AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

École doctorale IAEM Lorraine

Efficacité énergétique des bâtiments : modélisation hygrothermique et commande prédictive économique régularisée

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 17 décembre 2020

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(mention automatique, traitement du signal et des images)

par

Farah Gabsi

Composition du jury

Rapporteurs	Laurent Autrique	Professeur à l'Université d'Angers
	Nicolas Heraud	Maître de Conférences HDR à l'Université de Corse
Examinateurs	Dominique Sauter	Professeur à l'Université de Lorraine
	Stéphane Thil	Maître de Conférences à l'Université de Perpignan
Directeurs de thèse	Frédéric Hamelin	Professeur à l'Université de Lorraine
	Nathalie Sauer	Professeur à l'Université de Lorraine

Centre de Recherche en Automatique de Nancy — UMR 7039
Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance — EA 3096

CRAN

lgipm
Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance

Cette thèse a été préparée dans les laboratoires suivants.

Centre de Recherche en Automatique de Nancy. (CRAN)



Campus Sciences
Boulevard des Aiguillettes
BP 70239
54506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex
France

☎ (33)3 72 74 52 90
Site http://www.cran.univ-lorraine.fr/

Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance. (LGIPM)



Bâtiment A de l'UFR MIM
3 rue Augustin Fresnel
BP 45112
57073 Metz Cedex 03
France

☎ (33)3 72 74 79 98
Site http://lgipm.univ-lorraine.fr/

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières iii

Liste des figures v

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes vii

Liste des paramètres et variables ix

Remerciements xi

Introduction 1

1 Contexte, état de l'art et problématique 7
1.1 Modélisation hygrothermique des bâtiments . . . 9
1.1.1 Modèle de type boite noire . . . 11
1.1.2 Modèle de type boite blanche . . . 12
1.1.3 Modèle de type boite grise . . . 16
1.1.4 Analyse et positionnement . . . 18
1.2 Commande Prédictive (MPC) . . . 18
1.2.1 Commande prédictive quadratique (MPC) . . . 20
1.2.2 Commande prédictive économique (EMPC) . . . 21
1.2.3 Indicateurs clés de performance (ICP) . . . 23
1.2.4 Commande prédictive régularisée (RMPC) . . . 24
1.2.5 Analyse et positionnement . . . 30
1.3 Commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC) . . . 30
1.3.1 Principales défaillances d'un système de CVC . . . 31
1.3.2 Commande active tolérante aux défauts . . . 32
1.3.3 Analyse et positionnement . . . 35
1.4 Conclusion . . . 36

2 Modélisation du confort hygrothermique des bâtiments multi-zones 37
2.1 Introduction . . . 39
2.2 Modélisation hygrothermique d'une zone unique . . . 39
2.2.1 Hypothèses générales de modélisation . . . 40
2.2.2 Bilans de chaleur et d'humidité dans les murs / fenêtres . . . 41
2.2.3 Principaux échanges de masse et de chaleur dans une zone . . . 43
2.3 Confort hygrothermique . . . 47

2.3.1 Confort thermique . . . 47
2.3.2 Confort hygrométrique . . . 49
2.4 Modélisation du confort hygrothermique des bâtiments multi-zones . . . 50
2.4.1 Modélisation nodale . . . 50
2.4.2 Modélisation sous forme d'état . . . 56
2.5 Conclusion . . . 62

3 Commande prédictive économique ℓ_p-régularisée 63
3.1 Introduction . . . 65
3.2 Modèle hygrothermique . . . 65
3.3 Commande prédictive économique (EMPC) . . . 68
3.4 Commande prédictive régularisée (RMPC) . . . 71
3.4.1 Critère régularisé . . . 71
3.4.2 Pénalisation ℓ_p . . . 72
3.5 Confort hygrothermique dans les bâtiments multizones . . . 77
3.5.1 Fonction d'objectifs régularisée . . . 77
3.5.2 Commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC) . . . 79
3.5.3 Paramètre de régularisation optimal . . . 81
3.6 Minimisation du critère régularisé . . . 82
3.7 Conclusion . . . 89

4 Application à la plateforme "Eco-Sûr" 91
4.1 Présentation de la plateforme . . . 93
4.2 Modélisation de la plateforme . . . 93
4.2.1 Modèle thermique sous Simscape . . . 93
4.2.2 Modèle hygrothermique nodal par analogie électrique . . . 94
4.2.3 Modèle d'état hygrothermique . . . 95
4.2.4 Identification paramétrique . . . 98
4.2.5 Résultats de simulation . . . 99
4.3 Commande prédictive économique ℓ_ϵ-régularisée . . . 101
4.4 Conclusion . . . 106

Conclusions et perspectives 109

Références bibliographiques 113
Modélisation . . . 113
Commande . . . 115
Tolérance aux pannes . . . 120
Général . . . 121

Index 125

LISTE DES FIGURES

1 Évolution de la consommation énergétique des bâtiments et réglementations thermiques. 2

1.1 Différents modèles thermiques de murs. 17
1.2 Insertion d'une source solaire rayonnante dans un circuit $2R-1C$ pour symboliser le comportement thermique d'un mur. 18
1.3 Sphère unité $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);h\big)=1$ dans l'espace tridimensionnel. 29
1.4 Boule unité $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);h\big)\leq 1$ dans l'espace tridimensionnel. 29
1.5 Isocritères de $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);1\big)$ vs. $\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_p$ avec $p\ll 1$. 29
1.6 Système de Chauffage, Ventilation et Climatisation (CVC) avec différents types de ventilo-convecteurs. 33

2.1 Modèle de transfert thermique d'un mur s_1 séparant une zone z_1 de l'extérieur. 52
2.2 Modèle de transfert thermique d'une fenêtre à double vitrage séparant une zone z_1 de l'extérieur. 53
2.3 Modèle de transfert thermique d'une fenêtre à double vitrage et d'un mur séparant une zone z_1 de l'extérieur. 54
2.4 Modèle de transfert hydrique d'un mur s_1 séparant une zone z_1 de l'extérieur. 55
2.5 Stratégies de couplage en co-simulation. 59
2.6 Modélisation hygrothermique d'un bâtiment à deux zones. 61
2.7 Schéma de couplage parallèle pour un bâtiment à deux zones. 61

3.1 Trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ (en rouge) paramétrée en λ suivie par $\mathbf{u}^{*}_{\lambda,p}$ dans le plan u_1-u_2. 73
3.2 Tracé des isocritères et de la surface tridimensionnelle de $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)}$ dans le plan u_1-u_2. 74
3.3 Trajectoire $\Gamma_{\beta,p}$ (en noir) paramétrée en β suivie par $\mathbf{u}^{**}_{\beta,p}$ dans le plan u_1-u_2. 76
3.4 Trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ (en rouge) paramétrée en λ suivie par $\mathbf{u}^{*}_{\lambda,p}$ dans le plan u_1-u_2. 78
3.5 Schéma de commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC). 81
3.6 Courbe en L $\big(\|\mathbf{u}^{*}\|_p^{\min(1,p)}$ en ordonnée en fonction de $J^1(\mathbf{u}^{*})$ en abscisse$\big)$ associée au problème d'optimisation (3.16) pour différentes valeurs de p. . 82
3.7 Scénario de commande planifié de $k+1$ à $k+4$ pour un intervalle de confort T_{c} constant. 84
3.8 Scénario de commande planifié de $k+1$ à $k+4$ pour un intervalle de confort T_{c} dépendant du temps. 84
3.9 Scénario de commande planifié de $k+1$ à $k+5$ en utilisant l'approche itérative proposée pour un intervalle de confort T_{c} dépendant du temps. . . 86

3.10 Prédiction de $\left(\phi_{z_1}(\%, k+j), T_{z_1}^{op}(k+j)\right)$ pour $j = 1, ..., N_p$ en utilisant toutes les combinaisons de commandes possibles. 87
3.11 Prédiction de $\left(\phi_{z_1}(\%, k+j), T_{z_1}^{op}(k+j)\right)$ pour $j = 1, ..., N_p$ en utilisant l'approche itérative proposée. 88
3.12 $\left\{\phi_{z_1}(\%, k+j), T_{z_1}^{op}(k+j)\right\}$ (points bleus), $\left\{\phi_{z_1}^{\xi,\eta}(\%, k+j), T_{z_1}^{\xi,\eta}(k+j)\right\}$ (cercles et disques rouges), $\left\{\phi_{z_1}^{*\eta}(\%, k+j), T_{z_1}^{*\eta}(k+j)\right\}$ (disques rouges). 89

4.1 plateforme "Eco-Sûr". 93
4.2 Modèle Simscape de la zone R&D (z_1). 94
4.3 Modèle Simscape de la plateforme "Eco-Sûr". 95
4.4 Modèle hygrothermique nodal de la plateforme "Eco-Sûr". 96
4.5 Décomposition de $\mathcal{G}_{\mathbf{z}}$ en composantes connexes et biconnexes. 97
4.6 Perturbations et entrées de commande de la zone z_1 sur la période 20/12/2019 - 06/01/2020. 99
4.7 Température et humidité relative mesurées et estimées dans la zone z_1. . . 99
4.8 Températures ambiante, opérative et de contact estimées dans la zone z_1 avec ou sans prise en compte du flux énergétique solaire. 100
4.9 Influence de la conductivité thermique λ_{s_j} des murs extérieurs sur les variables T_{z_1}, T_{z_1,s_j} et $\phi_{z_1}(\%)$. 101
4.10 Éclairement énergétique solaire (W/m^2) dans les zones z_i. 104
4.11 Perturbations exogènes (en plus de celles liées à l'éclairement énergétique solaire). 104
4.12 Températures opératives $T_{z_1}^{op}(k)$ (K, ligne bleue continue) et $T_{z_5}^{op}(k)$ (K, ligne rouge pointillée) pour différents jeux de paramètres ψ_{z_1}, α_2. 105
4.13 Scénarios de commande optimale pour différents jeux de paramètres ψ_{z_1}, α_2. 106
4.14 Coût énergétique cumulé (kWh) pour différents jeux de paramètres ψ_{z_1}, α_2. 107

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

Terme	Description	Pages
AHU	"Air Handling Unit" est le terme anglais pour CTA.	vii
BEMS	"Building Energy Management System" est le terme anglais pour GTEB.	vii
CRAN	Centre de Recherche en Automatique de Nancy.	i, 5, 128
CTA	"Centrale de Traitement d'Air" est le terme français pour AHU, qui fait référence à l'équipement utilisé pour réguler et faire circuler l'air dans les systèmes de CVC.	11, 12, 23, 34, 43, 79, 111
CTD	Commande Tolérante aux Défauts.	vii
CVC	"Chauffage, Ventilation et Climatisation" est le terme français pour HVAC. Un système à volume d'air variable (VAV) est un système de CVC qui fait varier le débit d'air à une température constante. Cela contraste avec un système à volume d'air constant (CAV), qui fournit un débit d'air constant à des températures variables.	v, 3, 5, 9, 14–16, 20–23, 30–36, 39, 40, 62, 65, 68, 79, 80, 109–111
EMPC	"Economic Model Predictive Control" est le terme anglais pour "commande prédictive économique".	21–24, 30, 34, 79, 106, 107, 110
FTC	"Fault-Tolerant Control" est le terme anglais pour CTD.	32, 36, 65, 79
FTMPC	"Fault-Tolerant Model Predictive Control" est le terme anglais pour "commande prédictive tolérante aux défauts".	v, 35, 79–81, 88
GTEB	"Gestion Technique et Energétique des Bâtiments" est le terme français pour BEMS.	3, 34, 125
HVAC	"Heating, Ventilation and Air Conditioning" est le terme anglais pour CVC.	vii

Terme	Description	Pages
ICP	"Indicateur Clé de Performance" est le terme français pour KPI.	23, 24, 68, 125
KPI	"Key Performance Indicator" est le terme anglais pour ICP.	vii
LGIPM	Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance.	i, 128
MPC	"Model Predictive Control" est le terme anglais pour "commande prédictive".	9, 14, 19–21, 23, 24, 26, 33, 34, 36, 68, 96, 110–112
NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.	3
RMPC	"Regularized Model Predictive Control" est le terme anglais pour "commande prédictive régularisée".	25–28, 30, 65, 82, 88, 89
SIMBAD	"SIMulator of Building And Devices" est une boite à outils de simulation MATLAB® / Simulink.	15, 16
TRNSYS	"TRaNsient SYstems Simulation" est un logiciel de simulation thermique dynamique.	10, 15, 16
VAV	"Volume d'Air Variable" est un terme pour qualifier une CTA ou une unité terminale de traitement d'air (FCU).	32, 34, 35, 79

LISTE DES PARAMÈTRES ET VARIABLES

Terme	Description	Pages
C_{m,s_j}	Capacité d'humidité spécifique (kg/(kg · Pa)) du matériau s_j	42
$C_{P^{\text{DA}}}$	Capacité thermique massique de l'air sec (= 1 006 J/(kg·K))	14, 40, 41, 43, 44, 52, 54
C_{P,s_j}	Capacité thermique massique (J/(kg·K)) du matériau sec s_j	13, 42, 98
$C_{P^{\text{V}}}$	Capacité thermique massique de la vapeur d'eau (= 1 860 J/(kg·K))	13, 14, 40
$\delta^{\text{P}}_{s_j}$	Perméabilité à la vapeur d'eau (kg/(m·s·Pa)) du matériau s_j ($\frac{e_{s_j}}{\delta^{\text{P}}_{s_j}} = R^{\text{H}}_{s_j}$ est la résistance à la diffusion)	ix, 13, 14, 42, 43, 98
$\delta^{\text{L}}_{s_j}$	Perméabilité à l'eau (kg/(m·s·Pa)) du matériau s_j	14
e_{s_j}	Épaisseur (m) du matériau s_j	ix, 41–43, 98
h_c	coefficient d'échange thermique par convection (W/(m^2·K)) ≈ 8.3 (à l'intérieur) et ≈ 34.4 (à l'extérieur ; conditions normales)	ix, 41, 43, 52, 53, 57, 98
h_m	coefficient d'échange massique par convection (m/s) ≈ $7e^{-9}h_c$	41, 43, 55, 57, 98
h_r	Coefficient d'échange radiatif (≈ 6 W/(m^2·K))	48
h_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau (= $2.5e^6$ J/kg)	13, 14, 41, 42, 44, 55
λ_{s_j}	Conductivité thermique (W/(m·K)) du matériau s_j ($(\frac{e_{s_j}}{\lambda_{s_j}} = R^{\text{T}^\circ}_{s_j}$ est la résistance thermique de conduction)	vi, ix, 13, 42, 43, 98, 100, 101
n_a	Nombre de moles d'air par m^3 (≈ 41 mol/m^3)	41
$P^{\text{C}}_{s_j}$	Pression capillaire (Pa) au coeur du matériau s_j	14
$P^{\text{DA}}_{z_i}$	Pression d'air sec (Pa) dans la zone z_i	40, 41
ϕ_{z_i}	Humidité relative de l'air dans la zone z_i	11, 12, 49, 50, 68, 69, 87

Terme	Description	Pages
ϕ_{s_j}	Humidité relative de l'air au coeur du matériau s_j	13
ϕ_{out}	Humidité relative de l'air extérieur	11, 99
$P^{\mathrm{V}}_{z_i}$	Pression partielle de vapeur (Pa) dans la zone z_i	14, 40, 41, 49
$P^{\mathrm{V}}_{s_j}$	Pression partielle de vapeur (Pa) au coeur du matériau s_j	13, 14, 42
$P^{\mathrm{V}}_{z_i,s_j}$	Pression partielle de vapeur (Pa) au contact entre la zone z_i et le matériau s_j	42
R^{DA}	Constante gazeuse de l'air sec (= 287.1 J/(kg·K))	14, 40, 41
$\rho^{\mathrm{DA}}_{z_i}$	Densité (kg/m^3) de l'air sec dans la zone z_i	14, 40
ρ^{V}_{out}	Densité (kg/m^3) de vapeur d'eau à l'extérieur	43, 56, 57, 60, 99
ρ_{s_j}	Densité (kg/m^3) du matériau sec s_j	13, 42, 98
$\rho^{\mathrm{V}}_{z_i}$	Densité (kg/m^3) de vapeur d'eau de la zone z_i	40, 41, 43, 44, 49, 56, 67, 69
$\rho^{\mathrm{V}}_{z_i,s_j}$	Densité (kg/m^3) de vapeur d'eau au contact de la zone z_i avec le matériau s_j	41–43
$\rho^{\mathrm{V}}_{s_j}$	Densité (kg/m^3) de vapeur d'eau au cœur du matériau s_j	13, 14, 42, 43, 67
R^{V}	Constante de gaz pour la vapeur d'eau (= 461.5 J/(kg·K))	14, 40, 69
σ	Facteur d'ajustement du transfert de chaleur latente	42
S_{z_i,s_j}	Surface de contact (m^2) du matériau s_j avec la zone z_i	41, 42, 47, 98
T_{C}	Température de confort (K)	v, 49, 68, 69, 83, 84, 86
T_{out}	Température extérieure (K)	11, 43, 49, 56, 57, 60, 99, 101
T_{z_i}	Température (K) de l'air ambiant dans la zone z_i	11, 12, 14, 40, 41, 43, 44, 47, 49, 56, 67, 69, 85, 86
T_{s_j}	Température (K) au cœur du matériau s_j	13, 42, 43, 67
T_{z_i,s_j}	Température de contact (K) entre la zone z_i et le matériau s_j	41–43, 47, 69
$T^{op}_{z_i}$	Température opérative (K) dans la zone z_i	47, 49, 50, 56, 67–69, 83–87, 100, 103
V_{z_i}	Volume (m^3) de la zone z_i	14, 40, 41, 98
V_{s_j}	Volume (m^3) du matériau s_j	42, 98

REMERCIEMENTS

Nombreux sont ceux à qui je dois des remerciements pour m'avoir aidée, soutenue ou accompagnée pendant ces trois années de thèse. C'est pour leur exprimer ma gratitude et ma reconnaissance que je leur dédie cette page. Tout d'abord, je remercie M. Frédéric HAMELIN, mon directeur de thèse, pour tout son enthousiasme, ses nombreux conseils, sa patience, sa confiance sans faille et son aide permanente pendant ces trois années. Je remercie également Mme Nathalie SAUER, ma co-directrice de thèse, pour les discussions scientifiques et les conseils qu'elle m'a donnés. Je leur suis reconnaissante pour la formation que j'ai pu acquérir au cours de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à M. Laurent AUTRIQUE et M. Nicolas HERAUD pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail. Je leur suis reconnaissante pour la lecture attentive de mon manuscrit, leurs remarques et leurs compliments. Je remercie M. Dominique SAUTER et M. Stéphane THIL pour leur participation au jury. Je suis honorée par l'attention et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

L'équipe pédagogique a toujours été disponible pour me guider. Je tiens à remercier tout particulièrement M. Patrick SIBILLE pour tous les documents et conseils, tant sur les cours que j'ai suivis que pour les démarches administratives. Je remercie dans ce même cadre Mme Danielle DANDONNEAU, M. Samir ABERKANE, M. Christophe AUBRUN, M. Jean-Christophe PONSART et à nouveau M. Dominique SAUTER. La plupart d'entre eux ont également été mes professeurs dans le passé et je les remercie aujourd'hui de m'avoir si bien formée.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du CRAN et du LGIPM pour leur aide, et tout particulièrement M. Nidhal REZG, M. Didier MAQUIN, M. Dominique SAUTER, M. El-Hadi DJERMOUNE, M. David BRIE, M. Taha BOUKHOBZA et M. Didier THEILLIOL pour avoir tout mis en œuvre pour que cette thèse soit financée. Sans eux, je ne serais pas en train d'écrire ces remerciements aujourd'hui.

Je remercie également l'équipe dirigeante de la Faculté des Sciences et Technologies, en particulier Mme Danielle EVRARD et M. Stéphane FLAMENT pour le soutien qu'ils m'ont apporté avant la thèse.

Merci à mes copains de longue date (vous êtes ma deuxième famille) Jihene, Wafa, Jawher, Vincent et récemment Julia pour ces innombrables week-ends et moments passés avec vous qui me permettent de penser à d'autres choses et d'en profiter tout simplement. Je n'oublie pas mes sœurs de cœur Mouna ZRIBI et Mouna JAOUA.

Enfin, je remercie chaleureusement mes parents, mes sœurs, mon beau-frère et mon chéri, ainsi que toute ma famille pour leur soutien moral et leurs encouragements. Merci à Massin, mon neveu qui a égayé ma vie depuis 6 ans et récemment à Anyr, le petit dernier. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et mon amour. Cette thèse leur est dédiée.

Je remercie tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidée pendant ces trois années de thèse.

