons})$ ". En intégrant Q_p dans le temps, la somme de la différence $(T_o - T_{cons})$ restera la même quelque soit l'amplitude ΔT_o tant que T_o reste inférieure à la température de consigne.

Quant au déphasage, il évolue de la même façon que la constante de temps mais il reste invariant quelles que soient la moyenne et l'amplitude de la température extérieure. Ce qui est attendu car le déphasage ne dépend pas des sollicitations extérieures.

Pour les fluctuations de la température intérieure, elles sont réduites lorsque l'inertie devient importante. Les derniers graphiques des figures 3.8 et 3.10 ne montrent pas d'influence de la température extérieure sur celles-ci bien que DT_i évolue de la même manière que ΔT_o comme le montre la figure 3.11), mais le rapport des deux reste constant au cours de l'évolution de ΔT_o.

3.4.4 Impact du coefficient global de déperditions U_{bat}

Comme énoncé plus tôt, le coefficient U_{bat} en $W/(m^2.K)$ représente l'intensité du flux échangé entre l'intérieur du bâtiment et l'air extérieur à travers l'enveloppe lorsque le gradient de température est égal à 1 ° C. Autrement dit, il caractérise

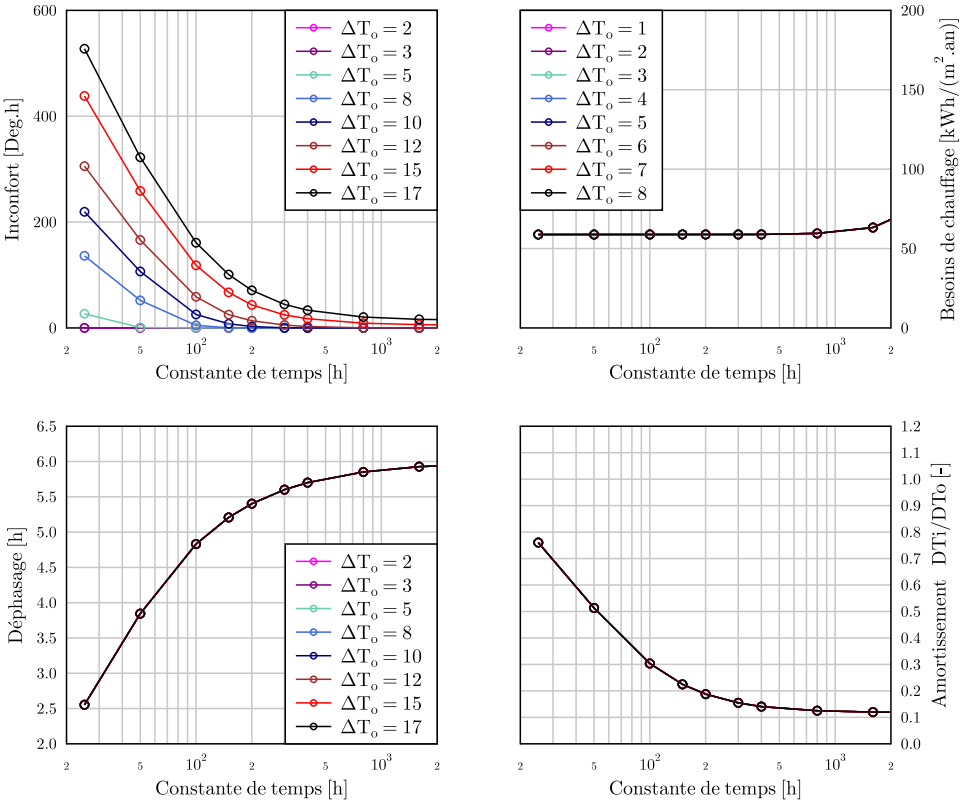

Figure 3.10 – *Effet de la l'écart de température jour/nuit extérieure en été sur l'inconfort, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure et l'écart de température jour/nuit extérieure en hiver sur les besoins de chauffage*

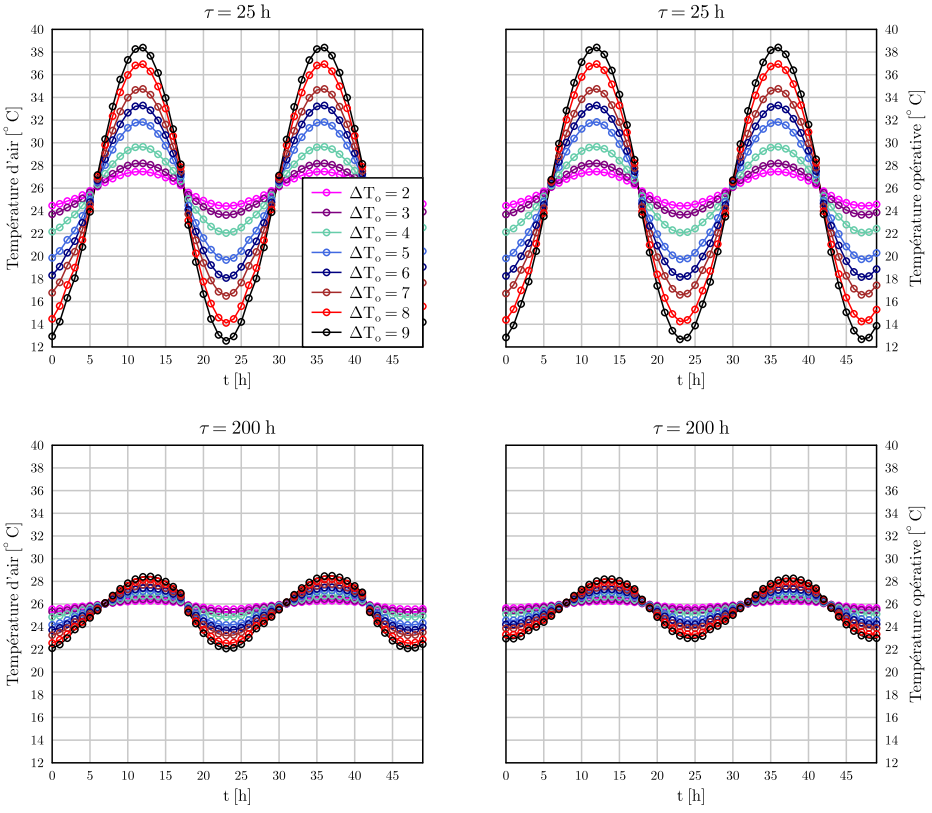

Figure 3.11 – *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une faible inertie (τ =25 h) et une inertie moyenne (τ =200 h) lorsque ΔT_o varie de 2 à 17 ° C.*

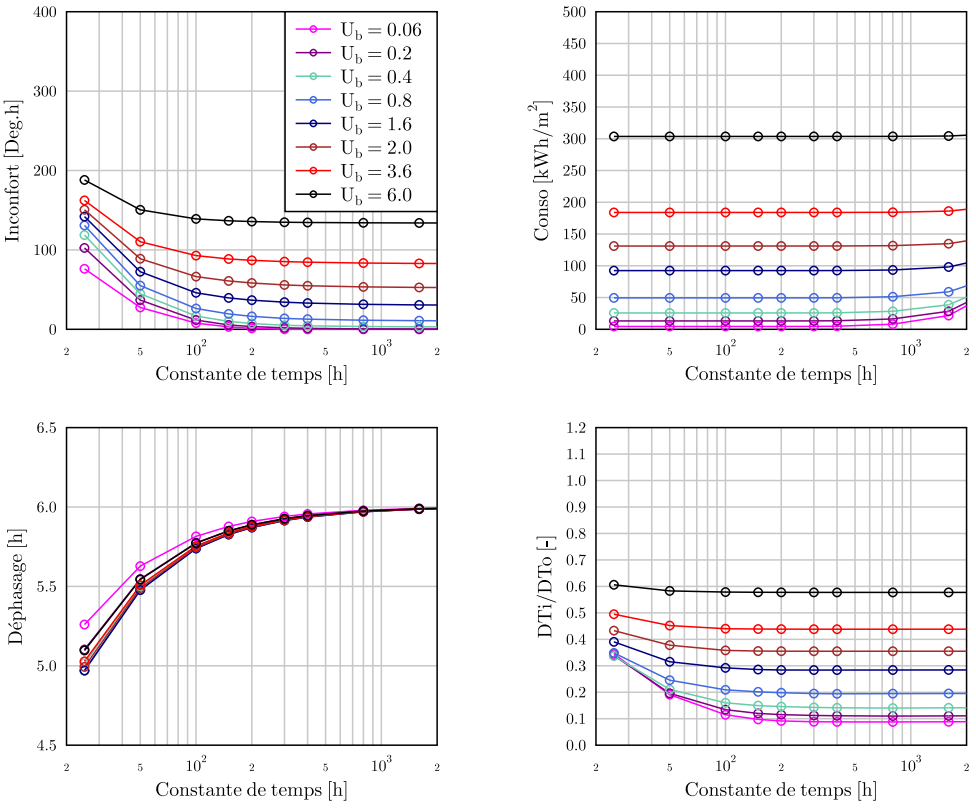

Figure 3.12 – *Effet du coefficient d'échange global du bâtiment sur l'inconfort, les besoins de chauffage, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure*

aussi l'aptitude de l'enveloppe à conserver la chaleur au sein du bâtiment. Par sa définition, U_{bat} s'exprime de la manière suivante :

$$U_{bat} = \frac{\sum U_{p,k} A_{p,k} + \sum U_{v,l} A_{v,l} + \sum \epsilon_j L_j}{\sum A_{p,k} + \sum A_{v,l}} \tag{3.75}$$

avec

$U_{p,k}$ et $A_{p,k}$, respectivement le coefficient d'échange et la surface d'une paroi k, $U_{v,l}$ et $A_{v,l}$, respectivement le coefficient d'échange et la surface d'une paroi vitrée l, ϵ_j et L_j, respectivement le coefficient de déperditions linéique et la longueur d'un pont thermique j.

Si la surventilation nocturne permet d'évacuer les chaleurs excédentaires stockées au cours de la journée, elle permet de réduire temporairement la constante de temps

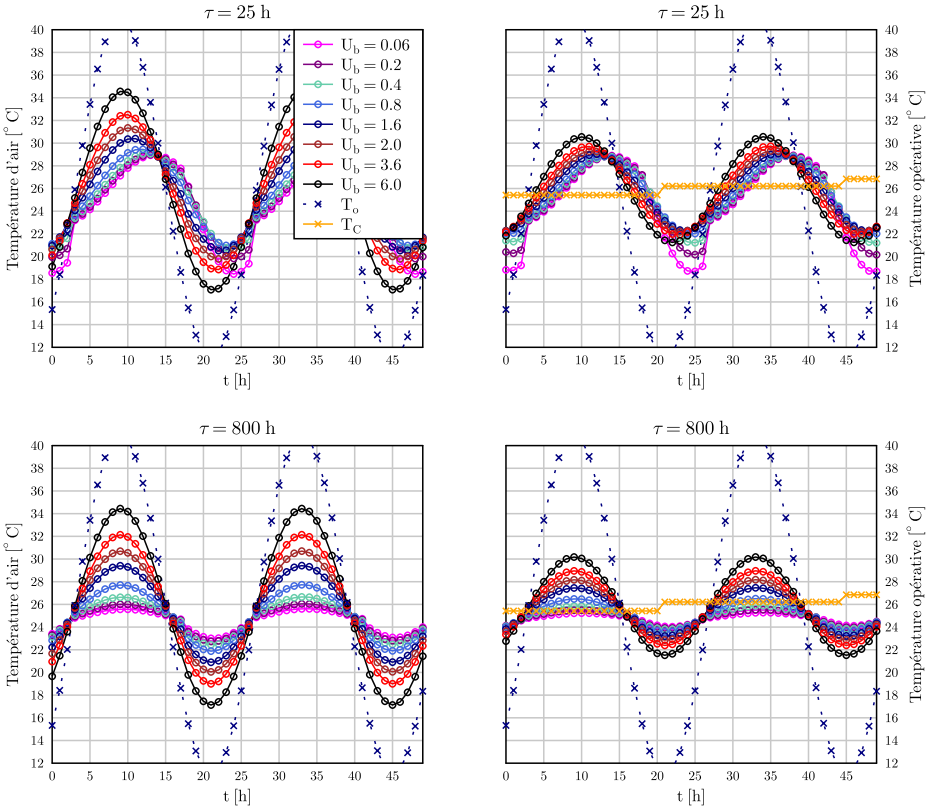

Figure 3.13 – *Evolution de la température intérieure et de la température opérative pour une faible inertie (τ = 25 h) et une forte inertie (τ = 800 h) lorsque U_{bat} varie de 0.06 à 6 $W/(m^2.K)$.*

du bâtiment de manière à accélérer le rafraîchissement du bâti tout en ayant la même quantité de masse dans la structure et par conséquent la même capacité de stockage. Lorsque la période de surventilation nocturne est achevée et que la ventilation redevient modérée, il est important que le bâtiment puisse conserver la fraîcheur qu'il a acquise au cours de la nuit et cela grâce à un certain niveau d'isolation quantifié par le coefficient d'échange global : plus la valeur de U_{bat} sera faible, mieux le bâtiment conservera la fraîcheur stockée.

Sur les figures (3.12) et (3.13), on considère le cas de base en faisant évoluer le coefficient U_{bat} de 0.06 à 6 $W/(m^2.K)$. Afin de se faire une idée sur cette fourchette de valeurs, le bâtiment basse consommation en béton banché de la plateforme INCAS que l'on a décrit dans le paragraphe 3.3.1 a un U_{bat} de 0.3 $W/m^2.K$. Son enveloppe comprend 15 cm de béton avec 20 cm d'isolation par l'extérieur. Pour $U_{bat} < 0.3$, on atteint des niveaux d'isolation encore plus importants, voire même des sur-isolations. A l'opposé, pour U_{bat} proche de 1.6, l'enveloppe du bâtiment n'est pas du tout isolée

et a donc une conductivité thermique élevée, favorisant au maximum les échanges avec l'extérieur.

Sur la figure 3.12, comme pour les cas précédent, l'inconfort diminue lorsque l'inertie du bâtiment évolue. Pour deux bâtiments ayant la même constante de temps mais des U_{bat} différents (par exemple pour $\tau = 50$ h et $U_{bat} = 0.4$ et 0.8), on constate que plus U_{bat} est faible, moins le bâtiment subit de surchauffe. A partir de $\tau \geq 400$ h, on observe que les surchauffes sont d'autant plus réduites lorsque U_{bat} devient faible, ce qui est en accord avec le résultat attendu : on a une inertie et une résistance thermique importante, ce qui permet une meilleure conservation de la fraîcheur.

Quant au déphasage, pour de faibles et moyennes inerties ($\tau \leq 100$ h), le déphase ne varie pas énormément, néanmoins on remarque que le pic de température intérieure est d'autant plus déphasé que U_{bat} est faible. Pour $\tau \geq 400$ h, le déphasage atteint une durée de 6 h, quelque soit la valeur de U_{bat}.

En ce qui concerne les fluctuations de température intérieure, on retrouve la même chose que pour l'inconfort : pour une faible inertie ($\tau < 50$ h), la température intérieure fluctue moins quand U_{bat} est faible. En outre, pour une forte inertie ($\tau > 400$ h), plus U_{bat} est faible et plus les fluctuations de température intérieure sont atténuées, ce qui est attendu car une forte isolation couplée à une forte inertie permet de lisser les températures.

3.4.5 Impact des charges internes

Les figures (3.14) et (3.15) ont été représentées pour le cas de base en faisant varier le coefficient de charges internes E de 0 à 16 W/m^2.

La figure (3.14) montre que quelle que soit la constante de temps, l'inconfort et les besoins de chauffage vont contribuer pour l'un à l'augmentation des heures de surchauffe et l'autre à la réduction des consommations énergétiques. D'autre part, ces charges internes étant constantes au cours du temps, elles n'ont pas d'impact sur le déphasage ou sur les fluctuations de la température intérieure.

3.4.6 Conclusion sur l'impact des différents paramètres

Dans ce paragraphe, on a réalisé une étude sur l'impact des paramètres de l'outil de conception qui serviront par la suite à la définition d'un cahier de charges dans la démarche de conception d'une part pour vérifier la cohérence de l'outil qu'on a développé et d'autre part pour comprendre leurs interactions vis-à-vis de l'inertie thermique. Les paramètres dont nous avons étudié les effets sont la température extérieure (sa moyenne et son amplitude jour/nuit), le débit de ventilation nocturne, U_{bat} et les charges internes. On a vérifé que :

- l'inconfort peut être considérablement réduit par une construction à forte inertie lorsque les conditions extérieures présentaient de fortes variations jour/nuit,

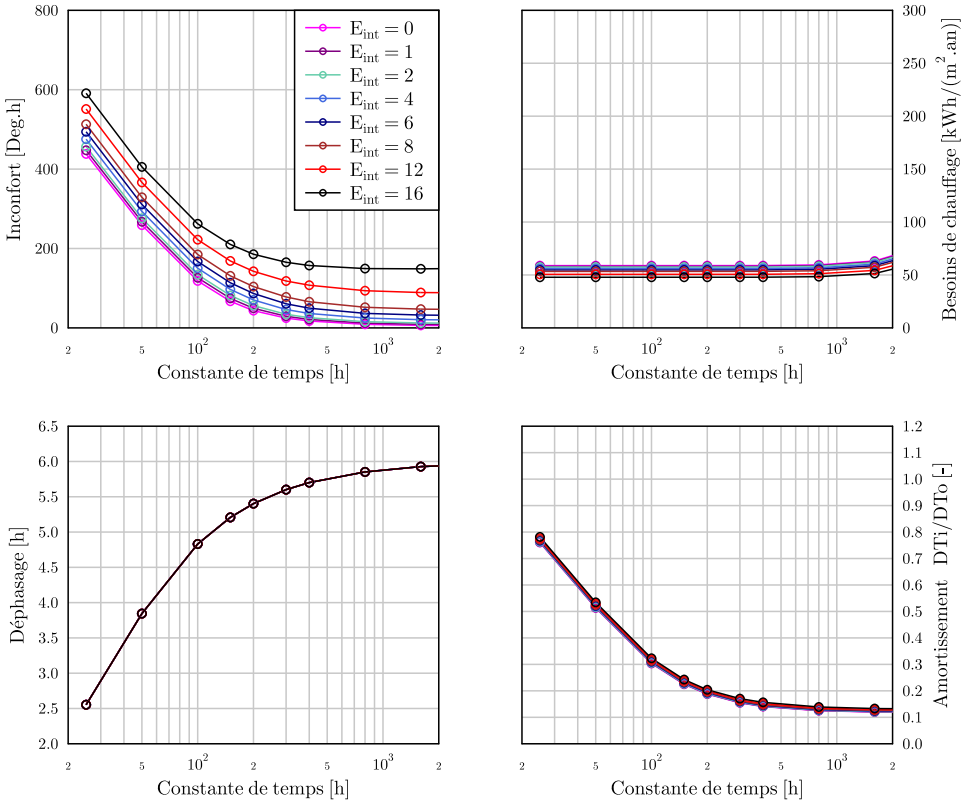

Figure 3.14 – *Effet des charges internes sur l'inconfort, les besoins de chauffage, le déphasage et les fluctuations de la température intérieure*

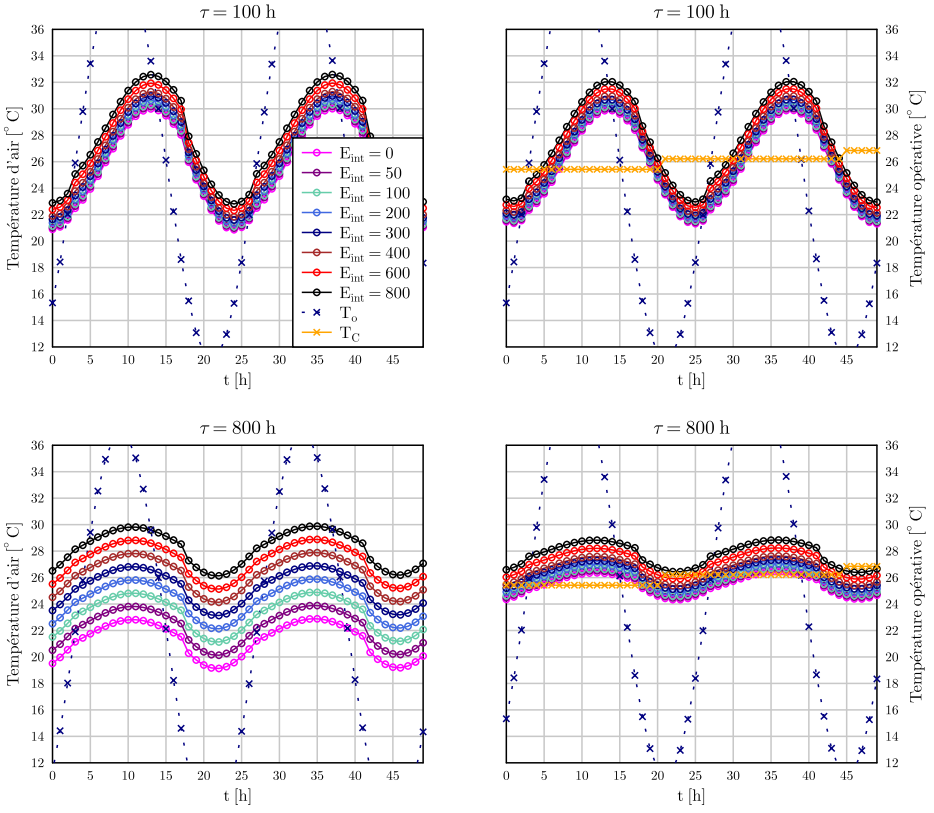

Figure 3.15 – *Evolution de la température intérieure et la température opérative pour une inertie moyenne (τ =100 h) et une forte inertie (τ =800 h) lorsque les charges internes varient de 0 à 16 W/m^2*

surtout avec l'usage de la ventilation nocturne.

- même avec la présence de charges internes (comprenant les flux solaires pénétrant dans le bâtiment par les fenêtres), un bâtiment à forte inertie nécessite des besoins de chauffage supérieurs à un bâtiment à construction légère.

- le déphasage et l'amortissement des fluctuations de la température intérieure ne dépendent pas des sollicitations extérieures et intérieures (si celles-ci sont constantes dans le temps), mais principalement de la constante de temps, de la ventilation nocturne et de U_{bat}.

Après avoir observé l'effet des paramètres du modèle de conception sur les performances énergétiques du bâtiment, on décide d'élaborer une démarche qui permettrait, à l'aide du modèle CoSPARK d'obtenir plus d'informations sur les caractéristiques thermiques du bâtiment en phase de conception. On propose une approche par inversion de modèle qui sera ensuite concrétisée selon deux méthodes : la première consiste à résoudre un problème d'optimisation (couplage du modèle CoSPARK avec les algorithmes d'optimisation de GenOpt), la seconde est une étude de sensibilité.

3.5 Application du modèle CoSPARK à l'aide à la conception pour deux cas types de bâtiments

3.5.1 Proposition d'une approche par inversion de modèle

Compte tenu du contexte du bâtiment, du voisinage, des masques proches et lointains, les éléments concernant l'exposition au vent et aux apports solaires ainsi que l'éclairage peuvent être précisés dès la phase d'avant-projet, notamment la taille des ouvertures, la proportion de vitrage aux façades et le dispositif de protections solaires. On peut alors estimer, en prenant connaissance du facteur solaire et du coefficient de transmission des vitrages, l'importance des apports solaires pénétrant au niveau des différentes zones.

A partir de ces quelques éléments clés définis dès les premières étapes du projet, il est possible de réaliser une démarche afin d'aider les concepteurs et les architectes quant au choix de la nature des matériaux de construction qui contribueraient à une meilleure performance sur le plan énergétique et sur le confort sans interférer sur d'autres exigences qui elles aussi ont une importance majeure sur la qualité environnementale du bâtiment.

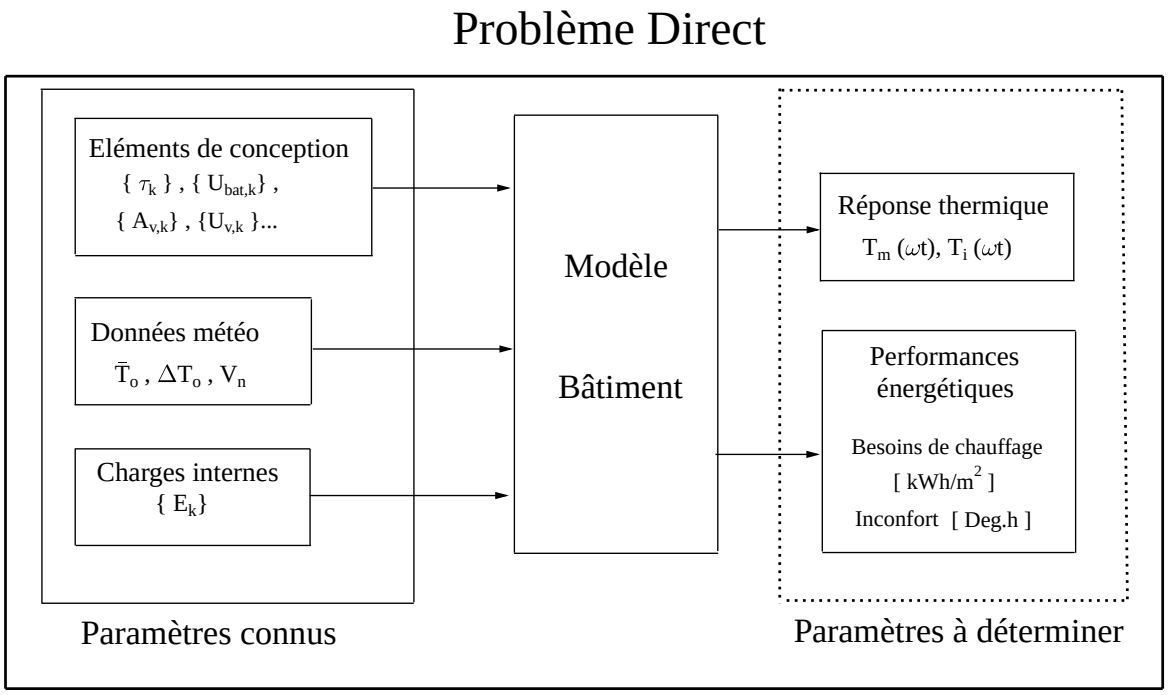

Figure 3.16 – *Schématisation du problème direct*

3.5.2 Inversion de modèle d'un bâtiment

3.5.2.1 Définition des problèmes "direct" et "inverse"

Le problème que nous tentons de résoudre peut se formuler de deux manières. Celles-ci diffèrent par le sens que l'on attribue à la résolution du problème, qui peut être alors "directe" ou "inverse". Les figures 3.16 et 3.17 représentent une schématisation du problème vu sous ces deux angles.

Le problème *direct* (figure 3.16) est la forme conventionnelle de résolution du problème thermique. On dispose de toutes les données sur le bâtiment : les paramètres décrivant la morphologie, les propriétés thermiques de l'enveloppe, les données météorologiques et l'ensemble des charges internes dissipées. Le modèle développé dans un environnement de simulation permet d'évaluer la réponse thermique ainsi que les performances énergétiques correspondantes.