INTRODUCTION

Si la nécessité de maîtriser le réchauffement climatique et la raréfaction des ressources, notamment du pétrole, ont été établies à l'échelle mondiale, les moyens de résoudre ces problèmes et la répartition des efforts entre les continents et les pays font l'objet de débats animés. Depuis la déclaration de Rio de 1992 sur l'environnement et le développement, l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto en 2005, le Grenelle de l'environnement en 2007 et l'objectif de la récente COP 21 de la Conférence de Paris (2015) de limiter les émissions de carbone dans l'atmosphère, l'optimisation énergétique des bâtiments est l'un des plus grands défis des prochaines décennies. L'utilisation de la climatisation / chauffage en est un bon exemple. Les conséquences d'une mauvaise utilisation sont multiples : consommation d'énergie excessive, diffusion de réfrigérant dont le confinement n'est pas parfait et dont les émissions dans l'atmosphère ont un impact négatif sur l'environnement. Selon le Ministère de la Transition Écologique, en France, ce secteur est le premier consommateur d'énergie de tous les secteurs économiques, avec une consommation par habitant d'environ 1.1 tep (tonne d'équivalent pétrole). Ce secteur représente 43.5% de la consommation d'énergie du pays en 2018 (Source SDES), et génère 23% des gaz à effet de serre (GES). Contrairement aux autres secteurs, on estime que la consommation annuelle moyenne devrait continuer à croitre dans le futur sachant qu'elle est déjà proche de 400 kWh d'énergie primaire par m^2 chauffé. Actuellement, elle est utilisée dans le secteur résidentiel-tertiaire à 32 % pour le chauffage, 46 % pour des usages spécifiques et 22 % pour l'eau chaude sanitaire et la cuisson. Selon le Grenelle de l'environnement, la volonté de réduire les émissions de CO_2 et l'augmentation inévitable des coûts énergétiques due à l'épuisement progressif des ressources imposent de ramener la consommation moyenne d'énergie primaire de l'ensemble des bâtiments en service en 2050 à environ 100 kWh/m^2 .

Dans ce contexte, les deux tiers des maisons construites avant 1975 nécessitent un véritable assainissement énergétique. En effet, étant donné l'âge de nombreux bâtiments, la qualité des matériaux utilisés pour leur construction, le manque d'entretien régulier et les mauvaises performances de leurs systèmes énergétiques, les maisons existantes sont les principaux consommateurs d'énergie [Com25]. Selon une étude publiée en 2018 par l'agence immobilière Guy Hoquet, 83% des maisons en France sont encore trop consommatrices d'énergie, et la plupart des biens sont classés D (40% du parc) et E (30%). Cela est principalement dû à l'âge moyen des maisons existantes. Dans une perspective de cycle de vie, certains pays ont adopté des politiques innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique des enveloppes et des équipements des bâtiments, et pour promouvoir l'utilisation de sources d'énergie renouvelables (SER), tout en assurant le confort thermique intérieur des occupants. Les normes et réglementations thermiques qui en résultent évo-

luent constamment pour encourager ou imposer aux parties prenantes des actions visant à maîtriser cette augmentation de la demande d'énergie et à mieux la gérer par des actions dites de "réponse à la demande" [Gen1]. La figure 1 montre les limites de consommation d'énergie des bâtiments. La réglementation thermique de 2012 (RT 2012) s'applique aux Bâtiments Basse Consommation (BBC), tandis que la réglementation environnementale de 2020 (RE 2020) correspond aux Bâtiments à Énergie POSitive (BEPOS). Les labels de

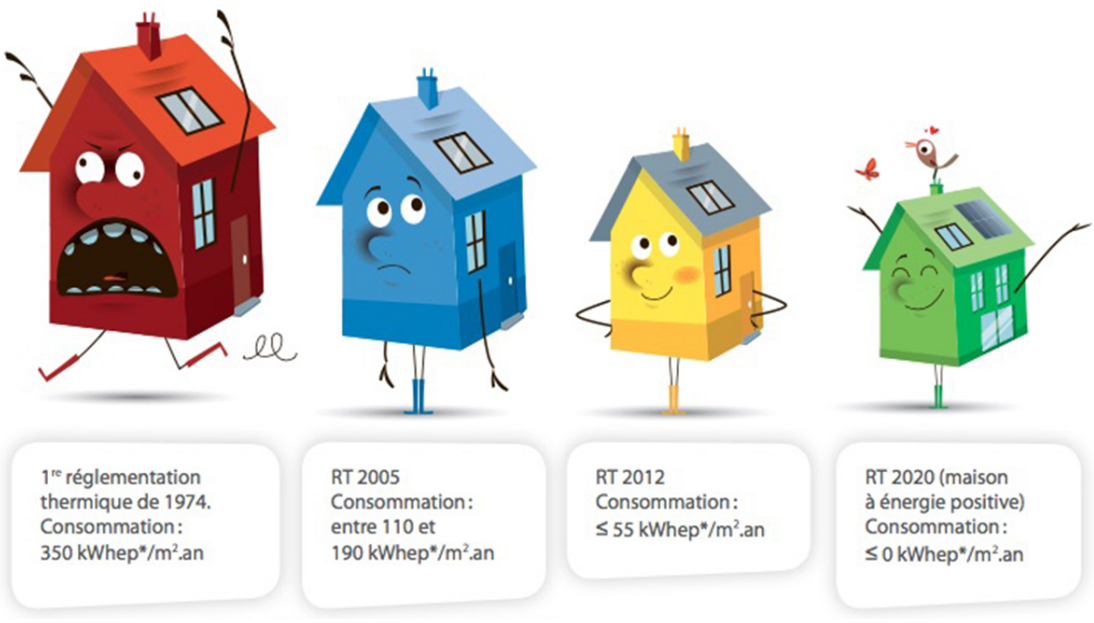


FIGURE 1 – Évolution de la consommation énergétique des bâtiments et réglementations thermiques.

qualité environnementale ou de performance énergétique (HQE, maisons passives, bâtiments basse consommation) ont amené le secteur de la construction à se concentrer principalement sur l'isolation des enveloppes de bâtiment [Gen14], [Com44]. Les bâtiments nouvellement construits et rénovés sont de plus en plus étanches et efficaces en termes d'isolation. Cela a pour effet de réduire les besoins de chauffage en hiver, mais comme les matériaux utilisés pour les bâtiments et leur orientation optimisent l'apport d'énergie solaire, la demande de refroidissement en été augmente. D'autres solutions ont un impact positif sur la consommation d'énergie des bâtiments neufs ou existants :

- Mettre en œuvre une nouvelle technologie de production d'énergie : les bâtiments peuvent facilement intégrer les énergies renouvelables. Par exemple, le toit peut être équipé de panneaux photovoltaïques pour compenser ou même dépasser la consommation d'énergie des habitants ;
- Développer et renforcer le système de ventilation, afin que les fenêtres ne soient pas systématiquement ouvertes quand il fait froid ou chaud et perdent l'avantage de l'isolation thermique ;
- Optimiser les systèmes de chauffage et de climatisation (poêle à bois, pompe à chaleur, géothermie) et un meilleur contrôle de la température (thermostat, chaudière à haut rendement).

Enfin, pour atteindre l'objectif global de décarbonation d'ici le milieu du siècle, il faut mettre en œuvre des stratégies visant à améliorer le fonctionnement des systèmes de chauffage et de refroidissement qui contribuent de manière significative à la consommation nette d'éner-

gie des bâtiments (40 à 60% de l'électricité totale dans les bâtiments commerciaux) [Com32]. L'objectif est de concevoir des stratégies qui ont un impact réel sur la consommation, tout en respectant les contraintes d'exploitation et en maintenant un confort acceptable.

Dans ce contexte, le concept de domotique, qui remonte aux années 1980, consiste à mettre en réseau, coordonner et automatiser le fonctionnement des équipements électriques dans les maisons ou les bâtiments afin d'économiser l'énergie et d'améliorer le confort et la sécurité des bâtiments. La raison pour laquelle la généralisation de la domotique n'a pas eu lieu est en partie due à l'inertie inhérente au développement des modes de vie, et aussi parce que les consommateurs avaient des attentes trop élevées vis-à-vis des techniques et des technologies qui ne pouvaient pas y répondre. En outre, en raison de la très longue durée de vie des bâtiments (1% de renouvellement par an), la dynamique de changement dans ce domaine est nécessairement très lente. Avec le développement des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication. (NTIC), l'émergence et l'intégration des énergies renouvelables (énergie éolienne, photovoltaïque), les objectifs environnementaux, et l'émergence des compteurs communicants (interfaces entre les réseaux électriques publics et des bâtiments privés, qui ouvrent des perspectives d'innovations majeures en aval des compteurs électriques), les premiers signes clairs du développement des bâtiments intelligents sont apparus en 2010.

Tout cela a conduit à l'émergence de bâtiments dits intelligents, qui couvrent les concepts de "maison intelligente" (Smart home), de "bâtiment à énergie positive" (Smart building) et de "réseaux électriques intelligents" (Smart grids). Ces réseaux intelligents couplent la transmission d'énergie et d'informations en un système complet appelé gestion technique et énergétique des bâtiments (GTEB), dont le but est de superviser et de gérer tous les systèmes installés dans le bâtiment (les équipements de CVC, l'éclairage, la vidéosurveillance, etc.). Une GTEB est construite autour d'un poste informatique équipé de logiciels de supervision (Supervisory Control And Data Acquisition – SCADA), de capteurs, d'automates et d'actionneurs. Les unités de traitement sont chargées de centraliser les informations provenant du dispositif de contrôle / commande, tandis que l'unité centrale de gestion relaie les ordres de commande à divers équipements via les actionneurs. Les bâtiments intelligents peuvent être considérés comme une technologie de Smart grids appliquée aux réseaux privés. Il s'agit de mettre l'intelligence sur le réseau électrique d'un bâtiment pour promouvoir et améliorer la gestion de l'énergie et des équipements électriques sur le réseau. L'efficacité des bâtiments intelligents se reflète dans la qualité de la gestion énergétique des équipements de consommation, de production et de stockage, afin que la solution puisse bénéficier du label BEPOS (Positive Energy Building). Aujourd'hui, grâce à des avancées technologiques majeures, une nouvelle génération de solutions de bâtiments intelligents utilise la technologie IoT (capteurs / actionneurs connectés) et l'analyse avancée des données, qui seront bientôt popularisées. Grâce à l'intelligence embarquée dans les équipements du bâtiment, l'éco-efficacité énergétique des bâtiments est devenue la priorité absolue des milieux politiques et des institutions.

On constate que le terme "intelligent" peut se référer à diverses technologies, configurations, pratiques et types de logiciels, et qu'il n'existe pas de définition uniforme. Pour [Gen5], une "maison intelligente" désigne une résidence équipée d'un réseau de haute technologie, qui connecte des capteurs et des dispositifs, des équipements et des fonctions pouvant être surveillées, accessibles ou contrôlés à distance, et qui fournit des services

répondant aux besoins de ses habitants. D'autres auteurs se concentrent sur la nature systémique de la maison, en mettant l'accent sur l'intégration ou la coopération de différents éléments. Pour [Gen15], la maison intelligente est un environnement domestique, avec une intelligence ambiante et des fonctions de contrôle automatique, qui peut répondre au comportement de ses habitants et leur fournir divers services. La société de conseil Berg Insight [Gen3] divise les "systèmes de maison intelligente" en sept catégories :

- systèmes de sécurité et de contrôle d'accès ;
- systèmes de gestion de l'énergie et de contrôle du confort ;
- systèmes audiovisuels et de divertissement ;
- systèmes d'éclairage et de contrôle des fenêtres ;
- systèmes de soins de santé et d'aide à la vie quotidienne ;
- équipements ménagers ;
- robotique de service.

Le travail effectué au cours de la thèse et décrit dans ce manuscrit fait partie de la deuxième catégorie. Comme les besoins énergétiques des bâtiments et le confort thermique intérieur sont généralement des exigences contradictoires, les procédures d'optimisation cherchant à faire des compromis entre les deux font l'objet de nombreux travaux [Com47], [Com48]. Néanmoins, ce problème est toujours d'actualité, car la coordination de systèmes intelligents de contrôle du confort capables de gérer au mieux leur consommation d'énergie en est encore à ses débuts et rend la gestion de ces systèmes par l'utilisateur très compliquée. Actuellement, les stratégies de gestion énergétique des bâtiments sont principalement basées sur une chaîne de règles logiques. Bien que cette approche présente des avantages certains, notamment lorsqu'elle est mise en œuvre sur des automates programmables, il est difficile de faire face aux différentes situations complexes qui peuvent être rencontrées (prix de l'énergie variable, contraintes de puissance, capacité de stockage de l'énergie, grands bâtiments). L'utilisation de méthodes de contrôle avancées pour mettre en œuvre des stratégies efficaces de gestion de l'énergie est une solution intéressante pour réduire les besoins énergétiques de l'exploitation des bâtiments. Un grand nombre d'études ont montré que, par rapport aux méthodes de contrôle traditionnelles, les méthodes de contrôle avancées peuvent permettre d'économiser beaucoup d'énergie [Com22]. Parmi les stratégies de commande potentielles, la commande prédictive présente de réels avantages dans le contexte spécifique de l'optimisation de la performance énergétique des bâtiments. En effet, elle prédit dynamiquement le comportement thermique et énergétique du bâtiment par une modélisation dynamique explicite, et effectue des ajustements proactifs pour optimiser la performance révélée par un critère. Elle est donc largement utilisée pour le contrôle des bâtiments intelligents. À cet égard, de nombreux travaux lui sont consacrés pour atteindre les objectifs suivants :

- haut niveau de confort thermique et de qualité de l'air intérieur ;
- haute efficacité énergétique.

Néanmoins, comme le montre l'état de l'art dans ce domaine présenté dans le chapitre suivant, peu de travaux abordent la modélisation hygrométrique des bâtiments. Bien que l'ASHRAE recommande de fixer l'humidité relative entre 40 et 60% pour assurer la santé et le confort des personnes [Gen51], les travaux se concentrent davantage sur la modélisation thermique. Du point de vue de la commande prédictive elle-même, à notre connaissance, aucune étude n'a pris en compte une fonction de coût combinant les aspects économiques, les indicateurs de confort hygrothermique exprimés en fonction des variables microclima-

tiques déterminant le confort, et les besoins de fonctionnement de certains équipements. Ce travail de thèse cible ces différents aspects en développant une méthodologie de simulation du comportement hygrothermique des bâtiments multi-zones existants et une stratégie originale de commande prédictive économique régularisée. Cette dernière est basée sur les prévisions météorologiques, les prévisions de confort intérieur et le comportement des utilisateurs dans les bâtiments afin d'assurer le confort hygrothermique dans les zones occupées tout en minimisant la consommation d'énergie.

Le manuscrit de thèse est divisé en quatre parties. Tout d'abord, le sujet de thèse est positionné dans un contexte scientifique grâce à un état de l'art dédié aux bâtiments intelligents sur les aspects de modélisation, de commande et d'accommodation aux défauts. La deuxième partie se concentre sur la synthèse de modèles hygrothermiques des bâtiments orientés contrôle. Les processus de transfert de chaleur et d'humidité et de pertes / gains d'énergie sont étudiés à cette fin. Un ensemble de modèles d'état est obtenu, qui peut être utilisé pour simuler globalement ou de manière coopérative le comportement hygrothermique des bâtiments multizones. Après avoir précisé le concept de confort hygrothermique, les données microclimatiques telles que la température opérative, la température radiante et l'humidité sont estimées dans chaque zone. Dans la troisième partie, une stratégie originale de commande prédictive économique régularisée prenant en compte des termes de pénalités en norme ℓ_ϵ est proposée. L'objectif est notamment d'optimiser la stratégie de commande des équipements de climatisation / chauffage assurant le confort hygrothermique des occupants tout en réduisant significativement leur consommation d'énergie. L'intérêt premier de la stratégie proposée est qu'elle permet de prendre en compte le stress causé par les démarrages / arrêts successifs et trop fréquents de certains équipements (pompes à chaleur, VMC, etc.) par le biais des termes de régularisation. Elle peut également limiter le nombre d'actionneurs et offrir des propriétés intéressantes pour une stratégie de commande dégradée par des défauts d'actionneurs. Dans ce contexte, La tolérance des schéma de commande prédictive à certaines défaillances d'actionneurs est également une propriété considérée. Ce dernier point est important car des dysfonctionnements se produisent régulièrement dans les systèmes CVC des bâtiments existants, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité énergétique et du confort des occupants. Afin d'éviter tout risque d'explosion combinatoire, un algorithme itératif original est proposé pour synthétiser en ligne la stratégie de commande prédictive proposée. La quatrième partie illustre les différents résultats de modélisation et de commande obtenus sur la plateforme Éco-Sûr du CRAN située à Nancy (France).

Ce travail de thèse a conduit à plusieurs communications dans des conférences internationales avec comité de lecture et fait l'objet de deux articles soumis à des revues internationales :

[Mod14] F. Gabsi, F. Hamelin et N. Sauer, « Hygrothermal Comfort Modeling of Multi-Zone Buildings, » soumis à « Journal of Building Performance Simulation »

[Com17] F. Gabsi, F. Hamelin, N. Sauer et al., « Regularized Economic Model Predictive Control for Building Automation and Control Systems, » soumis à « Energy and Buildings »

[Com18] F. Gabsi, F. Hamelin, N. Sauer et al., « ℓ_ϵ-Regularized Economic Model Predictive Control for Thermal Comfort in Multizone Buildings, » in *Proceedings of the 9th*

International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems, SMARTGREENS, Prague, Czech Republic : SCITEPRESS, mai 2020, pp. 137-148

[Tol4] F. Gabsi, F. Hamelin, N. Sauer et al., « Fault-Tolerant Economic Model Predictive Control for Building Temperature Regulation Using ℓ_ε-Regularization, » in *4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol)*, (Casablanca, Morocco), sept. 2019, pp. 232-237

[Com51] J. J. Yamé, F. Gabsi, T. Darure et al., « Optimality Condition Decomposition Approach to Distributed Model Predictive Control, » in *American Control Conference (ACC)*, (Philadelphia, PA, USA), juill. 2019, pp. 742-747

[Com16] F. Gabsi, F. Hamelin et N. Sauer, « Hygrothermal Modeling and MPC-Based Control for Energy and Comfort Management in Buildings, » in *7th International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, (Kuala Lumpur, Malaysia), mai 2018, pp. 156-161

[Mod13] F. Gabsi, F. Hamelin et N. Sauer, « Building Hygrothermal Modeling by Nodal Method, » in *8th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT)*, (Singapore), mai 2018, pp. 1103-1108

[Mod15] F. Gabsi, F. Hamelin, R. Pannequin et al., « Energy Efficiency of a Multizone Office Building : MPC-Based Control and Simscape Modelling, » in *6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, (Porto, Portugal), avr. 2017, pp. 227-234

CHAPITRE 1

CONTEXTE, ÉTAT DE L'ART ET PROBLÉMATIQUE

Sommaire du présent chapitre

1.1 Modélisation hygrothermique des bâtiments **9**
- 1.1.1 Modèle de type boite noire 11
- 1.1.2 Modèle de type boite blanche 12
- 1.1.3 Modèle de type boite grise 16
- 1.1.4 Analyse et positionnement 18

1.2 Commande Prédictive (MPC) **18**
- 1.2.1 Commande prédictive quadratique (MPC) 20
- 1.2.2 Commande prédictive économique (EMPC) 21
- 1.2.3 Indicateurs clés de performance (ICP) 23
- 1.2.4 Commande prédictive régularisée (RMPC) 24
- 1.2.5 Analyse et positionnement 30

1.3 Commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC) **30**
- 1.3.1 Principales défaillances d'un système de CVC 31
- 1.3.2 Commande active tolérante aux défauts 32
- 1.3.3 Analyse et positionnement 35

1.4 Conclusion **36**

Au cours de la dernière décennie, la modélisation et le contrôle de l'énergie dans les bâtiments sont devenus de plus en plus importants et de nombreuses études ont porté sur l'élaboration de stratégies de commande visant à réduire la consommation nette d'énergie des bâtiments. L'efficacité d'une stratégie de commande optimale dépend en grande partie de la qualité du modèle utilisé pour sa synthèse [Com43]. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort de vie des bâtiments, un modèle thermique précis est essentiel pour la conception et l'ajustement de la loi de commande et la simulation de ses performances. L'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) porte sur le modèle de transfert de chaleur, d'air et d'humidité de l'ensemble du bâtiment. Selon l'AIE, le couplage entre ces phénomènes est crucial pour l'optimisation énergétique future des bâtiments. Ce chapitre présente un état de l'art des diverses méthodes développées pour modéliser et contrôler les flux hygrothermiques à l'intérieur des bâtiments afin d'assurer un certain confort tout en minimisant leur consommation d'énergie. La présentation se concentre uniquement sur les techniques de commande prédictive (MPC) et les modèles de bâtiments qui permettent leur synthèse (en tenant compte de la dynamique des bâtiments et des systèmes de CVC). Sachant que certains équipements peuvent souffrir de défaillances ayant un impact financier important (par exemple, les compresseurs des systèmes de CVC), les méthodes de commande existantes qui prennent en compte l'occurrence de certaines défaillances sont également présentées dans le contexte des bâtiments.

1.1 Modélisation hygrothermique des bâtiments

La modélisation du comportement énergétique des bâtiments est devenue un domaine de recherche interdisciplinaire, impliquant des concepts dans les domaines du génie électrique et électronique, du génie mécanique, du génie civil et de la construction. Selon [Com9], deux modèles de base différents doivent être pris en compte lors de la mise en œuvre d'une MPC pour un bâtiment et son système de CVC :

- le modèle de bâtiment et de CVC orienté vers le contrôle, représentant le comportement thermodynamique du bâtiment, utilisé par la MPC pour l'optimisation en ligne ;
- les modèles de perturbation qui prédisent le comportement des variables non contrôlées qui affectent la réponse dynamique du système.

Bien que les deux modèles ci-dessus soient toujours nécessaires pour mettre en œuvre la MPC, un autre modèle est souvent requis aux stades de la conception et du prototypage. Il s'agit du modèle de simulation de bâtiment, qui est une représentation virtuelle, éventuellement avec une grande précision, du système contrôlé nécessaire pour fermer la boucle de contrôle dans la simulation.

La recherche sur la modélisation énergétique des bâtiments est principalement axée sur la structure topologique du bâtiment. Le couplage des modèles thermiques et des modèles de flux d'air prévaut généralement sur les modèles de flux d'air hygrothermiques entièrement couplés [Gen36]. Dans l'analyse conventionnelle des flux d'air multizone, le système de bâtiment est idéalisé comme un ensemble de zones et de points de raccordement de conduits reliés par des chemins de flux d'air discrets (avec des résistances à l'écoulement). La pression du vent et la température de l'enveloppe dans les zones et les conduits sont spécifiées comme conditions limites et d'entrée. On suppose que la température et les substances (polluants) ne changent pas dans l'espace d'une zone et ne modifient pas la

densité de l'air. Cette hypothèse est connue sous le nom de "zone bien mélangée". Le volume de chaque zone est réduit à un point ou à un sommet, et l'inconnue qui lui est attribuée est la pression totale de vapeur d'eau ou la température ambiante. Ensuite, les équations régissant le comportement hygrothermique global du système sont définies en supposant la conservation des flux de masse et d'énergie (sans stockage d'eau et d'énergie ou leur valeur est considérée comme quasi-stable). Enfin, ces équations sont résolues en supposant qu'il existe un champ de pression hydrostatique dans chaque zone.

Peu d'études portent sur la modélisation des flux de chaleur et d'humidité dans les bâtiments. Cependant, la migration de l'humidité a un impact significatif sur la performance énergétique de l'enveloppe, la qualité de l'environnement intérieur et la durabilité de la structure. En effet, l'accumulation d'humidité dans les matériaux de construction peut provoquer de la corrosion, réduire la résistance mécanique des matériaux de construction et favoriser la croissance de moisissures [Gen37] et d'autres phénomènes à la surface des murs. D'un point de vue énergétique, lors des gelées hivernales, la forte teneur en humidité de l'enveloppe du bâtiment augmente considérablement le coefficient de transfert thermique, ce qui entraine une consommation d'énergie plus élevée. D'un point de vue sanitaire, les moisissures constituent l'une des principales sources de pollution de l'air intérieur et sont particulièrement nocives pour la santé humaine [Gen13], [Gen51]. Des études ont montré que lorsque l'humidité relative d'un matériau atteint 80% ou plus, les moisissures se développent rapidement à température ambiante. En outre, des changements défavorables de la température ambiante et de l'humidité relative peuvent causer des dommages physiques à différents matériaux (tels que le bois) en raison de leur hygroscopicité et de leur réponse dimensionnelle à l'adsorption et à la désorption [Gen8]. Tous ces effets négatifs d'un mauvais contrôle de l'humidité dans les bâtiments justifient des recherches sur le transfert simultané de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction et les enveloppes poreuses.

Les méthodes de modélisation peuvent être divisées en trois catégories [Mod22] :

- les modèles de type boite blanche qui supposent une connaissance détaillée des différents processus et interactions du système. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas une construction physique du système pour évaluer ses performances. Ainsi, dans le cadre de la modélisation du comportement énergétique des bâtiments, ces modèles conviennent généralement pour la prévision préliminaire de la demande d'énergie et la conception de la charge du système. Les outils de simulation énergétique les plus courants (tels que EnergyPlus, TRaNsient SYstems Simulation (TRNSYS), ESP-r et DOE-2) utilisent ce type d'approche. Ils intègrent les contraintes physiques dans la modélisation des éléments de construction et nécessitent donc une grande quantité de documentation de conception. Bien que ces modèles soient très précis, ils ne sont pas directement adaptés à la synthèse des lois de commande en raison de leur grande complexité ;
- les modèles de type boite noire basés sur les données d'entrée / sortie du système. Ils sont développés en ajustant les paramètres du modèle au comportement historique du système et ne nécessitent pas une compréhension complète du système ou du processus. Ce type de modèle est particulièrement adapté à la prédiction du comportement des processus lorsque la connaissance déterministe *a priori* de la relation physique entre l'entrée et la sortie n'est pas définie de manière univoque (par exemple, l'évolution des perturbations climatiques et des perturbations liées au comportement des occupants) ;

— les modèles de type boite grise situés entre les types boîte blanche et boîte noire. Ils conservent la description physique du système qu'ils représentent et peuvent utiliser des méthodes d'identification pour estimer les paramètres du système. Les paramètres de réglage de ces modèles incluent la dynamique du système physique décrit. La modélisation physique semi-déterministe utilise une analogie avec le circuit RC d'un réseau électrique pour expliquer la thermodynamique du système.

1.1.1 Modèle de type boite noire

Cette méthode est entièrement basée sur des données expérimentales et fournit généralement des modèles précis qui peuvent être utilisés pour prédire la température et l'humidité dans une zone donnée. Traditionnellement, on considère que les réseaux de neurones artificiels donnent de meilleurs résultats que les modèles à paramètres linéaires. La suite de ce paragraphe décrit les principaux travaux récents utilisant cette stratégie de modélisation pour des bâtiments multi-zones de tailles différentes. La structure des différents modèles est également présentée.

Dans [Mod24], les modèles paramétriques linéaires classiques "Box-Jenkins" (BJ), "Autoregressive and Moving Average with Exogenous Variables" (ARMAX) et "Output-Error" (OE) sont utilisés pour prédire la température et l'humidité relative des bureaux d'un immeuble commercial moderne à Londres sur différents horizons temporels.

$$\begin{cases} y_{\text{OE}}(k) = \sum_{i=1}^{7} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} \cdot u_i\,(k - nk_i) + e(k) \\ y_{\text{BJ}}(k) = \sum_{i=1}^{7} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} \cdot u_i\,(k - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} \cdot e(k) \\ y_{\text{ARMAX}}(k) = \sum_{i=1}^{7} \frac{B_i(q)}{A(q)} \cdot u_i\,(k - nk_i) + \frac{C(q)}{A(q)} \cdot e(k) \end{cases} \tag{1.1}$$

Les mêmes auteurs [Mod25] ont également étudié des modèles autorégressifs à variables exogènes, soit linéaires (ARX), soit non linéaires basés sur des réseaux de neurones (NNARX). Le modèle ARX défini comme suit est une forme particulière du modèle ARMAX :

$$y_{\text{ARX}}(k) = \sum_{i=1}^{7} \frac{B_i(q)}{A(q)} \cdot u_i\,(k - nk_i) + \frac{1}{A(q)} \cdot e(k) \tag{1.2}$$

avec $y(k)$ estimant soit la température ambiante $T_{z_i}(k)$, soit l'humidité relative $\phi_{z_i}(\%, k)$. Les entrées $u_i(k)$ sont :

— la température extérieure $T_{out}(k-j)_{nk_1 \le j \le nb_1}$ en °C ;
— l'humidité relative extérieure $\phi_{\text{out}}(k-j)_{nk_2 \le j \le nb_2}$ en % ;
— l'humidité relative de l'air d'alimentation $\phi_{\text{A}}(k-j)_{nk_3 \le j \le nb_3}$ en % qui est liée à l'air provenant des centrales de traitement d'air (CTA) et passant par les ventilo-convecteurs ;
— la température de l'air d'alimentation $T_{\text{A}}(k-j)_{nk_4 \le j \le nb_4}$ en °C qui est liée à l'air provenant de la CTA et circulant à travers les ventilo-convecteurs ;
— le débit d'air d'alimentation $Q_{\text{A}}(k-j)_{nk_5 \le j \le nb_5}$ en m^3/s qui est lié à l'air provenant

de la CTA et circulant à travers les ventilo-convecteurs ;
- la température de l'eau réfrigérée $T_C(k-j)_{nk_6 \leq j \leq nb_6}$ en °C qui circule à l'intérieur des ventilo-convecteurs et qui provient des refroidisseurs ;
- la température de l'eau chaude $T_H(k-j)_{nk_7 \leq j \leq nb_7}$ en °C qui circule dans les ventilo-convecteurs et qui provient des chaudières ;
- la concentration ambiante en dioxyde de carbone $C_{CO_2}(k-j)_{nk_8 \leq j \leq nb_8}$ en ppm (parties par million).

Quant au modèle NNARX, il est tel que :

$$\hat{y}\left(k, \theta_{\text{NNARX}}\right) = F_j\left(\sum_{u=1}^{N_q} W_{j,u} \cdot f_u\left(\sum_{i=1}^{N_u} \varphi_i(k) \cdot w_{u,i} + w_{u,o}\right)\right) + W_{j,o} \tag{1.3}$$

où N_q est le nombre d'unités cachées et N_u est le nombre de variables d'entrée ; $W_{j,u}$ représente le vecteur des poids de connexion des neurones cachés dans la couche de sortie ; $w_{u,i}$ représente la matrice de poids des N_u entrées et des N_q unités cachées ; $w_{u,o}$ et $W_{j,o}$ sont les biais des unités cachées et de la couche de sortie, respectivement ; $\varphi_i(k)$ est le vecteur contenant les variables de régression du modèle ARX. Dans cette étude, f_u est considéré comme une fonction tangente hyperbolique et F_j comme une fonction linéaire ; enfin, $j = 1$ car seule la sortie $T_{z_i}(k)$ ou $\phi_{z_i}(\%, k)$ est prédite par simulation. Les modèles de prédiction de la température et de l'humidité relative sont conçus pour des périodes différentes (30 min à 3h à l'avance). La structure optimale du réseau est déterminée après avoir élagué le réseau entièrement connecté à l'aide de l'algorithme "Optimal Brain Surgeon" (OBS). Cela permet d'éliminer les éléments qui ont le moins d'impact sur les erreurs de sortie du réseau, d'éviter le sur-apprentissage et de limiter la complexité du modèle.

Les résultats montrent que tous les modèles fournissent d'assez bonnes prédictions, mais que les performances du modèle NNARX non linéaire sont meilleures que celles du modèle à paramètres linéaires.

Dans la lignée de ces travaux, un modèle de prédiction basé sur les réseaux de neurones à rétropropagation est établi dans [Mod27] pour prédire la température et l'humidité relative de l'air intérieur sur un horizon temporel de 6 à 72 heures. Le bâtiment expérimental est l'entrepôt d'une usine de tabac à Chongqing, une région typique de la Chine avec une forte humidité, des étés chauds et des hivers froids. Le modèle de prédiction utilise une base de données en ligne et présente l'avantage de ne pas nécessiter de données telles que la vitesse du vent, le rayonnement solaire, les propriétés thermodynamiques des matériaux de construction, le rapport fenêtre-mur, etc. Les données d'essai ont été utilisées pour déterminer les meilleurs paramètres du modèle de réseau neuronal.

1.1.2 Modèle de type boite blanche

Cette deuxième technique vise à générer des modèles analytiques ou basés sur la physique. Bien que ces modèles nécessitent la spécification ou l'identification de certains paramètres physiques (contrairement aux modèles basés sur des données), ils ont l'avantage de pouvoir estimer d'autres variables microclimatiques qui ne sont pas directement mesurées [Mod12], telles que la température opérative. Cette dernière reflète la température ressentie par le corps humain dans une zone, et est particulièrement utile pour formuler des

stratégies de contrôle afin d'assurer le confort thermique des occupants. Nous la définirons plus en détail dans le chapitre 2.

Plusieurs modèles théoriques (Künzel et Liu) ont été développés, mais il n'existe pas de modèle unifié pour décrire le transfert de chaleur et la migration de l'humidité dans l'enveloppe d'un bâtiment. Cela est dù à la plus grande complexité du mécanisme de transfert d'humidité. De plus, ces transferts de chaleur et d'humidité se produisent généralement simultanément dans un processus fortement couplé. Peu de travaux ont été réalisés sur la modélisation hygrothermique des bâtiments multizones. [Mod16] passe en revue les principales méthodes utilisées pour modéliser les systèmes énergétiques des bâtiments qui ont été développées et adoptées jusqu'en 2016. L'accent est mis sur les travaux de modélisation impliquant la formulation de stratégies de commande. Le reste de ce paragraphe a pour but de passer en revue et de discuter les principales méthodes et modèles actuels. La résolution spatiale du problème est une question clé à aborder. L'annexe 41 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) classe les modèles en quatre catégories : très fin, fin, intermédiaire et grossier.

[Mod10] propose une analyse comparative des modèles théoriques de Künzel et Liu, qui ont été testés dans une double chambre d'essai climatique. Ces modèles sont populaires mais pas encore entièrement validés. Les recherches menées dans le cadre de cette étude montrent que les deux modèles sont précis et adaptés à la simulation hygrothermique dans la gamme hygroscopique. Dans les zones proches d'une absorption excessive d'humidité (humidité relative inférieure mais proche de 95 %), le modèle de Liu est plus précis que le modèle Künzel, mais il est plus complexe. Le modèle de Künzel utilise l'humidité relative $\phi_{s_j}(\%, t)$ comme potentiel d'entraînement de l'humidité. Dans ce modèle, le transfert d'humidité dans un milieu poreux est considéré comme un processus de diffusion pure, qui est décrit par la loi de Fick. Les équations régissant la chaleur et l'humidité sont alors données par :

$$\begin{cases} \left(\rho_{s_j} \cdot C_{P,s_j} + \rho^{\mathrm{v}}_{s_j} \cdot C_{P^{\mathrm{v}}}\right) \cdot \dfrac{\partial T_{s_j}}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{s_j} \cdot \dfrac{\partial T_{s_j}}{\partial x}\right) + h_v \cdot \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\delta^{\mathrm{p}}_{s_j} \cdot \dfrac{\partial P^{\mathrm{v}}_{s_j}}{\partial x}\right) \\ \dfrac{\partial \rho^{\mathrm{v}}_{s_j}}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\delta^{\rho}_{s_j} \cdot \dfrac{\partial \rho^{\mathrm{v}}_{s_j}}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\delta^{\mathrm{p}}_{s_j} \cdot \dfrac{\partial P^{\mathrm{v}}_{s_j}}{\partial x}\right) \end{cases} \tag{1.4}$$

avec $\delta^{\rho}_{s_j}$: coefficient de transmission capillaire (m^2/s). Pour ce modèle, la diffusion de vapeur et le transfert d'eau liquide sont décrits par la loi de Fick. Mais le transfert capillaire de l'eau liquide est une sorte de "flux", et non de "diffusion". De plus, les diffusions de vapeur et d'eau liquide dans les matériaux de construction sont opposées, ignorant l'interaction des deux "diffusions", et les traitant comme deux processus indépendants. Le modèle de Liu utilise la température et l'humidité relative comme potentiels de transfert d'humidité pour éviter les discontinuités potentielles à l'interface entre deux milieux poreux différents. Dans ce modèle, la diffusion de vapeur est décrite par la loi de Fick et le transfert d'eau liquide est décrit par la loi de Darcy. La diffusivité de l'humidité $\delta^{\rho}_{s_j}$ comprend non seulement le transfert d'eau liquide, mais aussi la diffusion de vapeur d'eau.

Récemment, [Mod5] a proposé une méthode pour étudier l'influence des occupants sur la performance hygrothermique d'une pièce. Les équations de bilan massique et énergétique

utilisées pour atteindre cet objectif sont données à l'échelle d'une zone z_i par :

$$\begin{cases} \dfrac{R^{\mathrm{DA}}}{R^{\mathrm{V}}} \cdot \dfrac{\rho^{\mathrm{DA}}_{z_i}(t) \cdot V_{z_i} \cdot P^{El}_{z_i}(t)}{\left(P^{El}_{z_i}(t) - P^{\mathrm{V}}_{z_i}(t)\right)^2} \cdot \dfrac{\partial P^{\mathrm{V}}_{z_i}(t)}{\partial t} = \sum_{\xi} g^{\xi}_{z_i}(t) \\ \rho^{\mathrm{DA}}_{z_i}(t) \cdot V_{z_i} \cdot \left(C_{P^{\mathrm{DA}}} + \dfrac{R^{\mathrm{DA}}}{R^{\mathrm{V}}} \cdot \dfrac{P^{\mathrm{V}}_{z_i}(t)}{P^{El}_{z_i}(t) - P^{\mathrm{V}}_{z_i}(t)} \cdot C_{P^{\mathrm{V}}} \right) \cdot \dfrac{\partial T_{z_i}(t)}{\partial t} = \sum_{\xi} q^{\xi}_{z_i}(t) \\ \qquad\qquad + (C_{P^{\mathrm{V}}} \cdot T + h_v) \cdot \sum_{\xi} g^{\xi}_{z_i}(t) \end{cases} \tag{1.5}$$

où $P^{El}_{z_i}(t)$ est la pression atmosphérique et où les différents paramètres sont spécifiés dans la liste de la page ix. $\sum_{\xi} q^{\xi}_{z_i}(t)$ est l'échange de chaleur avec les différentes sources intérieures, avec les murs par convection et avec l'environnement extérieur par ventilation. $\sum_{\xi} g^{\xi}_{z_i}(t)$ correspond aux sources / puits de vapeur internes et à l'échange de vapeur d'eau avec les surfaces environnantes par convection et avec l'environnement extérieur par ventilation. La procédure de modélisation hygrothermique développée dans le chapitre 2 de cete thèse est basée sur ces équations d'équilibre qui ont l'avantage d'être relativement simples à considérer dans le cas d'une MPC. En revanche, les équations de conservation de la masse et de l'énergie régissant la migration dans les matériaux poreux sont aux dérivées partielles et ne sont donc pas considérées en faveur d'autres équations plus approximatives mais mais structurées plus simplement. La conservation de la masse prend en compte la transmission de la vapeur d'eau et de l'eau liquide décrite par les lois de Fick et Darcy :

$$\frac{\partial \rho^{\mathrm{V}}_{s_j}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(- \delta^{\mathrm{L}}_{s_j} \cdot \frac{\partial P^{\mathrm{C}}_{s_j}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\delta^{\mathrm{P}}_{s_j} \cdot \frac{\partial P^{\mathrm{V}}_{s_j}}{\partial x} \right) \tag{1.6}$$

Dans [Mod28], en intégrant l'enveloppe du bâtiment, l'environnement intérieur, les systèmes de CVC et les mécanismes de génération de chaleur et d'humidité intérieures, un modèle holistique de la chaleur, de l'air et de l'humidité a été développé dans le contexte d'un bâtiment à zone unique. Plus précisément, le modèle de l'enveloppe du bâtiment est d'abord décrit par des équations aux dérivées partielles. En tenant compte des caractéristiques hygrothermiques non linéaires des matériaux, du transfert d'humidité par diffusion de vapeur, du transport capillaire de l'eau liquide et du transfert convectif de chaleur et d'humidité, il a la capacité de gérer le transfert non linéaire et couplé de la chaleur, de l'air et de l'humidité à travers des milieux poreux multicouches. En outre, le modèle prend également en compte l'influence de l'humidité sur les caractéristiques de stockage et de transfert de chaleur des matériaux ainsi que des effets locaux de chauffage et de refroidissement dans la structure dus aux changements de phase de l'humidité (condensation et évaporation).

Quant au modèle de zone intérieure, il est développé pour prédire les conditions de température et d'humidité intérieures en fonction du bilan de chaleur et d'humidité établi dans chaque zone du bâtiment. Le modèle prend en compte la production interne de chaleur et d'humidité aux sorties des différents équipements ainsi que les flux de chaleur et d'humidité qui traversent les murs environnants de chaque zone. L'hypothèse de base du modèle est que l'air intérieur se mélange bien. L'intégration des différents modèles dans une plateforme constitue la base du modèle hygrothermique de l'ensemble du bâtiment.

Cette modélisation, très complète, est particulièrement intéressante pour simuler le comportement hygrothermique d'un bâtiment. Cependant, en raison de sa complexité qui ressort par son illustration sur un bâtiment d'une seule zone, elle est peu adaptée à la synthèse des lois de commande.

Afin de coupler les phénomènes de chaleur et de flux d'air, un modèle de zone simplifié reflétant la dynamique du mélange air-eau est proposé dans [Mod12]. Les variables d'état dynamiques considérées sont la température sèche de la zone, l'humidité absolue, la pression totale et la teneur en air sec. Le bilan énergétique de la zone, le bilan massique de l'air sec et de l'eau, et l'équation d'état du mélange air-eau sont utilisés pour obtenir la dynamique du système. Dans cette zone, le champ de pression hydrostatique est supposé ne pas stocker d'énergie cinétique. Le modèle qui en résulte se compose de trois équations différentielles ordinaires non linéaires et d'une équation algébrique. Elles ne sont pas spécifiées dans ce manuscrit car elles sont plus appropriées pour simuler avec précision le comportement hygrothermique d'une zone, que pour synthétiser des lois de contrôle.

Dans la lignée des travaux précédents, et toujours dans le cas des bâtiments à zone unique, [Mod23] utilise la loi de Darcy, la loi de Fick et la loi de Fourier pour décrire les équations de transfert. Le système non linéaire d'équations aux dérivées partielles qui en résulte est discrétisé dans l'espace par la méthode des éléments finis. Le schéma de Crank-Nicolson est ensuite utilisé pour estimer numériquement la solution temporelle. La température et l'humidité de l'enveloppe du bâtiment et de l'air intérieur peuvent être estimées en fonction des conditions météorologiques extérieures telles que la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire et la vitesse du vent.