Dans le problème "indirect" ou *inverse* (figure 3.17), seule une partie des éléments de conception est connue. Il s'agit des paramètres que l'on pose comme *contraintes* lors de la conception. On associe ces paramètres à la morphologie du bâtiment (proportion de surfaces vitrées, surface de façades en contact avec l'extérieur...), aux données météorologiques et aux charges internes. Les paramètres que nous cherchons à déterminer sont les éléments de conception liés aux propriétés thermiques des matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment. Une zone j est caractérisée par la constante de temps τ_j et le coefficient de transmission $U_{bat,j}$. Un bâtiment mul-

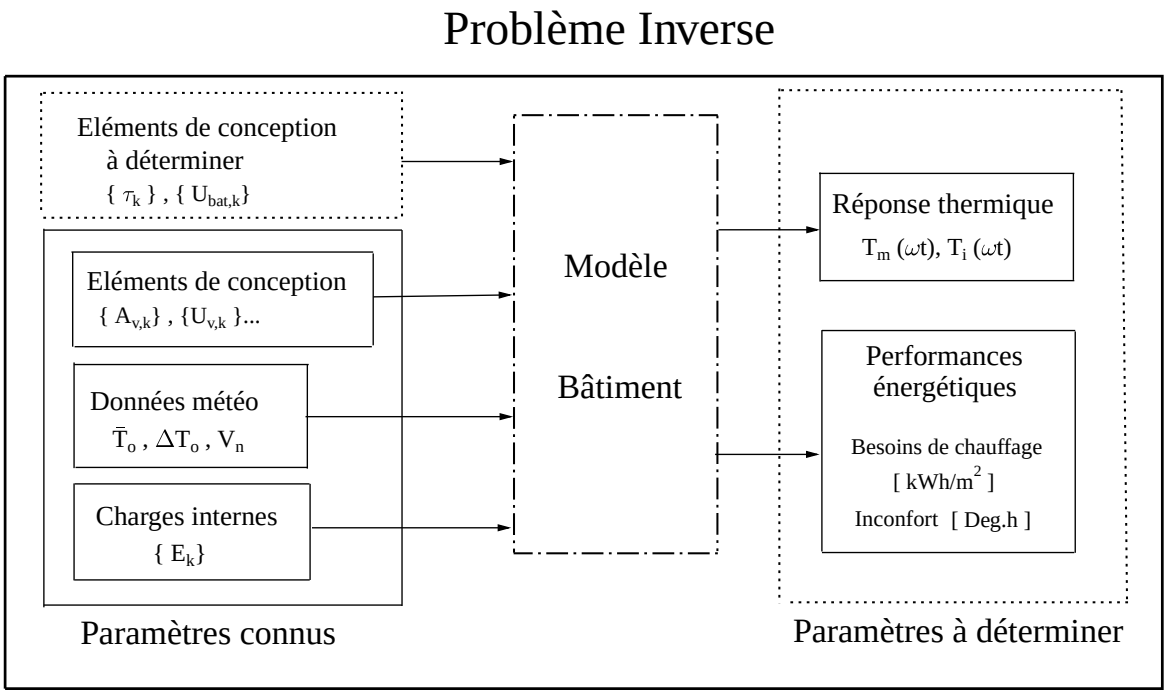

Figure 3.17 – *Schématisation du problème inverse*

tizone sera donc caractérisé par l'ensemble des constantes de temps τ_j déterminant l'inertie de ces zones et leurs coefficients de transmission $U_{bat,j}$, soit les vecteurs $\{\tau_j\}$ et $\{U_{bat,j}\}$. Les réponses thermiques $T_{i,j}(\omega t)$ des zones sont également à déterminer.

Généralement dans un problème inverse classique, les paramètres de sortie sont connus et on cherche à identifier les variables d'entrée à déterminer par un procédé d'identification ou d'ajustement : par un procédé itératif, on fait varier les paramètres recherchés sur leur domaine de définition de façon à minimiser l'écart entre la réponse et la sortie imposée. Pour que le problème soit bien posé, il est nécessaire que le nombre de ces paramètres inconnus soit le même que dans le problème direct.

3.5.2.2 Résolution du problème inverse

Imposer les sorties $T_{i,j}(\omega t)$ reviendrait à limiter l'ensemble de solutions, voire à ne pas avoir de solution du tout (par exemple, imposer des températures $T_{i,j}(\omega t)$ constantes au cours du temps alors que la température extérieure est variable). Les températures $T_{i,j}(\omega t)$ seront caractérisées de la même manière que $T_o(\omega t)$ c'est-à-dire comme des fonctions périodiques définies par une fréquence (la même que T_o), une valeur moyenne $\tilde{T}_{i,j}$ et une amplitude $\Delta T_{i,j}$, il peut exister une infinité de solutions pour le couple ($\tilde{T}_{i,j}$, $\Delta T_{i,j}$) permettant de minimiser la durée d'inconfort.

D'autre part, si on considère le principe du confort adaptatif, il suffit que les températures $T_{i,j}(\omega t)$ fassent partie du domaine délimité par $[T_C - k; T_C + k]$ avec T_C, la température de confort évaluée par le principe du confort adaptatif et $k = 1$,

2 ou 3 $°C$ en fonction de la catégorie du bâtiment (I, II ou III selon l'acceptabilité de la variation des températures intérieures (4.1.2.1).

Afin de laisser un degré de liberté sur l'évolution des températures $T_{i,j}(\omega t)$, on définit le problème d'inversion comme un problème de minimisation : on définit une fonction objective que l'on cherche à minimiser en fonction des paramètres de conception inconnus, soit $\{\tau_j\}$ et $\{U_{bat,j}\}$. La fonction objective est une combinaison linéaire entre les indices d'inconfort $\{IDH_j\}$ du bâtiment en été et $\{C_j\}$ les besoins de chauffage en hiver. $\{IDH_j\}$ et $\{C_j\}$ sont respectivement l'ensemble des indices d'inconfort et des besoins de chauffage des zones du bâtiment. On définit cette fonction objective comme étant $\{F_j\}$:

$$\{F_j\} = \{IDH_j\} + \{C_j\} \tag{3.76}$$

La procédure est schématisée dans l'organigramme de la figure (3.18).

Le modèle du bâtiment est implémenté dans un environnement de simulation. Dans notre cas il s'agit de l'environnement de simulation SimSPARK couplé à des algorithmes d'optimisation génériques, développés sous GenOpt (1.5.3).

D'autre part, on spécifie dans les algorithmes d'optimisation le domaine de variation, le pas de variation et la valeur initiale des paramètres d'optimisation. A chaque itération, la simulation permet d'évaluer la fonction objective $\{F_j\}$ qui est par la suite introduite dans les algorithmes d'optimisation ; en fonction de l'amélioration de la fonction objective, les algorithmes orientent la résolution du problème de manière à déterminer les valeurs de $\{\tau_j\}$ et de $\{U_{bat,j}\}$ qui minimisent $\{F_j\}$.

3.5.2.3 Définition des contraintes du problème inverse

Au moment de formuler le problème d'optimisation, il est nécessaire de bien spécifier l'ensemble des paramètres de conception qui sont déjà imposés d'office. Ces paramètres connus à l'avance constituent l'ensemble des *contraintes*. Dans la démarche que nous avons développée, notre intérêt est porté sur l'identification des éléments de conception liés aux propriétés des matériaux. Ainsi, les variables étant $\{\tau_j\}$ et $\{U_{bat,j}\}$, les contraintes que nous nous imposons sont principalement :

- le reste des éléments de conception : les dimensions, les surfaces vitrées, le coefficient de transmission des vitrages...
- les données météorologiques : la moyenne et l'écart jour/nuit de la température extérieure caractérisant le climat, l'éclairement global.
- l'ensemble des charges internes dissipées dans le bâtiment

- les paramètres liés au fonctionnement du bâtiment : les débits de ventilation journalière et nocturne V_j et V_n, les instants de démarrage et d'arrêt de la ventilation nocturne, la consigne de chauffage en hiver, les instants d'arrêt et de démarrage du chauffage.

Toutefois, si l'on s'intéresse à une autre problématique de la conception, il est envisageable d'intervertir les contraintes et les variables : par exemple, si la problématique était de connaître la proportion de surfaces vitrées qui minimise l'inconfort en été et les besoins de chauffage en hiver sachant que les matériaux de construction sont connus, les vecteurs $\{\tau_j\}$ et $\{U_{bat,j}\}$ deviennent les contraintes et $\{A_{v,j}\}$ et $\{U_{v,j}\}$ les variables.

Il est possible d'augmenter le nombre de variables du problème, par exemple en laissant le débit de ventilation nocturne V_n inconnu ou les instants de démarrage et d'arrêt de la surventilation... Le problème continuera à être bien posé car l'optimisation se déroule selon un processus itératif consistant à rechercher les variables sur des intervalles de variation (1.5.3).

3.5.3 Application à un bâtiment de la plateforme d'expérimentation INCAS

On propose dans cette partie d'appliquer la procédure que l'on vient de présenter sur un bâtiment expérimental de la plateforme INCAS de l'INES. On cherche à déterminer les éléments de conception permettant de minimiser l'inconfort et les besoins de chauffage avec une connaissance d'un minimum de paramètres architecturaux.

3.5.3.1 Analyse des contraintes pour le cas de la maison INCAS

Comme indiqué sur la figure (3.18), il s'agit de déterminer les éléments de conception connus, les données météorologiques représentatives du climat et les charges internes.

Détermination des éléments architecturaux imposés On propose de reprendre la description de la maison décrite plus haut (3.3.1) sur laquelle on a réalisé la comparaison des deux types de modèle en se basant uniquement sur ses données architecturales (3.1) supposant que les caractéristiques des zones du bâtiment (τ_1, $U_{bat,1}$) et (τ_2, $U_{bat,2}$) sont inconnues. D'autre part, on conserve les mêmes conditions aux limites sur les parois :

- les parois verticales sont d'un côté en contact avec l'extérieur et de l'autre avec l'air intérieur
- les températures du vide sanitaire et des combles égales à la température extérieure

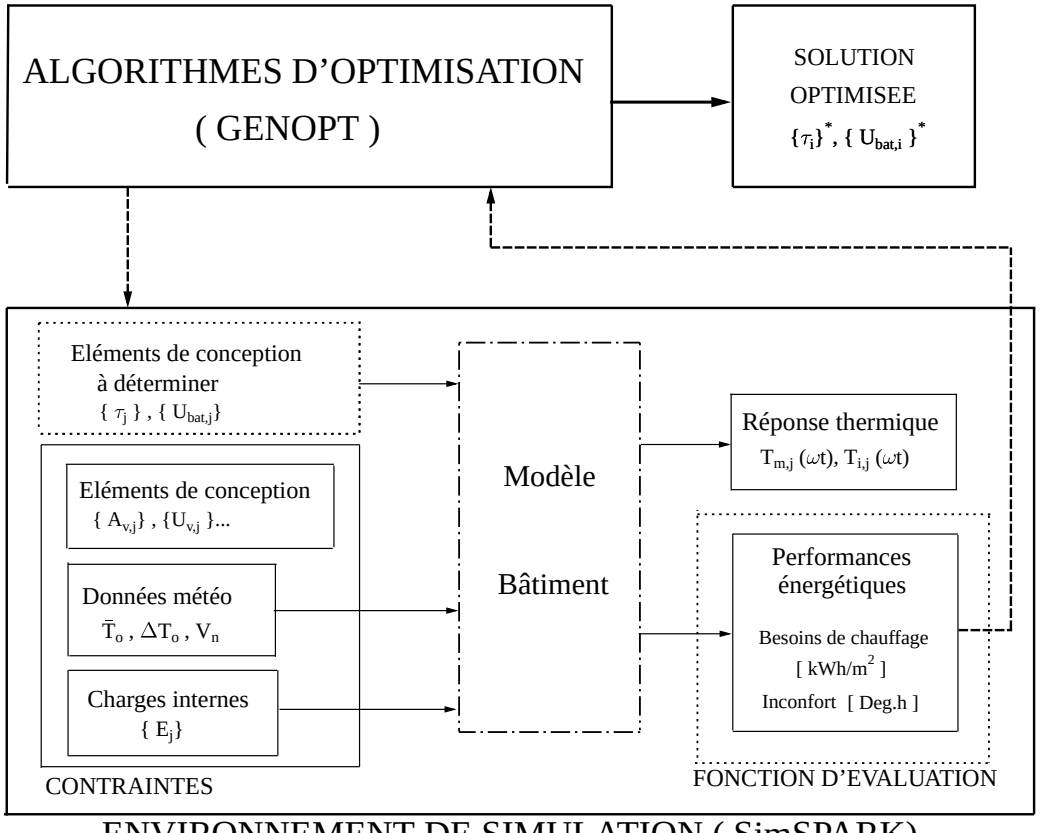

Figure 3.18 – *Evaluation des constantes de temps* $\{\tau_j\}$ *et des coefficients de transmission* $\{U_{bat,j}\}$ *du bâtiment par optimisation*

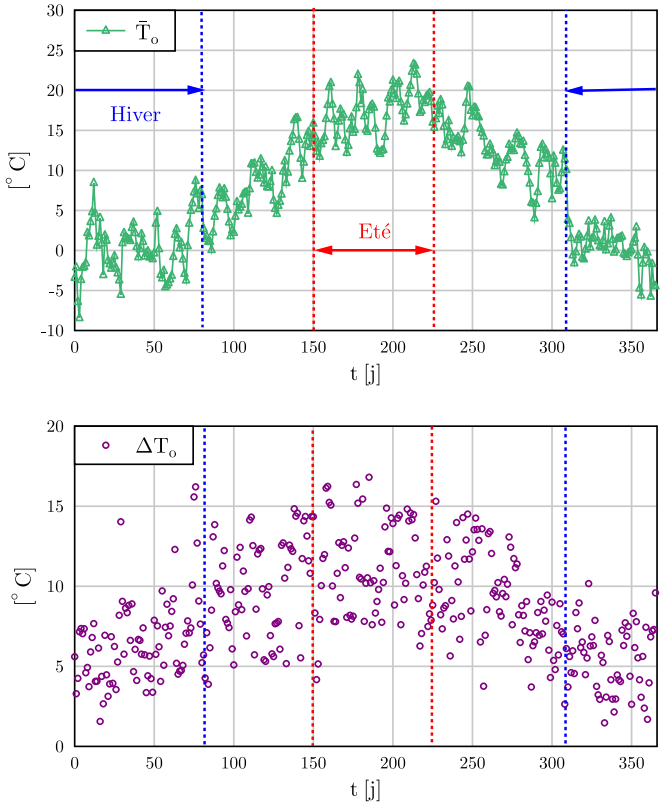

Figure 3.19 – *Représentation de la température extérieure moyenne $\tilde{T}_o$ et de l'écart de température jour/nuit ΔT_o pour le climat de Chambéry*

- on prend une condition de flux nul au niveau de la paroi commune. En d'autres termes, les surfaces de cette paroi ne sont pas comptabilisées dans le calcul des surfaces d'échanges (le plafond du RDC et le plancher de l'étage).

Sélection des températures extérieures à partir du fichier météo La figure (3.19) montre respectivement l'évolution de la moyenne journalière de la température extérieure $\tilde{T}_o$ et la variation de température jour/nuit ΔT_o au cours de l'année. On constate qu'en été, la moyenne peut varier entre 12 et 24°C et l'écart de température jour/nuit varie entre 4 et 16°C. En hiver, la moyenne varie entre -8 et 8°C et l'amplitude entre 2 et 16°C. En représentant la répartition de la moyenne et de l'amplitude jour/nuit par tranches de 2°C respectivement pour l'été (figure 3.20) et l'hiver (figure 3.21), on observe la fréquence des valeurs prises par celles-ci. On remarque qu'en été la moyenne de température est comprise 25% du temps entre 18 et 20°C et 24% du temps entre 16 et 18°C. Quant à l'amplitude, elle est en majorité incluse dans un intervalle entre 10 et 12°C (32%). En hiver, la moyenne $\tilde{T}_o$ est comprise entre 0 et 2°C, quant à l'amplitude, elle varie entre 4 et 6°C (35%).
Au final, on retiendra que la température extérieure varie en moyenne autour de $\tilde{T}_o$

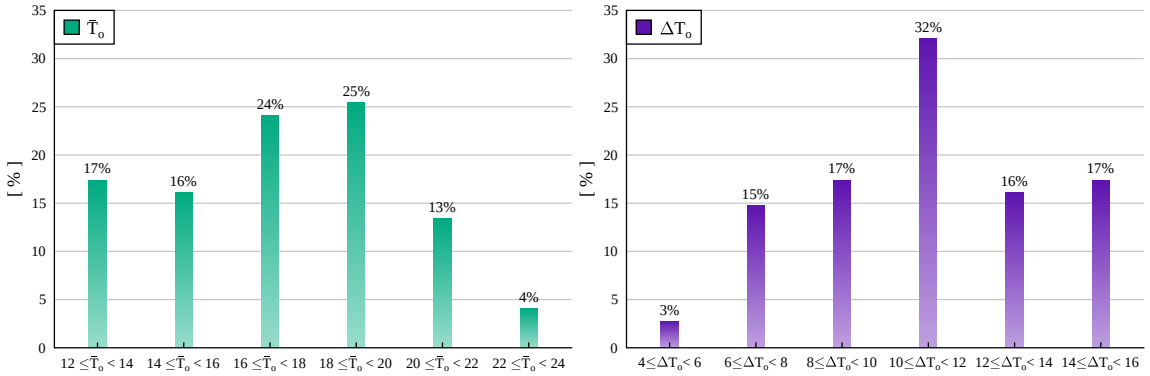

Figure 3.20 – *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en été pour le climat de Chambéry*

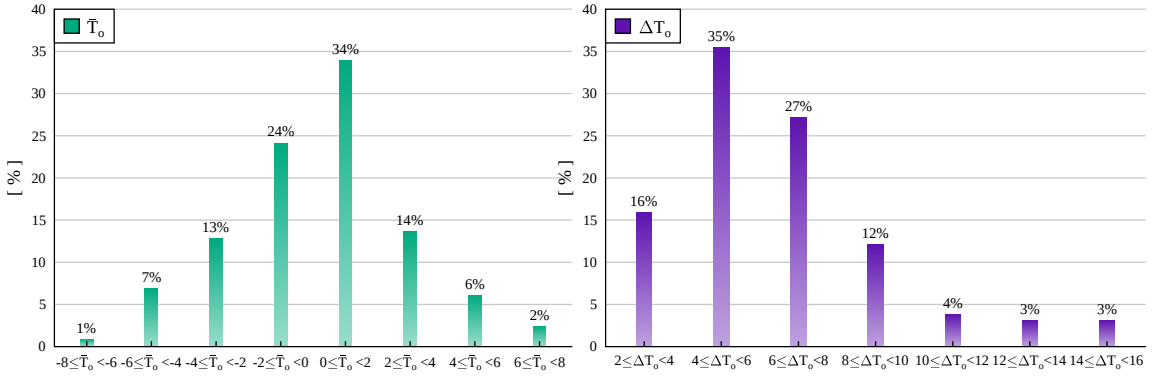

Figure 3.21 – *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en hiver pour le climat de Chambéry*

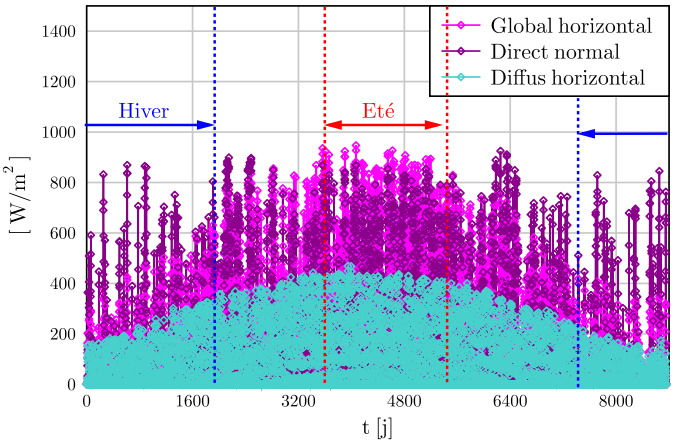

Figure 3.22 – *Evolution de l'éclairement global et de ses composantes directe et diffuse pour Chambéry - fichier météo type tm2*

$= 19°C$ en été avec un écart de $\Delta T_o = 12°C$ et en hiver, $\tilde{T}_o = 1°C$ et $\Delta T_o = 6°C$.

On remarque que l'écart jour/nuit ΔT_o demeure plus important en été qu'en hiver. Selon les conditions atmosphériques, le ciel aurait tendance à être plus découvert ce qui favoriserait le rafraîchissement de la température extérieure au cours des périodes nocturnes estivales. D'où un écart de température qui se creuse entre le jour et la nuit et qui évolue dans le même sens que la moyenne au fil des saisons.

Bilan des apports gratuits D'après l'équation (3.68), ils sont principalement dus au rayonnement solaire pénétrant à l'intérieur des pièces par les vitrages et d'autre part, aux apports internes liés à l'occupation, l'éclairage et les appareils électriques.

On prend en compte l'ensemble des apports solaires reçus sur une journée en les répartissant sur une période de 24 h avec une valeur constante. Comme énoncé plus tôt lors de la formulation du modèle (section 3.2.5), la variable E caractérisant les charges internes dissipées dans le volume intérieur est une quantité ajoutée en continu sur l'ensemble d'une période. Ainsi, la totalité des apports solaires fournis au bâtiment reste la même au cours du temps. Sur la figure (3.23), on montre pour le RDC, l'ensemble des flux solaires transmis $E_{tr,f}$ par chaque orientation en W/m^2 de plancher.

On aperçoit notamment sur la période d'été l'effet des protections solaires à la façade Sud qu'on ne voit pas en hiver car le soleil étant plus bas, la totalité des flux pénètre à l'intérieur de la zone.

Par la suite, on cherche à estimer les valeurs les plus récurrentes en été et en

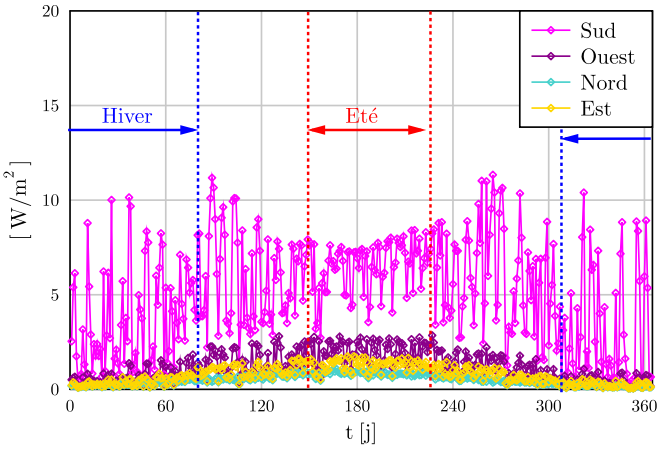

Figure 3.23 – *Flux solaires transmis $E_{tr,f}$ au RDC avec prise en compte des casquettes en W/m^2*

hiver pour la quantité de flux solaires transmis. On calcule les fréquences des valeurs prises par la somme de ces flux E_{sol} dans chaque zone afin de déterminer dans quels intervalles elles se situent. Les résultats sont affichés sur le graphique de la figure (3.24). On constate qu'en été, la majorité du temps, $E_{RDC,sol}$ et $E_{Etage,sol}$ prennent des valeurs comprises entre 8 et 12 W/m^2 (56 et 55%) tandis qu'en hiver, ces valeurs demeurent inférieures à 4 W/m^2 (57 et 63%). En définitive, on retiendra pour $E_{RDC,sol,ete} = 10\ W/m^2$, $E_{Etage,sol,ete} = 10\ W/m^2$ et $E_{RDC,sol,hiver} = 3\ W/m^2$, $E_{Etage,sol,hiver} = 3\ W/m^2$.

En ce qui concerne les charges internes liées à l'occupation, on a pris 5 W/m^2 durant la période d'occupation de 16 h sur 24 (de 0 à 10 h et de 18 à 24 h) selon le scénario conventionnel pour un logement dans la méthode Th-CE, ce qui revient à 3.5 W/m^2 si on considère que les apports sont fournis en continu. Pour la puissance dissipée par les appareils électriques, le standard maison passive ne prend pas en compte le séchage de linge en hiver comme étant une puissance générée par un appareil électrique, ce qui n'est pas le cas dans la réglementation française. On choisit de se baser sur le standard maison passive de 2.5 W/m^2 en continu : on prend pour le RDJ 3 W/m^2 et pour l'étage 1.5 W/m^2 (car la plupart des appareils électriques sont situés dans la zone au RDC), ce qui fait au total E_{int}= 6.5 W/m^2 au RDC et E_{int}= 5 W/m^2 à l'étage.

On dresse le bilan des charges internes dans le tableau 3.2 et on calcule les sommes E_{RDC} et E_{Etage} des puissances dissipées dans chaque zone.

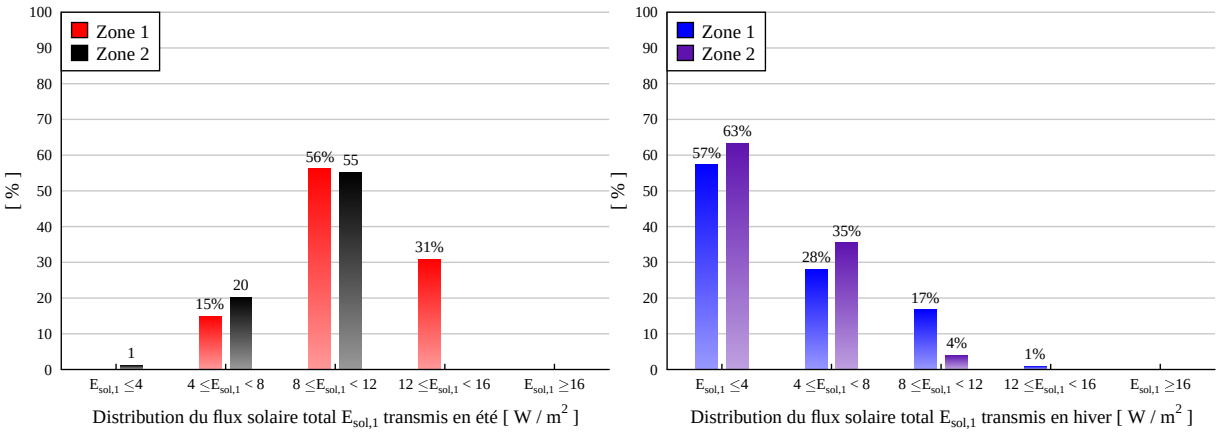

Figure 3.24 – *Distribution du flux solaire total transmis en W/m^2 de plancher durant les périodes d'été et d'hiver*

Table 3.2 – *Bilan des charges internes pour la maison béton banché de la plateforme INCAS*

	$E_{sol,été}$	$E_{sol,hiver}$	E_{int}	$E_{été}$=$E_{sol,été}$+E_{int}	E_{hiver}=$E_{sol,hiver}$+E_{int}
RDC	10	2	6.5	16.5	8.5
Etage	10	2	5	15	7

Table 3.3 – *Solution trouvée avec la procédure de la figure 3.18*

	τ (h)	U_{bat} (W/K)	Inconfort (Deg.h)	Besoins énergétiques (kWh/m^2)
RDC	132	5	0	99
Etage	120	5	0	120

3.5.3.2 Recherche des solutions du problème inverse appliqué à la maison de la plateforme INCAS

La recherche de la solution s'est faite de deux manières. Tout d'abord, on a effectué une optimisation à l'aide d'algorithmes génériques (Genopt) couplés au modèle de bâtiment comme décrit dans la procédure du schéma de la figure 3.18. La matrice solution $\{(\tau^*), (U^*_{bat})\}$ minimisant les indicateurs de performance montre pour le RDC, $\tau_1 = 5.5$ j et pour l'étage $\tau_2 = 5$ j, et pour U_{bat}, 5 W/K soit 0.03 $W/(m^2.K)$ pour le RDC et 0.029 pour l'étage (Tableau (3.3)).

On remarque que la constante de temps de la zone au RDC est supérieure à celle de l'étage du fait des apports internes plus importants dans la première. On vérifie ainsi la cohérence avec les observations faites dans le paragraphe (3.14).

Les valeurs trouvées pour U_{bat} sont très faibles et correspondent à un bâtiment fortement isolé.En fait, elles correspondent à la borne inférieure du domaine de variation qu'on a défini au début de l'optimisation car s'il y a des déperditions, l'optimisation tendra à privilégier la solution $U_{bat} = 0$.

On rappelle que les caractéristiques de la construction actuelle (tableau 3.1) sont respectivement de 300 et 215 h pour les constantes de temps du RDC et de l'étage, et de 35 et 26.5 W/K pour les coefficients de transmission U_{bat}.

En réalité, il est possible de trouver plusieurs solutions à ce problème de conception. En le posant comme un problème inverse, il doit être "bien posé", et pour cela il est nécessaire que la solution soit unique. Néanmoins d'autres couples $\{(\tau^*), (U^*_{bat})\}$ donneraient au bâtiment des performances énergétiques proches de celles qu'on a identifiées sans avoir forcément besoin de le sur-isoler.