Outre ces quelques travaux portant sur les aspects hygrothermiques, des recherches approfondies ont davantage porté sur la synthèse de modèles thermiques d'une complexité abordable (du point de vue des utilisateurs et de leur charge de calcul) et ont débouché sur une gamme assez complète d'outils de simulation :

- TRNSYS [Mod3], [Mod19] est un logiciel flexible de simulation énergétique développé par le "Solar Energy Laboratory" (SEL) depuis 1975. Il contient de nombreuses bibliothèques (systèmes de chauffage et de refroidissement, charges et structures, échangeurs de chaleur, régulateurs, etc.) et est devenu une référence mondiale pour la simulation thermique dynamique appliquée aux bâtiments grâce à sa structure modulaire. Récemment, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (France) a créé l'outil MATHIS (Modélisation de l'Aéraulique, de la Thermique, et de l'Humidité InstationnaireS d'un bâtiment) comme module optionnel de TRNSYS. Combiné à ce logiciel, il peut utiliser la puissance de chacun des deux environnements pour modéliser numériquement la relation entre le débit d'air, la température et l'humidité dans l'ensemble du bâtiment.
- HVACSIM+ [Mod26], développé par le "National Institute of Standards and Technology" (NIST, anciennement NBS, Gaithersburg, Maryland) en 1985, utilise des méthodes hiérarchiques et modulaires et des techniques avancées de résolution d'équations pour simuler dynamiquement les systèmes de CVC et de contrôle des bâtiments. Le modèle associé peut être intégré dans TRNSYS.
- SIMulator of Building And Devices (SIMBAD) [Mod18] est une boite à outils de

simulation liée à l'environnement MATLAB®/ Simulink. Elle a été développée par le CSTB au début des années 1990 et permet de réaliser des simulations dynamiques de l'ensemble du bâtiment et de ses habitants, ainsi que de divers équipements, sur des échelles de temps courtes. SIMBAD a été utilisé pour construire des bancs d'essai dédiés au système de gestion du bâtiment (SIMBAD GTB) et à l'évaluation des performances des systèmes de contrôle de CVC selon le projet de norme européenne SIMTEST [Mod20].

- EnergyPlus [Mod8] est un programme complet de simulation énergétique des bâtiments que les ingénieurs, les architectes et les chercheurs peuvent utiliser pour modéliser la consommation d'énergie et d'eau. Il comprend notamment un système modulaire, configurable par l'utilisateur, avec une simulation de zone basée sur le bilan thermique et massique. Il permet de simuler les flux d'air multizones, l'énergie électrique, l'énergie solaire thermique et l'énergie photovoltaïque.
- Modelica Buildings Library [Mod34] est une bibliothèque de code source libre contenant des modèles pour la simulation dynamique des systèmes énergétiques et de contrôle dans les bâtiments et les quartiers. L'objectif principal de la bibliothèque est la modélisation flexible et rapide pour accélérer l'innovation menant à des systèmes rentables et à très faible consommation d'énergie pour les bâtiments neufs et existants.
- VCBT (Virtual Cybernetic Building Testbed) [Mod6], [Mod17] est un simulateur de bâtiment complet conçu pour soutenir la recherche sur divers sujets liés au concept de "bâtiment cybernétique". Il fournit une simulation reproductible du fonctionnement normal et de divers défauts et situations dangereuses qui peuvent survenir dans un bâtiment cybernétique. Il est mis en œuvre par le NIST et est basé sur la deuxième bibliothèque de composants utilisée par les environnements HVACSIM+ et TRNSYS. Le développement d'EnergyPlus et de la bibliothèque de bâtiments Modelica a conduit au développement de simulateurs utilisant le Building Controls Virtual Testbed [Com50] et la plateforme VOLTRON [Com27].

1.1.3 Modèle de type boite grise

Comme mentionné dans l'introduction de ce paragraphe, le modèle de type boîte grise est un compromis entre les modèles boîte blanche et boîte noire. L'analogie électrique utilisée dans [Mod1] est particulièrement intéressante car elle permet de développer directement un modèle précis et simplifié lorsqu'il n'est pas nécessaire d'estimer la température à l'intérieur des murs. Le processus d'identification des paramètres permet d'optimiser le comportement entrée / sortie de ces modèles sur la base de données expérimentales. Selon les auteurs, le transfert de chaleur par conduction à l'intérieur d'une paroi multicouche est représenté par des cellules RC de différents degrés de complexité. Dans [Mod11], une cellule à trois résistances et quatre condensateurs ($3R-4C$) est utilisée, tandis que dans [Mod1], [Mod4], elle se compose de seulement deux résistances et un condensateur ($2R-1C$). Des similitudes peuvent être établies entre cette approche nodale par analogie électrique et la bibliothèque Simscape™ de MATLAB / Simulink, qui est un outil pour la simulation de modèles de bâtiments thermodynamiques. En combinant les fonctionnalités des blocs Simscape avec des modèles prédéfinis pour les éléments de construction, les modèles Simscape peuvent être facilement traduits en schémas électriques composés de cellules RC. Dans [Mod21], un réseau simplifié à 3 résistances et 2 condensateurs ($3R-2C$)

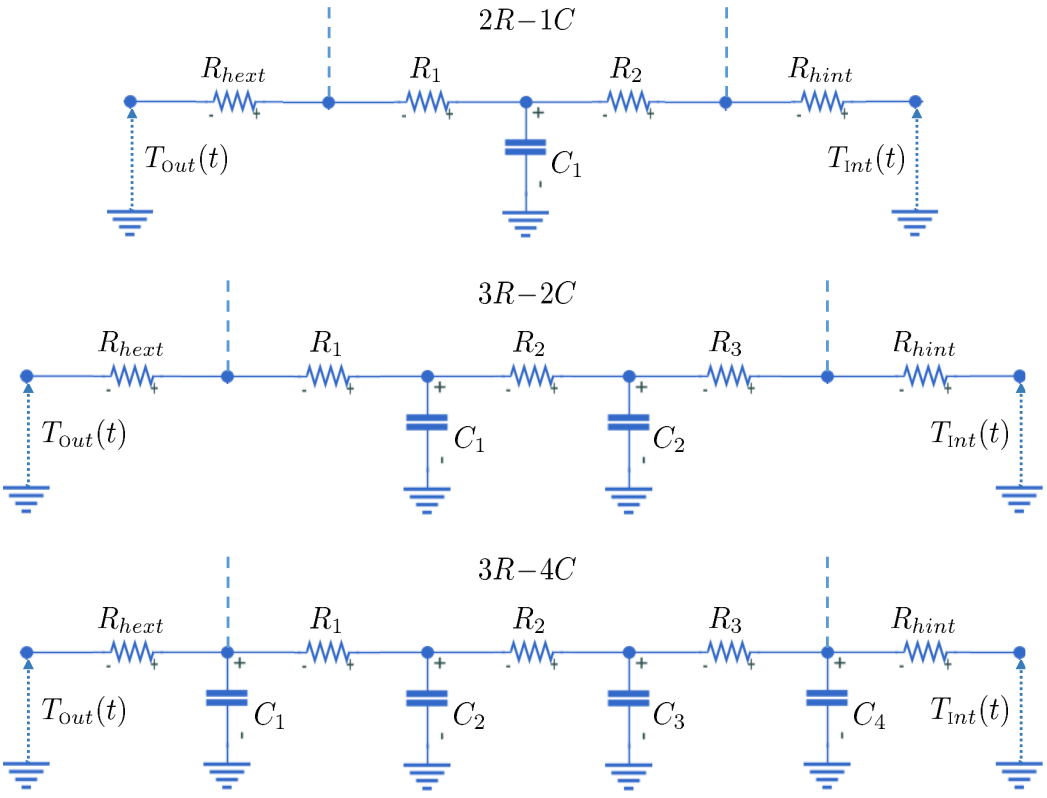


FIGURE 1.1 – Différents modèles thermiques de murs.

est obtenu grâce à cette équivalence, qui permet de modéliser la capacité thermique d'un mur et le transfert de chaleur par conduction.

La différence d'ordre observée lors de la modélisation d'un mur est principalement liée à la prise en compte ou non des différentes couches de matériaux qui composent le mur. L'intérêt d'utiliser des cellules d'ordre supérieur ($3R-4C$ ou $3R-2C$ vs. $2R-1C$) pour modéliser le comportement thermique d'une paroi est démontrable par une analyse temporelle et fréquentielle [Mod11], mais des études récentes [Mod30] ont montré que la modélisation du second ordre ($3R-2C$) peut être utilisée pour modéliser avec précision les éléments de construction (murs extérieurs, cloisons intérieures, planchers et toits). Il est important de noter que dans un modèle multi-capacités, de nombreux composants sont non identifiables, et seules leurs valeurs physiques théoriques peuvent les estimer. Ce type de modèle *RC* convient à tous les éléments de construction ayant une masse thermique élevée (par exemple, murs, toits, planchers). Une recherche parallèle a également été effectuée sur un modèle considérablement simplifié : un modèle de pièce entière avec des paramètres regroupés. La problème est de trouver le plus petit nombre de condensateurs capables de modéliser avec précision une zone thermique complète, en considérant la zone entière au lieu de chaque élément de construction individuel. Le modèle $5R-1C$ de la norme EN ISO 13790 appartient à cette catégorie de modèles de zones entières à paramètres regroupés. Il considère une capacité représentant tous les éléments de construction ayant une masse thermique élevée, mais ses performances sont parfois insuffisantes.

De nombreux autres équipements ou éléments architecturaux des bâtiments peuvent également être modélisés par cette analogie électrique. Par exemple, dans [Mod11], un

modèle de chauffage par le sol est proposé en reliant un modèle $1R-2C$ à deux modèles de murs. Dans [Mod1], un vide sanitaire est envisagé, dans lequel les mécanismes de transfert de chaleur sont la convection et le rayonnement. Les expériences ont montré que la partie convection peut être remplacée par la conduction dans une couche d'air stagnant adjacente au plafond. Quant aux apports énergétiques, ils peuvent être facilement intégrés dans le modèle nodale au moyen de générateurs de courant [Mod1]. La figure 1.2 l'illustre en considérant la chaleur du rayonnement solaire pour chauffer un mur modélisé par une cellule $2R-1C$.

Un article récent [Mod33] a proposé une méthode simple et efficace pour obtenir des

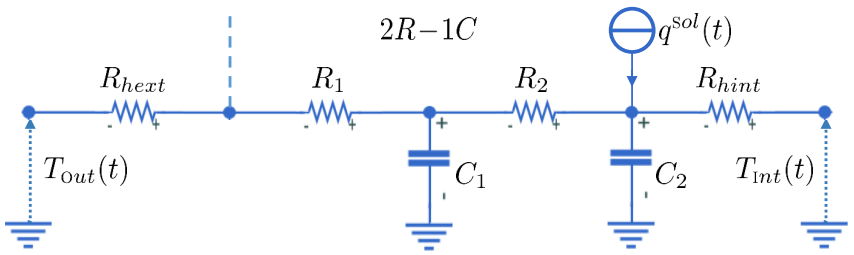


FIGURE 1.2 – Insertion d'une source solaire rayonnante dans un circuit $2R-1C$ pour symboliser le comportement thermique d'un mur.

modèles à base de cellules *RC* pour simuler la thermodynamique des bâtiments. Dans cette méthode, une structure de modèles initiale complexe est d'abord créée sur la base de principes physiques, puis simplifiée en supprimant progressivement les paramètres non identifiables pour obtenir la structures de modèle la plus appropriée. Une étude de cas utilisant des maisons à faible consommation d'énergie illustre cette approche.

1.1.4 Analyse et positionnement

L'analyse effectuée dans cette section indique qu'il est encore nécessaire d'étudier plus avant les effets des paramètres d'entrée tels que le rayonnement solaire et l'occupation. A des fins de contrôle, il y a encore un manque de développement systématique de modèles de construction simplifiés impliquant la température, la chaleur et l'humidité relative. De plus, l'analyse bibliographique liée à la modélisation nodale montre que la température intérieure de l'air sec est très généralement la seule variable microclimatique impliquée dans l'étalonnage de ces modèles [Mod32] et que le transfert d'humidité n'est jamais considéré bien que les équations de Fick aient la même structure. Etant donné l'intérêt évident de la méthode nodale dans le cadre de la modélisation thermique des bâtiments, le deuxième chapitre de cette thèse présente une méthodologie unifiée pour la modélisation hygrothermique de bâtiments multi-zones en utilisant une approche nodale. Outre l'utilisation de l'humidité relative comme deuxième variable microclimatique, une attention particulière est accordée à l'effet du rayonnement solaire sur la température opérative. Sur la base de cette modélisation graphique, une forme d'état est alors établie qui peut être utilisée pour synthétiser des commandes efficaces.

1.2 Commande Prédictive (MPC)

Les régulateurs "Tout ou Rien" sont très courants dans les anciens systèmes de bâtiments sans contrôle numérique, tandis que les régulateurs PID sont généralement utilisés dans les

bâtiments plus modernes où les systèmes de chauffage et de refroidissement sont équipés de commandes numériques (telles que les commandes à modulation de largeur d'impulsion) [Com46]. Au niveau de l'ensemble du bâtiment, il n'y a généralement pas d'optimisation, bien qu'il y ait souvent des régulateurs locaux très complexes. Dans les années 1990, la recherche a commencé à se concentrer sur le développement et l'application de méthodes intelligentes pour les systèmes de contrôle des bâtiments [Com13]. La pratique de contrôle était basée sur des règles, qui déterminent toutes les entrées de commande en fonction d'une série de règles de type "si condition, alors action". Les conditions et les actions étaient généralement associées à des paramètres numériques (tels que des seuils) qui devaient être sélectionnés. De bonnes performances dépendaient principalement d'un bon choix de règles et de paramètres associés.

Ces dernières années, l'application de la MPC dans la gestion énergétique des bâtiments a fait l'objet d'une grande attention de la part de la communauté des chercheurs [Com2], [Com6]. En raison de la puissance de calcul croissante des systèmes d'automatisation des bâtiments et de la disponibilité de grandes quantités de données de surveillance des bâtiments, la MPC est de plus en plus applicable. Elle a été mise en œuvre avec succès dans le domaine de la régulation thermique des bâtiments, en exploitant tout le potentiel de la masse thermique des bâtiments. Elle permet de réaliser une automatisation prédictive intégrée des zones [Com24], étendant ainsi l'utilisation d'actionneurs à faible consommation d'énergie à l'utilisation de la capacité de stockage de chaleur du bâtiment. Une application spécifique de l'automatisation prédictive intégrée des locaux consiste à contrôler le confort thermique en favorisant les actionneurs à faible consommation d'énergie (tels que les fenêtres ou les stores motorisés) par rapport aux actionneurs à coût énergétique élevé (par exemple les refroidisseurs, les chaudières à gaz, les radiateurs conventionnels). Afin de réduire les coûts énergétiques, l'énergie à faible coût (refroidissement naturel, gain solaire affecté par les stores) peut être utilisée pour charger et décharger la capacité thermique du bâtiment tant que la température ambiante est maintenue dans une plage confortable. L'utilisation du stockage passif de la chaleur dans les bâtiments nécessite la prédiction de leur comportement thermique et la stratégie MPC est donc particulièrement adaptée.

En outre, la MPC a été utilisée avec succès dans le contrôle des systèmes de stockage d'énergie ou de production d'énergie renouvelable [Com45]. Dans de nombreuses applications de gestion de l'énergie, le système est intrinsèquement hybride car il contient à la fois une dynamique continue et discrète (impliquant des machines à états finis et des entrées et états booléens), ce qui donne des modèles non linéaires avec des discontinuités. Dans ce cas, la formulation de la MPC est généralement appelée hybride. Cette méthode de MPC est fréquemment utilisée lorsque le fonctionnement du système implique des états discrets, ouvert ou fermé, activé ou désactivé, ou des exigences de programmation. La stratégie de MPC peut ignorer les aspects imparfaits / incertains des prévisions météorologiques et prendre une décision de commande en supposant qu'elles sont parfaites, c'est-à-dire avec la même réalisation que la prévision. Cette approche standard de MPC, utilisée dans presque toutes les applications commerciales, est dite déterministe. Elle diffère de la MPC stochastique [Com37], qui prend directement en compte l'incertitude des prévisions météorologiques et considère des contraintes aléatoires avec une probabilité prédéterminée. Ce concept peut être étendu à la prise en compte de l'incertitude des prévisions d'occupation.

Parce qu'elle est capable de prendre en compte des contraintes, des prévisions de perturbations (généralement météorologiques) et des objectifs multiples, parfois même contradictoires, tels que le confort thermique intérieur et les besoins énergétiques du

bâtiment, la MPC offre de multiples possibilités pour améliorer l'efficacité de fonctionnement des systèmes de CVC. Dans le cas d'une optimisation énergétique avec réponse à la demande, [Com22] a évalué les avantages de la MPC en termes de consommation d'énergie en la comparant aux stratégies classiques de commande du système de climatisation en mode "tout ou rien" et par correcteur PID. Il est clair que la méthode la plus coûteuse est la commande en mode «tout ou rien», et que la MPC est la plus économique.

La suite de ce paragraphe est consacrée à un examen des différentes stratégies de MPC qui existent en termes de confort hygrothermique des bâtiments et de leur efficacité énergétique. L'accent est mis sur les différentes fonctions d'objectifs utilisées, notamment en ce qui concerne les aspects économiques. L'intérêt des termes de régularisation est également évoqué à travers cet état de l'art.

1.2.1 Commande prédictive quadratique (MPC)

D'une manière générale, l'objectif principal est de minimiser les coûts énergétiques tout en respectant les contraintes de confort, ce qui peut être formalisé par le problème d'optimisation suivant :

$$J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} L\big(\mathbf{x}(k+j), \mathbf{u}(k+j)\big) \tag{1.7}$$

avec :

$$L\big(\mathbf{x}(k+j), \mathbf{u}(k+j)\big) = \big\|\boldsymbol{\epsilon}(k+j)\big\|^2_{\mathbf{Q}(k+j)} + \big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|^2_{\mathbf{R}(k+j)} \tag{1.8}$$

et $\boldsymbol{\epsilon}(k+j) = \mathbf{y}_{\text{ref}}(k+j) - \mathbf{y}(k+j)$ sous les contraintes $\mathbf{u}(k+j) \in \mathbb{U}, \mathbf{x}(k+j) \in \mathbb{X}, \forall j \geq 0$. Les matrices $\mathbf{Q}(k+j)$ et $\mathbf{R}(k+j)$ sont de taille appropriée et peuvent varier dans le temps sur l'horizon de prédiction N_P. $\mathbf{y}_{\text{ref}}(k+j)$ est la valeur de la trajectoire de référence à l'instant de prédiction $k+j$. Le compromis entre l'erreur de suivi et la consommation d'énergie est représenté par le rapport des termes des matrices diagonales $\mathbf{Q}(k+j)$ et $\mathbf{R}(k+j)$. La facture énergétique est convertie sous la forme quadratique classique (1.8) ou sous la forme d'une fonction affine de la consommation énergétique totale [Com49]. Dans ce dernier cas, le terme quadratique lié à la matrice $\mathbf{R}(k+j)$ est remplacé par $\mathbf{R}^T(k+j)\cdot\mathbf{u}(k+j)$.

Le modèle de système est une partie essentielle de la MPC. Plusieurs structures de modèle peuvent été envisagées, comme le montre la liste suivante. Des articles relatifs à l'optimisation de la performance énergétique des bâtiments y sont référencés.

— Linéaire [Com28], [Com39], [Com49]. C'est le type de modèle le plus courant, et le seul qui conduit à un problème d'optimisation convexe et facile à résoudre :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(k) \tag{1.9}$$

— Affine en la commande [Com33]. Ce type de modèle peut couvrir un grand nombre de systèmes complexes :

$$\mathbf{x}(k+1) = f\big(\mathbf{x}(k)\big) + g\big(\mathbf{x}(k)\big)\cdot\mathbf{u}(k) \tag{1.10}$$

— Hybride ou affine par morceaux [Com15]. Les systèmes hybrides sont des systèmes qui consistent en une combinaison de composants discrets et continus, tels que des

interrupteurs ou des vannes, en combinaison avec des systèmes continus :

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{cases} \mathbf{A_1}\cdot\mathbf{x}(k) + \mathbf{B_1}\cdot\mathbf{u}(k) & \text{si } \mathbf{x}(k) \in P_1 \\ \vdots & \\ \mathbf{A_n}\cdot\mathbf{x}(k) + \mathbf{B_n}\cdot\mathbf{u}(k) & \text{si } \mathbf{x}(k) \in P_n \end{cases} \tag{1.11}$$

— Non-linéaire [Com23], [Com40] :

$$\mathbf{x}(k+1) = f\big(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)\big) \tag{1.12}$$

Sachant que notre objectif est plus de définir un critère de minimisation qui reflète tous les objectifs en termes d'énergie, de confort et de contrôle plutôt que de choisir *a priori* une structure de modèle le contraignant, ces différents travaux ne seront pas détaillés. Nous nous concentrons plutôt sur les différents types de critères de la littérature relatifs à la performance énergétique / hygrothermique des bâtiments.

1.2.2 Commande prédictive économique (EMPC)

La commande prédictive économique (EMPC) est une méthode de contrôle avancée qui a suscité l'intérêt des communautés scientifique [Com14] et industrielle [Com42] ces dernières années. L'un de ses principaux avantages est qu'elle peut utiliser des critères d'optimisation personnalisés qui peuvent se concentrer sur la valeur économique ajoutée. Avec le potentiel de réduire les coûts d'exploitation et d'améliorer l'efficacité énergétique, la EMPC est proposée comme alternative aux stratégies traditionnelles heuristiques, PID et autres stratégies de contrôle pour les systèmes de CVC dans les bâtiments commerciaux. Une EMPC est différente à cet égard de la MPC traditionnelle, dont la fonction d'objectifs ne reflète pas clairement l'objectif de réduction de la consommation d'énergie. Toutefois, à quelques exceptions près, le critère économique lié à la synthèse d'une EMPC est une fonction non linéaire, de sorte que, contrairement à la MPC dont le critère est associé à un problème d'optimisation convexe, la stabilité d'une EMPC ne peut généralement pas être prouvée.

Comme premier exemple, [Com26] introduit une fonction de coût très basique qui minimise la consommation d'énergie tout en maintenant le confort thermique du bâtiment :

$$J_{\text{EMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} u(k+j) \tag{1.13}$$

où $\mathbf{u}$ représente le flux thermique contrôlable sous contrainte $0 \leq u(k+j) \leq u_{\max}$ et $\mathbf{y}$ est la température ambiante du bâtiment sous contrainte de confort $y^{\min}(k+j+1) \leq y(k+j+1)$. Le problème d'optimisation correspond à la forme canonique de la méthode de programmation linéaire, en raison de la linéarité du critère et des contraintes considérées et du choix du modèle d'état dans la forme standard :

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}\cdot\mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\cdot\mathbf{x}(k) \end{cases} \tag{1.14}$$

où $\mathbf{w}(k)$ représente les entrées incontrôlables connues, telles que celles liées à la météo.

Dans le cas légèrement différent d'un système énergétique avec plusieurs sources d'énergie renouvelables, ces ressources distribuées doivent être activement contrôlées en réponse à la demande pour maintenir la fiabilité du système et améliorer l'économie d'exploitation. Dans ce cas, [Com52] propose une stratégie de EMPC pour la gestion intelligente de l'énergie des bâtiments, qui peut agir comme un utilisateur actif interagissant avec des systèmes énergétiques intelligents.

$$J_{\text{EMPC}}(\mathbf{u}^*, \mathbf{v}^*) = \min_{\mathbf{u},\mathbf{v}} \left\{ \sum_{j=0}^{N_P-1} c'(k+j)\cdot u(k+j) + \sum_{j=1}^{N_P} \rho \cdot \left| v(k+j) \right| \right\} \tag{1.15}$$

La particularité de la fonction d'objectifs choisie est de remplacer certaines contraintes dures sur $y(k+j)$ par des contraintes douces $y^{\min}(k+j) \leq y(k+j) - v(k+j) \leq y^{\max}(k+j)$ pour assurer la faisabilité de l'optimisation linéaire en ajoutant le terme $\rho \cdot \left| v(k+j) \right|$ à la fonction d'objectifs, ce qui pénalise la violation des contraintes pour de meilleures performances du contrôleur. Une étude pilote a montré que des économies d'énergie et un déplacement de charge peuvent être réalisés en appliquant cette stratégie de commande.

[Com29] propose une autre technique de EMPC pour réduire les coûts de l'énergie et de la demande des systèmes de CVC dans les bâtiments. La stratégie de contrôle consiste en une fonction d'objectifs économique qui prend en compte les coûts de l'énergie et de la demande avec un barème de taux en fonction de l'heure d'utilisation, le modèle de processus thermique et le potentiel de masse thermique dynamique du bâtiment, ainsi qu'un ensemble de contraintes pour assurer un fonctionnement normal. L'optimisation est un problème d'optimisation min-max :

$$J_{\text{EMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} \left\{ E_c(k+j)\cdot \Delta t \cdot u(k+j) + D_c \cdot \max_j u(k+j) \right\} \tag{1.16}$$

avec $\sum_{j=0}^{N_P-1} E_c(k+j)\cdot \Delta t \cdot u(k+j)$ les coûts énergétiques quotidiens et $D_c \cdot \max_j u(k+j)$ les coûts supplémentaires associés à la consommation énergétique quotidienne maximale (frais de service public pour maintenir une alimentation électrique constante). $\Delta t \cdot u(k+j) = \Delta t \cdot P(k+j)$ représente la consommation d'énergie prévue dans l'intervalle de temps $[k+j-1,\ k+j]$ sur la base de la prédiction de la température de consigne de chaque zone, de la température intérieure et de la température extérieure. $E_c(k+j)$ est le tarif de l'électricité basé sur l'heure d'utilisation ; D_c est la redevance de capacité qui est une subvention par kW de puissance consommée par rapport à la demande ($\$/kW$) ; $\Delta t = 0,25$h est le pas de temps et $N_P = \dfrac{24}{\Delta t}$ est le nombre total de pas de temps Δt par jour. Un plan tarifaire est utilisé, dans lequel chaque jour est divisé en heures de pointe, moyennes et creuses. En suivant la logique du critère utilisé, on peut voir que la EMPC peut faire économiser beaucoup d'argent en déclenchant automatiquement un effet de pré-refroidissement et en déplaçant la demande de pointe vers les heures creuses. Cette méthode de EMPC est mise en œuvre dans un immeuble de bureaux commerciaux [Com30].

En complètement des travaux précédents, [Com42] aborde une question importante à prendre en compte lors de la commande de grands systèmes commerciaux de CVC. Il s'agit

d'une architecture de contrôle basée sur la décomposition hiérarchique du système de CVC couplant les côtés air et eau. Le système côté air comprend toutes les zones des bâtiments et les CTA associées pour le contrôle de la température. Le système côté eau comprend les équipements centraux pour répondre aux charges de chauffage et de refroidissement. En effet, étant donné les exigences du fonctionnement en temps réel, la mise en oeuvre d'une EMPC comme problème d'optimisation global unique n'est ni pratique ni souhaitable pour le fonctionnement en temps réel. Le but du système de contrôle est de déterminer les points de consigne de température des zones côté air et les programmes de fonctionnement des équipements côté eau, qui comprend des variables continues et discrètes. Pour décomposer un problème d'optimisation unique en problèmes plus petits, une MPC distribuée [Com11] impliquant un échange d'informations peut être utilisée. Dans le même esprit, la méthode de modélisation hygrothermique présentée au chapitre 2 considère une décomposition de grands bâtiments pour une simulation globale ou coopérative. La suite de ce paragraphe présente différents indicateurs de confort et d'énergie qui peuvent être intégrés dans la définition de la fonction d'objectifs de la MPC ou de la EMPC.

1.2.3 Indicateurs clés de performance (ICP)

En général, les indicateurs clés de performance (ICP) reflètent des objectifs importants. Les domaines de performance des bâtiments comprennent l'efficacité énergétique, les économies d'eau, les matériaux, le site, la qualité de l'environnement intérieur, les déchets et la pollution. Dans les services rendus par un bâtiment, le confort thermique n'est qu'un aspect du confort environnemental, qui comprend également le confort visuel et acoustique. La qualité de l'air joue également un rôle important et est généralement assurée par les mêmes systèmes de CVC que pour le confort thermique. La consommation d'énergie n'est qu'un des nombreux impacts des bâtiments sur l'environnement. Cependant, la raison pour laquelle elle est mise en avant peut être liée à l'ampleur de son impact environnemental pour les bâtiments existants. Les ICP liés à l'efficacité énergétique, au confort thermique et à la qualité de l'air sont les suivants [Com8] :

1.2.3.1 Inconfort thermique

Cet ICP, exprimé en Kh, prend en compte la variation dynamique de la température ambiante T_{z_i} dans les zones $z_i \in \mathcal{Z}$ d'un bâtiment à chaque instant de prédiction $k+j$. Il donne le nombre de degrés-heures nécessaires pour un chauffage hypothétique (pour atteindre $T_{\mathrm{c,min}}(k+j)$) et un refroidissement hypothétique (pour atteindre $T_{\mathrm{c,max}}(k+j)$) par rapport à l'intervalle de confort prédéterminé $T_{\mathrm{c,min}}(k+j) \leq T_{z_i}(k+j) \leq T_{\mathrm{c,max}}(k+j)$. En le notant $\mathrm{ICP}_{\mathrm{INC}}$, il est associé au problème d'optimisation suivant :

$$J_{\mathrm{ICP}_{\mathrm{Inc}}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}}(\mathrm{ICP}_{\mathrm{INC}}) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=1}^{N_P} f\left(\mathbf{T}_z(k+j), T_{\mathrm{c,min}}(k+j), T_{\mathrm{c,max}}(k+j)\right) \cdot \Delta t \quad (1.17)$$

avec l'écart de température défini par rapport à la température de confort minimale $T_{\mathrm{c,min}}(k+j)$ et maximale $T_{\mathrm{c,max}}(k+j)$ dans les zones $z_i \in \mathcal{Z}$, selon la relation :

$$\begin{aligned} &f\left(\mathbf{T}_z(k+j), T_{\mathrm{c,min}}(k+j), T_{\mathrm{c,max}}(k+j)\right) = \\ &\quad \sum_{z_i \in \mathcal{Z}} \max\left(T_{\mathrm{c,min}}(k+j) - T_{z_i}(k+j), 0\right) + \max\left(T_{z_i}(k+j) - T_{\mathrm{c,max}}(k+j), 0\right) \end{aligned} \quad (1.18)$$

Cet indicateur à lui seul ne permet pas de distinguer un bref épisode d'une condition très inconfortable d'une condition prolongée, légèrement inconfortable. C'est pourquoi il est parfois combiné avec un indicateur supplémentaire qui reflète le nombre d'heures passées en dehors de la zone de confort.

1.2.3.2 Consommation d'énergie finale

Cet ICP représente l'énergie consommée en kWh par tous les équipements d'un bâtiment pendant une période donnée. Il prend en compte l'énergie achetée et, le cas échéant, l'énergie produite et consommée sur place doit y être ajoutée. L'énergie finale est un indicateur pertinent car l'occupant peut la contrôler directement. En notant $\mathrm{ICP}_{\mathrm{ENER}}$ cet indicateur, il est associé au problème d'optimisation suivant :

$$J_{\mathrm{ICP}_{\mathrm{ENER}}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}}(\mathrm{ICP}_{\mathrm{ENER}}) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} \left\|\mathbf{q}_z(k+j)\right\|_1 \tag{1.19}$$

avec $\left\|\mathbf{q}_z(k+j)\right\|_1 = \sum_{z_i \in \mathcal{Z}} \sum_{\xi} q_{z_i}^{\xi}(k+j)$ l'énergie consommée par tous les équipements pendant la période $[k+j-1,\ k+j]$.

1.2.3.3 Émissions de CO_2 liées à l'énergie consommée

Cet ICP montre les émissions de dioxyde de carbone en kg causées par la consommation totale d'énergie d'un bâtiment sur une période donnée. Il est calculé sur la base de la demande totale d'énergie et des facteurs de conversion locaux associés à chaque source d'énergie. En notant $\mathrm{ICP}_{\mathrm{EMI}}$ cet indicateur, il est associé au problème d'optimisation suivant :

$$J_{\mathrm{ICP}_{\mathrm{EMI}}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}}(\mathrm{ICP}_{\mathrm{EMI}}) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} \mathbf{e}_z^T(k+j) \cdot \mathbf{q}_z(k+j) \tag{1.20}$$

avec $\mathbf{e}_z^T(k+j) \cdot \mathbf{q}_z(k+j) = \sum_{z_i \in \mathcal{Z}} \sum_{\xi} e_{z_i}^{\xi}(k+j) \cdot q_{z_i}^{\xi}(k+j)$ et $e_{z_i}^{\xi}(k)$ le facteur d'émission en CO_2 de l'équipement ξ dans la zone z_i.

Outre ces différents critères de performance énergétique, hygrothermique et économique qui permettent de définir la fonction d'objectifs, il peut être utile d'ajouter d'autres termes, dits de régularisation, pour donner à la loi de commande optimale diverses caractéristiques intéressantes. Par une recherche bibliographique, le paragraphe suivant précise leur utilité et leur définition lorsqu'ils sont associés à la synthèse d'une MPC ou d'une EMPC.

1.2.4 Commande prédictive régularisée (RMPC)

La technique dite de régularisation initialement introduite par Tikhonov [Gen44] est principalement utilisée pour obtenir des estimations pertinentes de solutions à des problèmes mal posés. Elle consiste à introduire dans le problème des informations *a priori* sur la solution recherchée. Globalement, au lieu de chercher le minimum $\mathbf{u}^*$ de la fonction

d'objectifs $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}^*)$, on cherche à résoudre le problème :

$$J_{\text{RMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}) + \lambda \cdot R(\mathbf{u}) \tag{1.21}$$

où $R(\mathbf{u})$ caractérise les informations fournies et $\lambda > 0$ est le coefficient de régularisation précisant l'importance accordée à ces informations. $R(\mathbf{u})$ peut être de différents types :

- norme ℓ_p : $R(\mathbf{u}) = \|\mathbf{u}\|_p^2$ (régularisation de Tikhonov lorsque les matrices sont mal conditionnées ou lorsqu'il existe une infinité de solutions au problème initial) ;
- opérateur de type dérivé ou son équivalent discret : $R(\mathbf{u}) = \|\Delta\mathbf{u}\|_2$ (utilisé dans la restitution d'images quand on veut introduire l'idée de corrélation entre plusieurs pixels).

D'une manière générale, un problème initial mal posé est remplacé par un autre "proche dans un certain sens" du premier et qui est bien posé. Dans le cadre d'une commande optimale, la régulatisation est plutôt motivée par sa capacité à modifier la solution optimale d'un problème initial de sorte que la solution régularisée privilégie, par exemple, les actions de certains actionneurs ou répartit efficacement l'effort de contrôle. Elle prend alors la forme $R(\mathbf{u}) = \|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u}\|_p^2$. Comme le montre l'étude suivante, la norme ℓ_p qui définit ces termes de régularisation leur donne des propriétés très différentes.

1.2.4.1 Régularisation ℓ_1

La théorie du Lasso (Least Absolute Selection and Shrinkage Operator), particulièrement utilisée dans le traitement du signal, a conduit au développement de nouvelles stratégies de commande prédictive ces dernières années, appelées "ℓ_{asso}-MPC" [Com19], [Com21], [Com41] ou commande prédictive régularisée (RMPC) pour "MPC régularisée" [Com5]. Les termes de régularisation représentés par la norme ℓ_1 permettent de synthétiser des lois de commande éparses avec intérêts multiples. Par exemple, le nombre d'entrées de commande actives dans un système sur-actionné [Com20] peut être limité en donnant la priorité à certains actionneurs. Il est également possible de répondre aux contraintes de certaines applications de contrôle qui nécessitent l'utilisation de signaux de commande constants ou par morceaux avec le moins de changements possible [Com38]. De même, des termes de régularisation binaire peuvent être appliqués pour pénaliser de manière différenciée les variations de puissance des actionneurs en fonctionnement normal, au démarrage et à l'arrêt [Com12]. Enfin, une RMPC peut également réduire la taille des paquets de données dans les systèmes de contrôle des réseaux [Com35]. Dans tous ces problèmes, le choix de la norme ℓ_1 pour les termes de contrôle est lié au fait que c'est la seule norme qui favorise la parcimonie et qui est convexe.

La suite de ce paragraphe présente différentes stratégies de commande prédictive synthétisées par la minimisation d'un critère régularisé en norme ℓ_1. Cette présentation n'est pas limitée aux travaux liés aux bâtiments en raison de son très petit nombre.

Dans [Com19], [Com21], une stratégie "ℓ_{asso}-MPC" bimode est proposée pour contrôler les systèmes linéaires à temps discret invariants dans le temps définis par l'équation d'état

classique (1.9). Le problème de commande optimale contraint est le suivant :

$$J_{\text{RMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \left\{ F\big(\mathbf{x}(k+N_P)\big) + \sum_{j=0}^{N_P-1} L\big(\mathbf{x}(k+j), \mathbf{u}(k+j)\big) \right\} \tag{1.22}$$

avec $\mathbf{u}(k+j) \in \mathbb{U}$, $\mathbf{x}(k+j) \in \mathbb{X}, \forall j \geq 0, \mathbf{x}(k+N_P) \in \mathbb{X}_f$: ensemble positivement invariant, $F\big(\mathbf{x}(k+N_P)\big)$: fonction de Lyapunov contrôlée dans $\mathbb{X}_f$ et :

$$L\big(\mathbf{x}(k+j), \mathbf{u}(k+j)\big) = \begin{cases} \mathbf{x}^T(k+j)\cdot\mathbf{Q}\cdot\mathbf{x}(k+j) + \mathbf{u}^T(k+j)\cdot\mathbf{R}\cdot\mathbf{u}(k+j) + \lambda\cdot\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_1 & \text{pour } \mathbf{x} \notin \mathbb{X}_f \\ \mathbf{x}^T(k+j)\cdot\mathbf{Q}\cdot\mathbf{x}(k+j) + \mathbf{u}^T(k+j)\cdot\mathbf{R}\cdot\mathbf{u}(k+j) & \text{pour } \mathbf{x} \in \mathbb{X}_f \end{cases} \tag{1.23}$$

La stabilité nominale a été prouvée et un algorithme de mise en œuvre d'un contrôleur bimode a été proposé. Les simulations montrent que la stratégie "ℓ_{asso}-MPC" peut fournir des performances de contrôle similaires à celles de la MPC quadratique, tout en offrant une évolution très différente du signal d'entrée $\mathbf{u}(k)$. En particulier, les auteurs mentionnent que la pénalisation en norme ℓ_1 de l'entrée $\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_1$ amène la valeur des actionneurs à zéro la plupart du temps (lorsque $\mathbf{x} \notin \mathbb{X}_f$), sans permettre de petites amplitudes. De même, en pénalisant la norme ℓ_1 de la différence de deux valeurs consécutives de $\mathbf{u}(k)$, les actionneurs ont un comportement plus constant ou plus souple. A cet égard, la "ℓ_{asso}-MPC" semble particulièrement adaptée aux systèmes sur-actionnés, où chaque tâche est censée utiliser le moins d'actionneurs possible. Elle permet en effet d'avoir une stratégie de distribution de commande intelligente.

Selon les mêmes auteurs, lorsqu'il existe une différence nette entre les actionneurs prioritaires et les actionneurs auxiliaires, la stratégie développée dans [Com20] permet de n'utiliser ces derniers que lorsque l'erreur de régulation est significative. Elle permet d'imposer une certaine zone de fonctionnement nominale proche du point de consigne où les actionneurs auxiliaires ne doivent pas être utilisés. La réduction de l'utilisation des actionneurs peut apporter de nombreux avantages, tels qu'une efficacité énergétique accrue et une durée de vie prolongée.

Ces différentes remarques nous ont conduit à étudier l'influence de termes de pénalité en norme ℓ_1. Cependant, la prise en compte d'un modèle LTI ne nous a pas permis de bénéficier davantage des développements de cette communication.

Une première illustration intéressante est donnée dans [Com5], qui examine l'application de la RMPC monomode dans la gestion de l'énergie des systèmes de stockage d'énergie hybrides. La fonction $F\big(\mathbf{x}(k+N_P)\big)$ est alors définie par $\mathbf{x}^T(k+N_P)\cdot\mathbf{P}\cdot\mathbf{x}(k+N_P)$. L'utilisation de la "$\ell_{\text{asso}}$-MPC" est également motivée par sa capacité à hiérarchiser les actions des actionneurs et à répartir efficacement l'effort de contrôle. Par rapport à la MPC traditionnelle (non régularisée), il a été démontré que cette stratégie de commande réduisait la dégradation des batteries de plus de 70%.

Une deuxième illustration intéressante [Com35] est liée à la commande prédictive de paquets de données séquentiels dans un canal de communication. Une fonction de coût régularisée est définie pour réduire la taille des paquets de données pour les systèmes contrôlés en réseau. Les auteurs proposent d'adopter une optimisation $\ell^1 - \ell^2$ plus propice à la rareté et disposant d'algorithmes efficaces. Le problème qui en résulte est similaire à

(1.22) avec :

$$L\big(\mathbf{x}(k+j),\mathbf{u}(k+j)\big) = \mathbf{x}^T(k+j)\cdot\mathbf{Q}\cdot\mathbf{x}(k+j) + \lambda\cdot\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_1 \tag{1.24}$$

et $F\big(\mathbf{x}(k+N_P)\big) = \mathbf{x}^T(k+N_P)\cdot\mathbf{P}\cdot\mathbf{x}(k+N_P)$ sous la contrainte du modèle (1.9).

[Com41] explore les problèmes de commande optimale avec des objectifs en norme ℓ_1 impliquant des systèmes linéaires à temps discret. Ces problèmes, qui peuvent être résolus efficacement sous la forme de programmes linéaires, donnent lieu à des solutions éparses. Il a été démontré que le problème de commande optimale suivant :

$$J_{\text{RMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \left\{ \sum_{j=0}^{N_P-1} \big\|\mathbf{C}\cdot\mathbf{x}(k+j+1)\big\|_1 + r\cdot\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_1 \right\} \tag{1.25}$$

sous la contraintes de modèle d'état (1.9), peut conduire à une solution inactive ou "deadbeat" où l'entrée ou la sortie est respectivement égale à zéro sur tout l'horizon de prédiction. La principale contribution de [Com41] est de spécifier les conditions sur les paramètres du problème qui précisent quand ces solutions se produisent. Ces résultats montrent comment différents types de solutions éparses résultent du choix des paramètres de synthèse et peuvent ainsi guider la conception de contrôleurs utilisant des objectifs ℓ_1.

L'utilisation de la norme ℓ_1 ne s'arrête pas dans cet article au seul terme de régularisation mais implique également la fonction d'objectifs. Néanmoins, compte tenu de l'intérêt des résultats obtenus, une étude sera menée à la section 3.5.3 sur l'ajustement de l'hyperparamètre pondérant les termes de régularisation.