De ce fait, on a réalisé une analyse paramétrique sur ces indicateurs, en faisant varier les paramètres τ_1, $U_{bat,1}$ et τ_2, $U_{bat,2}$ afin d'avoir une vision plus globale de l'ensemble des solutions. Les résultats sont présentés sur les diagrammes radar des figures (3.25) et (3.26). Le principe est le suivant : pour chaque variation du U_{bat} (5,10...,55) en jaune, on effectue dix variations de τ (25,30,...,500) en bleu en effectuant ainsi 70 combinaisons de caractéristiques dont on évalue les performances en termes d'inconfort (IDH) en rose et de consommation énergétiques ($Conso$) en violet. Les zones de confort sont caractérisées par $IDH = 0$. Pour comprendre le diagramme radar, on considère un cas particulier correspondant à la droite en gras sur la figure (3.25), dans le cas où on a $IDH = 0$ et $Conso = 109$ et pour lequel on

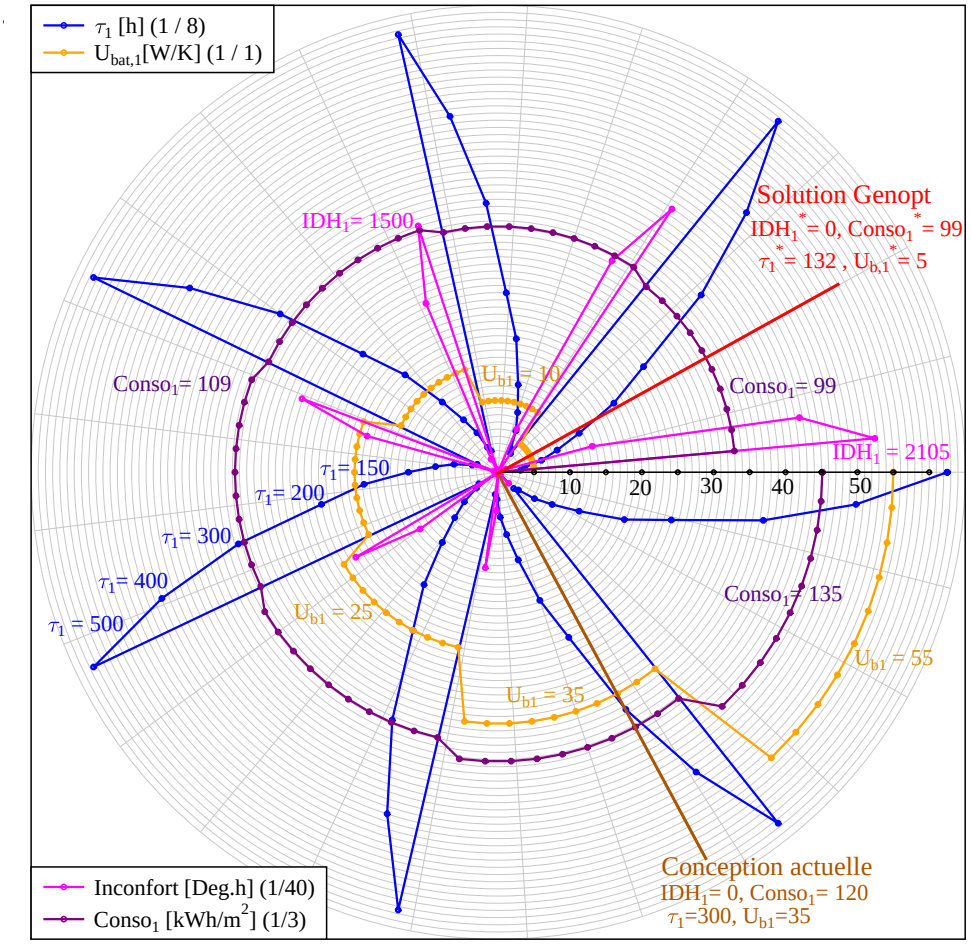

Figure 3.25 – *Résultats de l'optimisation pour la maison individuelle - RDC*

obtient $\tau = 70$ et $U_{bat} = 20$. On voit à partir de là qu'il est possible de représenter l'ensemble des possibilités de solutions.

Pour les deux étages du bâtiment, on peut vérifier l'appartenance de la solution obtenue avec la première méthode à ce dernier ensemble de solutions. La solution actuelle donne les valeurs suivantes : pour le RDJ, $\tau_1 = 300$ et $U_{bat,1} = 35$, $IDH_1 = 0$ et $Conso_1 = 120$, et pour l'étage $\tau_2 = 215$ et $U_{bat,2} = 26.5$, $IDH_2 = 0$ et $Conso_2 = 126$.

Une optimisation par GenOpt conduit naturellement à minimiser les déperditions en l'absence d'inconfort.

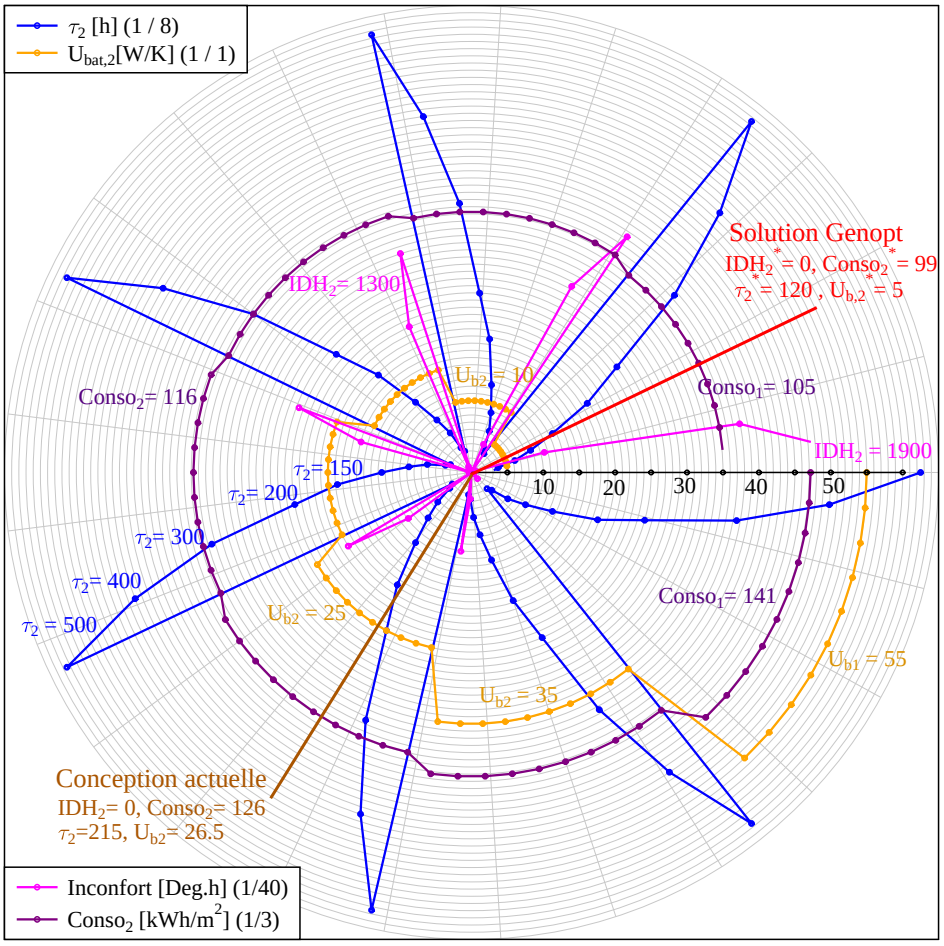

Figure 3.26 – *Résultats de l'optimisation pour la maison individuelle - Etage*

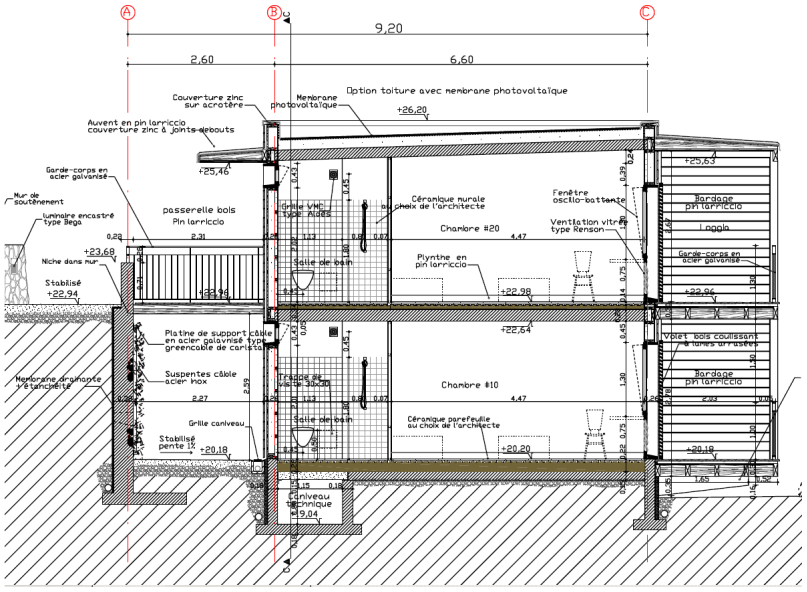

Figure 3.27 – *Coupe verticale du bâtiment côté sud*

3.5.4 Application sur un logement collectif à Cargèse

3.5.4.1 Bilan des éléments clés de la conception

A présent, on s'intéresse à développer la même démarche de conception sur un logement collectif situé à Cargèse constitué de vingt logements répartis sur deux étages. Pour cette étude, le bâtiment a été divisé en dix parties identiques. Chacune de ces parties est composée d'une chambre au rez-de-chaussée et une chambre à l'étage. Comme conditions aux limites, on a pris les parois Nord et Sud adiabatiques car elles constituent les séparations entre les différentes tranches du bâtiment, et les parois Est et Ouest en contact avec l'extérieur. Afin de simplifier l'approche, on a également lié le plancher bas et les combles à la température extérieure.

Éléments architecturaux imposés Comme pour l'exemple précédent, on se sert uniquement des éléments architecturaux présentés dans le tableau 3.4 concernant la géométrie et les propriétés de fenestration.

Le bâtiment est orienté Est-Ouest, avec des fenêtres uniquement à l'Est pour afin de réduire la part de flux solaires pouvant pénétrer à l'intérieur durant la journée. D'autre part, le dispositif de protections solaires comprend des casquettes à l'Est et à l'Ouest ainsi que des brises soleil verticaux entre deux chambres voisines comme le montre la figure (3.27).

Etude de l'évolution de la température extérieure pour le climat de Cargèse A l'opposé de l'exemple précédent, il s'agit ici d'un climat chaud voire légère-

Table 3.4 – *Description d'une tranche du bâtiment comprenant deux zones superposées*

	RDC	**Etage**
Dimensions	L = 6.6 m ; W = 4 m ; H = 2.7 m	
τ	53 h	83 h
U_{bat}	20 W/K	21 W/K
Orientation	Est	
Surface vitrée		
Sud	0	0
Est	0	0
Ouest	2.3 m^2	2.3 m^2
Nord	0	0
Coefficient de transmission des vitrages U_v	1.7 $W.m^2/K$	
Protections solaires		
Casquettes à l'ouest		
Profondeur	2 m	2 m
Distance entre la casquette et le haut de la fenêtre	0.4 m	0.6 m
Brises soleil à l'ouest		
Profondeur	2 m	2 m
Distance entre le brise soleil et côté gauche de la fenêtre 1	1.0 m	1.0 m
Distance entre le brise soleil et côté droit de la fenêtre 2	0.1 m	0.1 m
Taux de renouvellement d'air dans la journée V_j	0.6 vol/h	
Débit de surventilation nocturne V_n	3 vol/h	
Heure d'arrêt de la surventilation $Timestop$	7 h AM	
Heure de démarrage de la surventilation $Timestart$	21 h PM	

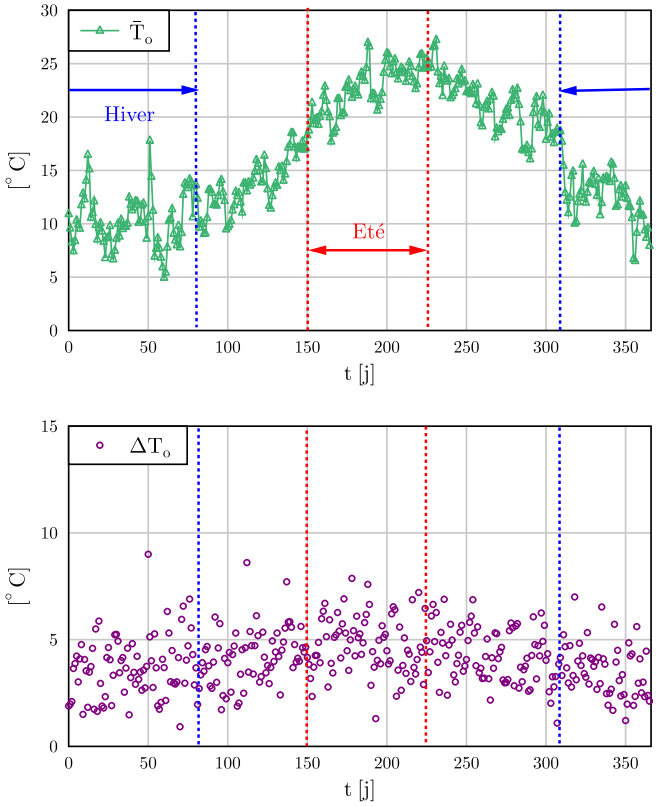

Figure 3.28 – *Représentation de la température extérieure moyenne $\tilde{T}_o$ et de l'écart de température jour/nuit ΔT_o pour le climat de Cargèse*

ment humide de par la situation géographique du bâtiment en bord de mer. En été, la moyenne de température extérieure est en majeure partie comprise sur l'intervalle [22 ;26] (30% du temps entre 24 et 26°C et 28% du temps entre 22 et 24 °C. De plus, l'écart jour/nuit de température est en majorité compris entre 1 et 5 (58% du temps). En outre en hiver, la température extérieure varie le plus souvent entre 9 et 13°C (27% entre 9 et 11 et 26% entre 11 et 13) et l'amplitude reste quasiment semblable toute l'année, soit comprise entre 1 et 5°C.

Au final, on retient pour notre démarche que la moyenne de température extérieure $\tilde{T}_o = 24$ en été et 11 en hiver et que l'amplitude jour/nuit $\Delta T_o = 5$ toute l'année.

Bilan des apports gratuits De la même manière que pour l'exemple précédent, on évalue les flux solaires transmis à l'intérieur du bâtiment toute l'année. Sur la figure (3.31) est représenté l'éclairement global pour le climat de Cargèse.

Seule la façade Est comprend des surfaces vitrées, et on calcule les flux solaires incidents sur chaque façade ainsi que la part pénétrant par les fenêtres à l'est, puis on fait la somme pour chaque jour de l'année, des flux solaires transmis en Wh/m^2

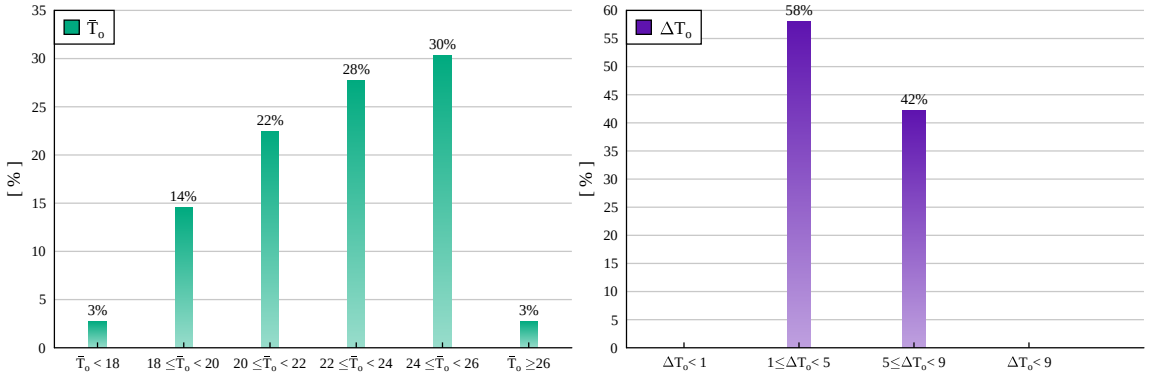

Figure 3.29 – *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en été pour le climat de Cargèse*

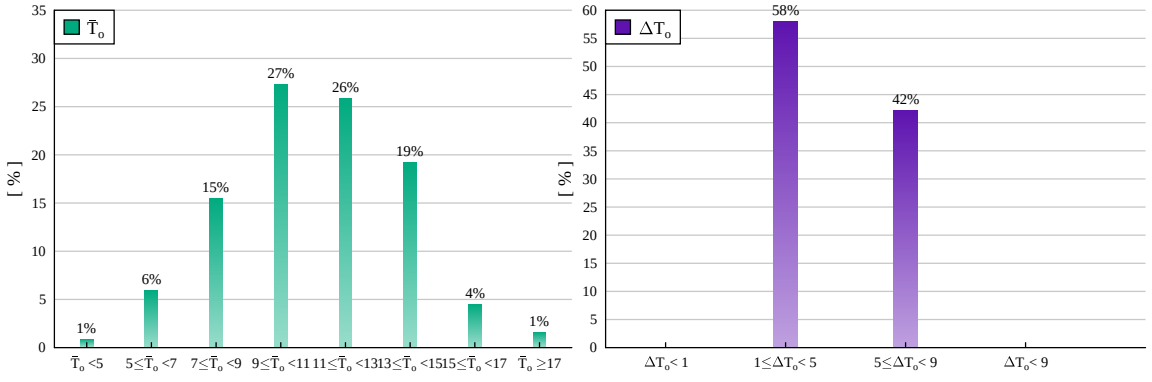

Figure 3.30 – *Distribution de la moyenne journalière de la température extérieure et de l'écart jour/nuit en hiver pour le climat de Cargèse*

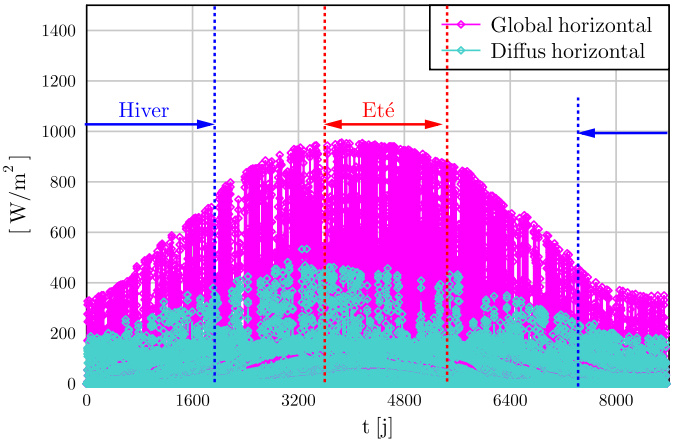

Figure 3.31 – *Evolution de l'éclairement global et de ses composantes directe et diffuse pour Cargèse - fichier météo type tm2*

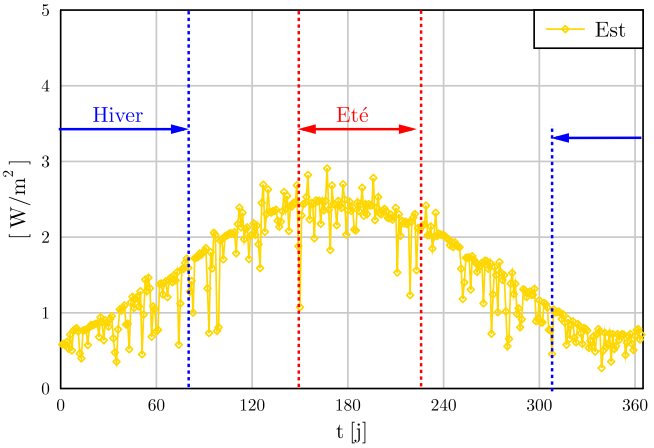

Figure 3.32 – *Flux solaire transmis $E_{tr,f}$ au RDC avec prise en compte des casquettes en W/m^2*

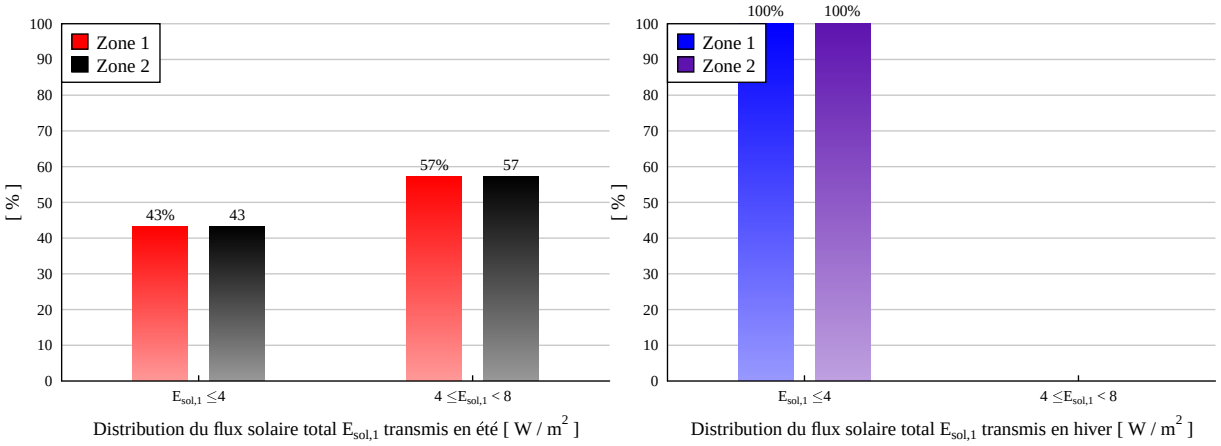

Figure 3.33 – *Distribution du flux solaire total transmis en W/m^2 de plancher durant les périodes d'été et d'hiver*

Table 3.5 – *Bilan des charges internes dans le bâtiment de Cargèse*

	$E_{sol,été}$	$E_{sol,hiver}$	E_{int}	$E_{été}$=$E_{sol,été}$+E_{int}	E_{hiver}=$E_{sol,hiver}$+E_{int}
RDC	6	4	6.5	12.5	10.5
Etage	6	4	6.5	12.5	10.5

de plancher (3.32).

On procède à l'estimation des valeurs les plus représentatives en été et en hiver pour la quantité de flux solaires transmis. Comme pour le paragraphe précédent, on calcule les fréquences des valeurs prises par la somme de ces flux E_{sol} dans chaque zone afin de déterminer lesquelles sont les plus récurrentes. Les résultats sont affichés sur le graphique de la figure (3.33). On constate qu'en été, la majorité du temps, $E_{RDC,sol}$ et $E_{Etage,sol}$ prennent des valeurs comprises entre 4 et 8 W/m^2 (57%) tandis qu'en hiver, ces valeurs demeurent tout le temps inférieures à 4 W/m^2. En définitive, on retiendra pour $E_{RDC,sol,ete} = 6\ W/m^2$, $E_{Etage,sol,ete} = 6\ W/m^2$ et $E_{RDC,sol,hiver} = 4\ W/m^2$, $E_{Etage,sol,hiver} = 4\ W/m^2$.

En ce qui concerne les charges internes liées à l'occupation, on a gardé les mêmes scénarios que l'exemple précédent, soit 5 W/m^2 durant la période d'occupation de 16 h sur 24 (de 0 à 10 h et de 18 à 24 h) ce qui revient à 3.5 W/m^2 si on considère que les apports sont fournis en continu. Pour la puissance dissipée par les appareils électriques, on prend 3 W/m^2 , ce qui fait au total E_{int}= 6.5 W/m^2 au RDC et à l'étage.

On dresse le bilan des charges internes dans le tableau 3.2 et on calcule les sommes E_{RDC} et E_{Etage} des puissances dissipées dans chaque zone.

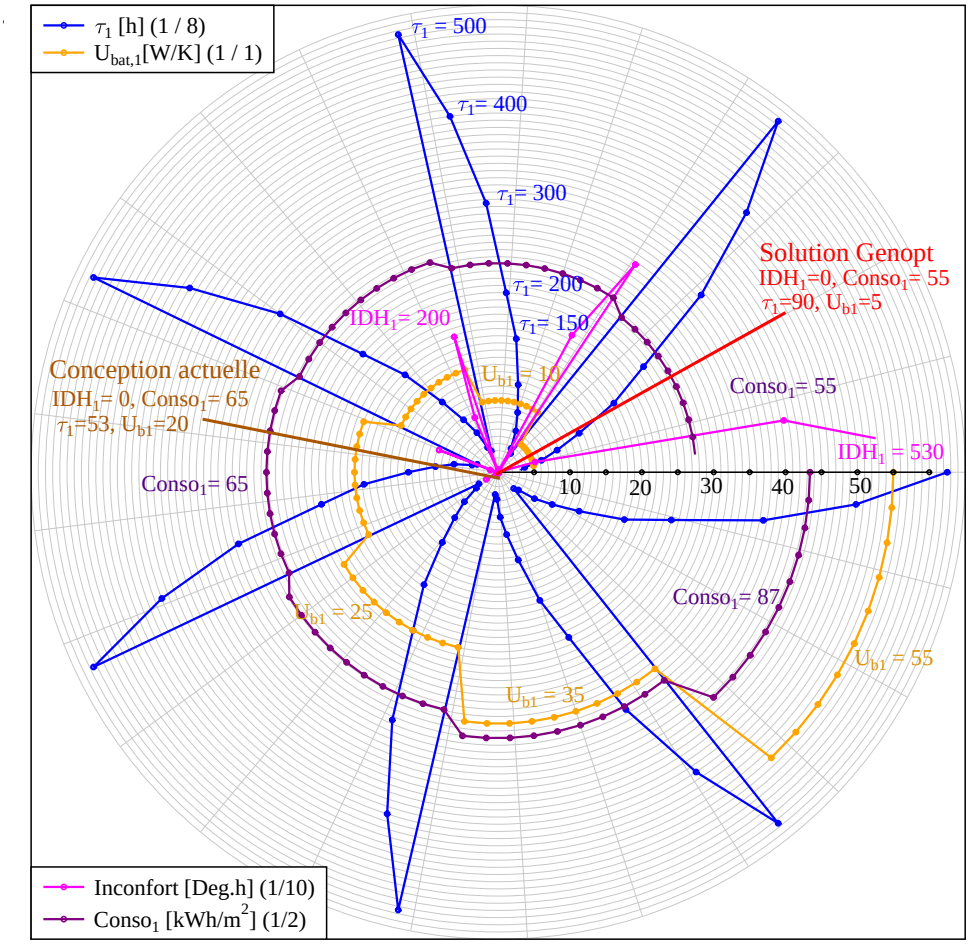

Figure 3.34 – *Résultats de l'optimisation pour le bâtiment collectif de Cargèse*

3.5.4.2 Recherche des solutions du problème inverse appliqué sur un bâtiment à Cargèse

Comme les deux zones superposées sont identiques du point de vue des conditions aux limites (mêmes surfaces reliées à la températures extérieures) et des apports internes, on a réalisé l'optimisation sur une seule zone.

Pareillement, la recherche de la solution s'est faite de deux manières. En premier lieu, on a effectué une optimisation selon la procédure de la figure 3.18. La solution $\{\tau^*, U^*_{bat}\}$ minimisant les indicateurs de performance obtenus est , $\tau = 90$ h et pour U_{bat}, 5 W/K soit 0.03 $W/(m^2.K)$ (tableau 3.6).

Ici également, on trouve plutôt une constante de temps moyenne (presque 4 jours). Par rapport au cas de la maison expérimentale, on retrouve une constante de temps plus faible car la variation jour/nuit de la température en été est plus faible ($\Delta T_o = 5\ °C$) et sa moyenne est un peu plus élevée ($\tilde{T}_o = 24$) ce qui limite le potentiel de rafraîchissement par rapport au climat de Chambéry en été. Cette

Table 3.6 – *Solution trouvée pour le bâtiment de Cargèse*

	τ (h)	U_{bat} (W/K)	Inconfort (Deg.h)	Besoins énergétiques (kWh/m^2)
Zone 1 et 2	90	5	0	55

solution est cohérente par rapport au choix architectural qui a été fait sur le bâtiment existant (tableau 3.1) : on a des constantes de temps de 53 et 83 h pour le RDC et l'étage.

Seule la prise en compte d'un nombre de critères plus important pourrait entraîner un résultat différent.

Dans un second temps, on a réalisé une analyse paramétrique sur ces indicateurs, en faisant varier les paramètres τ_1, $U_{bat,1}$ afin d'avoir ici aussi une vision plus globale de l'ensemble des solutions "potentielles". Les résultats sont présentés sur le diagramme de la figure 3.25. De même, U_{bat} varie de 5 à 55 W/K, et τ de 25 à 500 h. En évaluant les performances des 70 combinaisons de caractéristiques ainsi obtenues on identifie le domaine des solutions potentielles qu'on repère graphiquement.

La solution proposée par la première méthode fait également partie de l'ensemble des solutions, et même mathématiquement elle correspond véritablement au minimum de la fonction objective $IDH^* = 0$ et $Conso^* = 55\ kWh/m^2$. D'ailleurs, pour obtenir cette combinaison de performances, tous les couples (τ, U_{bat}) situés sur le premier secteur angulaire pour lequel $Conso^* = 55$ et tels que $IDH^* = 0$ sont valables aussi comme solutions, mais le module d'optimisation dont on s'est servi a "choisi" le couple solution le plus faible en valeur absolue.