Dans certaines applications, il est nécessaire d'utiliser des signaux de commande constants ou impulsionnels avec le moins de changement possible. Pour obtenir ce type de contrôle, [Com38] utilise une RMPC, qui permet d'imposer cette structure par régularisation. Les auteurs ont souligné à juste titre que les compromis entre les performances de la régulation et les caractéristiques des signaux de commande ne sont généralement pas très intuitifs. C'est pourquoi ils ont proposé une reformulation équivalente à la RMPC, qui permet de configurer le compromis souhaité de manière plus intuitive et efficace sur le plan des calculs. Cette reformulation est basée sur la formulation dite ϵ-contrainte des problèmes d'optimisation multi-objectifs, et le compromis peut être quantifié en attribuant clairement des contraintes aux performances de la régulation.

$$\begin{aligned} J_{\text{RMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=1}^{\infty} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+j) \\ \mathbf{u}(k+j-1) \end{bmatrix}^T \cdot\mathbf{Q}\cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+j) \\ \mathbf{u}(k+j-1) \end{bmatrix} \\ +\mathbf{q}^T\cdot\mathbf{x}(k+j) + \mathbf{r}^T\cdot\mathbf{u}(k+j-1) \end{aligned} \tag{1.26}$$

sous la contrainte $\mathbf{C}_{\mathbf{x}}^T\cdot\mathbf{x}(k+j) + \mathbf{C}_{\mathbf{u}}^T\cdot\mathbf{u}(k+j) \leq d, \forall j \geq 0$ et celle plus classique du modèle d'état (1.9). Cette reformulation nous a permis de mettre en évidence les avantages de la norme ℓ_p au niveau des termes de régularisation.

Dans [Com10], la minimisation de la norme CLOT (Combined ℓ-One and Two) est considérée avec l'objectif de synthétiser une commande continue mais encore relativement

parcimonieuse. La norme CLOT est la combinaison convexe des normes ℓ_1 et ℓ_2 :

$$J_{\text{RMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} \left\{ \left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_1 + \lambda \cdot \left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_2 \right\} \tag{1.27}$$

sous la contrainte du modèle d'état (1.9) et d'une valeur finale $\mathbf{x}(k+N_P)$ imposée. La commande associée est un cas particulier de la commande "ℓ_{asso}-MPC" décrite ci-dessus [Com21]. Il est démontré dans [Com10] que la commande CLOT est continue et plus parcimonieuse que la commande "Elastic Net" (EN) classique [Gen52], dont la différence est liée au carré du terme en norme ℓ_2 :

$$J_{\text{RMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} \left\{ \left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_1 + \lambda \cdot \left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_2^2 \right\} \tag{1.28}$$

[Com12] propose d'utiliser une RMPC binaire pour gérer la production d'électricité des centrales solaires à concentration avec stockage d'énergie thermique. Le principal avantage de cette stratégie de commande est qu'elle peut pénaliser de manière différenciée les changements de production d'électricité en fonction de l'état de la centrale pendant le fonctionnement normal, le démarrage ou l'arrêt. Cette différence permet non seulement de réaliser des bénéfices élevés sur les ventes d'énergie, mais aussi de prolonger la durée de vie des composants de l'unité de production. Le terme de régularisation binaire considéré est basé sur le "lasso réduit" (trimmed lasso) [Gen7], qui est une généralisation de la pénalité du lasso. Si l'on considère le terme de régularisation du lasso $\left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_1$ (1.22) défini par :

$$\left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_1 = \sum_{i=1}^{n_u} \left|u_i(k+j)\right| = \mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);0\big) \tag{1.29}$$

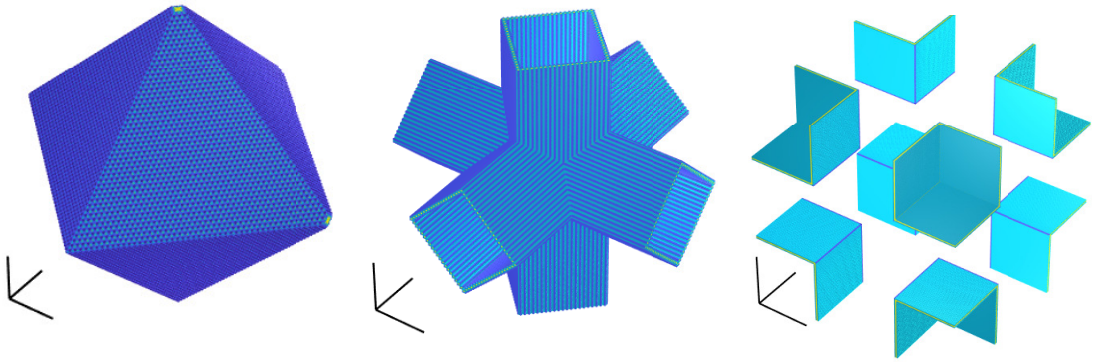
alors pénaliser le "lasso réduit" $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);h\big)$, défini par :

$$\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);h\big) = \min_{\mathbf{w}\in[0,1]^{nu}} \sum_{i=1}^{n_u} w_i \cdot \left|u_i(k+j)\right| \quad \text{avec } \mathbf{1}^T \cdot \mathbf{w} \geq n_u - h \tag{1.30}$$

permet de pénaliser en norme ℓ_1 que la somme des $n_u - h$ entrées plus petites $\left|u_i(k+j)\right|$. Les sphères unités représentées dans la figure 1.3 permettent de comprendre l'impact du terme de réduction h dans la définition (1.30). En particulier, on constate que seule la boule unité délimitée par la sphère $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);0\big) = 1$ est convexe (cf. Fig. 1.4). Par conséquent, l'utilisation d'une pénalité de "lasso réduit" rend le problème d'optimisation régularisé non convexe. Néanmoins, comme on peut le voir sur la figure 1.5 dans le cas tridimensionnel, la forme des isocritères de $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);1\big)$, qui est intéressante pour rendre la solution régularisée parcimonieuse, est "proche" de celle observée en considérant $\left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_p$ avec $p \ll 1$, ce qui a été une source d'idées pour le chapitre 3 de ce mémoire.

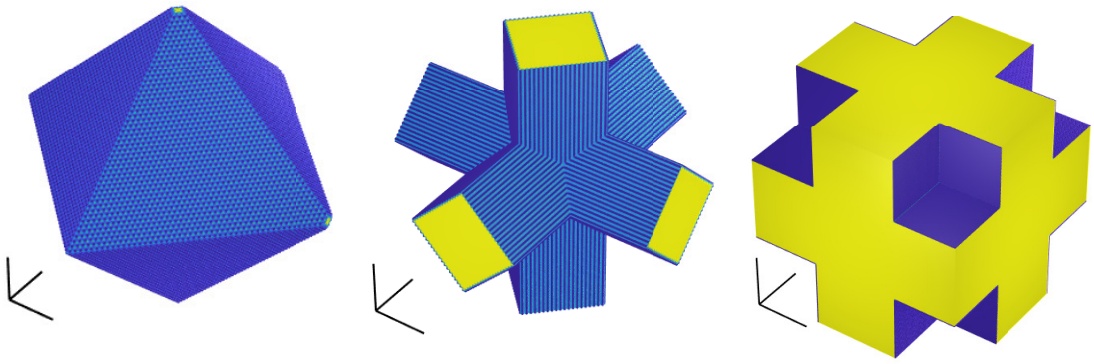
1.2.4.2 Régularisation ℓ_ϵ

En termes de parcimonie, les pénalités ℓ_ϵ (avec $\epsilon < 1$) peuvent être plus intéressantes [Com3], [Com4], mais leur principal inconvénient est qu'elles ne sont pas convexes. En règle générale, il est donc intéressant de n'utiliser ces termes ℓ_ϵ que lorsque la fonction



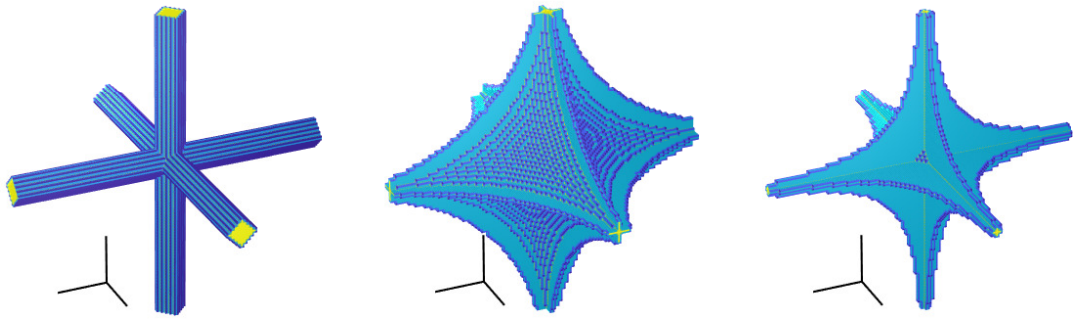
(a) $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);0\big)$ (b) $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);1\big)$ (c) $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);2\big)$

FIGURE 1.3 – Sphère unité $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);h\big) = 1$ dans l'espace tridimensionnel.



(a) $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);0\big)$ (b) $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);1\big)$ (c) $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);2\big)$

FIGURE 1.4 – Boule unité $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);h\big) \leq 1$ dans l'espace tridimensionnel.



(a) $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);1\big)$ (b) $\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_{0.5}$ (c) $\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_{0.2}$

FIGURE 1.5 – Isocritères de $\mathcal{R}\big(\mathbf{u}(k+j);1\big)$ vs. $\big\|\mathbf{u}(k+j)\big\|_p$ avec $p \ll 1$.

d'objectifs non régularisée est déjà non convexe, car dans ce cas, cela ne complique pas beaucoup la solution du problème d'optimisation.

Une stratégie de commande prédictive qui limite directement la norme ℓ_0 du vecteur de commande à chaque instant est proposée dans [Com3], [Com4] pour les systèmes linéaires

invariants dans le temps décrits sous la forme d'état classique (1.9). Cette stratégie se traduit par la contrainte de parcimonie :

$$\left\|\mathbf{u}(k+j)\right\|_0 \leq \gamma, \quad \forall j \geq 0 \tag{1.31}$$

et permet de ne considérer que certaines entrées disponibles comme "actives" à tout moment. Elle est liée au problème d'optimisation (1.22) avec $L\big(\mathbf{x}(k+j), \mathbf{u}(k+j)\big) = \mathbf{x}^T(k+j)\cdot\mathbf{Q}\cdot\mathbf{x}(k+j) + \mathbf{u}^T(k+j)\cdot\mathbf{R}\cdot\mathbf{u}(k+j)$ et $F\big(\mathbf{x}(k+N_P)\big) = \mathbf{x}^T(k+N_P)\cdot\mathbf{P}\cdot\mathbf{x}(k+N_P)$ sous des contraintes liées à l'entrée de commande ($\mathbf{u}(k+j) \in \mathbb{U}$) et à l'état du système ($\mathbf{x}(k+j) \in \mathbb{X}$). Le problème d'optimisation combinatoire est transformé en un problème d'optimisation équivalent, qui ne tient pas compte de la relaxation des contraintes de cardinalité. Ce problème d'optimisation équivalent peut être résolu en utilisant des boîtes à outils de programmation non linéaire standard [Gen41], qui fournissent la séquence de commandes d'entrée correspondant à l'optimum global.

En règle générale, la meilleure commande ℓ_0-optimale est de type "tout ou rien" (TOR) avec les valeurs ± 1 et 0. Cependant, pour de nombreuses applications, de telles commandes discrètes ne sont pas souhaitables.

1.2.5 Analyse et positionnement

L'importance des travaux utilisant des techniques de commande prédictive pour aborder la performance énergétique des bâtiments multizones démontre la valeur de cette approche. Les raisons en sont multiples, notamment la possibilité de prédire les perturbations hygrothermiques qui affectent le confort des zones, et la possibilité d'établir un modèle de comportement dynamique de manière assez systématique. Cependant, comme le montre l'émergence des stratégies EMPC et RMPC, le déploiement de l'approche prédictive à grande échelle nécessite que le critère de minimisation soit spécifiquement dédié au bâtiment en intégrant tous les objectifs d'énergie, de confort et de contrôle. Les synthèses EMPC et RMPC permettent déjà d'étendre la fonction d'objectifs classique en considérant des critères purement économiques ou des contraintes spécifiques régularisant le scénario de commande optimale. Il serait intéressant de préciser ces aspects en prenant en compte une fonction d'objectifs qui reflète le concept de confort hygrothermique et les conditions nominales de fonctionnement des équipements de CVC. C'est l'objectif du chapitre 3 de ce manuscrit, qui propose une stratégie de commande prédictive économique régularisée visant spécifiquement la performance énergétique / hygrothermique des bâtiments. Compte tenu de la dynamique relativement lente des bâtiments qui ne limite pas la charge de calcul, le choix est fait d'avoir un critère de minimisation aussi proche que possible des souhaits réels de l'utilisateur au détriment d'une relative complexité de résolution du problème d'optimisation.

1.3 Commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC)

La plupart des bâtiments, en particulier ceux dotés de systèmes énergétiques complexes, connaissent des problèmes de fonctionnement à des degrés divers. La défaillance de certains composants du système CVC ou de leurs capteurs peut sérieusement affecter la

performance énergétique attendue du bâtiment et le confort des utilisateurs (consommation d'énergie élevée, confort thermique faible et qualité de l'air inacceptable). On estime que les équipements de CVC mal entretenus et mal contrôlés sont responsables d'une surconsommation d'énergie de 15 à 30% dans les bâtiments commerciaux. Il a également été signalé que le nombre de demandes de maintenance des systèmes énergétiques des bâtiments a augmenté de manière exponentielle au cours des dernières décennies, ce qui indique une augmentation des dysfonctionnements de ces équipements. Dans ce contexte, il est particulièrement intéressant de synthétiser des lois de commande s'accommodant au mieux de ces défauts afin de permettre un fonctionnement efficace du système de CVC défaillant, d'améliorer le confort thermique intérieur du bâtiment et de prolonger la durée de vie utile de certains équipements.

La première partie de cette section est consacrée à la présentation des défaillances les plus courantes qui peuvent entraver le bon fonctionnement des systèmes de CVC. Des stratégies de commande à base de modèle permettant de s'accommoder au mieux de l'apparition de certains de ces défauts sont ensuite présentées.

1.3.1 Principales défaillances d'un système de CVC

Les défaillances de fonctionnement typiques peuvent être causées par un mauvais entretien, une dégradation de l'équipement, un décalage ou un dysfonctionnement des capteurs ou des problèmes de logique de contrôle. La liste suivante résume les principales défaillances qui peuvent survenir dans les systèmes de CVC [Gen34]. La modélisation et la simulation de ces défaillances permettent de quantifier leur impact sur la consommation d'énergie et le confort de vie des bâtiments [Tol10]. C'est ainsi que l'on peut obtenir des informations sur la surconsommation d'énergie finale causée par les nombreuses défaillances des refroidisseurs, des chaudières, des ventilateurs et des pompes [Gen48] :

- Biais des capteurs (température, humidité, enthalpie et pression) dans l'économiseur d'air (capteurs 11a et 11b à la figure 1.6). Les données des capteurs sont différentes des conditions réelles de l'air, ce qui entraîne un mauvais fonctionnement de l'économiseur d'air et un environnement intérieur médiocre. Le biais des capteurs de température de l'air extérieur interfère avec les seuils de commande des différents modes de fonctionnement de l'économiseur d'air et peut entraîner une consommation excessive d'énergie de chauffage et de refroidissement de plusieurs pour-cent.
- Biais des thermostats / humidistats (capteurs 11c et 11d à la figure 1.6). En raison de ce biais, les relevés de température ou d'humidité relative de l'air intérieur s'écartent des valeurs réelles, ce qui entraîne un fonctionnement anormal de certains équipements de chauffage / refroidissement / humidification / déshumidification.
- Encrassement des serpentins de chauffage et de refroidissement (batteries à eau chaude (2) et à eau glacée (3) à la figure 1.6), qui sont les types d'échangeurs de chaleur les plus couramment utilisés. L'encrassement des surfaces de transfert de chaleur des chaudières et des refroidisseurs augmente la résistance thermique et réduit le transfert de chaleur. La poussière sur les dissipateurs thermiques a également le même effet. Comme les pompes à vitesse variable sont utilisées pour alimenter les circuits d'eau froide et d'eau chaude, un tel encrassement augmente leur consommation d'énergie d'environ 4%. L'impact énergétique n'est pas significatif, mais le nombre d'heures d'inconfort thermique causé par la réduction de la capacité

de refroidissement et de chauffage est considérablement augmenté.
- Défaut de l'unité de refroidissement (refroidisseur ou pompe à chaleur) et de la chaudière (unités 12 et 13 de la figure 1.6). Les dommages causés aux tuyaux du refroidisseur ou le tartre dans la chaudière ont un impact énergétique significatif (plus de 12%) en raison de la réduction du COP et du rendement de la chaudière. Des défauts (fuite, blocage) peuvent également se produire dans les vannes à trois voies alimentant les serpentins en eau chaude ou glacée.
- Colmatage des filtres à air (filtre (1) à la figure 1.6). Ces filtres peuvent être obstrués par de la poussière, des débris ou d'autres obstructions. Cela augmente la résistance du système de circulation d'air et affecte directement le fonctionnement des ventilateurs correspondants. Plus précisément, cette défaillance peut entraîner une augmentation de la chute de pression, une augmentation de la consommation électrique des ventilateurs et/ou une augmentation de l'enthalpie de l'air de sortie des ventilateurs. Elle peut également entraîner une réduction du débit d'air, ce qui peut affecter la performance d'autres composants du système (par exemple, la performance de transfert de chaleur des serpentins de chauffage / refroidissement). Trois situations sont possibles : pour un ventilateur à vitesse constante, il n'est pas possible de maintenir le débit d'air requis ; pour un ventilateur à vitesse variable, soit le débit d'air requis peut être maintenu par un ventilateur fonctionnant à une vitesse plus élevée, soit il ne peut pas être atteint parce que le ventilateur ne peut pas augmenter suffisamment sa vitesse.
- Fuite ou blocage du registre d'air extérieur. Le blocage, généralement causé par une défaillance mécanique, est assez courant. Si le registre du système à volume d'air variable (VAV) intégré se bloque alors qu'il est ouvert à 100%, la consommation d'énergie du chauffage et des ventilateurs augmentera considérablement, estimée à 184% et 27%, respectivement. En cas de fuite, si la proportion d'air frais extérieur est inférieure au niveau de fuite, le registre ne pourra pas contrôler efficacement l'admission.
- Défaillance des ventilateurs de soufflage. Elles sont généralement caractérisées par un faible débit d'air et sont liées à des dysfonctionnements du moteur d'alimentation, du variateur de fréquence ou des pressostats de commande.

1.3.2 Commande active tolérante aux défauts

Les méthodes existantes pour concevoir des lois de commande tolérantes aux défauts peuvent être divisées en deux catégories : passives et actives [Tol11]. Les solutions passives sont similaires aux méthodes de commande robustes car elles sont conçues de manière conservatrice pour tenir compte de certaines défaillances potentielles. En revanche, les solutions actives sont adaptatives. Elles éliminent ou réduisent l'impact des défauts identifiés en reconfigurant les loi de commande, ce qui permet de réagir aux défaillances du système en temps réel. Les solutions actives de commande tolérante aux défauts (FTC) nécessitent des outils de diagnostic des défauts et peuvent gérer davantage de défaillances et de changements de comportement du système que les solutions passives de FTC. Le développement de commandes tolérantes aux défauts pour les applications du bâtiment et de CVC a récemment pris un élan considérable pour répondre à la demande croissante d'économies d'énergie, de fiabilité des systèmes et d'efficacité opérationnelle.