Au final, traiter le problème de conception comme un problème "inverse" classique conduirait à limiter l'ensemble des caractéristiques qui pourraient satisfaire le cahier de charges que l'on définit au début de la démarche à cause de la condition sur l'unicité de la solution pour que le problème soit bien-posé. Mais en se servant de la formulation "inverse" du problème et en faisant varier les paramètres de conception (ou d'optimisation), on est capable d'avoir une vision globale de l'ensemble des solutions. L'intérêt de la démarche augmentera avec le nombre de paramètres pris en compte en recherchant l'optimum sur un nombre de critères conséquent comme les coûts financiers de la conception ou le bilan carbone.

3.6 Conclusion sur la méthode de conception

Dans ce chapitre, on a développé un outil d'aide à la conception destiné à assister les concepteurs et architectes au cours de la phase d'avant-projet. On a formulé un modèle de bâtiment simple et facile à exploiter. On a comparé cet outil de conception

à un modèle de simulation thermique dynamique et on a constaté qu'il fournissait des réponses suffisamment précises pour s'en servir comme outil d'aide à la conception. En outre on a étudié les effets sur le modèle des paramètres de conception dont on se sert par la suite pour dresser un cahier de charges et on a vérifié la cohérence de ses réponses. Finalement, on a établi une démarche fondée sur la définition d'un problème inverse qu'on a ensuite appliqué pour la conception d'un bâtiment résidentiel situé à Chambéry. Pour cela, on s'est basé sur les données architecturales d'une maison expérimentale de la plateforme INCAS de l'INES. On a également testé ce processus sur un bâtiment résidentiel collectif basé à Cargèse. Dans les deux cas, on a identifié un ensemble de solutions pour la constante de temps et le coefficient de transmission U_{bat} qui optimisent les performances énergétiques pour le confort d'été et d'hiver. Cette méthode de conception permettra par la suite, de guider les concepteurs afin de mieux prendre en compte l'inertie au stade initial d'un projet.

Chapitre 4

Exploitation de l'inertie thermique pour l'amélioration du confort et la réduction des consommations

---

L'objet de ce chapitre est de développer et d'appliquer des stratégies donnant lieu à une meilleure exploitation de l'inertie thermique. Il comporte deux parties distinctes. La première est destinée à l'application d'une stratégie de rafraîchissement passif par la ventilation nocturne dans laquelle on introduit le concept de surventilation "adaptative" permettant d'assurer le confort thermique en été tout en minimisant les besoins de chauffage indésirables pouvant survenir durant les intersaisons.
Dans la seconde partie, on aborde l'étude d'un plancher solaire activé, associé à un système de capteurs solaires thermiques et de ballons de stockage en proposant une logique de fonctionnement que nous avons définie.
Ici, le modèle détaillé de bâtiment développé sous SimSPARK a été utilisé.
On démontre à travers ces applications qu'il est possible par l'association des propriétés de stockage de l'inertie thermique et d'une gestion optimisée de l'énergie solaire de couvrir une grande partie des besoins énergétiques du bâtiment et d'assurer les conditions de confort en été et en hiver.

4.1 Etude de l'amélioration du confort d'été par le rafraîchissement passif nocturne

4.1.1 Enjeu de la ventilation nocturne et intérêt d'une gestion optimisée

Plusieurs études ont montré que l'usage d'une forte inertie couplée à la ventilation demeure une stratégie passive d'autant plus efficace que la variation de température jour/nuit est importante ([12], [32]). En effet, en regard des conditions climatiques évoquées à la partie (1.2.2), l'activation de l'inertie thermique, peut permettre d'assurer un niveau de confort sans avoir recours à la climatisation. Toutefois, si l'emploi d'un système de climatisation est indispensable, la ventilation nocturne permet tout de même de réduire de manière significative la durée du besoin de rafraîchissement. Elle peut être naturelle ou mécanique et consiste à créer un déphasage du pic de température : la nuit, les débits importants de surventilation permettront de décharger les parois, planchers et plafonds de l'énergie stockée au cours de la journée et ainsi de réduire les pics de température intérieure au cours de la journée suivante.

Avant tout, pour illustrer l'importance d'une ventilation nocturne sur les performances énergétiques annuelles des bâtiments, on a considéré deux bâtiments de conception différente avec la même géométrie que celle des maisons expérimentales de la plateforme INCAS (Figure (4.1) et Figure (4.2)) : une maison individuelle à deux étages de 100 m^2 de surface habitable. Le débit de ventilation est de 0.6 vol/h. La principale différence entre ces deux maisons est la position de l'isolation : dans la première, l'isolation sur les murs et le plancher bas est extérieure et pour la seconde intérieure. Ceci a un impact sur l'inertie du bâtiment puisque seule l'inertie située à l'intérieur de l'isolation compte effectivement dans la constante de temps. On a pris soin de les choisir ainsi afin que les deux maisons aient le même coefficient global de déperditions U_{bat}. Les caractéristiques de l'enveloppe sont présentées dans le tableau (4.1). Pour évaluer l'impact de la ventilation sur ces maisons, trois modes de ventilation ont été testés (Tableau (4.2)).

Pour le premier mode (*Mode 1*), le débit de ventilation est constant et égal à 0.6 vol/h. Pour le *Mode 2*, le débit de ventilation est de 0.6 vol/h durant la journée et de 3 vol/h durant la nuit de Juin à Août. Pour le *Mode 3*, le débit de ventilation est de 0.6 vol/h durant la journée et de 3 vol/h durant la nuit d'Avril à Octobre.

Les données météorologiques considérées dans les simulations sont celles du climat de Chambéry. La température intérieure est maintenue à une consigne de 19°C en hiver. La consommation annuelle globale Q_h et la somme des heures d'inconfort OH sont évaluées et reportées dans le tableau (4.3). OH est la durée pour laquelle la température intérieure est supérieure à la température de confort T_c.

Lorsque la ventilation nocturne est appliquée au cours de la période estivale de

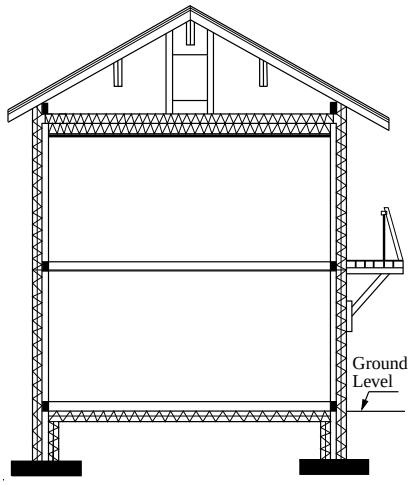

Figure 4.1 – *Schéma de la maison en béton banché avec isolation par l'extérieur, Plateforme INCAS, France*

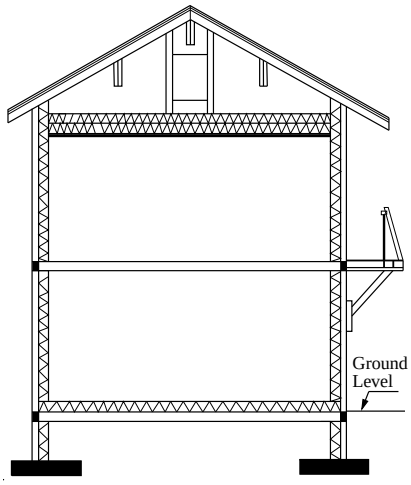

Figure 4.2 – *Schéma de la maison en béton banché avec isolation par l'intérieur*

	Zone	Nord	Sud	Est	Ouest
Surface vitrée (m^2)	RDC	0.9	10.0	3.5	1.0
	1^{er}étage	0.9	6.0	2.3	1.3
Type de vitrage / Caractéristiques	RDC,1^{er}étage	Triple vitrage	Double vitrage		
		U=0.86, g=0.44	U=1.3, g=0.54		
Murs (Ext→Int)	RDC,1^{er}étage	20 cm polystyrène extrudé, 15 cm béton lourd, U = 0.15 W/m^2.K			
Plafond (Ext→Int)	1^{er}étage	40 cm Laine de verre, 1 cm panneau de plâtre, U = 0.11 W/m^2.K			
Plancher bas (Ext→Int)	RDC	25 cm polystyrène extrudé, 20 cm blocs béton parpaing, U = 0.11 W/m^2.K			
Plancher intermédiaire	–	22 cm béton lourd			

Table 4.1 – *Caractéristiques de la maison avec isolation extérieure*

	Mode 1	**Mode 2**	**Mode 3**
Débit de ventilation modéré VOL/H	0.6	0.6	0.6
Débit de ventilation forte VOL/H	0.6	3.0	3.0
Jour de commencement	–	1^{er} *Juin*	1^{er} *Avr*
Jour de fin	–	31 Août	31 Oct
Heure de commencement	–	10 :00 pm	10 :00 pm
Heure de fin	–	7 :00 am	7 :00 am

Table 4.2 – Modes de ventilation classique testés

	Mode de ventilation		
Maison avec isolation par l'extérieur	**1**	**2**	**3**
Besoins énergétiques [kWh/(m².an)]	45.3	47.4	68
Nombre d'heures où $T_i > T_c$ [h/an]	1146	39	0
	Mode de ventilation		
Maison avec isolation par l'intérieur	**1**	**2**	**3**
Besoins énergétiques [kWh/(m².yr)]	48.3	50.5	72
Nombre d'heures où $T_i > T_c$ [h/an]	1388	323	151

Table 4.3 – Résultats de simulation pour les bâtiments à forte et à faible inertie pour les modes de ventilation classique 1, 2 et 3

trois mois (*Mode 2*), les périodes de surchauffe sont considérablement réduites pour les deux maisons. L'extension de la ventilation nocturne au cours des intersaisons (*mode 3*) permet de réduire encore sensiblement les heures de surchauffe, mais elle implique également des besoins de chauffage 30 % plus importants dans chaque maison.

Cet exemple montre que même durant les périodes de début et de fin d'été, il est possible d'exploiter la ventilation nocturne pour réduire passivement les excès de chaleur dans le bâtiment. Afin de rendre cette stratégie plus efficace, elle nécessite d'être mieux gérée et cela par un processus qui permettrait la prise de décision sur la nécessité d'activer la surventilation nocturne en fonction des conditions extérieures/intérieures, et de l'inertie thermique.

C'est pourquoi on propose dans la suite de ce travail de développer un algorithme permettant d'adapter la gestion de la ventilation nocturne en fonction des conditions de température à la fois à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment et en fonction de son temps de réponse aux sollicitations, autrement dit de sa constante de temps. On parle alors d'une ventilation nocturne "adaptative" permettant d'assurer le confort thermique tout en minimisant les besoins de rafraîchissement par la climatisation et les besoins de chauffage indésirables pouvant survenir durant les intersaisons. On se base sur le principe du confort adaptatif que l'on présente maintenant.

4.1.2 Ventilation nocturne "adaptative"

4.1.2.1 Principe du confort adaptatif

La théorie du confort par le modèle adaptatif est basé sur le principe d'adaptation des occupants avec l'environnement : si un changement susceptible de dégrader le confort se produit, les occupants vont réagir de façon à rétablir le confort (adaptation de la tenue vestimentaire, de la température de consigne ...). Cette théorie a été introduite dans les années 70 par Nicol et Humphreys par opposition à d'autres théories de confort définissant celui-ci comme étant un "état stationnaire" [27]. En

comparant les résultats de l'évolution de la température de confort en fonction de la température extérieure, Humphreys a proposé la relation suivante pour estimer la température de confort T_c pour les bâtiments dit en "évolution libre" :

$$T_c = aT_{ext} + b \tag{4.1}$$

où a et b sont des constantes et T_{ext} est l'indice de la température extérieure considérée au début égale à la température moyenne mensuelle. D'autres études menées ultérieurement ont montré que T_{ext} serait mieux approchée par une température moyenne glissante puisqu'en effet, les occupants réagissent en fonction de leur "expérience thermique" et l'expérience la plus récente est la plus influente [20].

Le calcul de la moyenne glissante de la température est analogue aux calculs de désintégration en physique nucléaire et en médecine et s'exprime par :

$$T_{RMn} = cT_{RMn\text{-}1} + (1-c)T_{DMn\text{-}1} \tag{4.2}$$

où T_{RMn} la moyenne glissante de la température au $n^{ième}$ jour (°C), T_{RMn} la moyenne glissante de la température au jour *n-1*, T_{DMn} la moyenne journalière de la température au jour *n-1* et c une constante à déterminer.

Les résultats du projet européen SCAT [20] ont permis de calculer la constante c et d'estimer les valeurs des constantes a et b spécifiques à quelques pays européens comme la France, la Grèce , le Portugal, la Suède et le Royaume Uni et des constantes a et b valables pour le reste des pays européens. Ainsi, pour la France, on a les équations suivantes :

$$T_{RMn} = 0.8T_{RMn\text{-}1} + 0.2T_{DMn\text{-}1} \tag{4.3}$$

$$T_c = 0.049T_{RMn} + 22.58 \qquad \text{si } T_{RMn} \leq 10°\text{C} \tag{4.4}$$

$$T_c = 0.206T_{RMn} + 21.42 \qquad \text{si } T_{RMn} \geq 10°\text{C} \tag{4.5}$$

La norme EN 15251 [29] a réparti les bâtiments selon des catégories dépendant des intervalles de variation de la température de confort T_c évaluée par la méthode adaptative et le tableau (4.4) reprend les trois catégories mentionnées dans la norme.

	PMV	
	Limite inférieure	Limite supérieure
Bâtiment catégorie 1	T_c-2°C	T_c+2°C
Bâtiment catégorie 2	T_c-3°C	T_c+3°C
Bâtiment catégorie 3	T_c-4°C	T_c+4°C

Table 4.4 – Valeurs recommandées pour le confort adaptatif d'après la norme 15251

Dans la suite de ce travail, on se base sur ce principe pour évaluer la température de confort T_c. Par ailleurs, on s'inspire du calcul de la moyenne glissante de la température pour prendre en compte son historique dans la conception de l'algorithme de contrôle.

4.1.2.2 Elaboration d'un algorithme de contrôle

L'algorithme de contrôle que l'on souhaite développer servira a déclencher ou arrêter la surventilation nocturne lorsque cela est nécessaire en tenant compte de l'historique des températures extérieures et intérieures et de l'inertie thermique du bâtiment.

Pour cela, il est essentiel d'évaluer à la fois les moyennes glissantes des températures extérieures et intérieures notées respectivement TRM_o et TRM_i correspondantes aux températures de l'air extérieur et intérieur T_o et T_i. Selon les valeurs de TRM_o et TRM_i et la valeur de la température intérieure instantanée, le régime de ventilation nocturne le mieux adapté sera sélectionné.

La procédure est décrite dans la figure (4.3). Pour chaque pas de temps de la simulation, TRM_o et TRM_i sont comparées à des températures "seuil" constantes, respectivement $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ en ° C. On évalue la variable *sn* qui peut prendre la valeur de 0 ou de 1 en fonction des valeurs de TRM_o et TRM_i et qui décrit si les conditions sont favorables pour une éventuelle ventilation nocturne par rapport à ces valeurs.

Si *sn = 0*, la ventilation faible est immédiatement sélectionnée. D'autre part, tant que la variable *sn* est égale à 1, la ventilation forte *peut* être activée. *sn = 1* dans le cas où :

- la condition [($TRM_o > T_{s,o}$) et ($TRM_i > T_{s,i}$)] est satisfaite, et la température intérieure T_i est supérieure à (T_c - 3). De plus, l'heure locale (TL) doit être comprise dans l'intervalle [TL_b ; TL_e], TL_b and TL_e correspondant à l'heure de commencement et de fin de la période de rafraîchissement nocturne. Dans ce cas, la ventilation nocturne est activée. (Dans cette étude, on a considéré TL_b et TL_e constants et égaux respectivement à 10 h pm et 7 h am)

- la condition [($TRM_o > T_{s,o}$) et ($TRM_i > T_{s,i}$)] est satisfaite, et la température intérieure T_i est inférieure à (T_c - 3). La ventilation nocturne alors n'est pas activée.

- la condition [($TRM_o > T_{s,o}$) et ($TRM_i > T_{s,i}$)] est satisfaite, et la température intérieure T_i est supérieure à (T_c - 3) mais l'heure locale (TL) n'est pas comprise dans l'intervalle [TL_b ; TL_e]. La ventilation faible est toujours activée.

Si la condition [($TRM_o > T_{s,o}$) et ($TRM_i > T_{s,i}$)] n'est pas satisfaite, *sn* est égale à 0 et le régime de ventilation faible reste activé.

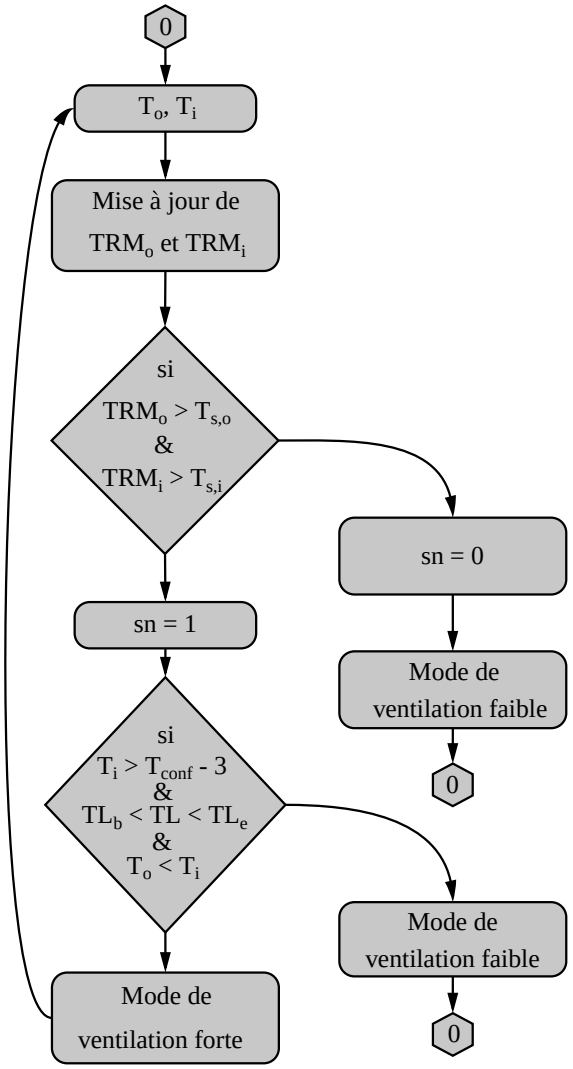

Figure 4.3 – *Algorithme du contrôle adaptatif*

τ (Jours)		Analogie avec les circuits RC	Méthode dynamique
Maison 1 : M-IE	zone 1	12.1	9.9
	zone 2	7.1	5.9
Maison 2 : M-II	zone 1	2.3	1.9
	zone 2	2.3	1.9

Table 4.5 – Constantes de temps des maisons à isolation intérieure et extérieure

4.1.2.3 Choix du coefficient "c" selon la constante de temps du bâtiment

La valeur de la constante c définit à quelle vitesse les sollicitations extérieures/intérieures ont une influence sur les fluctuations de la moyenne en température. Elle est équivalente à la *demi-vie*, utilisée en physique nucléaire ou en médecine qui est une moyenne glissante de la température et est estimée approximativement par ([25]) :

$$HL = \frac{0.69}{1-c} \tag{4.6}$$

Plus la valeur de c est importante, plus la demi-vie HL est prolongée, et concrètement, les fluctuations des conditions extérieures(/intérieures) mettront plus de temps à se faire *ressentir* dans la moyenne glissante de la température $TRM_o(/TRM_i)$.

Sachant que la constante de temps du bâtiment correspond au temps de la réponse thermique de celui-ci à des sollicitations extérieures, on l'estime approximativement à la valeur de la "demi-vie" et on choisit de l'utiliser comme une référence pour l'estimation de la valeur de la constante c_i utilisée dans le calcul de TRM_i.

Les constantes de temps des deux maisons ont été calculées selon les deux méthodes présentées à la section (1.1.3) du chapitre 1 : dans un premier temps par l'analogie avec les circuits électriques et dans un second temps par la méthode dynamique. Les résultats affichés dans le tableau (4.5) présentent des similitudes dans la prédiction de la réponse thermique. De ce fait, on utilisera dans cette étude la première méthode afin de simplifier le processus.

Pour déterminer la valeur de c_i entrant dans le calcul de TRM_i, on prend la demi-vie d'une fluctuation de température intérieure égale à la valeur de la constante de temps du bâtiment durant la période de surventilation nocturne.

La figure (4.4) montre comment la constante de temps du bâtiment évolue en fonction du débit de ventilation nocturne : τ diminue lorsque le débit de ventilation augmente. Lorsque le bâtiment est soumis à un régime de ventilation forte (3 Vol/h), τ sera respectivement égal à 2.5 jours pour la maison à isolation par l'extérieur et 0.85 jours pour la maison à isolation par l'intérieur. La constante de temps relative à la zone 2 est choisie afin de se placer dans le cas le plus défavorable dans le cas de la maison avec isolation par l'extérieur. Dans la maison avec isolation par l'intérieur, la constante de temps est la même pour les deux zones. Les valeurs de c qui ont été

Variable	Température correspondante	Valeur de 'c'
c_o	T_o : température extérieure	0.72
$c_{i,ei}$	$T_{i,ei}$: température d'air intérieur pour la maison avec isolation extérieure	0.72
$c_{i,ii}$	$T_{i,ii}$: température d'air intérieur pour la maison avec isolation intérieure	0.19

Table 4.6 – Valeurs de c

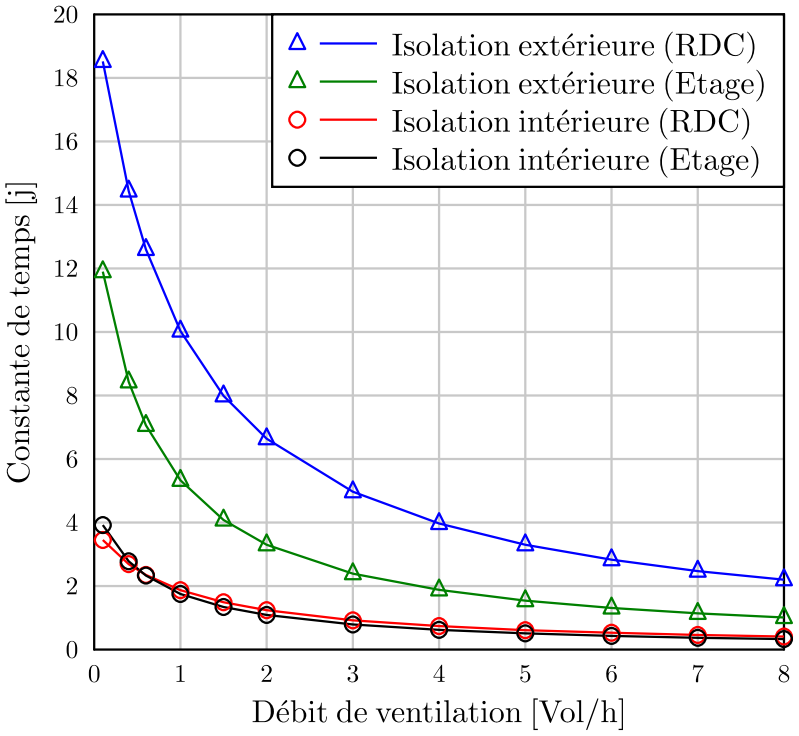

Figure 4.4 – *Evolution de la constante de temps en fonction du débit de ventilation nocturne*

retenues sont montrées dans le tableau 4.6.

Afin de déterminer la valeur de c_o relative aux fluctuations de température extérieure TRM_o, on définit la demi-vie HL pour une variation des conditions extérieures égale à 2.5 jours.

4.1.2.4 Choix des températures "seuils" adéquates

Dans cette section, nous essayons de définir un couple de températures seuils ($T_{s,o}$, $T_{s,i}$) pour lesquels l'algorithme de contrôle tel que décrit dans le paragraphe 4.1.2.2 fonctionne de façon optimisée. Pour cela on cherche à identifier les couples qui permettent de minimiser à la fois les critères suivants :

- la somme des heures d'inconfort, OH (h/an),
- la somme des heures où le chauffage et la surventilation nocturne fonctionnent simultanément, X_s (h/an),
- la consommation électrique annuelle du ventilateur, Q_{el} (kWh/an) dans le cas d'une ventilation mécanique.

Pour cela, on propose de réaliser une étude paramétrique sur $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ et d'observer l'évolution du nombre d'heures d'inconfort OH, du nombre d'heure X_s de fonctionnement simultané du chauffage et de la surventilation et de la consommation électrique Q_{el} du ventilateur.

Etude paramétrique sur $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ On a constaté lors de simulations préliminaires que les intervalles critiques pour les valeurs des moyennes glissantes étaient de [13 ;19] pour la température extérieure et de [19 ;25] pour la température intérieure. En effet, pour des valeurs de $TRM_o < 13$ et $TRM_i < 19$, les besoins de rafraîchissement sont quasiment nuls tandis que pour des valeurs $TRM_o > 19$ et $TRM_i > 25$, le besoin de ventilation nocturne est omniprésent. On focalise donc la recherche des températures seuils $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ sur les intervalles [13 ; 19] et [19 ; 25].

Sur les diagrammes des figures (4.5) et (4.6) est représenté l'évolution du nombre d'heures d'inconfort OH, du nombre d'heure X_s de fonctionnement simultané du chauffage et de la surventilation et de la consommation électrique Q_{el} du ventilateur. Pour chaque variation de la température seuil extérieure $T_{s,o}$ entre 13 °C et 19 °C, la température seuil intérieure $T_{s,i}$ varie de 19 °C à 25 °C.

Sélection des températures correspondant à la mise en route de la ventilation Pour la maison avec isolation extérieure, le nombre d'heures d'inconfort OH est presque toujours égal à zéro, sauf dans le cas où la température seuil intérieure $T_{s,i} = 25$ °C et la température seuil extérieure $T_{s,o}$ comprise entre 13 et 19 °C

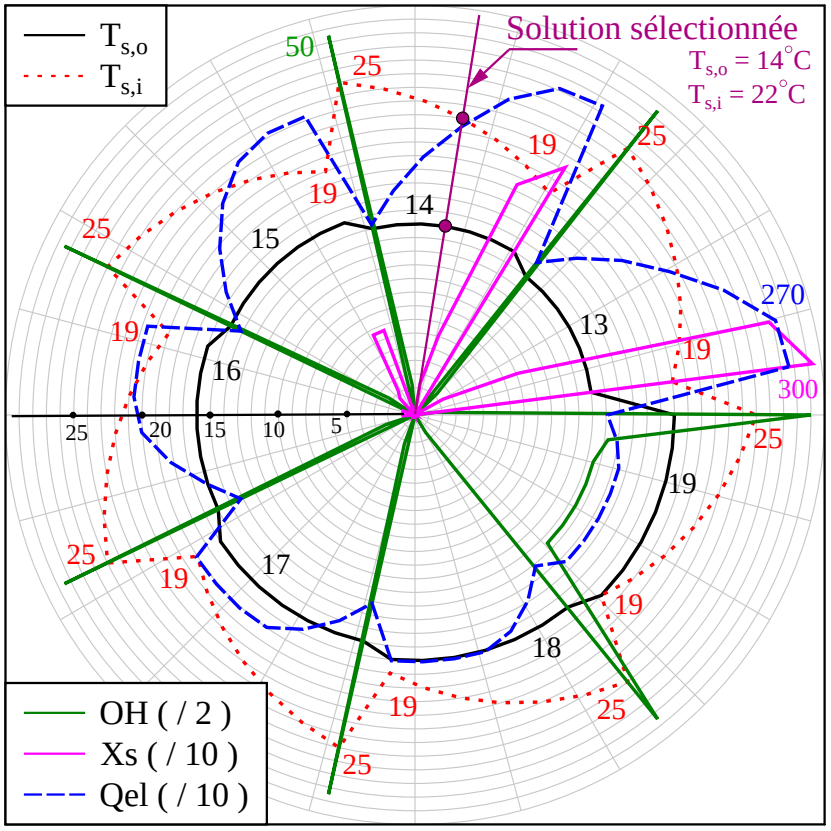

Figure 4.5 – *Effet de $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ sur les performances énergétiques de la maison avec isolation par l'extérieur*

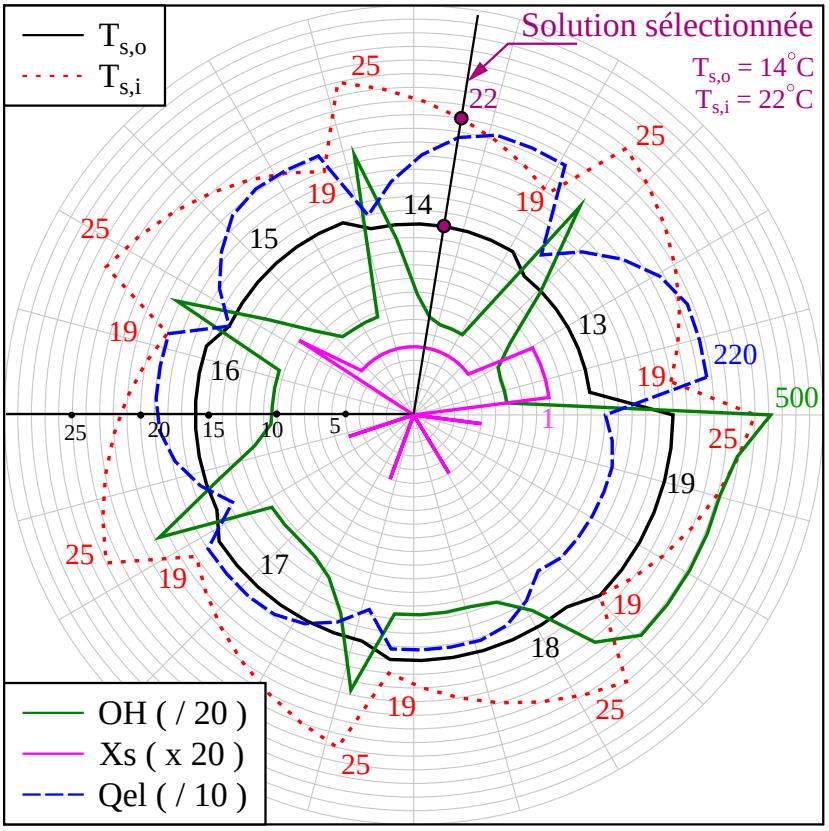

Figure 4.6 – *Effet de $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ sur les performances énergétiques de la maison avec isolation par l'intérieur*

et aussi $T_{s,o} = 19$ °C avec une valeur de $T_{s,i}$ comprise entre 19 et 25 °C (voir Figure (4.5)).

Comme attendu, il existe des configurations de températures seuils $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ pour lesquelles le chauffage et la ventilation nocturne fonctionnent simultanément. Pour la maison avec isolation extérieure, cela est constaté pour (13, 19), (13, 20), (14, 19), (14, 20) et (15, 19) alors que plusieurs couples de $T_{s,o}$ et $T_{s,i}$ peuvent satisfaire les équations $OH = 0$ et $X_s = 0$.

Dans le cas de la maison avec isolation par l'intérieur, plusieurs combinaisons satisfont $X_s = 0$ mais le nombre d'heures d'inconfort OH devient vite très important. En considérant l'hypothèse que la priorité est le critère de confort et que de faibles valeurs de X_s sont tolérées, la solution ($T_{s,o} = 14$; $T_{s,i} = 22$) semble la plus appropriée, et pour ce cas le nombre d'heures d'inconfort OH est inférieur à 140 h pour toute l'année, ce qui est tolérable.

Le couple solution ($T_{s,o} = 14$; $T_{s,i} = 22$) est commun pour des bâtiments à faible et à forte inertie. Par conséquent, il est intéressant de l'adopter pour le développement d'un algorithme de contrôle, en raison de sa capacité d'adaptation à différents types d'inertie thermique de bâtiment. Le seul paramètre qu'il sera nécessaire de déterminer est le coefficient "c" qui dépend de la constante de temps.

4.1.3 Comparaison entre les surventilations classique et adaptative

4.1.3.1 Performances annuelles globales des bâtiments

La figure (4.7) et la figure (4.8) présentent les résultats de simulation avec la ventilation adaptative et la ventilation classique 2 et 3.

Dans les deux maisons, la ventilation adaptative montre les mêmes conditions de confort que le *mode 3* accompagnées d'une réduction de la demande énergétique de 30 % par rapport au *mode 2* et de 10 % par rapport au *mode 3*. Dans le cas de la maison avec isolation intérieure, elle assure jusqu'à 57% d'heures d'inconfort en moins que les modes classiques. La durée X_s de chauffage et de surventilation simultanés disparaît totalement. Dans le cas où la ventilation nocturne est mécanique, on remarque que la consommation électrique du ventilateur est de 45 % inférieur par rapport au *mode 3*.

4.1.3.2 Comportement des bâtiments en intersaison

Dans la figure (4.9), on compare les débits de ventilation dans le cas d'un contrôle adaptatif de la ventilation nocturne et dans le cas du mode de ventilation classique 2 pour la maison à forte inertie du 1^{er} au 26 Juin. En partant du bas, le premier graphique montre l'évolution du débit de ventilation pour le mode de ventilation adaptative avec celle de la variable *sn* délimitant la zone jaune qui représente les

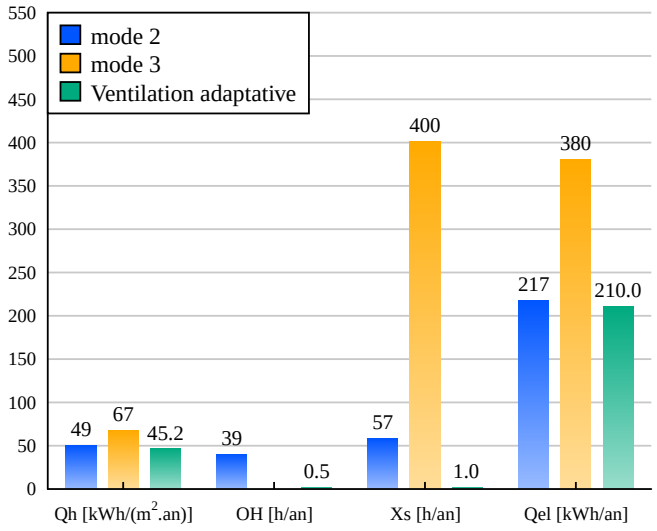

Figure 4.7 – *Comparaison entre les modes de ventilation adaptative et classique sur la maison à forte inertie*

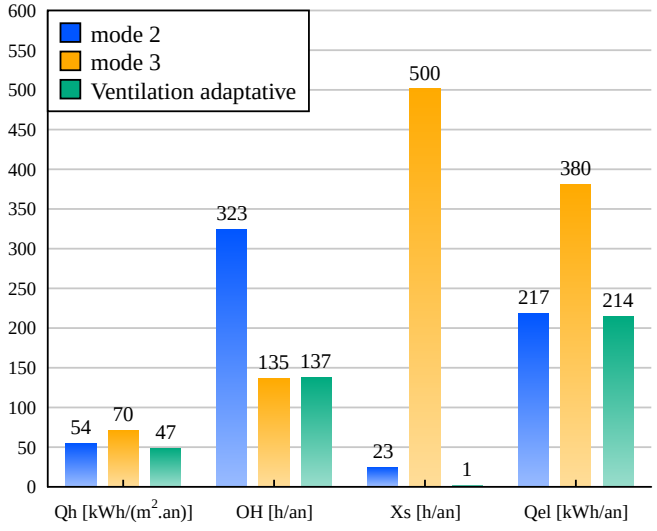

Figure 4.8 – *Comparaison entre les modes de ventilation adaptative et classique sur la maison à faible inertie*

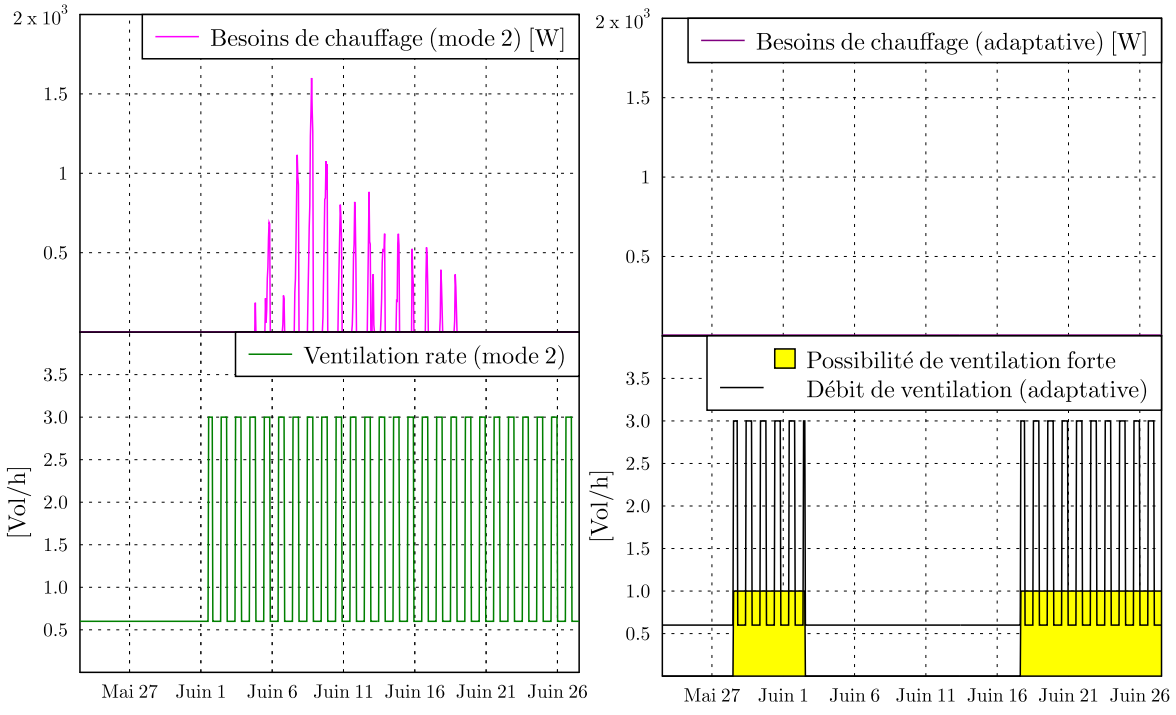

Figure 4.9 – *Comparaison des débits entre le mode de ventilation classique 2 (Tableau (4.2)) et le mode de ventilation adaptative durant une période d'intersaison sur la maison à forte inertie*

intervalles où le régime de ventilation forte peut être activé si les conditions sur l'heure locale *TL*, $\mathrm{TRM_i}$ et $\mathrm{TRM_o}$ sont satisfaites. Le second graphique montre le taux de renouvellement d'air pour le mode de la ventilation classique 2 et le dernier illustre l'évolution correspondante des besoins de chauffage. On remarque que dans le cas de la ventilation classique (mode 2), la puissance de chauffage du 6 au 21 juin n'est pas négligeable et pourrait être évitée avec l'utilisation de l'algorithme de contrôle adaptatif. En fait, il est visible que la variable *sn* prend la valeur "0" à partir du 2 jusqu'au 16 Juin évitant ainsi l'activation des taux élevés de ventilation nocturne et, par conséquent, empêche le déclenchement inutile du chauffage. De plus, le ventilation adaptative a permis de surventiler le bâtiment sur la période du 27 Mai au 1^{er} Juin, ce qui n'est pas le cas pour le mode de ventilation classique.

Dans la figure (4.10), on considère le cas de la maison avec isolation par l'intérieur dont la constante de temps est faible. En partant du bas de la figure, le premier graphique montre les intervalles où le régime de ventilation forte est possible (zone en jaune) et l'évolution du débit de ventilation dans le cas du contrôle adaptatif, le second graphique illustre les besoins de chauffage correspondants. Les graphiques suivants montrent respectivement les évolutions du débit de ventilation et la puissance de chauffage pour le *mode 3*. On remarque que l'utilisation du *mode 3* induit une puissance de chauffage conséquente au cours de la période de mi-saison, alors que l'application du régime de contrôle adaptatif élimine les périodes de chauffage et de surventilation nocturne concomitants. En outre, pour les périodes allant du 1^{er} au 11 Octobre, la variable *sn* étant égale à zéro, l'activation du régime de ventilation forte est empêchée et induit un besoin de chauffage quatre fois plus faible que dans le cas de la ventilation classique. D'autre part, on peut remarquer que la fréquence et l'étendue des périodes de surventilation nocturne peuvent être considérablement réduites pour la ventilation adaptée par rapport au *mode 3*. Ceci est principalement dû au fait que, même si *sn* est égal à 1, la température intérieure T_i peut être inférieure à $\mathrm{Tc} - 3$ provoquant le passage au régime de ventilation modéré.

4.1.4 Conclusion sur la stratégie de la ventilation nocturne adaptative

Cette partie a été consacrée au développement d'une méthode mettant en oeuvre un algorithme adaptatif servant à contrôler la ventilation nocturne pour différents types d'inertie thermique afin d'améliorer l'efficacité de la stratégie de rafraîchissement passif. Après une évaluation de critères de confort thermique adaptatif, nous avons défini la structure de l'algorithme basé sur l'évaluation des moyennes glissantes de températures extérieures et intérieures. En estimant la constante de temps du bâtiment avec deux méthodes différentes, nous avons pu pondérer l'influence des fluctuations des températures extérieures et intérieures et améliorer sa prise en compte dans le processus de l'algorithme. Par ailleurs, par une étude paramétrique,

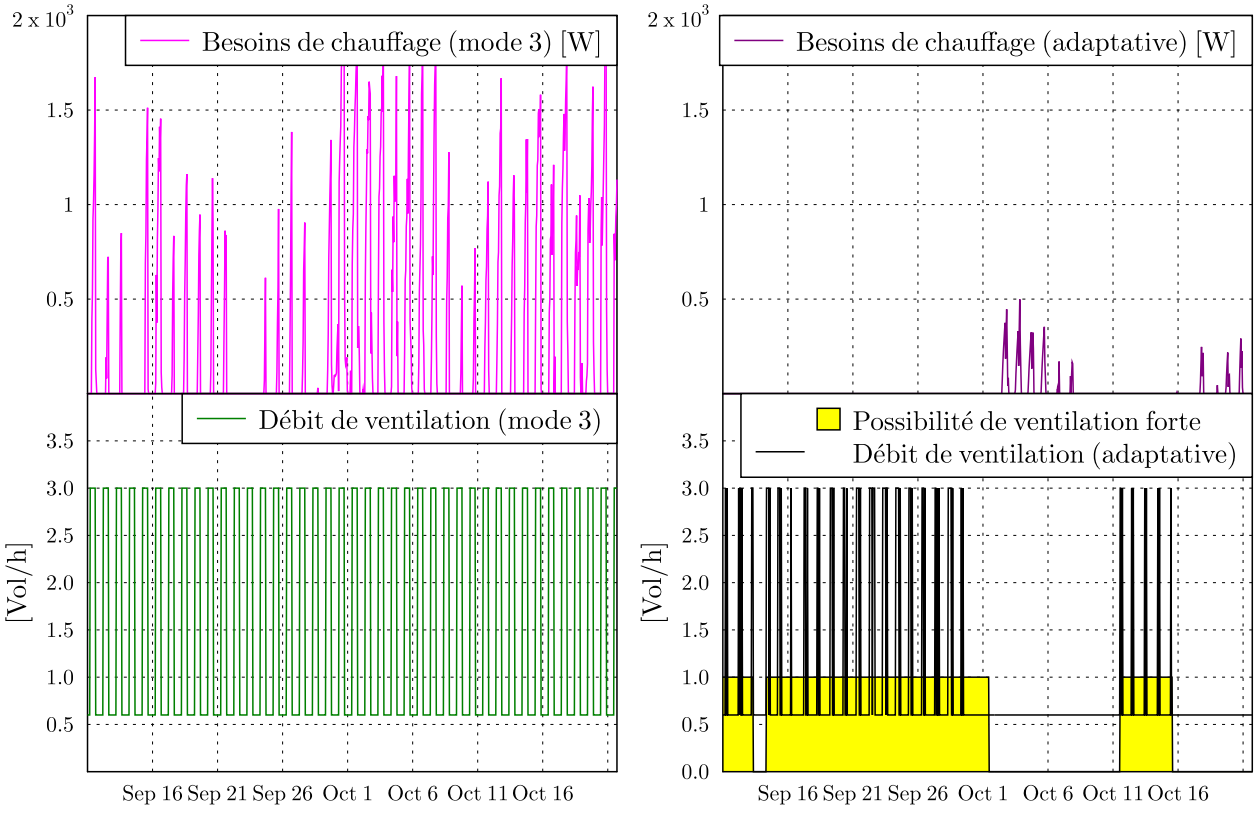

Figure 4.10 – *Comparaison des débits entre le mode de ventilation classique 3 (Tableau (4.2)) et un mode de ventilation adaptative durant une période d'intersaison sur la maison à faible inertie.*

nous avons pu identifier le couple de températures "seuil" les plus appropriées au contrôle des moyennes de températures glissantes à la fois pour un bâtiment à faible et à forte inertie thermique. Enfin, une comparaison de la ventilation nocturne adaptative et classique a montré que, outre les économies d'énergie réalisées, l'algorithme a été effectivement en mesure d'identifier les périodes où la ventilation nocturne doit être activée et les périodes où elle ne le devrait pas, limitant ainsi considérablement les périodes de ventilation nocturne concomitantes avec le chauffage. Un des principaux avantages de l'algorithme est que, après la détermination du couple de températures de consigne qui sont la plupart du temps fonction du climat, le seul paramètre qui sera nécessaire de déterminer est la constante c liée à la constante de temps du bâtiment. Les résultats montrent que l'algorithme adaptatif est capable d'adapter le bâtiment aux périodes de mi-saison ce qui empêche les puissances de chauffage indésirables tout en préservant de bonnes conditions de confort thermique.

Après avoir étudié l'intérêt d'une stratégie de rafraîchissement passif par une ventilation nocturne adaptative, on s'intéresse à présent à une application sur l'exploitation de l'inertie thermique pour la réduction des besoins de chauffage en hiver.

4.2 Etude d'une stratégie de chauffage solaire par activation d'un plancher chauffant

4.2.1 Modélisation de l'installation solaire

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du programme de recherche ANR-Habisol VALERIE que nous avons évoqué dans la section (1.3.3) du chapitre 1 concernant l'étude de l'exploitation immédiate des ressources énergétiques par le bâtiment et le développement de stratégies de réhabilitation. La solution qui consiste à coupler une installation de capteurs solaires thermiques avec un plancher chauffant a été retenue parmi ces stratégies et elle fait l'objet de cette partie. On a considéré la même géométrie de bâtiment que celles des maisons expérimentales de la plateforme INCAS, soit une maison individuelle à deux étages déclinée en une version BBC et une version avant 1974.

L'installation solaire comprend 12 m^2 de capteurs plans et deux ballons de stockage qui alimentent en eau chaude les planchers activés situés au RDC et à l'étage. Dans cette partie, on présente les modèles numériques qui ont été implémentés dans la plateforme SIMSPARK et qui ont été couplés au modèle de simulation de la maison INCAS.

4.2.1.1 Modèle du plancher chauffant

La modélisation du plancher activé repose d'une part sur l'écriture du bilan énergétique entre le fluide caloporteur et la dalle et d'autre part sur le bilan énergétique entre la dalle et l'air de la pièce.

Échanges de chaleur entre les tuyaux et la dalle

- Puissance transportée par le fluide caloporteur vers la dalle

La quantité de chaleur P_{tr} transportée par le fluide caloporteur des capteurs solaires vers la dalle est évaluée par :

$$P_{tr} = \dot{m} C_p (T_1 - T_2) \tag{4.7}$$

avec $\dot{m}$, le débit massique du fluide en kg/s, T_1 et T_2 les températures d'entrée et de sortie de l'eau dans la dalle et C_p la chaleur spécifique du fluide.

- Puissance dissipée dans la dalle

La puissance transportée par l'eau dans le tuyau est ensuite dissipée par convection forcée à la surface intérieure de celui-ci. La puissance dissipée par le fluide dans les tuyaux à l'intérieur de la dalle est évaluée par :

$$P_{dis} = h_t (T_e - T_m) \tag{4.8}$$

avec h_t, le coefficient de transfert thermique entre le fluide et la maille de la dalle en W/K évalué par

$$\frac{1}{h_t} = R_t + R_{ft} \tag{4.9}$$

avec R_t, la résistance thermique du tube en K/W et R_{ft}, la résistance thermique entre le fluide et le tube en K/W.

R_t est calculé par la formule

$$R_t = \frac{ln\left(\frac{D_{te}}{D_{ti}}\right)}{2\pi L \lambda_t} \tag{4.10}$$

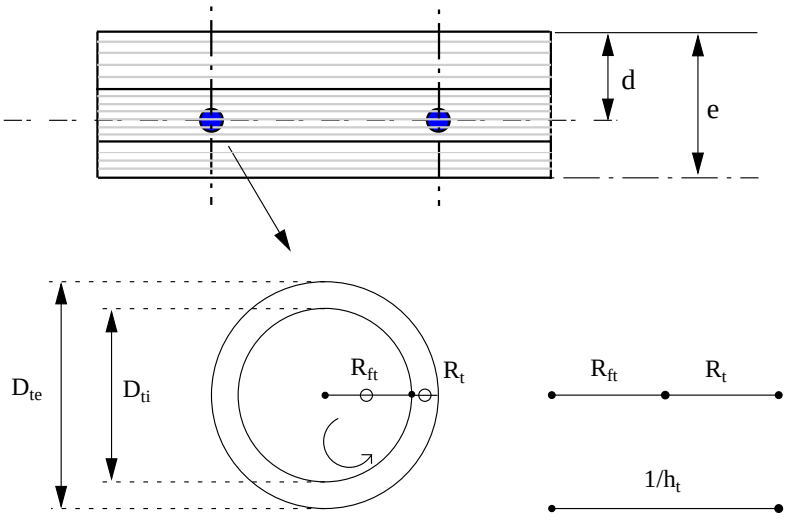

Figure 4.11 – *Coupe verticale du plancher chauffant*

Avec D_{te} et D_{ti}, les diamètres extérieur et intérieur du tube en m, l, la longueur du tuyau en m, λ_t, la conductivité du tube (0.16 W/mK pour le polyethylene).

La résistance thermique R_{ft} entre le fluide et le tube est évaluée par

$$R_{ft} = \frac{D_{ti}}{Nu\lambda_f S} \tag{4.11}$$

avec λ_f, la conductivité thermique du fluide en W/(m.K), S, la surface d'échange à l'intérieur du tuyau en m^2

$$S = \pi D_{ti} l \tag{4.12}$$

et Nu, le nombre de Nusselt calculé par la corrélation suivante dans le cas d'un écoulement turbulent :

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \tag{4.13}$$

C_p	chaleur spécifique	4182 J/(kg.K)
ρ	masse volumique	1000 kg/m^3
U	vitesse moyenne du fluide en m/s	-
μ	viscosité dynamique	10^{-3} kg/(m.s)
λ_f	conductivité thermique	0.597 W/(m.K)

Table 4.7 – *Propriétés thermiques de l'eau à 20° C et à pression constante*

avec le nombre de Reynolds,

$$Re = \frac{\rho U D_{ti}}{\mu} \tag{4.14}$$

le nombre de Prandtl,

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} \tag{4.15}$$

et le coefficient de frottement f,

$$f = 0.185 Re^{1/5} \tag{4.16}$$

Les propriétés du fluide présentées dans le tableau (4.7) sont prises pour celles de l'eau à 20°C et à pression constante.

Dans le cas d'un écoulement laminaire, le nombre de Reynolds, Re < 2500, et le nombre de Nusselt, Nu = 3,66.

La chaleur est ensuite dissipée dans la dalle par conduction. Le transfert de chaleur par conduction est supposé monodimensionnel vertical.

Échanges de chaleur aux surfaces du plancher Les transferts de chaleur du plancher avec l'ambiance de la pièce se font principalement par convection et par rayonnement.

Le flux convectifs aux faces inférieure et supérieure du plancher sont évalués par :

$$q"_{conv,inf} = h_{c,inf}(T_{s,inf} - T_{air}) \tag{4.17}$$

$$q"_{conv,sup} = h_{c,sup}(T_{s,sup} - T_{air}) \tag{4.18}$$

Le contour de la dalle est supposé suffisamment isolé pour pouvoir négliger les pertes sur les côtés.

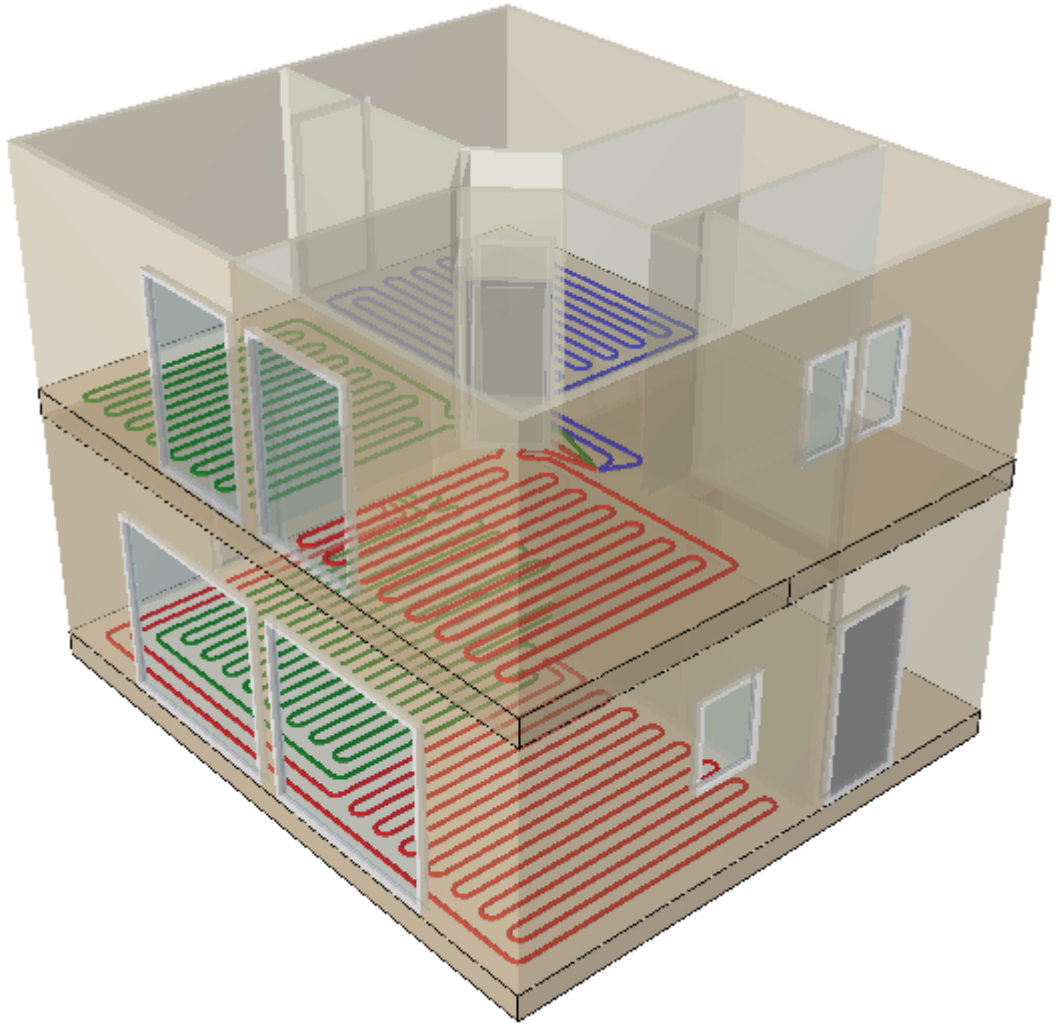

Figure 4.12 – *Vue en 3D de l'installation des planchers chauffants pour un bâtiment de la plateforme INCAS*

Caractéristiques des planchers Chaque plancher chauffant est constitué d'une dalle en béton d'épaisseur $\boldsymbol{e}$ dans laquelle est enroulé un tuyau situé à une distance $\boldsymbol{d}$ de la surface du sol, ayant une longueur $\boldsymbol{L}$, un diamètre extérieur D_{te} et un diamètre intérieur D_{ti} (4.12). Le débit de l'eau circulant dans chaque plancher est égal au débit total provenant du système de production d'eau chaude divisé par deux.

En considérant des espacements de 20 cm pour le tuyau, L est pris égal à 160 m pour chaque étage, $D_{te} = 20$ mm et$D_{ti} = 16$ mm. Le débit maximal pouvant être envoyé au plancher est de 280 l/h.

Quant au choix de l'épaisseur de dalle et de la distance de la nappe par rapport à la surface du sol, ils déterminent la capacité du plancher à stocker la chaleur et à déphaser les apports solaires au cours de la journée. On choisit d'étudier le comportement de trois types de planchers différents :

- dans le premier cas (P1), on a pris une épaisseur de béton de 25 cm et la nappe formée par les tuyaux est située à 6 cm de la surface du sol afin de privilégier le stockage tout en ayant un temps de déphasage réduit.