En général, un système de commande tolérant aux défauts est conçu pour maintenir

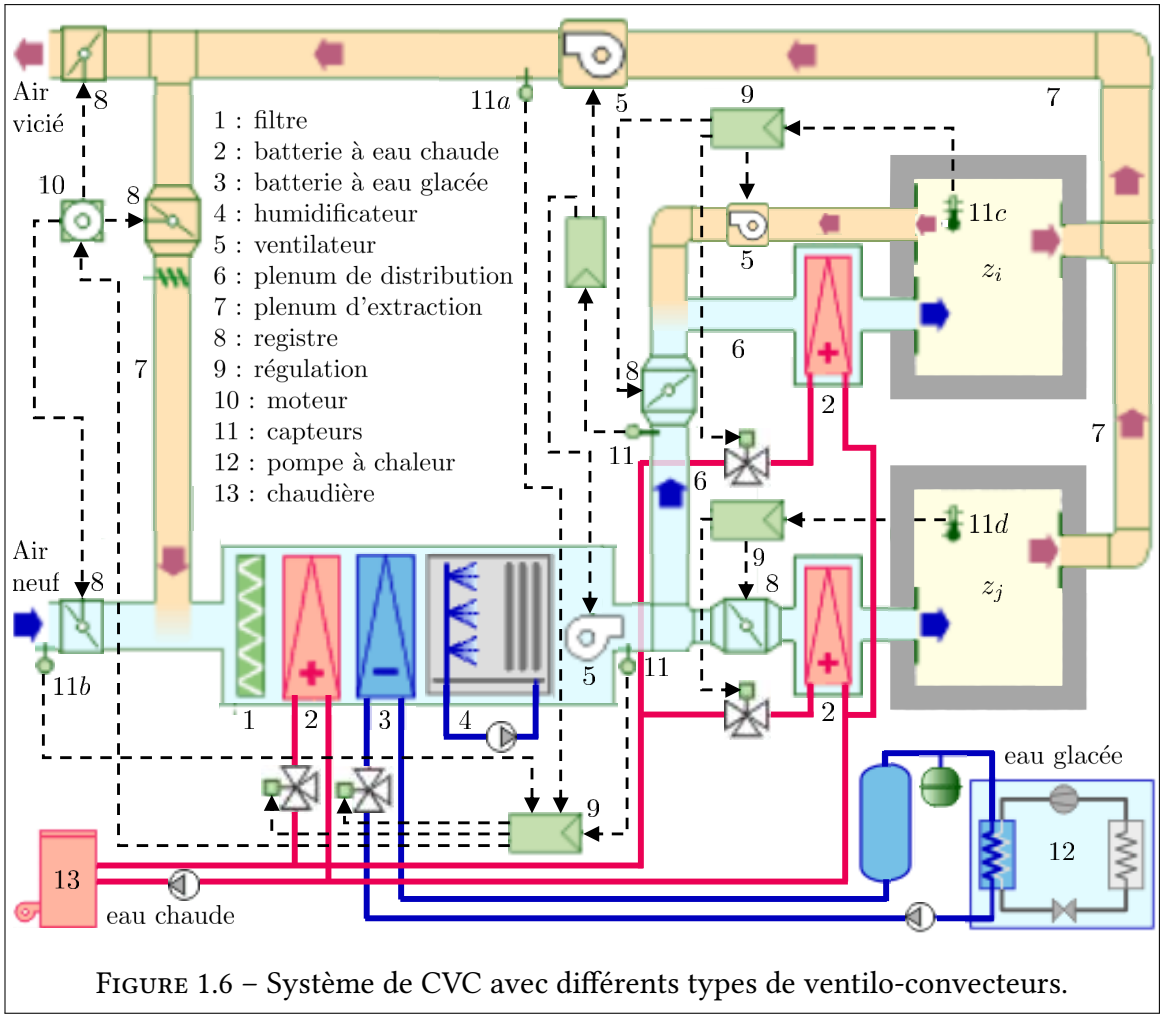


FIGURE 1.6 – Système de CVC avec différents types de ventilo-convecteurs.

des performances quasi normales en cas de défaillance. Des recherches dans ce domaine ont été menées et appliquées au contrôle de la température des bâtiments [Tol1], [Tol8]. Certaines d'entre elles permettent une adaptation à la défaillance de capteurs [Tol3], [Tol7], tandis que d'autres permettent la reconfiguration de la loi de commande en présence d'une défaillances du système de CVC [Tol2], [Tol9] (régulateur de débit d'air bloqué). Même si la recherche bibliographique effectuée montre que leur nombre est plutôt limité, les principales méthodes d'accommodation aux défauts basées sur des modèles de bâtiments ou de CVC sont maintenant présentées.

En présence d'un module de diagnostic, Le processus d'accommodation aux défauts peut être considéré lors de la synthèse d'une MPC en modifiant la fonction d'objectifs, les contraintes ou le modèle du système. En effet, l'impact d'une défaillance peut parfois être exprimé sous la forme de perturbations ou d'incertitudes importantes.

[Tol1] développe une loi de commande tolérante aux fautes pour les systèmes de CVC. En combinant une stratégie de MPC avec les informations d'un module de diagnostic, la loi de commande du système de CVC est automatiquement ajustée en fonction de l'apparition de défauts, garantissant ainsi une consommation d'énergie minimale tout au long du cycle de vie du bâtiment, en toutes circonstances. L'algorithme MPC est utilisé pour générer des points de consigne optimaux pour les boucles internes du système de CVC, minimisant

ainsi sa consommation d'énergie, tout en tenant compte des occupants par des contraintes de confort. Lorsqu'un défaut est détecté, deux scénarios peuvent se produire. Soit les contraintes de confort peuvent encore être satisfaites, et en tenant compte des nouvelles contraintes de l'équipement défectueux, l'algorithme développé peut générer une solution optimale acceptable. Soit l'importance du défaut ne permet plus de satisfaire les contraintes de confort, et l'objectif de l'algorithme de contrôle devient alors de minimiser l'inconfort en prenant en compte les nouvelles contraintes liées au défaut. En tant qu'extension du système de base de GTEB, la solution proposée est mise en œuvre au niveau du bloc de supervision dans une architecture de commande hiérarchisée. Des tests de mise en œuvre, effectués dans deux grands centres d'entraînement dans la région des Grands Lacs de l'Illinois, ont montré l'intérêt et la simplicité de cette approche. Chaque centre était équipé d'un système centralisé de CVC, où des échangeurs de chaleur vapeur-eau chaude desservent plusieurs CTA.

Dans [Tol2], un schéma de commande prédictive est proposé pour résoudre le problème du blocage des registres dans les systèmes de CVC à volume d'air variable. L'adaptation aux défauts se fait par la modification en ligne des contraintes prises en compte lors de la minimisation d'une fonction d'objectifs économique, dont le but est de minimiser la consommation d'énergie en mode nominal et en cas de dysfonctionnement sous contraintes de confort thermique. La fonction d'objectifs est définie en fonction de la consommation d'énergie thermique et électrique requise par les ventilateurs de la CTA pour acheminer le flux d'air vers les boîtes à VAV :

$$J_{\text{FTMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} \Big(C_{P^{\text{A}}} \cdot u(k+j) \cdot \big(T_{\text{BAT}}^{out}(k+j) - T_{\text{BAT}}^{inp}(k+j) \big) + C_{\text{VENT}} \cdot u^3(k+j) \Big) \cdot \Delta t \quad (1.32)$$

avec :

- $u(k+j) = Q_{\text{CTA}}(k+j)$: débit d'air contrôlé et fourni par la CTA ;
- $C_{P^{\text{A}}} \cdot u(k+j) \cdot \big(T_{\text{BAT}}^{out}(k+j) - T_{\text{BAT}}^{inp}(k+j) \big)$: puissance de la batterie de préchauffage ;
- $T_{\text{BAT}}^{inp}(k+j)$: température d'entrée de la batterie de préchauffage ;
- $T_{\text{BAT}}^{out}(k+j)$: température à la sortie de la batterie de préchauffage ;
- $C_{P^{\text{A}}}$: capacité thermique massique de l'air dans la batterie de préchauffage ;
- $C_{\text{VENT}} \cdot u^3(k+j)$: puissance du ventilateur.

En cas de défaut, le problème de MPC est reformulé en synthétisant des filtres d'estimation spécifiquement dédiés à la caractérisation des blocages de registres de ventilo-convecteurs. Sachant que le débit $Q_{\text{CTA}}(k+j)$ correspond à la somme des flux d'air $\sum_i Q_{\text{VAV}_i}(k+j)$ circulant dans chaque terminal à VAV, en cas de blocage sur le i^{e} registre, la contrainte de bon fonctionnement $Q_{\text{VAV}_i}^{\min}(k+j) \leq Q_{\text{VAV}_i}(k+j) \leq Q_{\text{VAV}_i}^{\max}(k+j)$ devient $Q_{\text{VAV}_i}(k+j) = Q_{\text{VAV}_i}^{bloc}$ et est prise en compte dans le problème d'optimisation (1.32).

Une approche intégrée de diagnostic et de tolérance aux pannes décentralisée, basée sur une stratégie de EMPC, est proposée dans [Tol6] pour un système de CVC dans un bâtiment multizone. Après avoir décomposé le bâtiment en autant de modèles thermiques orientés contrôle qu'il y a de zones, les auteurs ont développé un système de EMPC décentralisé qui

fonctionne en mode sain ou défectueux. Le problème d'optimisation associé est le suivant :

$$J_{\text{FTMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=0}^{N_P-1} C_f \cdot u_{\max} \cdot n^2 \cdot \big(u_i(k+j)\big)^2 + C_p \cdot u_i(k+j) \cdot \big|T_s - T_{zi}(k+j)\big| + \gamma \zeta^2(k+j) \quad (1.33)$$

où les objectifs de confort sont considérés à travers des contraintes inégalitaires et où les termes $C_f \cdot u_{\max} \cdot n^2 \cdot \big(u_i(k+j)\big)^2$ et $C_p \cdot u_i(k+j) \cdot \big|T_s - T_{zi}(k+j)\big|$ correspondent respectivement aux puissances du ventilateur et du processus de chauffage requises pour la i^{e} zone. Dans le cas d'un blocage de registre diagnostiqué dans le caisson à VAV de la zone i, un terme de relaxation $\zeta(k+j)$ lié à la température de cette zone est ajouté pour compenser ce défaut. Cette étude intéressante montre comment il est possible d'ajuster la fonction d'objectifs avec des termes de régularisation pour s'adapter au mieux à l'apparition de défauts spécifiques.

Une dernière étude intéressante a été menée dans [Tol5], dans laquelle une stratégie de FTMPC a été développée pour atteindre l'efficacité énergétique dans les bâtiments où la consommation d'énergie est proche de zéro. Le système envisagé comprend une pompe à chaleur pour la régulation de la température et un micro-réseau énergétique composé de panneaux photovoltaïques, de micro-turbines éoliennes et de batteries. L'objectif d'atteindre un équilibre entre la production et la consommation d'énergie tout en minimisant le coût total de l'énergie achetée et en maintenant une température confortable dans les bâtiments se reflète par le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} J_{\text{FTMPC}}(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u}} & \sum_{j=1}^{N_P} \alpha_1 \cdot \big(T(k+j) - T_{\text{REF}}(k+j)\big)^2 \\ & + \sum_{j=0}^{N_P-1} \alpha_2 \cdot \big(P_{\text{BAT}}(k+j) + P_{\text{GRID}}(k+j) + P_{\text{L}}(k+j) - P_{\text{PV}}(k+j) - P_{\text{WT}}(k+j)\big)^2 \quad (1.34) \\ & + \sum_{j=0}^{N_P-1} \beta_1 \cdot P_{\text{BAT}}(k+j)^2 + \beta_2 \cdot P_{\text{GRID}}(k+j)^2 + \beta_3 \cdot P_{\text{L}}(k+j)^2 \end{aligned}$$

avec :

- $P_{\text{PV}}(k+j)$: énergie produite par les panneaux photovoltaïques ;
- $P_{\text{WT}}(k+j)$: énergie électrique produite par les éoliennes ;
- $P_{\text{GRID}}(k+j)$: énergie du micro-réseau (> 0 si vendue, < 0 si achetée) ;
- $P_{\text{BAT}}(k+j)$: échange d'énergie avec les batteries ;
- $P_{\text{L}}(k+j)$: énergie demandée par la charge.

Des défauts de batteries sont considérés en modifiant les valeurs minimale et maximale de leur état de charge et sont pris en compte dans la solution du problème d'optimisation (1.34). Cette étude peut être considérée comme une extension de ce travail de thèse et nous a inspirés dans le développement de nos perspectives à long terme.

1.3.3 Analyse et positionnement

En cas de défaillance de certains équipements d'un système de CVC, on peut noter que peu de travaux s'appuient sur la synthèse d'une commande prédictive pour répondre au

problème de FTC. Cependant, comme l'ont montré les travaux précédents, une définition adaptée de la fonction d'objectifs et des contraintes d'exploitation aux caractéristiques du défaut semble être une technique simple et efficace. Sur cette base, le paragraphe 3.5.2 explique en détail la mise en œuvre de cette stratégie par la régularisation de la fonction d'objectifs nominale.

1.4 Conclusion

A travers une recherche bibliographique, ce chapitre a présenté divers travaux relatifs à la modélisation hypothermique des bâtiments, aux techniques de MPC utilisées pour optimiser leur efficacité énergétique et à l'extension de cette approche de commande prédictive pour tenir compte de l'apparition de défauts de CVC. Les conclusions locales de chaque paragraphe ont fourni une analyse critique des travaux existants et ont permis de positionner les travaux développés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DU CONFORT HYGROTHERMIQUE DES BÂTIMENTS MULTI-ZONES

Sommaire du présent chapitre

2.1 Introduction **39**

2.2 Modélisation hygrothermique d'une zone unique **39**

2.2.1 Hypothèses générales de modélisation 40

2.2.2 Bilans de chaleur et d'humidité dans les murs / fenêtres . . 41

2.2.3 Principaux échanges de masse et de chaleur dans une zone . 43

2.3 Confort hygrothermique **47**

2.3.1 Confort thermique 47

2.3.2 Confort hygrométrique 49

2.4 Modélisation du confort hygrothermique des bâtiments multi-zones **50**

2.4.1 Modélisation nodale 50

2.4.2 Modélisation sous forme d'état 56

2.5 Conclusion **62**

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthodologie globale pour la synthèse de modèles hygrothermiques orientés vers le contrôle et adaptés aux bâtiments multizones. Contrairement au modèle thermique traditionnel, en plus de la température de l'air intérieur, la température opérative de chaque zone est également modélisée. L'humidité relative est la troisième variable microclimatique modélisée, ce qui permet de considérer le tableau psychrométrique de la norme ANSI/ASHRAE 55-2017 du point de vue du confort et d'étudier les problèmes potentiels liés à la condensation de vapeur ou à l'humidité dans la structure. Le processus de modélisation prend en compte les différents murs, le volume des différentes zones, leur orientation, la présence de fenêtres et différents systèmes de CVC. L'environnement extérieur du bâtiment (température et humidité de l'air extérieur, éclairement énergétique solaire) est également pris en compte. La méthodologie proposée est basée sur le processus en trois étapes de Clarke [Mod7], qui permet la génération de modèles hygrothermiques orientés vers le contrôle pour des bâtiments multizones sous forme nodale [Mod4], [Mod15] ou d'une représentation d'état pour une simulation globale ou coopérative. Les outils classiques de théorie des graphes sont utilisés pour décomposer de grands bâtiments multizones en ensembles spatialement cohérents de zones interconnectées. Par conséquent, la méthodologie de modélisation proposée est particulièrement adaptée à une utilisation dans le cadre du contrôle prédictif décentralisé et distribué.

L'organisation de ce chapitre est la suivante. La section 2.2 spécifie d'abord les différentes lois de la physique qui décrivent le transfert de chaleur / humidité dans une zone de bâtiment entourée de différentes murs / fenêtres. Afin de faciliter la synthèse d'un modèle hygrothermique unifié couplant ces différents transferts, une attention particulière est portée à l'uniformité des différentes variables psychrométriques utilisées, et certaines approximations sont justifiées en considérant un climat tempéré. La section 2.3 clarifie le concept de confort hygrothermique en introduisant les notions de température moyenne de rayonnement et de température opérative. Le flux énergétique solaire incident qui affecte directement et de manière significative le confort thermique des occupants d'une zone donnée [Gen26] est également pris en compte. La section 2.4 présente deux types de modèles hygrothermiques pour des bâtiments multizones complets : le premier est sous forme nodale, qui est particulièrement adaptée à la modélisation / simulation graphique, le second sous forme de représentation d'état, pour une utilisation ultérieure à des fins de contrôle ou de diagnostic. La simulation de bâtiments multizones peut dans ce cas être réalisée de manière coopérative en définissant un ensemble de modèles d'état couplés résultant d'une technique de décomposition graphique du bâtiment multizone. La section 2.5 présente une conclusion et des perspectives pour les travaux futurs.

2.2 Modélisation hygrothermique d'une zone unique

Dans ce paragraphe est introduit l'ensemble des équations d'équilibre régissant le comportement dynamique de la température et de l'humidité relative dans un volume d'air z_i (alors appelé zone z_i) délimité par un ensemble $\mathcal{S}_i = \{s_{i_j}\}$ de couches de matériaux $N^s_{z_i}$ (murs, plafonds, sols). Les approximations qui seront faites sont raisonnables si l'on considère une zone de climat tempéré. Les définitions des différents paramètres sont précisées dans le texte ou dans la liste de la page ix.

2.2.1 Hypothèses générales de modélisation

Les bâtiments sont composés de multiples éléments et de systèmes hétérogènes (murs, fenêtres, équipements thermiques, mobilier...), qui ont de multiples interactions physiques (thermiques, pneumatiques, électriques, hydrauliques...), ce qui les rend complexes à modéliser. Pour cette raison, ils sont généralement décomposés en sous-ensembles homogènes (murs, zones, équipements, ...), modélisés séparément et interconnectés par des relations de couplage. Ce paragraphe décrit un ensemble de lois, de relations et de modèles permettant d'estimer dynamiquement le comportement hygrothermique d'une zone et des murs qui l'entourent dans des bâtiments multi-zones standard. Le bâtiment et son environnement peuvent être décomposés comme suit :

- Environnement : ensemble de conditions météorologiques qui constituent les conditions limites du modèle.
- Zones : toutes les caractéristiques hygrothermiques peuvent être considérées comme uniformes. Une pièce, ou un groupe de pièces ayant les mêmes caractéristiques psychrométriques, sera considéré comme une zone. De plus, dans l'hypothèse habituelle où le gaz enfermé dans une zone est calme et soumis à la seule action du champ de gravité, la distribution spatiale de la pression correspond au profil hydrostatique, qui est parfaitement uniforme pour une zone.
- Enveloppes, telles que murs, sols ou fenêtres : la conduction hygrothermique dans ces éléments est considérée comme unidirectionnelle.
- Équipements climatiques : tout système ayant une influence thermique par convection, rayonnement ou échange d'air (CVC, VMC, etc.).

2.2.1.1 Bilan thermique

L'équation du bilan énergétique transitoire indique que la somme algébrique de tous les flux de chaleur entrants et sortants est égale à la variation temporelle de l'enthalpie de l'air humide $H_{z_i}(t)$, qui est composée de chaleur sensible et latente. Si l'on ne prend en compte que la chaleur sensible de l'air sec et de la vapeur d'eau (sans tenir compte de la chaleur latente de la vapeur d'eau), on peut écrire :

$$\begin{aligned}
\dot{H}_{z_i}(t) &= \left(\rho_{z_i}^{\mathrm{DA}}(t)\cdot C_{P^{\mathrm{DA}}} + \rho_{z_i}^{\mathrm{V}}(t)\cdot C_{P^{\mathrm{V}}}\right)\cdot V_{z_i}\cdot \dot{T}_{z_i}(t) \\
&= C_{P^{\mathrm{DA}}}\cdot \rho_{z_i}^{\mathrm{DA}}(t)\cdot\left(1+\frac{C_{P^{\mathrm{V}}}\cdot\rho_{z_i}^{\mathrm{V}}(t)}{C_{P^{\mathrm{DA}}}\cdot\rho_{z_i}^{\mathrm{DA}}(t)}\right)\cdot V_{z_i}\cdot\dot{T}_{z_i}(t) \\
&= C_{P^{\mathrm{DA}}}\cdot\frac{P_{z_i}^{\mathrm{DA}}(t)}{R^{\mathrm{DA}}\cdot T_{z_i}(t)}\cdot\left(1+1.15\cdot\frac{P_{z_i}^{\mathrm{V}}(t)}{P_{z_i}^{\mathrm{DA}}(t)}\right)\cdot V_{z_i}\cdot\dot{T}_{z_i}(t) \\
&= \sum_{\xi} q_{z_i}^{\xi}(t)
\end{aligned} \tag{2.1}$$

sachant que $\rho_{z_i}^{\mathrm{DA}}(t) = \dfrac{P_{z_i}^{\mathrm{DA}}(t)}{R^{\mathrm{DA}}\cdot T_{z_i}(t)}$ et $\rho_{z_i}^{\mathrm{V}}(t) = \dfrac{P_{z_i}^{\mathrm{V}}(t)}{R^{\mathrm{V}}\cdot T_{z_i}(t)}$. Cette équation différentielle non linéaire, qui néglige les variations de capacités thermiques spécifiques $C_{P^{\mathrm{DA}}}$ et $C_{P^{\mathrm{V}}}$ à la température, peut être linéarisée en considérant les conditions météorologiques locales. En effet, selon (2.31), la pression au niveau de la mer $P_{z_i}^{0}(t)$ est généralement comprise entre 980 et 1040 hPa (compte tenu des conditions météorologiques typiques en France) et la

température dans une zone z_i est telle que 288 K $< T_{z_i}(t) <$ 308 K, donc nous avons :

$$\begin{aligned} 1.11 - 1.25e^{-4}\cdot \text{E}l \; &< \frac{P^{\text{DA}}_{z_i}(t)}{R^{\text{DA}}\cdot T_{z_i}(t)}\cdot\left(1 + 1.15\cdot\frac{P^{\text{V}}_{z_i}(t)}{P^{\text{DA}}_{z_i}(t)}\right) \\ &< 1.26 - 1.42e^{-4}\cdot \text{E}l \end{aligned} \tag{2.2}$$

en tenant compte des variations de la pression atmosphérique $P^{\text{E}l}_{z_i}(t)$ avec l'altitude (El en mètres) :

$$P^{\text{E}l}_{z_i}(t) = P^{\text{DA}}_{z_i}(t) + P^{\text{V}}_{z_i}(t) \approx P^{0}_{z_i}(t)\cdot\left(1 - \frac{0.0065\cdot \text{E}l}{288.15}\right)^{5.255} \tag{2.3}$$

Par conséquent, pour la ville de Nancy (France, $\approx$ 230 m altitude), (2.1) peut être approximé par l'équation différentielle linéaire suivante avec une erreur maximale de ±6% sur la pondération estimée du terme $\dot{T}_{z_i}(t)$:

$$1.15\cdot C_{P^{\text{DA}}}\cdot V_{z_i}\cdot\dot{T}_{z_i}(t) = \sum_{\xi} q^{\xi}_{z_i}(t) \tag{2.4}$$

2.2.1.2 Bilan hydrique

Dans la zone z_i, la densité de vapeur d'eau $\rho^{\text{V}}_{z_i}(t)$ ne change qu'avec l'ajout ou l'enlèvement d'humidité, indépendamment des changements de température et de pression. Il en résulte :

$$V_{z_i}\cdot\dot{\rho}^{\text{V}}_{z_i}(t) = \sum_{\xi} g^{\xi}_{z_i}(t) \tag{2.5}$$

2.2.1.3 Transfert par convection

La zone z_i étant en contact avec un ensemble de $N^s_{z_i}$ couches de matériau $\mathcal{S}_i = \{s_{i_j}\}$, qui sont caractérisées par une surface de contact S_{z_i,s_j}, une température de contact $T_{z_i,s_j}(t)$ et une densité de vapeur d'eau de contact $\rho^{\text{V}}_{z_i,s_j}(t)$, des flux de chaleur/humidité se produisent par convection dans la zone z_i selon les relations [Gen49] :

$$\begin{cases} g^1_{z_i}(t) = -\displaystyle\sum_{s_j\in\mathcal{S}_i}\frac{P_{z_i}(t)}{n_a}\cdot h_m\cdot S_{z_i,s_j}\cdot\left(\rho^{\text{V}}_{z_i}(t) - \rho^{\text{V}}_{z_i,s_j}(t)\right) \\ q^1_{z_i}(t) = -\displaystyle\sum_{s_j\in\mathcal{S}_i} h_c\cdot S_{z_i,s_j}\cdot\left(T_{z_i}(t) - T_{z_i,s_j}(t)\right) + h_v\cdot g^1_{z_i}(t) \end{cases} \tag{2.6}$$

où h_m, h_c, h_v et n_a sont définis dans la liste de la page ix et $\dfrac{P_{z_i}(t)}{n_a} \approx 2\,500$. Dans cette étape de modélisation, le transfert de chaleur radiante vers les couches autour de la zone z_i est négligé par rapport au transfert de chaleur convective. La température $T_{z_i,s_j}(t)$ et la densité de vapeur d'eau $\rho^{\text{V}}_{z_i,s_j}(t)$ apparaissant dans l'équation (2.6) peuvent être déterminées par le bilan d'énergie et d'humidité dans les murs / fenêtres autour de la zone z_i.