- dans le second cas (P2), on a pris une épaisseur de dalle de 25 cm avec une profondeur de 20 cm du réseau hydraulique, de manière à favoriser le stockage de chaleur et le déphasage de la température,

- dans le dernier cas (P3), on a pris une épaisseur de dalle de 6 cm et un réseau situé à 4 cm de la surface du sol de façon à permettre une réponse immédiate de la dalle activée.

4.2.1.2 Modèle de capteur solaire thermique

Le modèle de capteur plan qu'on a implémenté dans l'environnement SimSPARK est un modèle analytique intermédiaire à mi-chemin entre les modèles numériques dont la résolution nécessite d'importantes capacités informatiques et les modèles analytiques simplifiés ([35]).

Les principales sorties du modèle de collecteur sont la puissance utile $\dot{Q}_u$, l'efficacité η correspondant à la surface du collecteur[1] et la température de sortie du fluide.

Le modèle est formulé à partir du bilan énergétique externe de l'absorbeur avec l'air ambiant et du bilan énergétique interne de l'absorbeur avec le fluide circulant à l'intérieur des tubes.

Bilan énergétique extérieur Les transferts de chaleur de l'absorbeur vers l'air ambiant se font :

[1] sans tenir compte de la surface de cadre

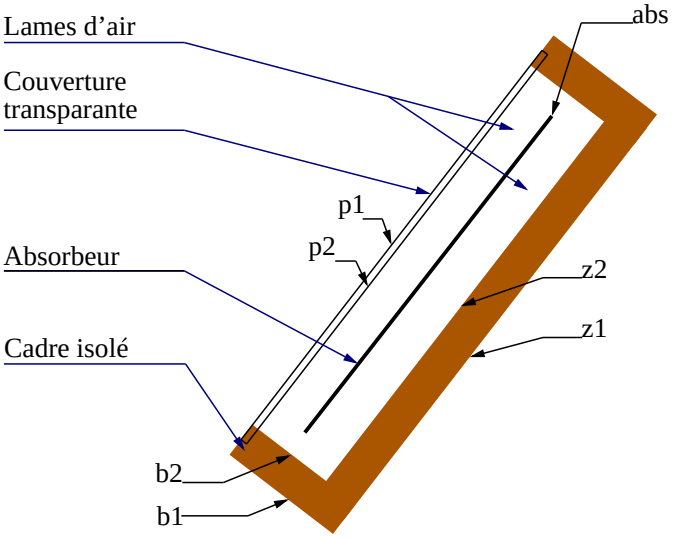

Figure 4.13 – *Schéma du capteur solaire plan*

- tout d'abord par rayonnement Grande Longueur d'Onde et par convection naturelle dans la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre (et dans la lame d'air entre l'absorbeur et le cadre),
- puis par conduction à travers la vitre (et à travers le cadre)
- ensuite par convection et rayonnement GLO entre la vitre et l'air extérieur (et entre le cadre et l'air extérieur)

La résolution du modèle se fait par un processus itératif connaissant les valeurs initiales des températures des différentes surfaces, la température d'entrée de l'eau dans les capteurs et la température extérieure.

Le bilan énergétique externe de l'absorbeur s'écrit :

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}_s - \dot{Q_{l,o}} - \dot{Q_{l,t}} - \dot{Q}_u \tag{4.19}$$

avec

$\frac{dQ}{dt}$, la variation de l'énergie interne du collecteur,
$\dot{Q}_s$, le flux solaire incident sur la surface du collecteur en W,
$\dot{Q_{l,o}}$, les pertes optiques en W,
$\dot{Q_{l,t}}$, les pertes en W,
$\dot{Q}_u$, la puissance utile du collecteur en W.

L'absorbeur ayant une constante de temps de l'ordre de dix à vingt minutes et une faible capacité calorifique, il possible de considérer que le système est en régime

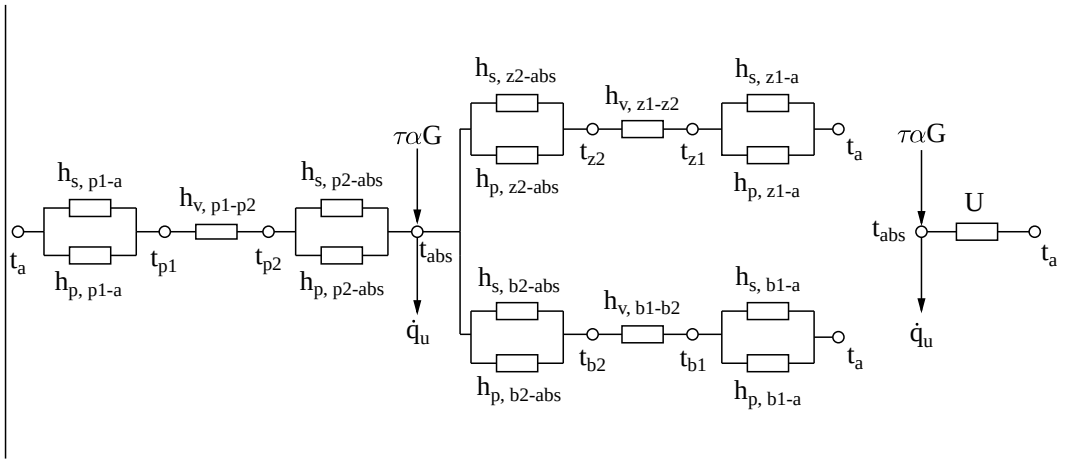

Figure 4.14 – *Bilan énergétique global du capteur solaire plan*

permanent s'il est simulé avec des pas de temps supérieurs à une heure.

- Échange radiatif entre la surface extérieure de la vitre et le ciel ($h_{s,p1-a}$)

Le flux radiatif échangé entre la vitre et le ciel s'exprime par :

$$q_{p1-o} = \epsilon_{p1}\sigma(T_{p1}^4 - T_{ciel}^4) \tag{4.20}$$

soit,

$$h_{s,p1-a} = \epsilon_{p1}\sigma\frac{T_{p1}^4 - T_{ciel}^4}{T_{p1} - T_a} \tag{4.21}$$

avec

ϵ_{p1}, l'émissivité extérieure de la la vitre,
σ, la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67{*}10^{-}8\ W/(m^2.K^4)$
T_{p1}, la température de surface extérieure de la vitre en K,
T_a, la température ambiante en K.

- Échange convectif de la vitre avec l'air ambiant ($h_{p,p1-a}$)

Pour le calcul du coefficient de convection extérieur, la relation utilisée est celle de McAdams :

$$h_{p,p1-a} = h_w = 5.7 + 3.8w \tag{4.22}$$

avec w, la vitesse du vent en m/s.

- Transfert de chaleur par conduction à travers la vitre ($h_{v,p1-p2}$)

$$h_{vp,p1-p2} = \frac{\lambda_{p1-p2}}{L_{p1-p2}} \tag{4.23}$$

avec λ_{p1-p2}, la conductivité thermique de la vitre en W/(m.K)
et L_{p1-p2}, l'épaisseur de la vitre en m.
La conductivité λ_{p1-p2} de la vitre peut être calculée à partir de la température de celle-ci d'après la relation polynomiale suivante :

$$\lambda_{p1-p2}(t) = \lambda_0 + \lambda_1 t + \lambda_2 t^2 \tag{4.24}$$

avec λ_0,λ_1 et λ_2 des constantes spécifiques au matériau de la vitre.

- Échange radiatif entre l'absorbeur et la vitre ($h_{s,abs-p2}$)

Le flux radiatif échangé entre l'absorbeur et la vitre s'écrit :

$$h_{s,abs-p2} = \sigma \frac{T_{abs}^4 - T_{p2}^4}{\frac{1}{\epsilon_{p2}} + \frac{1}{\epsilon_{abs,p}} - 1} \tag{4.25}$$

avec T_{p2} la température de surface de la vitre en K,
T_{abs}, la température de surface de l'absorbeur en K,
ϵ_{p2}, l'émissivité de la surface intérieure de la vitre,
$\epsilon_{abs,p}$, l'émissivité de la face supérieure de l'absorbeur.

Le coefficient de transfert de l'échange radiatif s'exprime par :

$$h_{s,abs-p2} = \frac{q_{s,abs-p2}}{T_{abs}^4 - T_{p2}^4} \tag{4.26}$$

soit,

$$h_{s,abs-p2} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{p2}} + \frac{1}{\epsilon_{abs,p}} - 1} (T_{abs}^2 + T_{p2}^2)(T_{abs} + T_{p2}) \tag{4.27}$$

- Échange par convection naturelle dans la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre ($h_{p,abs-p2}$)

La relation entre le coefficient d'échange h_p dans la lame d'air et le nombre de Nusselt Nu_L s'exprime par :

$$Nu_L = \frac{h_p L_g}{\lambda_g} \tag{4.28}$$

Le coefficient de convection h_p à l'intérieur de la cavité fermée inclinée entre l'absorbeur et la vitre s'écrit alors :

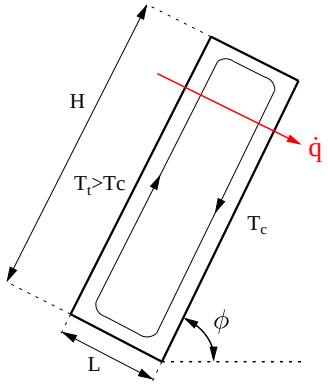

Figure 4.15 – *Prise en compte de l'inclinaison du capteur*

$$h_{p,abs-p2} = \frac{Nu_L \lambda_g}{L_{abs-p2}} \tag{4.29}$$

avec λ_g, la conductivité thermique de l'air à la température moyenne $t_g = t_{abs-p2}$ à l'intérieur de la cavité en $W/(m.K)$,

L_{abs-p2}, l'épaisseur de la lame d'air entre la vitre et la face supérieure de l'absorbeur

avec

$$Nu_L = (0.1464 - 2.602 * 10^{-4}\phi - 2.046 * 10^{-6}\phi^2) Ra_L^{0.29} \tag{4.30}$$

où ϕ est l'angle d'inclinaison en degré.

- Échange radiatif entre l'absorbeur et le cadre ($h_{s,z2-abs}$)

Comme pour l'échange radiatif entre l'absorbeur et la vitre, le coefficient de transfert pour le flux radiatif échangé entre l'absorbeur et la vitre s'écrit :

$$h_{s,z2-abs} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{z2}} + \frac{1}{\epsilon_{abs,z}} - 1} (T_{abs}^2 + T_{z2}^2)(T_{abs} + T_{z2}) \tag{4.31}$$

avec T_{z2} la température du cadre en K,
T_{abs}, la température de surface de l'absorbeur en K,
ϵ_{z2}, l'émissivité de la surface intérieure du cadre,
$\epsilon_{abs,z}$, l'émissivité de la face inférieure l'absorbeur.

- Échange par convection naturelle dans la lame d'air entre l'absorbeur et le cadre ($h_{p,z2-abs}$)

Le coefficient de convection h_p à l'intérieur de la cavité fermée inclinée entre l'absorbeur et le cadre s'écrit de façon similaire à l'équation (4.29) :

$$h_{p,z2-abs} = \frac{Nu_L \lambda_g}{L_{z2-abs}} \tag{4.32}$$

avec λ_g, la conductivité thermique de l'air à la température moyenne $t_g = t_{z2-abs}$ à l'intérieur de la cavité en $W/(m.K)$,

L_{z2-abs}, l'épaisseur de la lame d'air entre la face inférieure de l'absorbeur et le cadre en m,

et où

$$Nu_L = 1 + [Nu_L(\phi = 90° - 1)]sin\phi \;\; pour \;\; 90 < \phi < 180° \tag{4.33}$$

- Transfert de chaleur par conduction à travers le cadre ($h_{v,z1-z2}$)

$$h_{vp,z1-z2} = \frac{\lambda_{z1-z2}}{L_{z1-z2}} \tag{4.34}$$

avec λ_{z1-z2}, la conductivité thermique du cadre en W/(m.K). Le cadre est en général constitué majoritairement en matériau isolant.
Et L_{z1-z2}, l'épaisseur du cadre en m.

- Échange radiatif entre la surface extérieure du cadre du collecteur et la surface adjacente ($h_{s,z1-a}$)

Le coefficient de transfert radiatif entre la surface extérieure du cadre et la surface adjacente au collecteur (toiture) s'exprime par

$$h_{s,z1-a} = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{z1}} + \frac{1}{\epsilon_{as}-1}} * \frac{T_{z1}^4 - T_{as}^4}{T_{z1} - T_a} \tag{4.35}$$

avec

T_{z1}, la température de surface extérieure du cadre du collecteur en K,
T_{as}, la température de la surface adjacente en K.
T_a, la température ambiante en K.
ϵ_{z1}, l'émissivité extérieure du cadre,
ϵ_{as}, l'émissivité de la surface adjacente ,

La plupart du temps, T_{as} peut être considérée égale à la température ambiante T_a, ce qui implique que

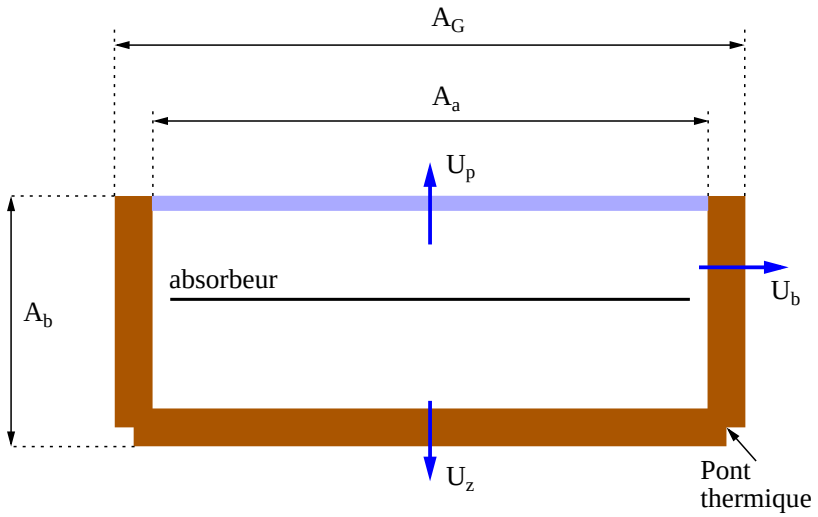

Figure 4.16 – *Bilan énergétique externe du capteur solaire plan*

$$h_{s,z1-a} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{z1}} + \frac{1}{\epsilon_{as}-1}}.(T_{z1}^2 - T_a^2)(T_{z1} + T_a) \tag{4.36}$$

- Échange convectif entre le cadre et l'air ambiant ($h_{p,z1-a}$)

Le coefficient de transfert de l'échange convectif entre la surface extérieure du cadre et l'air ambiant est évalué de la même manière que l'équation 4.22.

- Calcul du coefficient d'échange U global du collecteur

En faisant référence à la figure 4.14, le coefficient d'échange global U_p relatif à la face supérieure du collecteur (côté de la vitre), est calculé par :

$$U_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{s,p1-a}+h_{p,p1-a}} + \frac{1}{h_{v,p1-p2}} + \frac{1}{h_{s,abs-p2}+h_{p,abs-p2}}} \tag{4.37}$$

De manière analogue, le coefficient de déperdition au niveau du cadre du collecteur U_z est exprimé par :

$$U_z = \frac{1}{\frac{1}{h_{s,z1-a}+h_{p,z1-a}} + \frac{1}{h_{v,z1-z2}} + \frac{1}{h_{s,abs-z2}+h_{p,abs-z2}}} \tag{4.38}$$

Le coefficient de déperdition global du collecteur relatif à la surface de capteur A_G[2] s'exprime alors :

$$U_G A_G = U_p A_G + U_z A_G + U_b A_b = U A_a \tag{4.39}$$

[2]elle comprend également la surface du cadre

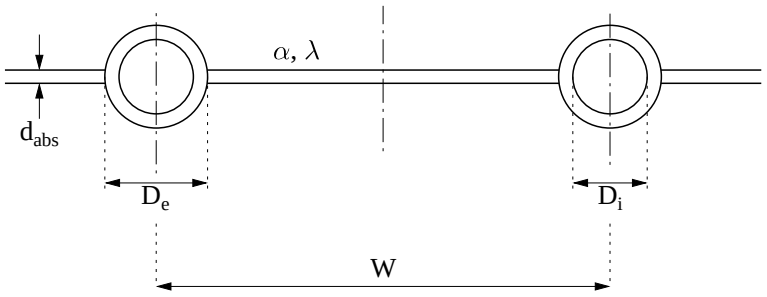

Figure 4.17 – *Coupe de l'ensemble absorbeur-tube*

avec U, le coefficient de déperdition global rapporté à la surface vitrée du collecteur A_a[3]. Ce qui donne :

$$U = (U_p + U_z + U_z \frac{A_b}{A_G}) \frac{A_G}{A_a} \tag{4.40}$$

Après avoir établi le bilan énergétique extérieur de l'absorbeur, on dresse à présent le bilan énergétique intérieur de celui-ci.

Bilan énergétique intérieur de l'absorbeur En considérant un élément de l'absorbeur comme étant une ailette, le bilan énergétique entre la surface de l'absorbeur et l'eau circulant dans les tubes (Figure (4.17)) conduit à trouver le champ de température au niveau de l'ailette et par conséquent le gradient de température dans un tube de l'absorbeur.

L'efficacité de l'ailette est alors évaluée par :

$$F = \frac{tanh[m(W - D_e)/2]}{m(W - D_e)/2} \tag{4.41}$$

où

$$m = \sqrt{\frac{U}{\lambda_{abs} d_{abs}}} \tag{4.42}$$

avec W, la longueur de l'ailette en m (soit la distance entre deux tubes de l'absorbeur),
D_e, le diamètre extérieur des tubes, en m,
λ_{abs}, la conductivité thermique de l'absorbeur, en $W/(m.K)$,
d_{abs}, épaisseur de l'ailette en m.

Pour une configuration analogue à celle de la figure (4.17) pour la liaison des tubes et de l'absorbeur, et tenant compte des échanges par conduction à travers les

[3]elle ne tient pas compte de la surface du cadre

liaisons de l'ailette et des tubes, et de l'échange par convection forcée entre le fluide et les tubes, l'efficacité du collecteur est calculée par :

$$F' = \frac{U_0}{U} \tag{4.43}$$

où, U_0 est le coefficient d'échange entre le fluide et l'air ambiant en $W/(m^2.K)$, et U, le coefficient d'échange entre l'absorbeur et l'air ambiant en $W/(m^2.K)$.

Soit pour la configuration montrée à la figure (4.17),

$$F' = \frac{1/U}{W[\frac{1}{U(D_e+(W-D_e)F)} + \frac{1}{h_i \pi D_i}]} \tag{4.44}$$

Le coefficient d'échange par convection forcée h_i entre le fluide et les tubes de l'absorbeur est déterminé par la relation suivante :

$$h_i = Nu_D.\frac{\lambda_f}{D_i} \tag{4.45}$$

où λ_f est la conductivité thermique du fluide en $W/(m.K)$,
et D_i le diamètre intérieur des tubes en m.

On définit le coefficient F_R comme étant le rapport entre le gain du collecteur sur le gain de l'absorbeur si celui-ci atteignait la température du fluide :

$$F_R = \frac{\dot{M}_c}{A_a U}\ \left[1 - exp\left(-\frac{A_a U F'}{\dot{M}_c}\right)\right] \tag{4.46}$$

où $\dot{M}_c$ est le débit massique total du fluide circulant dans le collecteur en kg/s,
c_t, la capacité calorifique du fluide en $J/(kg.K)$,
A_a, la surface vitrée du collecteur en m^2.

Le coefficient F_R est équivalent à l'efficacité d'un échangeur évaluant le rapport entre l'énergie utile échangée sur l'énergie utile maximale pouvant être échangée. Pour un capteur solaire thermique, cela correspond au cas où l'absorbeur est à la même température d'entrée du fluide.

La puissance utile disponible à la sortie du capteur solaire est évaluée par la formule suivante :

$$\dot{Q}_u = A_a[(\tau\alpha)_{eff} G - U(t_{abs} - t_a)] \tag{4.47}$$

où $(\tau\alpha)_{eff}$ est le produit de la transmittivité du vitrage et de l'absorptivité de l'absorbeur,
U, le coefficient d'échange global du collecteur rapporté à la surface de la vitre en $W/(m^2.K)$,
G, l'ensoleillement global incident sur la surface du capteur en W/m^2,
A_a, la surface vitrée du capteur solaire en m^2 (ou la surface du capteur ne tenant pas compte de la surface de cadre).

Il est difficile d'évaluer la puissance utile disponible à la sortie du capteur à partir de la température moyenne de l'absorbeur t_{abs} en raison de la difficulté à la mesurer expérimentalement. Pour cela, la puissance utile à la sortie du capteur est évaluée à partir de la température moyenne du fluide à l'intérieur du collecteur :

$$t_m = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} \tag{4.48}$$

où t_{in} est la température d'entrée du fluide dans le collecteur en °C,
et t_{out}, la température à la sortie du collecteur en °C.

La puissance utile à la sortie des capteurs est alors évaluée à partir de l'efficacité F_R et la température d'entrée du fluide dans le collecteur :

$$\dot{Q}_u = A_a F_R[(\tau\alpha)_{eff} G - U(t_{in} - t_a)] \tag{4.49}$$

Afin de calculer les coefficients de transfert aux différentes surfaces du collecteur et pour ainsi évaluer le coefficient d'échange global U du collecteur, la température de l'absorbeur t_{abs} est fournie par la relation suivante :

$$t_{abs} = t_{in} + \frac{\dot{Q}_u / A_a}{F_R U}(1 - F_R) \tag{4.50}$$

Par un processus itératif, il est possible d'évaluer t_{abs} et le coefficient global U.

La température moyenne du fluide nécessaire pour le calcul du coefficient de convection h_i du fluide dans les tubes de l'absorbeur est évaluée par :

$$t_m = t_{in} + \frac{\dot{Q}_u / A_a}{F_R U}(1 - \frac{F_R}{F'}) \tag{4.51}$$

4.2.1.3 Modèle des ballons de stockage

Comme énoncé plus haut, l'installation solaire comprend deux ballons de stockage de respectivement 400 et 600 litres de volume. Leurs fonctions sont les suivantes :

- le premier, le *ballon de déstockage* a pour fonction de *déstocker* directement l'eau vers les planchers chauffants à une température ne dépassant pas 40°C,
- le second, le *ballon solaire*, a essentiellement une fonction de stockage à long terme. C'est pourquoi son volume est supérieur à celui du ballon de déstockage.

Les ballons ont été modélisés de la même façon comme indiqué sur le schéma de la figure 4.18 par une discrétisation en dix couches élémentaires (de 0 à 9).

Le volume du ballon est chauffée par un serpentin faisant circuler un débit $\dot{m}_1$ à partir de la couche moyenne à la température T_e.

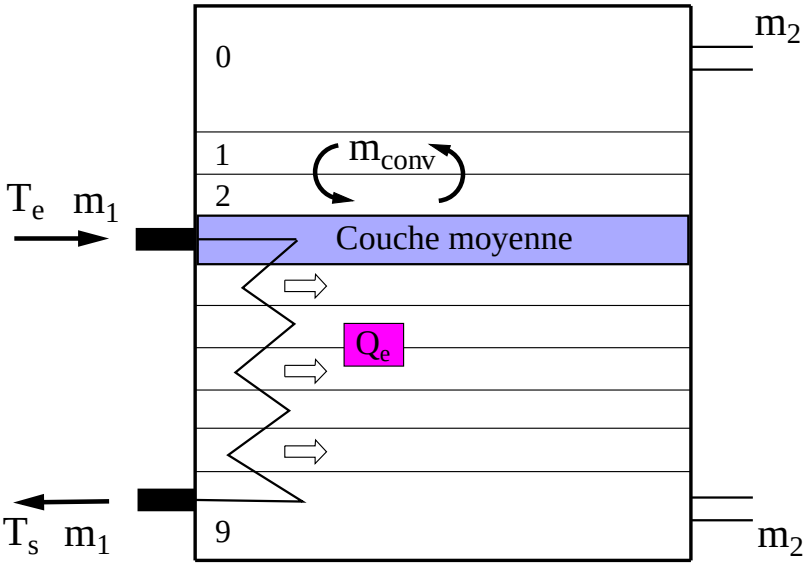

Figure 4.18 – *Schéma de principe des ballons*

En considérant trois couches adjacentes successives désignées par *(j-1)*, *(j)* et *(j+1)* dont les températures sont respectivement T_a, T_b et T_c, le bilan énergétique d'une couche élémentaire s'écrit de manière différente selon sa position :

- Pour la couche supérieure du ballon ($j = 0$),

$$\rho C_p V \frac{dT_b}{dt} = m_2 C_p\,(T_c - T_b) + K_{st} S_e\,(T_{ext} - T_b) + \frac{\lambda S_b}{h}(T_c - T_b) + F_1 m_{conv} C_p (T_c - T_b) \tag{4.52}$$

- Pour une couche *haute*, correspondant à un noeud entre $j = 1$ et le noeud précédent la couche moyenne,

$$\rho C_p V \frac{dT_b}{dt} = m_2 C_p\,(T_c - T_b) + K_{st} S_e\,(T_{ext} - T_b) + \frac{\lambda S_b}{h}(T_c - T_b) + \frac{\lambda S_b}{h}(T_a - T_b) + F_1 m_{conv} C_p (T_c - T_b) + F_2 m_{conv} C_p (T_c - T_b) \tag{4.53}$$

- A partir de la couche *moyenne* jusqu'à la couche précédent la plus basse,

$$\rho C_p V \frac{dT_b}{dt} = Q_e + m_2 C_p\,(T_c - T_b) + K_{st} S_e\,(T_{ext} - T_b) + \frac{\lambda S_b}{h}(T_c - T_b) + \frac{\lambda S_b}{h}(T_a - T_b) + F_1 m_{conv} C_p (T_c - T_b) + F_2 m_{conv} C_p (T_a - T_b) \tag{4.54}$$

- Pour la couche inférieure du ballon pour laquelle $j = 9$,

$$\rho C_p V \frac{dT_b}{dt} = Q_e + \ m_2 C_p \ (T_c - T_b) + \ K_{st} S_e \ (T_{ext} - T_b) + \ \frac{\lambda S_b}{h}(T_a - T_b) + F_2 m_{conv} C_p (T_a - T_b) \tag{4.55}$$

Q_e est le flux thermique, en W, délivré par l'échangeur dans chaque couche et il est calculé d'après les relations :

$$\begin{cases} T_s = T_b + (T_e - T_b) \ e^{\ (\frac{UA}{m_1 C_p})} \\ Q_e = m_1 \ C_p \ (T_e - T_s) \end{cases}$$

où UA est le coefficient d'échange global de l'échangeur en W/K, T_b la température de la couche du ballon, T_e et T_s les températures d'entrée et de sortie de l'eau du serpentin. Pour représenter les écoulements convectifs à l'intérieur du ballon, on introduit des débits additionnels entre deux couches adjacentes (m_{conv}) dans le cas où la température dans la couche j est plus basse que la température dans la couche $j + 1$.

λ (W/m.K), ρ (kg/m^3), C_p $(J/(kg.K))$ sont les propriétés thermiques de l'eau, S_b et S_e sont respectivement la section du ballon et sa surface d'échange avec l'extérieur en m^2, h est la hauteur d'une couche en m,
K_{st} est le coefficient de déperdition global entre l'eau à l'intérieur et l'air ambiant en $W/(m^2.K)$,
F_1 et F_2 sont des fonctions de commande telles que :

$$\begin{cases} F_1 = 1 \ si \ \ T_c > T_b, \ sinon \ \ F_1 = 0, \\ F_2 = 1 \ si \ \ T_a < T_b, \ sinon \ \ F_2 = 0, \end{cases}$$

4.2.2 Description de la logique de fonctionnement

Dans cette partie, on développe une logique de fonctionnement qui permettra de coordonner l'activation des différents éléments du système. Le pilotage que l'on propose est principalement articulé autour de huit modes qui sont sélectionnés en fonction des conditions d'ensoleillement et du comportement thermique du bâtiment.

4.2.2.1 Mode 1

Le *mode 1* fonctionne si les conditions extérieures d'ensoleillement sont faibles et que la température de l'eau à la sortie des capteurs ne dépasse pas 30°C. Cela

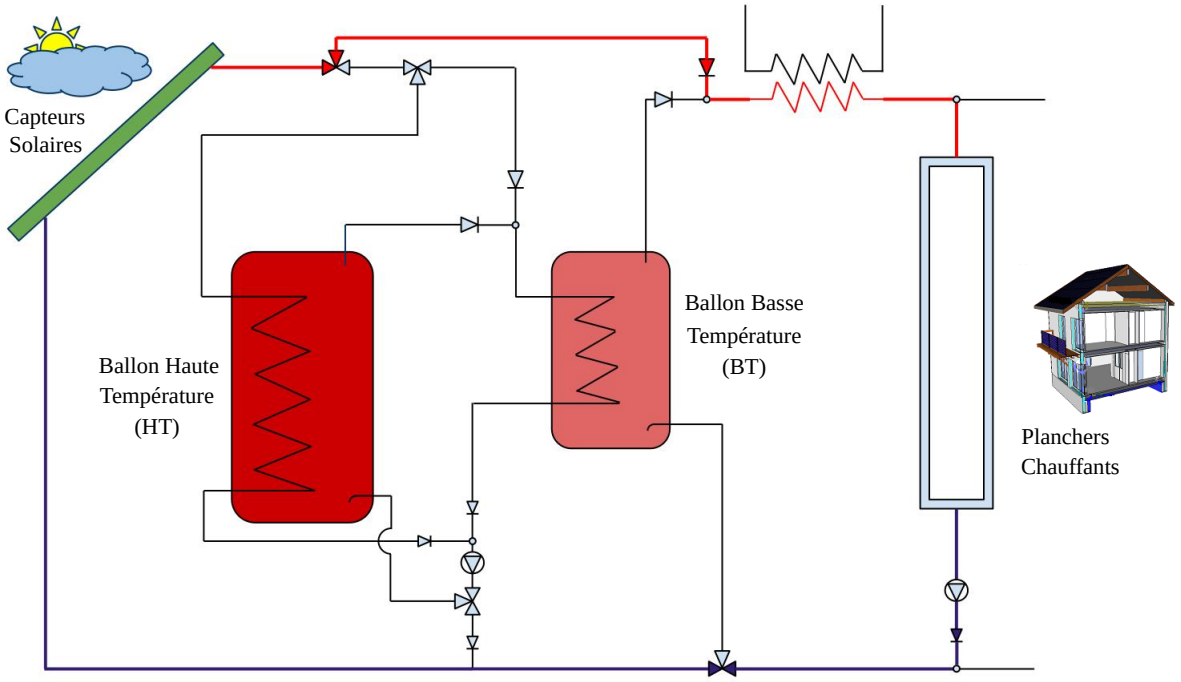

Figure 4.19 – *Mode 1*

correspond typiquement aux conditions que l'on peut rencontrer en début ou en fin de journée et même certaines fois en cours de journée d'hiver. Envoyer cette eau dans les ballons conduirait à les refroidir. D'autre part, vu que les températures de dalles sont généralement faibles (entre 20 et 30°C), des températures de sortie de capteurs supérieures à 20°C paraissent intéressantes pour stocker de l'énergie dans celles-ci. C'est pourquoi on choisit d'envoyer le débit directement dans les dalles tant que leurs températures restent inférieures à la température de sortie des capteurs (voir Figure (4.19)).

4.2.2.2 Modes 2 et 3

Le *mode 2* (Figure 4.20) a pour fonction d'assurer à la fois le stockage de l'eau chaude dans le ballon solaire et le chauffage du plancher par le ballon de déstockage. Ceci est possible lorsque la température de sortie des capteurs T_{sc} est supérieure à la température en haut du ballon solaire $T_{HT,0}$ (maille supérieure), et que la température de sortie du ballon de déstockage (température du haut du ballon) est supérieure à la température de la dalle de façon à ce qu'il y ait un besoin de chauffage dans le bâtiment.

Le *mode 3* est pareil au *mode 2*, sauf qu'il n'y a pas de besoin de chauffage, et donc l'alimentation des planchers est coupée. Par contre, tant que le ballon solaire a une température inférieure à celle de l'eau à la sortie des capteurs, il continue d'être

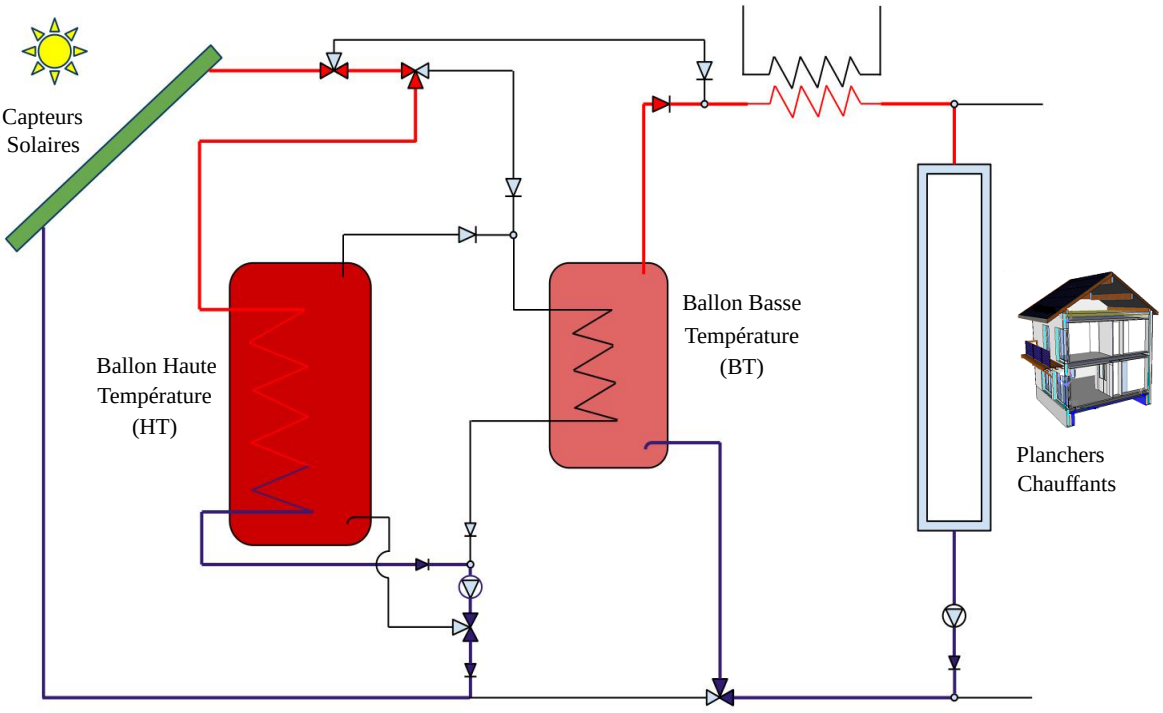

Figure 4.20 – *Mode 2*

chargé.

4.2.2.3 Modes 4 et 5

Le *mode 4* (Figure 4.21) contribue à la fois à charger le ballon de déstockage par les capteurs et à stocker l'énergie dans le plancher solaire. Ainsi, Le *mode 4* fonctionne lorsque la température de l'eau à la sortie des capteurs T_{sc} est suffisamment élevée pour être envoyée vers le ballon de déstockage (T_{sc} supérieure à la température du haut du ballon $T_{BT,0}$) et que celui-ci est suffisamment chaud pour alimenter le plancher ($T_{BT,0} > 35°C$). Tant que les températures d'air des pièces n'ont pas atteint la température de consigne ($T_{cons} = 20°C$), les planchers restent alimentés en eau chaude.

Le *mode 5* fonctionne de manière similaire au mode 4 sauf que l'alimentation des planchers est coupée car les besoins de chauffage sont nuls. En revanche, tant que la température de sortie des capteurs est supérieure à la température au sommet du ballon de déstockage, celui-ci continue à être chargé.

4.2.2.4 Modes 6, 7 et 8

Le *mode 6* contribue à assurer le chauffage du plancher par le ballon solaire de façon indirecte. En effet, ce mode est activé de manière à isoler les capteurs

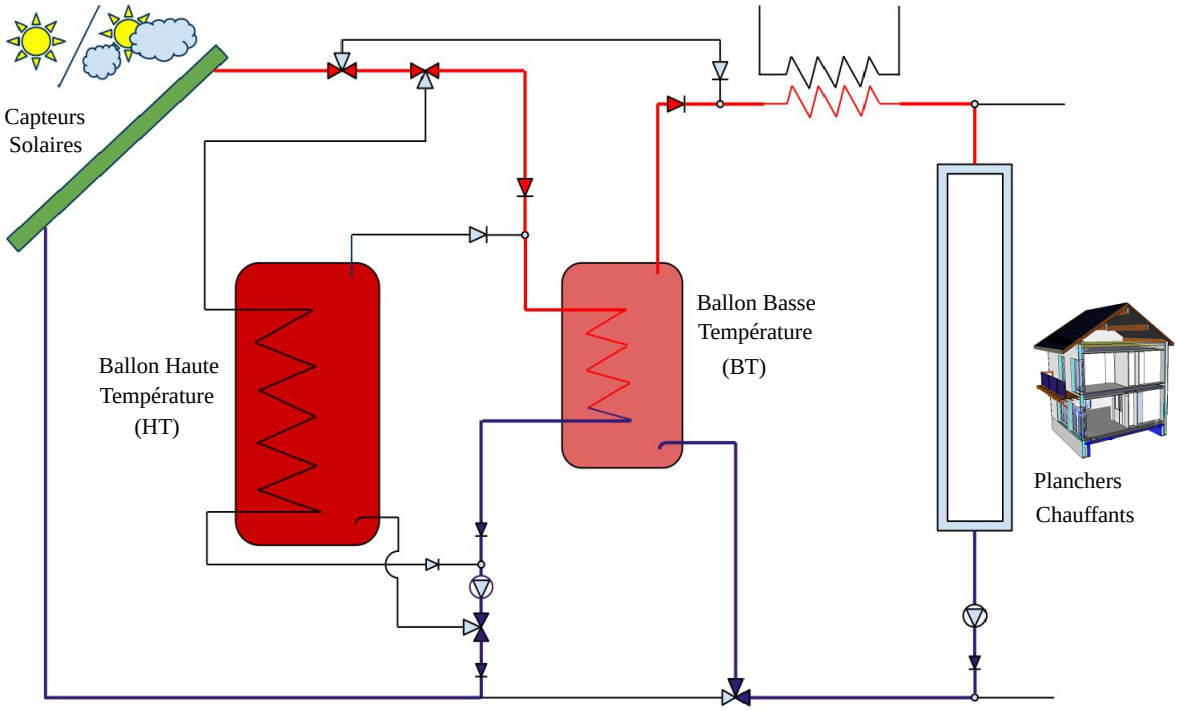

Figure 4.21 – *Mode 4*

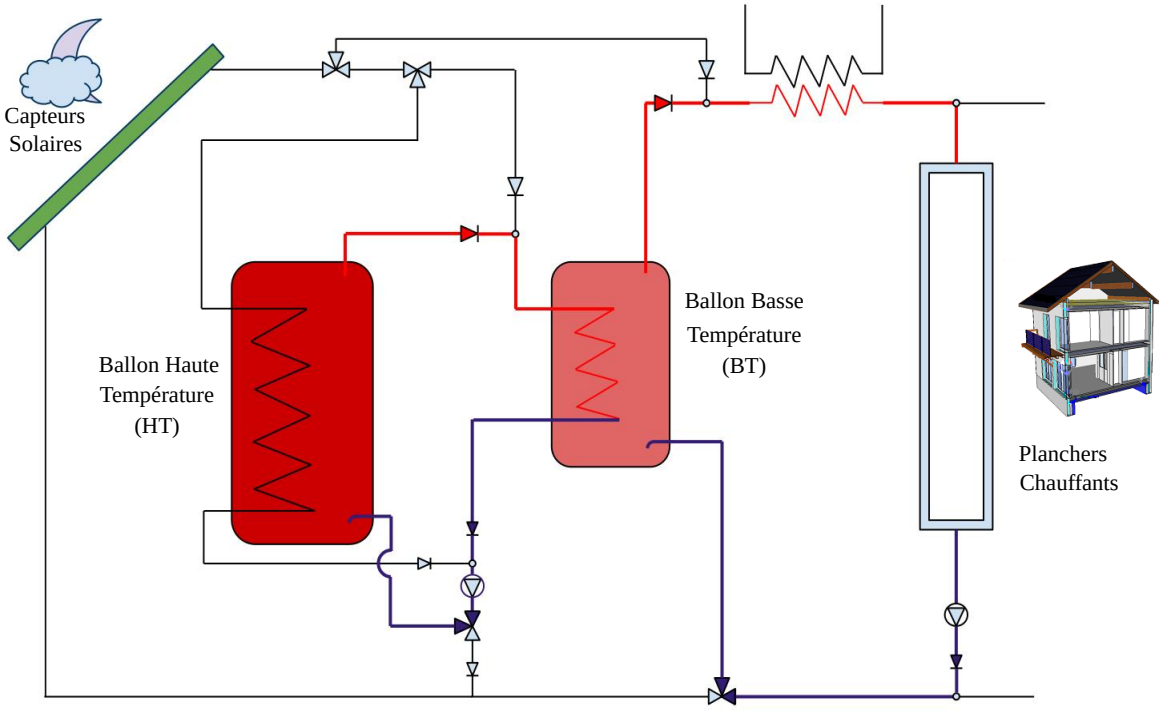

Figure 4.22 – *Mode 6*

du système lorsqu'il n'y a plus d'ensoleillement et permet de les substituer par le ballon solaire. Celui-ci fournit l'eau chaude au ballon de déstockage qui lui continue à alimenter les planchers tant qu'il y a un besoin de chauffage (Figure 4.22) et que la température de la dalle est inférieure à la température de l'eau à la sortie du ballon de déstockage $T_{BT,0}$. Ce mode fonctionne en général durant la nuit et permet de restituer l'énergie solaire stockée au cours de la journée.

Le *mode 7* est similaire au *mode 6* en supprimant la condition de chauffage et donc un arrêt de l'alimentation des planchers : le ballon de déstockage et le ballon solaire continuent à s'alimenter entre eux afin de garder une température homogène.

Le *mode 8* correspond à l'état d'arrêt du système qui se produit lorsqu'il n'y a ni ensoleillement, ni besoin de chauffage et qu'aucune des conditions des modes précédents n'est vérifiée.

Le chauffage d'appoint est assuré par des radiateurs électriques fonctionnant à une consigne plus basse de 1°C que celle de l'installation solaire de manière à ce qu'il soit déclenché lorsque celle-ci ne fournit pas suffisamment d'apports au bâtiment.

4.2.3 Couplage de l'installation solaire au bâtiment

L'installation solaire a été couplée aux deux types de bâtiments présentés dans la partie (1.3.3) du chapitre 1, à savoir un bâtiment de type BBC et un bâtiment ancien (avant 1974) qui ont la même géométrie que les maisons de la plateforme INCAS. On s'est intéressé respectivement aux climats de Chambéry et de Marseille et pour chaque cas, on a testé les trois types de planchers chauffants décrits dans la partie (4.2.1.1).

Sur la Figure (4.23), on a représenté dans le cas du bâtiment BBC pour le climat de Chambéry l'évolution de la température du RDC et des modes de fonctionnement pour quatre jours consécutifs au mois de Février. On peut observer que pratiquement tous les modes ont été sollicités au cours de cette période.

En observant l'évolution des modes sur la journée du 4 Février, le système évolue progressivement du mode 8 au mode 1 : tout d'abord le bâtiment ne présentait pas de besoins en présence de charges internes (mode 8), puis lorsque les occupants sont couchés (apports internes égaux à 170 W), le mode 6 a été activé afin d'alimenter le plancher en eau chaude stockée au cours de la journée précédente. On constate la montée en température de la dalle à ce moment-là.

On observe au cours de la journée du 4 Février des conditions d'ensoleillement assez faibles (le flux global incident est inférieur à 200 W/m^2) et en conséquence des passages fréquents en mode 1 et peu de stockage (modes 3 et 5). On voit que le passage direct de l'eau chaude des capteurs vers les planchers chauffants est bénéfique pour le maintien des températures des dalles au-dessus de 20°C. On remarque par ailleurs que le manque d'apports solaires durant la journée du 4 Février ne s'est fait ressentir que dans la matinée du 5 Février (usage du chauffage d'appoint).

Par la suite, la présence d'ensoleillement a conduit à l'activation du mode 4 qui a permis de charger le ballon de déstockage et de chauffer le bâtiment durant une période de trois heures pour maintenir la température intérieure à la température de consigne.

Lorsque le bâtiment a été suffisamment chauffé, on voit que le système a fonctionné de manière à charger successivement le ballon de déstockage (mode 5) et le ballon solaire (mode 3). La journée du 5 Février étant plus ensoleillée que la veille, on note que le système est en état d'arrêt (mode 8) puisque les besoins du bâtiments sont nuls et que les ballons de stockage sont suffisamment chargés. En effet, la température intérieure et la température de dalle sont supérieures à la température de consigne.

4.2.4 Evaluation des indicateurs de performance

4.2.4.1 Quantification des potentiels concomitant et exploité

On souhaite évaluer les performances énergétiques du bâtiment en présence de l'installation solaire en se servant des indicateurs définis aussi dans la partie (1.3.3) du chapitre 1 afin de quantifier les ressources énergétiques apportées au bâtiment et la façon dont le bâtiment les exploite en présence de l'installation solaire.

Tout d'abord, on a évalué pour les maisons BBC et avant 1974 les besoins de chauffage annuels en tenant compte de l'ensoleillement (besoins avec source). Les besoins sans source ont été pris égaux au cas de référence (section 1.3.3) c'est-à-dire sans source et sans installation solaire.

On remarque en premier lieu dans le tableau (4.8) que les trois types de planchers chauffants présentent à peu près les mêmes performances annuelles quelque soit le type de bâtiment ou le type de climat (*Besoins avec source (IS)*). On vérifie aussi que le potentiel exploité est supérieur dans le cas où l'on intègre l'installation solaire au bâtiment par rapport au cas de référence.

On remarque aussi que le potentiel concomitant global (IS) est toujours supérieur au potentiel exploité.

4.2.4.2 Comparaison du taux de couverture et du taux d'exploitation par rapport au cas de référence

On calcule le taux de couverture et le taux d'exploitation des bâtiments BBC et avant 1974 en présence de l'installation solaire. Les résultats sont présentés dans le tableau (4.9).

On constate à première vue que les faibles besoins de chauffage pour le bâtiment BBC ont conduit à des taux de couverture avoisinant les 96 % pour le climat de Chambéry et 99% pour le climat de Marseille. Le bâtiment avant 1974 présente un

$\frac{kWh}{(m^2.an)}$	Type de plancher	Besoins sans source	Potentiel concomitant	Besoins avec source	Besoins avec source (IS)[a]	Potentiel exploité	Potentiel exploité (IS)
BBC Chambéry	P1	56.6	686.4	19.6	2.25	37	54.3
	P2	56.6	686.4	19.6	2.3	37	54.3
	P3	56.6	686.4	19.6	4.1	37	52.5
BBC Marseille	P1	25.3	624	1.8	0.4	23.5	24.9
	P2	25.3	624	1.8	0.4	23.5	24.9
	P3	25.3	624	1.8	0.6	23.5	24.7
Avant 1974 Chambéry	P1	411	924	328	200	83.1	211
	P2	411	924	328	198	83.1	213
	P3	411	924	328	203	83.1	208
Avant 1974 Marseille	P1	256	844	182	122	74.5	134
	P2	256	844	182	118	74.5	138
	P3	256	844	182	120	74.5	136

Table 4.8 – Exploitation des potentiels par les maisons BBC et avant 1974 pour les climats de Chambéry et de Marseille

[a]avec l'Installation Solaire

taux de couverture proche des 50 % et un taux d'exploitation proche des 30% pour les deux climats.

L'évolution des taux de couvertures et d'exploitation a été représenté sur la figure (Figure 4.24). On peut noter que le fait d'ajouter une installation solaire la plupart du temps conduit à améliorer à la fois le taux de couverture et le taux d'exploitation en fonction de l'efficacité énergétique du bâtiment et du climat.

Pour le bâtiment avant 1974, le taux de couverture des besoins a été doublé ; on passe de 20 à 50% pour le climat de Chambéry et de 30 à 50% pour Marseille. Quant au taux d'exploitation, il a été pratiquement doublé dans les deux cas ; on passe de 9 à 23% pour Chambéry et de 9 à 16% pour Marseille.

Quant au bâtiment BBC, le taux de couverture dans le cas du climat de Chambéry est passé de 65 à 96 %. Pour le climat de Marseille, le taux de couverture était déjà élevé à la base (il est de 93% sans installation solaire) et devient égal à 98%. Le taux d'exploitation reste invariant pour le cas de Marseille et s'améliore légèrement dans le cas de Chambéry (il varie de 5 à 8%).

En comparant le taux d'exploitation des ressources solaires des bâtiments BBC et Avant 74 pour le climat de Chambéry, on observe que celui-ci évolue de façon plus importante dans le cas du bâtiment non isolé et que ainsi l'installation solaire est une stratégie plus intéressante dans le cas d'une réhabilitation : autrement dit,

	Type de plancher	Taux de couverture [%]	Taux d'exploitation [%]	Taux de couverture (IS)[%]	Taux d'exploitation (IS)[%]
BBC Chambéry	P1	65	5	96	7.9
	P2	65	5	96	7.9
	P3	65	5	93	7.6
BBC Marseille	P1	93	4	98	4
	P2	93	4	99	4
	P3	93	4	98	4
Avant 1974 Chambéry	P1	20	9	51	22.8
	P2	20	9	52	23
	P3	20	9	51	22.5
Avant 1974 Marseille	P1	29	9	52	15.9
	P2	29	9	54	16.3
	P3	29	9	53	16.1

Table 4.9 – Taux de couverture des besoins et taux d'exploitation de la ressource en soleil pour un bâtiment BBC et un bâtiment avant 1974 en intégrant une installation solaire.

moins le bâtiment est isolé, plus la ressource en soleil est exploitée.

Par contre l'évolution du taux de couverture des besoins de chauffage est la même pour ces deux bâtiments. En effet, s'il existe des besoins de chauffage, le taux de couverture dépendra davantage du climat. En comparant les bâtiments non isolés de Chambéry et de Marseille, on constate que le taux de couverture est plus intéressant dans le cas de Chambéry.

4.2.5 Conclusion sur la stratégie de l'activation de l'inertie pour le chauffage solaire

Dans cette partie, on a étudié la possibilité de chauffer un bâtiment par l'activation des planchers avec de l'eau chaude solaire. Pour cela, on a implémenté dans la plateforme de simulation SimSPARK le modèle d'une installation solaire composée de capteurs solaires thermiques, de ballons de stockage et d'un plancher chauffant. On a également développé une logique de fonctionnement du système permettant d'une part de stocker l'énergie solaire et de la restituer plus tard lorsque le bâtiment en a besoin et d'autre part de bénéficier du chauffage des planchers par les capteurs lorsque les conditions d'ensoleillement sont faibles pour envoyer l'eau dans les ballons de stockage. Par ailleurs, une application sur un bâtiment BBC et un bâtiment d'avant 1974 pour deux types de climats a été présentée en testant trois types de planchers chauffants. Par une analyse d'indicateurs quantifiant l'exploita-

tion des ressources en énergie solaire, on a pu montrer que l'activation des planchers par le couplage avec ce type de système permettait d'envisager de tendre vers une autonomie énergétique pour les bâtiments BBC, et de réduire considérablement les besoins de chauffage dans le cas d'une réhabilitation.

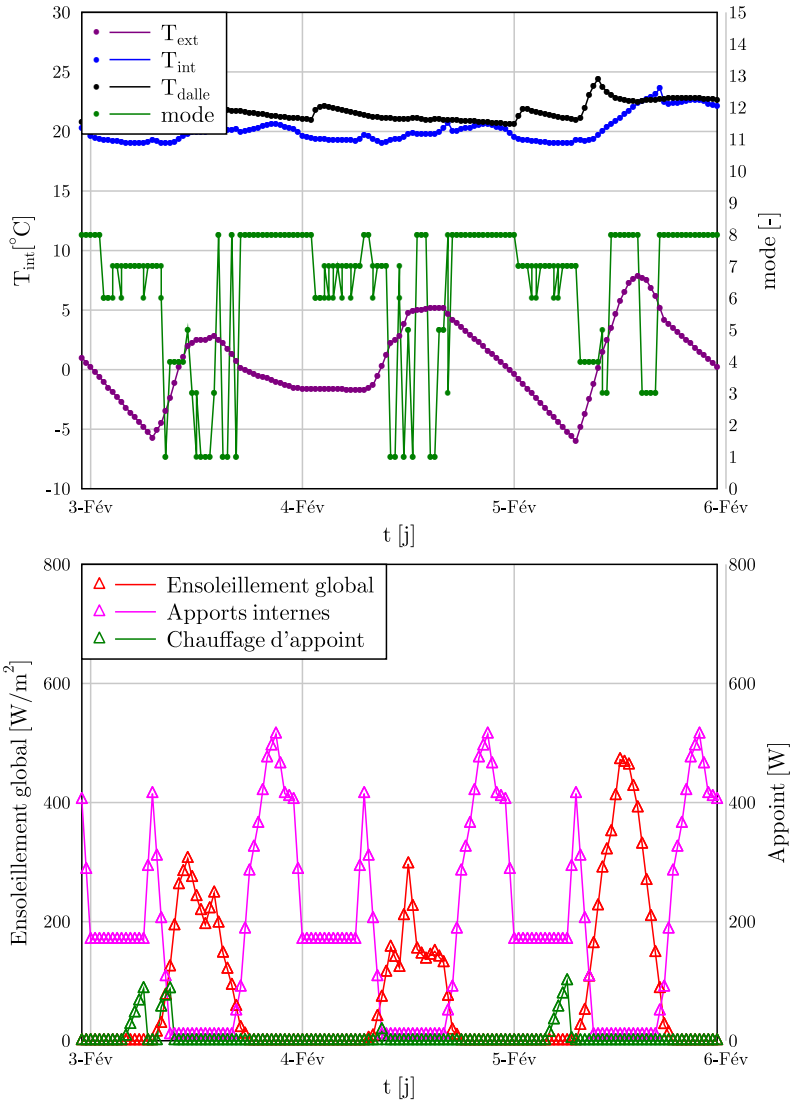

Figure 4.23 – *Fonctionnement de l'installation solaire sur le bâtiment BBC Double Murs (zone 1) du 3 au 6 Février pour le climat de Chambéry*

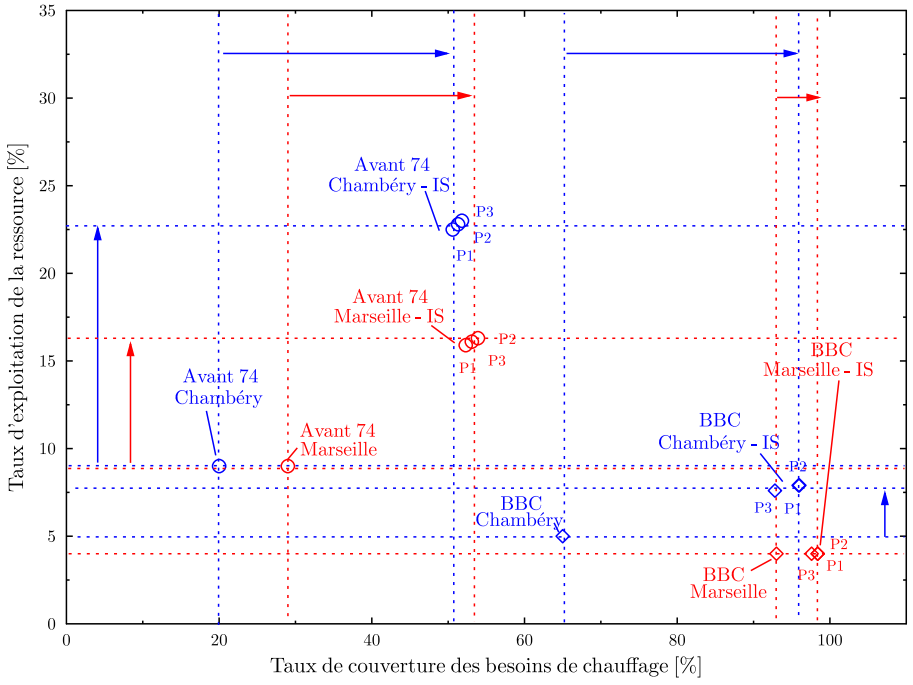

Figure 4.24 – *Taux de couverture et taux d'exploitation des bâtiments BBC et avant 1974 pour les climats de Chambéry et Marseille, avec et sans Installation Solaire (IS)*

Conclusion

L'ensemble de ces travaux a porté sur la contribution de l'inertie thermique dans le comportement énergétique des bâtiments et sa prise en compte dans la simulation thermique notamment durant la phase de conception. Tout d'abord on a présenté les enjeux de l'inertie thermique pour l'amélioration du confort d'été lorsqu'elle est couplée à la ventilation nocturne si les conditions climatiques sont favorables et également dans le cas d'une construction en climat tempéré lorsque l'exposition au rayonnement solaire et l'association à l'isolation extérieure sont favorisées. Bien que l'inertie thermique soit un atout pour stocker les apports gratuits dans la journée et les restituer ultérieurement, on a vu qu'il existait une problématique sur l'utilisation de l'inertie thermique en climat chaud principalement liée à l'importance de la variation jour/nuit de la température extérieure et du potentiel en ventilation nocturne. On a montré qu'il était donc nécessaire d'avoir recours à des méthodes qui permettraient d'orienter les choix architecturaux dès les premières phases de la conception où généralement ont lieu des décisions irréversibles et influentes sur le comportement du bâtiment. Par ailleurs, on a montré qu'il était possible de caractériser l'inertie thermique à différentes échelles et notamment à une échelle globale par la constante de temps du bâtiment, ce qui permet de créer un lien direct entre les propriétés des matériaux de construction et ses performances énergétiques.

Cette étude a ensuite fait l'objet d'une méthodologie de conception basée sur deux approches complémentaires : la première consiste à utiliser un outil simplifié appelé CoSPARK qui à partir de la connaissance de quelques éléments clés, permet de déterminer les caractéristiques de l'enveloppe qui seraient les plus appropriées en terme de constante de temps et de coefficient global de déperditions U_{bat}, ce qui facilite le choix de la composition de l'enveloppe du bâtiment en ce qui concerne les matériaux et les modes constructifs. La seconde approche permet de décrire le comportement détaillé du bâtiment à l'aide d'un modèle de simulation dynamique plus performant développé dans la plateforme SimSPARK nécessitant une meilleure connaissance des données architecturales.

Par la suite, on a comparé des résultats du modèle SimSPARK avec des mesures issues des maisons expérimentales de la plateforme INCAS de manière à réaliser un outil de référence. A l'occasion d'une campagne réalisée sur la maison en béton banché avec isolation par l'extérieur, on a étudié le comportement du bâtiment en phase

de décharge et de remontée en température et on a constaté par une analyse de sensibilité que les paramètres dont les effets s'opposaient à son évolution contribuaient à augmenter la constante de temps. En ayant recours à l'optimisation, on a pu rectifier la prise en compte de la répartition entre les zones du RDC et de l'étage du débit de ventilation soufflé (et par conséquent du chauffage) qui constitue un paramètre difficile à déterminer par la mesure sur cette maison de la plateforme. Néanmoins, il est possible d'améliorer les modèles de simulation thermique dynamique en approfondissant l'étude d'incertitude au niveau des mesures et des paramètres de la simulation. La qualité des résultats obtenus pour cette étude a permis de considérer le modèle SimSPARK suffisamment adapté pour constituer un modèle de référence dans l'élaboration de l'outil simplifié de conception CoSPARK.

Ensuite, on a établi une démarche fondée sur la définition d'un problème inverse qu'on a appliqué pour la conception d'un bâtiment résidentiel situé à Chambéry en se basant sur les données architecturales qui sont communes aux maisons expérimentales de la plateforme INCAS de l'INES. Le processus a également été testé sur un bâtiment résidentiel collectif à Cargèse. Les résultats ont montré qu'il était possible d'identifier un ensemble de solutions pour la constante de temps et le coefficient de transmission U_{bat} optimisant les performances énergétiques pour le confort d'été et d'hiver, pour orienter les concepteurs quant au choix des matériaux de construction et mieux prendre en compte l'inertie thermique dès la phase d'avant-projet. Ultérieurement, il sera envisagé de développer des méthodes d'optimisation qui à partir de la constante de temps et du coefficient U_{bat} permettraient de déterminer le cahier des charges des matériaux de construction en tenant compte de la compacité du bâtiment (et donc des surfaces d'échanges des parois opaques), et en regard des critères de coût et de bilan carbone. Il sera alors possible de déterminer les propriétés thermiques optimales et par report sur le diagramme d'Ashby de les identifier, et voire même d'inciter à l'élaboration de nouveaux matériaux. La simulation thermique dynamique servirait à ce moment-là à affiner le comportement du bâtiment et mieux estimer ses besoins énergétiques en phase de conception.

En outre, on s'est intéressé à l'amélioration de stratégies consistant à activer l'inertie thermique d'une part dans le cas d'une ventilation nocturne *adaptative* pour l'été et d'autre part à l'amélioration des consommations de chauffage en hiver dans le cas d'un plancher couplé à une installation solaire en utilisant le modèle de référence SimSPARK. Dans le premier cas, on a développé un algorithme de contrôle basé sur l'évaluation des moyennes glissantes de températures extérieures et intérieures. Une étude paramétrique a permis d'identifier le couple de températures "seuil" les plus appropriées pour le contrôle de ces moyennes de températures glissantes à la fois pour un bâtiment à faible et à forte inertie thermique. Par une comparaison des ventilations nocturnes adaptative et classique, on a montré que, outre les économies d'énergie réalisées, l'algorithme a été en mesure d'identifier les périodes où

la ventilation nocturne doit être activée et les périodes où elle ne le devrait pas, limitant ainsi considérablement les périodes de ventilation nocturne concomitantes avec le chauffage. D'autre part, en ce qui concerne l'application du chauffage solaire, on a implémenté et couplé les éléments de l'installation solaire avec le modèle d'un bâtiment dans SimSPARK et on a mis en oeuvre une logique de fonctionnement permettant d'exploiter les apports solaires par le stockage dans les planchers y compris durant les périodes de faible ensoleillement. En développant une analyse sur l'exploitation des ressources, deux applications ont montré qu'il était possible pour un bâtiment BBC, de tendre vers une autonomie énergétique et dans le cas d'un bâtiment ancien de réduire considérablement les besoins de chauffage, et cela pour deux climats différents. En perspective, en ayant recours à la simulation thermique dynamique, l'étude de l'exploitation de l'inertie thermique par l'intermédiaire de ces stratégies pourrait constituer un prolongement de la méthode de conception qui a été amorcée et qui favoriserait la construction de bâtiments plus autonomes en énergie et plus respectueux de l'environnement et de cette manière de relever le défi des bâtiments zéro énergie.

Annexes

Caractéristiques des maisons de la plateforme INCAS

Matériaux de construction	*Epaisseur* $[m]$	λ $(W/m.K)$	ρ $[kg/m^3]$	C_p $[J/kg.K]$
Roofmate	0.2	0.029	35	1400
Styrofoam	0.2	0.03	35	1400
Laine de verre iso 35	0.2	0.035	12	880
Laine de verre iso 32	0.1	0.032	12	880
Wallmate EXL-X	0.2	0.03	35	1400
Béton banché	0.15	1.75	2300	1000
Dalle pleine 16cm	0.16	2.5	2400	1000
Dalle pleine 4cm	0.04	2.5	2400	1000
Poutrelle entrevous	0.16	1.23	1300	648
Chape	0.08	2.75	2400	880
Carrelage	0.01	0.41	1200	1000
Enduit extérieur	0.015	1	1450	500
Enduit intérieur	0.01	0.43	1200	1000
Enduit hydrofuge	0.015	1	1800	1000
Tuiles	0.015	2.2	2700	753
Graviers	0.3	2	1600	900

Table 4.10 – Propriétés thermophysiques des matériaux de construction de la maison Béton Banché (BB)

Émissivité extérieure	0.9
Émissivité intérieure	0.9
Coefficient d'absorption extérieur	0.6
Coefficient d'absorption intérieur	0.6

Table 4.11 – Propriétés de surface des parois opaques

Modélisation du bâtiment dans l'environnement SimSPARK

Cette annexe résume les principaux modèles existants dans SIMSPARK qui ont été utilisés dans ce travail. Ces modèles ont été décrits plus précisément dans les manuscrits des thèses de ceux qui les ont implémentés dans SIMSPARK (Wurtz 1995 ; Musy 1999 ; Mora 2003 ; Cordeiro Mendonça 2004). L'approche nodale a été adoptée pour caractériser le comportement des bâtiments étudiés. Le principe de cette approche est de découper le bâtiment en zones thermiques. Pour chaque zone, à chaque instant, les variables d'état sont considérées comme uniformes. On y applique les lois de conservation de masse et d'énergie. Restent à caractériser correctement les transferts de masse et d'énergie en jeu entre ces zones et entre les zones et l'environnement extérieur du bâtiment.

Modèle de zone

Bilan massique sur l'air

Sur chaque zone, on réalise un bilan de masse d'air en considérant qu'il ne peut pas y avoir d'accumulation. La somme des débits massiques d'air entrant dans cette zone est donc nulle :

$$\sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{air,i} = 0 \tag{4.56}$$

Bilan thermique

On explicite ici le fait que la somme des flux entrant pendant un temps dt dans une zone thermique et du flux source est égale à la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier la température de l'air de la zone de dT_{air} pendant la même durée.

$$\left(\sum_{i=1}^{n} q_i + q_{source} \right) .dt = \rho_{air} c_{air} dT_{air} \tag{4.57}$$

La gestion de la dérivée temporelle de la température est réalisée directement par SPARK (thèse Pierre Tittelein [36]).

Vitrage extérieur	
Émissivité extérieure	0.837
Transmission solaire	0.842
Réflectance extérieure	0.076
Épaisseur $[m]$	0.004
Réflectance intérieure	0.076
Conductivité $[W/(m.K)]$	0.1
Émissivité intérieure	0.837

Argon	
Épaisseur $[m]$	0.016
Conductivité $[W/(m.K)]$	0.0163
C_p $[J/(kg.K)]$	521.9
Densité $[kg/m^3]$	1.782

Vitrage intérieur	
Émissivité extérieure	0.037
Transmission solaire	0.588
Réflectance extérieure	0.312
Épaisseur $[m]$	0.004
Réflectance intérieure	0.246
Conductivité $[W/(m.K)]$	0.1
Émissivité intérieure	0.837

Cadre	
U $[W/(m^2.K)]$	1.45
Fraction de cadre	0.15
Absorptivité	0.9
$U_{cadre+vitrage}$ $[W/(m^2.K)]$	1.3

Table 4.12 – Propriétés des vitrages

Épaisseur $[m]$	0.005
Transmission solaire	0.4
Réflexion solaire	0.5
Transmission du visible	0.4
Réflexion du visible	0.5
Émissivité thermique hémisphérique	0.9
Transmission thermique	0
Conductivité [W/(m.K)]	0.1

Table 4.13 – Propriétés des volets roulants

Heure d'ouverture des volets le matin	$7h$
Heure de fermeture des volets le soir	$20h$

Table 4.14 – Scénario des volets roulants pour la période d'hiver

Les flux entrant dans la zone thermique peuvent être soit des flux venant des parois, soit des flux venant des bouches d'entrée ou de sortie d'air, le flux entrant est alors calculé à partir de l'enthalpie de l'air liée à la température de soufflage :

$$q_i = \dot{m}_{airsoufflé}\ c_{air}\ T_{airsoufflé} \tag{4.58}$$

Modèles de transfert de chaleur

Les transferts de chaleurs à considérer pour caractériser les échanges entre les zones sont les transferts par conduction dans les parois ainsi que les échanges superficiels par convection et par rayonnement. On a donc au niveau de chaque surface considérée un bilan des flux de ce type (par convention, tous les flux sont pris ici convergents vers la surface) :

$$q_{cond} + q_{conv} + q_{ray} = 0 \tag{4.59}$$

Transfert de chaleur par conduction dans les parois

Le modèle dynamique adopté pour caractériser les transferts conductifs est de type différences finies 1D. Le mur est discrétisé en n tranches. Sur chacune de ces tranches, on réalise un bilan de densité de flux :

$$q"_{i+\frac{1}{2}} - q"_{i-\frac{1}{2}} = \rho C_p\ \Delta x\ \frac{\partial T_i}{\partial t} \tag{4.60}$$

Entre chaque tranche, la densité de flux est évaluée par une simplification 1D de la loi de Fourier :

Orientation	Menuiserie	Hauteur	Largeur	Surface
SUD	Porte fenêtre séjour (x2)	2.15	2.4	5.16
	Porte fenêtre chambres 1er étage (x2)	2.15	1.4	3.01
OUEST	Fenêtre cuisine	1.25	1	1.25
	Porte fenêtre repas	2.25	1	2.25
	Porte fenêtre chambre	2.25	1	2.25
EST	Fenêtre séjour	1.25	0.8	1
	Fenêtre sanitaires (x2)	1.1	0.6	1.32
NORD	Fenêtre cellier (x2)	1.1	0.8	0.88
La façade possède une porte (2.25m x 1m) ayant comme coefficient de transfert thermique 0.8 $W/[(m^2.K)]$.				

Table 4.15 – Dimensions des ouvertures comprenant vitrages + cadre

$$q"_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\lambda(T_i - T_{i+1})}{\Delta x} \tag{4.61}$$

Échanges par rayonnement

Rayonnement à l'intérieur du bâtiment Les échanges par rayonnement sont pris en compte par la méthode des enceintes fictives (Walton 1980). Son implémentation dans SIMSPARK est détaillée dans la thèse de Cordeiro Mendonça (2004). Son principe est le suivant : si l'on considère le rayonnement entre n surfaces, le rayonnement de la surface i avec les n-1 autres surfaces est rapporté à son rayonnement avec une surface unique f_i appelée enceinte fictive qui possède des caractéristiques de rayonnement qui sont des moyennes pondérées des caractéristiques des *n-1* autres surfaces.

Pour le rayonnement CLO, on peut donc calculer l'exitance primaire de fi et en déduire l'éclairement total de la surface *i*. On réalise ce calcul pour toutes les surfaces de la pièce considérée et comme le calcul des facteurs de forme est approché et qu'il ne vérifie pas la condition de complémentarité (leur somme n'est pas égale à 1) le bilan radiatif sur l'ensemble de la pièce est excédentaire. On calcule donc le reliquat d'énergie radiative par l'équation suivante :

$$q_{r,rel} = q_{r,abs} + q_{r,tr} - q_{r,D} - q_{r,d} \tag{4.62}$$

On redistribue ensuite ce reliquat sur toutes les surfaces en fonction de leur absorptivité puis on le recalcule jusqu'à obtenir un reliquat proche de zéro par itération. Pour le rayonnement GLO, on évalue la densité de flux de chaleur de rayonnement nette GLO pour la surface i en fonction de la température de f_i et on corrige cette grandeur en redistribuant le reliquat en fonction des propriétés radiatives des sur-

faces. Cette méthode approchée a l'avantage de prendre en compte le flux radiatif CLO qui peut ressortir par les fenêtres et d'éviter le calcul des facteurs de forme, ce qui simplifie grandement le code de calcul. Elle donne de bons résultats pour des géométries de pièces pas trop élancées ([16]).

Les données à fournir pour ce calcul, outre les caractéristiques radiatives des parois, sont l'ensemble des flux primaires direct et diffus des parois.

Rayonnement à l'extérieur du bâtiment Le rayonnement GLO est calculé à partir de la température du ciel, de la température du sol, de l'émissivité de la surface et de l'angle entre la surface considérée et l'horizontale :

$$q"_{GLO} = \sigma_0 \epsilon_p \left(T_{sp}^4 - \left(\frac{1 - cos\Theta}{2} \right) T_{sol}^4 - \left(\frac{1 + cos\Theta}{2} \right) T_{ciel}^4 \right) \tag{4.63}$$

On obtient aisément cette formule par la méthode des radiosités en considérant que les surfaces du ciel et du sol sont très grandes par rapport à la surface de la paroi.

Échanges superficiels par convection

Les échanges superficiels par convection sont pris en compte de façon simplifiée par l'intermédiaire de la loi de Newton :

$$q"_{conv} = h_c(T_s - T_{air}) \tag{4.64}$$

Le coefficient d'échange est choisi en fonction de la position de la paroi considérée (plafond, plancher, mur vertical) pour les surfaces intérieures des murs et déterminé en fonction de la vitesse du vent à l'extérieur.

Dans le cas où les coefficients de convection sont variables aux parois, les échanges par convection naturelle béton/ambiance intérieure φ_{conv,n_i} : à l'intérieur de la pièce est du essentiellement à la convection naturelle engendrée par la différence de température ΔT entre la paroi intérieure et l'ambiance et calculé par la relation suivante :

$$\varphi_{conv,i_2} = h_{conv,n_i} S \Delta T_2 \tag{4.65}$$

D'après l'ASHRAE [3], le coefficient de convection h_{conv,n_i} peut être calculé par la relation empirique suivante :

$$h_{conv,n_i} = C \left(\frac{\Delta T_2}{L} \right)^m \tag{4.66}$$

ou L est la longueur caractéristique de la paroi , C et m sont des coefficients empiriques dépendants de la configuration géométrique et de la nature de l'écoulement et sont déterminés expérimentalement ou par des considerations théoriques.

Table 4.16 – *Coefficients et exposants empiriques pour l'équation 4.66 [3]*

Plaques verticales	
- Petites plaques, écoulement laminaire	$h = 1.42(\Delta T/L)^{0.25}$
- Grandes plaques, écoulement *turbulent*	$h = 1.31(\Delta T/L)^{0.33}$
Plaques horizontales, orientées vers le *haut* quand chauffées ou vers le *bas* quand refroidies	
- Petites plaques, écoulement laminaire	$h = 1.32(\Delta T/L)^{0.25}$
- Grandes plaques, écoulement *turbulent*	$h = 1.52(\Delta T/L)^{0.33}$
Plaques horizontales, orientées vers le *bas* quand chauffées ou vers le *haut* quand refroidies	
- Petites plaques, écoulement laminaire	$h = 0.59(\Delta T/L)^{0.25}$

Le tableau (4.16) représente les différentes valeurs de C et m d'après les valeurs publiées dans ASHRAE [3].

Dans le cas de la comparaison du modèle du bâtiment en béton banché de la plateforme INCAS avec les mesures, les relations que nous avons utilisées sont :

- à la surface des planchers,

$$hc_{plancher} = a_c * |\frac{t_{surf} - t_{int}}{h}|^{0.25} \tag{4.67}$$

- à la surface des murs verticaux,

$$hc_{mur} = a_{mv} * |\frac{t_{surf} - t_{int}}{h}|^{0.25} \tag{4.68}$$

- à la surface des plafonds,

$$hc_{plafond} = a_p * |\frac{t_{surf} - t_{int}}{h}|^{0.25} \tag{4.69}$$

avec $a_c = 1.32$, $a_p = 0.59$ et $a_{mv} = 1.42$.

Bibliographie

[1] ISO 7730. *Moderate Thermal Environments- Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*, 1994.

[2] A.De Herde A.Liébard. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. Le Moniteur, 1996-2004.

[3] Refrigeration American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Fundamentals Handbook*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2001.

[4] K. A. Antonopoulos and E. Koronaki. Envelope and indoor thermal capacitance of buildings. *Applied Thermal Engineering*, 19(7) :743 – 756, 1999.

[5] K. A. Antonopoulos and E. P. Koronaki. On the dynamic thermal behaviour of indoor spaces. *Applied Thermal Engineering*, 21(9) :929 – 940, 2001.

[6] H. Asan. Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *Energy and Buildings*, 32(2) :197 – 203, 2000.

[7] H. Asan and Y.S. Sancaktar. Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28(2) :159 – 166, 1998.

[8] Michael-F Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2005.

[9] Michael-F Ashby. *Materials and the Environment, Eco-Informed Material Choice*. Elsevier, 2009.

[10] Baruch-Givoni. *Man, Climate and Architecture*. Applied science, London, 1981.

[11] Baruch-Givoni. *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van nostrand Reinhold, USA, 1994.

[12] Baruch-Givoni. *Climate considerations in Building and Urban Design*. John Wiley and sons, 1998.

[13] L. Chesne, T. Duforestel, and G. Rusaouen J.J. Roux. Exploitation des ressources de l'environnement par des bâtiments, résultats et indicateurs. *IBPSA France 2010*, 2010.

[14] D. Defer, J. Shen, S. Lassue, and B. Duthoit. Non-destructive testing of a building wall by studying natural thermal signals. *Energy and Buildings*, 34(1) :63 – 69, 2002.

[15] R.C. Eberhart and J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. *Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science*, pages 39–43, 1995.

[16] A.Roldan F.Allard, C.Inard. Caractérisation théorique et expérimentale du comportement thermique d'une cellule d'habitation perturbée par des rayonnements de courtes et grandes longueurs d'onde. *CNRS PIRSEM, Paris (Commanditaire), INSA de Lyon, LEH*, 1985.

[17] Milo E. Hoffman and Moshe Feldman. Calculation of the thermal response of buildings by the total thermal time constant method. *Building and Environment*, 16(2) :71 – 85, 1981.

[18] http ://www.assemblee-nationale.fr/13/rap off/i2141.asp. La performance énergétique des bâtiments : comment moduler la règle pour mieux atteindre les objectifs ? *Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques*, 2141(135).

[19] Balcomb J.D. Heat storage and distribution inside passive solar buildings. *Passive and Low Energy Architecture*, 1983.

[20] Kathryn J.McCartney and Fergus J.Nicol. Developing an adaptive control algorithm for europe. *Energy and Buildings*, 34 :623 – 635, 2002.

[21] LBNL. *SPARK 2.0 reference manual*. Lawrence Berkeley National Laboratory and Ayres Sowell Associates Inc, 2003.

[22] LBNL. *Energy Plus Engineering Reference, the reference to Energy plus calculations*. Lawrence Berkeley National Laboratory and Ayres Sowell Associates Inc, 2007.

[23] A.G. Loudon. Summertime temperatures in buildings without air conditioning. *Building Research Station Current Paper*, 47/68, 1968.

[24] Stephan Louis. *Modélisation de la Ventilation Naturelle pour l'Optimisation du Rafraîchissement Passif des Bâtiments*. Génie civil et sciences de l'habitat, Université de Savoie, Avril 2010.

[25] Kathryn J. McCartney and J. Fergus Nicol. Developing an adaptive control algorithm for europe. *Energy and Buildings*, 34(6) :623 – 635, 2002.

[26] J. H. Lynn Milbank, N.O. Thermal response and the admittance procedure. *BSE*, 42 :38–51, 1974.

[27] J.F. Nicol and M.A. Humphreys. Thermal comfort as a part of a self-regulating system. *Proceedings of the CIB Symposium on Thermal Comfort, Building Research Establishment,Watford,UK*, 1972.

[28] A.G. Petherbridge P. Limiting the temperatures in naturally ventilated buildings in warm climates. *Building Research Establishment*, 1974.

[29] prEN 15251. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, 2006.

[30] J. M. Roucoult, O. Douzane, and T. Langlet. Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural nighttime ventilation system in buildings. *Energy and Buildings*, 29(2) :129 – 133, 1999.

[31] L. Serres, A. Trombe, and J. H. Conilh. Study of coupled energy saving systems sensitivity factor analysis. *Building and Environment*, 32(2) :137 – 148, 1997.

[32] Edna Shaviv, Abraham Yezioro, and Isaac G. Capeluto. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy*, 24(3-4) :445 – 452, 2001.

[33] Louis Stephan. *Projet MaisonPassive,Rapport Final.* ANR-ADEME, 06 2011.

[34] Louis Stephan, Alain Bastide, and Etienne Wurtz. Optimizing opening dimensions for naturally ventilated buildings. *Applied Energy*, 88(8) :2791 – 2801, 2011.

[35] V.Zmrhal T. Matuska, T.Metzger. *Design tool KOLEKTOR 2.2 for virtual prototyping of solar flat-plate collectors.*

[36] Pierre Tittelein. *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique de bâtiments basse consommation.* PhD thesis, Université de Savoie, 2008.

[37] V. Torczon. On the convergence of pattern search algorithms. *SIAM Journal on Optimization*, 7(1) :1–25, 1997.

[38] P. T. Tsilingiris. On the thermal time constant of structural walls. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6) :743 – 757, 2004.

[39] P.T. Tsilingiris. Wall heat loss from intermittently conditioned spaces–the dynamic influence of structural and operational parameters. *Energy and Buildings*, 38(8) :1022 – 1031, 2006.

[40] Koray Ulgen. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 34(3) :273 – 278, 2002.

[41] Florentzos F. et al. Van der Maas J. Passive cooling by night ventilation. *European Conference on Energy Performance and indoor Climate in Buildings*, 2, 1994.

[42] V.Sambou. *Transferts thermiques instationnaires : vers une optimisation de parois de bâtiments*. Phd thesis, Université Paul Sabatier, France, 2008.

[43] M. Wall. Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. a comparison of simulation programs. *Energy and Buildings*, 26(2) :129 – 135, 1997.

[44] Michael Wetter. *GenOpt, Generic Optimization Program*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, version 3.0.0 edition, May 11 2009.

[45] William O. Wray and J.Douglas Balcomb. Sensitivity of direct gain space heating performance to fundamental parameter variations. *Solar Energy*, 23(5) :421 – 425, 1979.

[46] M.H. Wright. Direct search methods : One scorned, now respectable. 1996.

[47] E. WURTZ. *Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérauliques dans le bâtiment en environnement orienté objet*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1995.

[48] E. Wurtz, M. Musy, and L. Mora. Introduction of specific laws in zonal model to describe temperature fields and air flow patterns in mixed ventilated buildings. *Journal of the Human Environment System*, 3 :43–59, 1999.

[49] Lina Yang and Yuguo Li. Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation. *Energy and Buildings*, 40(11) :2052 – 2058, 2008.

Résumé

L'inertie thermique constitue un atout essentiel pour stocker l'énergie reçue par le bâtiment et la restituer quand cela est nécessaire : elle permet d'emmagasiner les apports gratuits issus du rayonnement solaire pour réduire les consommations énergétiques liées au chauffage en présence d'une isolation performante. En été, son association à la ventilation nocturne contribue à évacuer l'énergie stockée au cours de la journée limitant ainsi les surchauffes à l'intérieur du bâtiment.

Une exploitation optimale de l'inertie passe par une sélection appropriée des matériaux de construction lors de la phase d'avant-projet et par le développement de stratégies visant à exploiter leur capacité de stockage. Les outils de simulation thermique dynamique dont on dispose permettent de modéliser de façon assez précise les transferts de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment mais leur niveau de finesse n'est pas nécessairement adapté aux besoins des concepteurs au moment de faire les choix les plus fondamentaux. Néanmoins ils demeurent indispensables non seulement pour la validation de ces choix mais aussi pour le développement de méthodes destinées à améliorer l'exploitation de l'énergie avant de procéder à la réalisation d'un projet.

Ce travail a consisté à développer une méthodologie de conception basée sur deux approches complémentaires : la première approche permet de décrire le comportement détaillé du bâtiment à l'aide d'un modèle de simulation dynamique performant développé dans la plateforme SimSPARK qu'on a eu l'occasion de comparer aux mesures expérimentales de la plateforme INCAS. La seconde est basée sur le développement de l'outil simplifié CoSPARK qui à partir de la connaissance de quelques éléments clés, permet de déterminer les caractéristiques appropriées de l'enveloppe pour favoriser la performance énergétique des bâtiments.

La dernière partie de ce travail a été consacrée à l'optimisation de stratégies d'une part en activant l'inertie thermique dans le cas d'une ventilation nocturne *adaptative* pour l'été et d'autre part en réduisant les consommations de chauffage en hiver dans le cas d'un plancher couplé à une installation solaire en utilisant le modèle de référence SimSPARK.

Abstract

Thermal inertia is a key asset to store energy received by the building and release it when needed : in winter, when used with a good insulation, it can store solar heat gains available during the day (collected via different systems) and restitute them during the night thus reducing energy consumption. In summer, building thermal mass coupled with an efficient night ventilation helps remove the energy stored during the day, which limits overheating periods inside the building during the next day.

Optimal use of thermal inertia results from an appropriate selection of building materials during the preliminary design phase and the development of strategies to exploit their storage capacity. Actual thermal simulation tools allow for higher accuracy in heat transfer modeling through the building envelope. However, their level of precision is not necessarily adapted to the needs of designers during the design phase when making the first choices. Nevertheless, they remain indispensable not only for the validation of these choices but also to develop methods to improve the management of the energy prior to the completion of a project.

This work aimed to develop a design methodology based on two complementary approaches : the first method uses the accurate building response evaluated using a dynamic simulation model developed in SimSPARK simulation platform that we had the opportunity to compare with experimental measurements on the INCAS platform. The second one consists on using the results of a simplified tool (CoSPARK) to determine, with only few design key elements, the appropriate characteristics of the envelope that optimize the energy performance of the building.

The last part of this work exposes some strategies that help take full advantage of the thermal mass inertia ; on one hand, for summer comfort, with the use of an adaptive night ventilation control, and, on the other hand, for winter periods, by reducing heating consumption using a radiant floor heating coupled with a solar system.