2.2.2 Bilans de chaleur et d'humidité dans les murs / fenêtres

Considérons une couche de matériau uniforme et isotrope s_j, telle qu'un mur, une fenêtre ou une porte, d'une épaisseur e_{s_j}, délimitée par deux surfaces parallèles $\left(\Sigma_{z_i,s_j}\right)$ et

(Σ_{z_ℓ,s_j}) ayant une surface de contact de $S_{s_j} = S_{z_i,s_j} = S_{z_\ell,s_j}$. On suppose que la température et la pression partielle de la vapeur d'eau sont les mêmes en tout point de chaque surface (conduction unidimensionnelle à travers le matériau). A partir de cette hypothèse, les flux de chaleur et de masse sont perpendiculaires à ces surfaces. Soit $\left(T_{z_i,s_j}(t), P^{\mathrm{v}}_{z_i,s_j}(t), \rho^{\mathrm{v}}_{z_i,s_j}(t)\right)$ et $\left(T_{z_\ell,s_j}(t), P^{\mathrm{v}}_{z_\ell,s_j}(t), \rho^{\mathrm{v}}_{z_\ell,s_j}(t)\right)$ la température, la pression partielle de vapeur et la densité de vapeur de chacune des deux surfaces (Σ_{z_i,s_j}) et (Σ_{z_ℓ,s_j}). Le reste de ce paragraphe décrit le bilan de masse et de chaleur sensible au cœur de la couche de matériau s_j, c'est-à-dire à la surface centrale (Σ_{s_j}) équidistante de $e_{s_j}/2$ de (Σ_{z_i,s_j}) et (Σ_{z_ℓ,s_j}). Soit $T_{s_j}(t)$, $P^{\mathrm{v}}_{s_j}(t)$ et $\rho^{\mathrm{v}}_{s_j}(t)$ la température, la pression de vapeur et la densité de vapeur sur cette surface centrale. Le modèle de transport couplé de la chaleur et de l'humidité est basé sur les lois standard de Fourier, Fick et Darcy.

2.2.2.1 Bilan thermique

Comme mentionné dans le chapitre précédent, le transfert de chaleur dans les milieux poreux peut prendre trois formes : par conduction thermique, c'est-à-dire la migration descendante de l'énergie en présence d'un gradient de température (loi de Fourier ($\frac{q_{cond}}{S_{s_j}} = -\lambda_{s_j} \cdot \mathrm{grad}(T)$)), par advection due à un flux d'eau liquide (généralement ignoré dans les bâtiments sains [Mod9]) et latente par le mouvement de diffusion de la vapeur ($\frac{q_v}{S_{s_j}} = -h_v \cdot \delta^{\mathrm{p}}_{s_j} \cdot \mathrm{grad}(P^{\mathrm{v}})$). L'équation du bilan énergétique la suivante :

$$\begin{aligned} \rho_{s_j} \cdot C_{P,s_j} \cdot V_{s_j} \cdot \dot{T}_{s_j}(t) = &-\frac{2 \cdot S_{s_j} \cdot \lambda_{s_j}}{e_{s_j}} \cdot \left(2 \cdot T_{s_j}(t) - T_{z_i,s_j}(t) - T_{z_\ell,s_j}(t)\right) \\ &-\frac{2 \cdot S_{s_j} \cdot \sigma \cdot h_v \cdot \delta^{\mathrm{p}}_{s_j}}{\rho_{s_j} \cdot C_{m,s_j} \cdot e_{s_j}} \cdot \left(2 \cdot \rho^{\mathrm{v}}_{s_j}(t) - \rho^{\mathrm{v}}_{z_i,s_j}(t) - \rho^{\mathrm{v}}_{z_\ell,s_j}(t)\right) \end{aligned} \tag{2.7}$$

avec :

$$\begin{cases} \rho^{\mathrm{v}}_{s_j}(t) = \rho_{s_j} \cdot C_{m,s_j} \cdot P^{\mathrm{v}}_{s_j}(t) \\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_i,s_j}(t) = \rho_{s_j} \cdot C_{m,s_j} \cdot P^{\mathrm{v}}_{z_i,s_j}(t) \\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_\ell,s_j}(t) = \rho_{s_j} \cdot C_{m,s_j} \cdot P^{\mathrm{v}}_{z_\ell,s_j}(t) \end{cases} \tag{2.8}$$

2.2.2.2 Bilan d'humidité

Le transfert d'humidité dans les matériaux insaturés poreux peut se produire sous forme d'eau liquide et de vapeur d'eau. Le transfert d'eau liquide est causé par le gradient de pression capillaire, mais comme le bâtiment doit être sain, il n'a pas été pris en compte dans ce travail. Le transport de vapeur d'eau est un processus de diffusion sous un gradient de pression de vapeur, régi par la loi de Fick ($\frac{g_v}{S_{s_j}} = -\delta^{\mathrm{p}}_{s_j} \cdot \mathrm{grad}(P^{\mathrm{v}})$). Le bilan de masse dans la surface centrale (Σ_{s_j}) nous permet d'écrire la relation suivante :

$$V_{s_j} \cdot \dot{\rho}^{\mathrm{v}}_{s_j}(t) = \frac{-2 \cdot S_{s_j} \cdot \delta^{\mathrm{p}}_{s_j}}{\rho_{s_j} \cdot C_{m,s_j} \cdot e_{s_j}} \cdot \left(2 \cdot \rho^{\mathrm{v}}_{s_j}(t) - \rho^{\mathrm{v}}_{z_i,s_j}(t) - \rho^{\mathrm{v}}_{z_\ell,s_j}(t)\right) \tag{2.9}$$

Remarque 1. *Pour la couche de matériau s_j, si les nombres de Biot caractérisant le transfert*

de chaleur et de masse respectivement par :

$$Bi = \frac{h_c \cdot e_{s_j}}{\lambda_{s_j}}; \quad Bi_m = \frac{h_m \cdot e_{s_j}}{\delta^P_{s_j}} \tag{2.10}$$

sont petits devant 1 ($Bi < 0,1$ *et* $Bi_m < 0,1$ *en considérant les coefficients* h_c *et* h_m *pour les deux surfaces* (Σ_{z_i,s_j}) *et* (Σ_{z_ℓ,s_j})*) alors la résistance de conduction dans le matériau* s_j *est beaucoup plus faible que la résistance de convection à travers la couche limite d'air. Dans ce cas, une distribution uniforme de la température / vapeur partielle dans* s_j *est raisonnable, et les équations (2.9) et (2.7) sont simplifiées en :*

$$\begin{cases} \rho^V_{s_j}(t) = \rho^V_{z_i,s_j}(t) = \rho^V_{z_\ell,s_j}(t) \\ T_{s_j}(t) = T_{z_i,s_j}(t) = T_{z_\ell,s_j}(t) \end{cases} \tag{2.11}$$

2.2.3 Principaux échanges de masse et de chaleur dans une zone

2.2.3.1 Mouvements d'air

La première raison des changements de température et d'humidité relative dans la zone z_i peut être liée à l'échange d'air avec l'extérieur par infiltration ou ventilation mécanique contrôlée (VMC). Soit Q_a (en m^3/s) le flux d'air entrant (infiltration + ventilation). En supposant que l'air est renouvelé de l'extérieur avec un débit constant Q_a de température $T_{out}(t)$, des flux algébriques de masse $g^2_{z_i}(t)$ / de chaleur $q^2_{z_i}(t)$ se forment et sont tels que :

$$\begin{cases} g^2_{z_i}(t) = -Q_a \cdot \left(\rho^{\mathrm{V}}_{z_i}(t) - \rho^{\mathrm{V}}_{out}(t)\right) \\ q^2_{z_i}(t) = -1.15 \cdot Q_a \cdot C_{P^{\mathrm{DA}}} \cdot \left(T_{z_i}(t) - T_{out}(t)\right) \end{cases} \tag{2.12}$$

Un autre cas peut être envisagé : une VMC pour faire circuler l'air entre deux zones z_i et z_ℓ. Dans ce cas, l'air extrait de la zone "source" z_i est en grande partie remplacé par de l'air extérieur qui s'infiltre dans les fenêtres par les bouches d'aération. Ainsi, l'air reçu par la zone "destination" z_ℓ a pour effet d'évacuer vers l'extérieur une partie de l'air initialement contenu dans cette zone. Par conséquent, dans chaque zone concernée, deux masses d'air ayant des caractéristiques psychrométriques différentes sont mélangées. Soit $\left(\rho^{\mathrm{V}}_{z_i}, T_{z_i}\right)(t_{on})$ et $\left(\rho^{\mathrm{V}}_{z_\ell}, T_{z_\ell}\right)(t_{on})$ ces caractéristiques dans chaque zone z_i et z_ℓ au moment t_{on} où la VMC est lancée. Les flux de masse/chaleur entrants sont donnés par :

$$\begin{cases} g^2_{z_\ell}(t) = -Q^{\mathrm{VMC}} \cdot \left(\rho^{\mathrm{V}}_{z_\ell}(t) - \rho^{\mathrm{V}}_{z_i}(t)\right) \\ q^2_{z_\ell}(t) = -1.15 \cdot Q^{\mathrm{VMC}} \cdot C_{P^{\mathrm{DA}}} \cdot \left(T_{z_\ell}(t) - T_{z_i}(t)\right) \end{cases} \tag{2.13}$$

$$\begin{cases} g^2_{z_i}(t) = -Q^{\mathrm{VMC}} \cdot \left(\rho^{\mathrm{V}}_{z_i}(t) - \rho^{\mathrm{V}}_{out}(t)\right) \\ q^2_{z_i}(t) = -1.15 \cdot Q^{\mathrm{VMC}} \cdot C_{P^{\mathrm{DA}}} \cdot \left(T_{z_i}(t) - T_{out}(t)\right) \end{cases} \tag{2.14}$$

où Q^{VMC} représente le débit d'air de la VMC en m^3/s.

2.2.3.2 Systèmes de chauffage/refroidissement

Dans les bâtiments, les CTA ne sont pas seulement utilisés pour chauffer ou refroidir des zones, mais aussi pour traiter, filtrer et humidifier l'air intérieur. Cette section se concentre

sur les pompes à chaleur réversibles (PAC). Ce sont des dispositifs thermodynamiques qui transfèrent la chaleur de la "source froide" à la "source chaude", où la chaleur est naturellement libérée de l'endroit le plus chaud vers l'endroit le plus froid. Les pompes à chaleur sont des systèmes qui jouent un rôle majeur dans le confort thermique des bâtiments car elles fournissent du froid en été et de la chaleur en hiver. Nous allons maintenant préciser les flux massique / thermique générés par ces systèmes. Supposons que la température $T_{\mathrm{H/C}}$ (en K) et les densités de vapeur $\rho^{\mathrm{V}}_{\mathrm{H}}$, $\rho^{\mathrm{V}}_{\mathrm{C}}$ de l'air forcé (en kg/m^3) soient connues en mode chauffage/refroidissement. Si les aspects transitoires ne sont pas pris en compte, les flux de masse/chaleur entrant dans la zone z_i sont en mode chauffage/refroidissement :

$$\begin{cases} g^3_{z_i}(t) = -Q^{\mathrm{PAC}} \cdot \left(\rho^{\mathrm{V}}_{z_i}(t) - \rho^{\mathrm{V}}_{\mathrm{H/C}}\right) \\ q^3_{z_i}(t) = -1.15 \cdot Q^{\mathrm{PAC}} \cdot C_{P^{\mathrm{DA}}} \cdot \left(T_{z_i}(t) - T_{\mathrm{H/C}}\right) \end{cases} \tag{2.15}$$

avec Q^{PAC} le débit d'air de la PAC en m^3/s.

2.2.3.3 Occupation et équipements

Le tableau 2.1 montre la quantité d'énergie et de vapeur d'eau émise par les personnes en fonction de leur activité et de la température de la zone. Selon (2.6), les flux énergétiques

	Repos à activité légère		Activité légère à soutenue		Activité physique intense	
T_{z_i} (K)	$g^4_{z_i}$ (g/h)	$q^4_{z_i}$ (W)	$g^4_{z_i}$ (g/h)	$q^4_{z_i}$ (W)	$g^4_{z_i}$ (g/h)	$q^4_{z_i}$ (W)
291	35	125	95	190	165	270
294	35	120	110	190	185	270
295	40	120	125	190	215	270
296	50	120	135	190	225	270
297	60	115	140	190	230	270
298	60	115	145	190	240	270
299	65	115	150	190	250	270

Tableau 2.1 – Flux de chaleur et d'humidité

$q^4_{z_i}$ indiqués dans le tableau 2.1 sont des valeurs approximatives de ceux générés par une personne. Ils comprennent la chaleur sensible dégagée par la température du corps humain (310 K) et la chaleur latente libérée par la vapeur d'eau dans la respiration et la sueur.

$$q^4_{z_i}(t) \approx -\gamma \cdot \left(T_{z_i}(t) - 310\right) + h_v \cdot g^4_{z_i}(t) \tag{2.16}$$

De nombreux autres appareils dans une zone génèrent de la chaleur ou de la vapeur. Comme leur nature (éclairage, matériel informatique, plantes vertes, etc.) et leur puissance sont très diverses, elles ne seront pas prises en compte dans ce travail.

2.2.3.4 Flux énergétique solaire

Le rayonnement est l'échange d'énergie à distance. Dans les bâtiments, il existe deux grandes familles de phénomènes de rayonnement. La première comprend toutes les sources

de rayonnement visible provenant du soleil ou des équipements d'éclairage. La seconde est causée par les différences de température entre les surfaces solides et se produit dans le domaine des rayonnements infrarouges. Dans les deux cas, le rayonnement est réfléchi, transmis et absorbé. Chaque surface solide capable de recevoir des rayonnements est caractérisée par des facteurs de réflexion, de transmission et d'absorption, qui dépendent de la nature du matériau et de l'état de la surface. Les différentes valeurs caractérisent le comportement de la surface par rapport aux rayonnements visibles ou infrarouges et aux rayonnements directs ou diffus. Naturellement, dans le cas du rayonnement solaire, l'orientation de la surface vitrée peut faciliter ou limiter l'apport de chaleur solaire. La suite de ce paragraphe se concentre sur le calcul de l'énergie solaire thermique reçue par une zone z_i.
Le flux énergétique solaire total reçu par rayonnement par une surface est défini par la somme des trois composantes suivantes :

- Flux énergétique solaire direct $q^5_{z_i}(t)$. Cette partie est nulle si le soleil est caché par des nuages ou des obstacles ;
- Flux énergétique solaire diffusé par l'atmosphère $q^6_{z_i}(t)$, sans rayonnement direct, se référant au rayonnement reçu de la voûte céleste. Ce flux est dirigé vers la surface de la Terre. Lorsque le soleil est proche de l'horizon, il peut atteindre 50% du flux énergétique global reçu ; si le ciel est complètement couvert, il peut atteindre 100% ;
- Flux énergétique solaire réfléchi par l'environnement extérieur $q^7_{z_i}(t)$, y compris le sol. Le coefficient de réflexion est appelé albédo.

Afin de quantifier le flux énergétique solaire global, la latitude locale Φ, l'angle horaire $h(t)$ en temps solaire local, la déclinaison solaire $\delta^{sol}(t)$ et l'azimut solaire $Z^{sol}(t)$ [Gen10] doivent être pris en considération. Dans des conditions normales de ciel clair, le flux énergétique solaire direct est [Gen11], [Gen29] :

$$q^5_{z_i}(t) = \sum_{s_j \in \mathcal{S}_i} q^5_{z_i,s_j}(t) = 1230 \cdot \exp\left(\frac{-1}{3.8 \cdot \sin\left(\alpha^{sol}(t) + 1.6\right)}\right) \cdot \sum_{s_j \in \mathcal{S}_i} T^{sol}_{s_j} \cdot S^{w}_{s_j} \cdot \cos\left(\theta_{s_j}(t)\right) \quad (2.17)$$

où $S^{w}_{s_j}$ est la surface des fenêtres de s_j (si s_j n'a pas de fenêtre, alors $S^{w}_{s_j} = 0$), $\alpha^{sol}(t)$ est l'angle d'élévation solaire défini par :

$$\alpha^{sol}(t) = \arcsin\left(\sin(\Phi) \cdot \sin\left(\delta^{sol}(t)\right) + \cos(\Phi) \cdot \cos\left(\delta^{sol}(t)\right) \cdot \cos\left(h(t)\right)\right) \quad (2.18)$$

$\theta_{s_j}(t)$ est l'angle d'incidence solaire entre les rayons du soleil et la normale à la fenêtre :

$$\theta_{s_j}(t) = \arccos\left(\cos\left(\alpha^{sol}(t)\right) \cdot \sin(\beta_{s_j}) \cdot \cos\left(Z^{sol}(t) - Z^{w}_{s_j}\right) + \sin\left(\alpha^{sol}(t)\right) \cdot \cos(\beta_{s_j})\right) \quad (2.19)$$

et $T^{sol}_{s_j}$ est la transmission solaire totale (ou coefficient de gain de chaleur solaire (CGCS)) du système de verre. Pour un simple vitrage (clair standard), $T^{sol}_{s_j} \approx 0,81$; pour un double vitrage isolant (clair standard) $T^{sol}_{s_j} \approx 0,7$.
La détermination de $\alpha^{sol}(t)$ et $\theta_{s_j}(t)$ implique le calcul de l'angle horaire solaire $h(t)$ (rad) :

$$h(t) = \frac{\pi}{12} \cdot \left(t^{sol}(t) - 12\right) \quad (2.20)$$

l'azimut solaire $Z^{sol}(t)$, qui est l'angle azimutal de la position du soleil :

$$Z^{sol}(t) = \arcsin\left(\frac{\cos\left(\delta^{sol}(t)\right)\cdot\sin\left(h(t)\right)}{\cos\left(\alpha^{sol}(t)\right)}\right) \tag{2.21}$$

et la déclinaison solaire $\delta^{sol}(t)$ (rad), qui est l'angle entre les rayons du soleil et le plan de l'équateur terrestre [Gen40] :

$$\begin{aligned}\delta^{sol}(t) = 10^{-3}\cdot\Big(&6.918 - 399.912\cdot\cos\left(\Gamma(t)\right) - 6.758\cdot\cos\left(2\Gamma(t)\right) - 2.697\cdot\cos\left(3\Gamma(t)\right)\\ &+ 70.257\cdot\sin\left(\Gamma(t)\right) + 0.907\cdot\sin\left(2\Gamma(t)\right) + 1.48\cdot\sin\left(3\Gamma(t)\right)\Big)\end{aligned} \tag{2.22}$$

où :

- $t^{sol}(t)$ est le temps solaire vrai ;
- $\Gamma(t) = 2\pi\cdot\big(D(t)-1\big)/365$ est un angle quotidien calculé en fonction du nombre de jours $D(t) \in \mathbb{R}$ depuis le 1er janvier de l'année, en tenant compte des heures et des minutes ($D(t) = \text{jour_de_l'année} + \frac{\text{heure} - 12}{24}$) ;
- la latitude locale Φ est déterminée par l'emplacement du bâtiment ($\Phi = 0{,}85$ rad pour Nancy, France) ;
- $Z^{w}_{s_j}$ est l'azimut de la fenêtre entre le sud vrai et la normale de la fenêtre ;
- β_{s_j} est l'angle d'inclinaison de la fenêtre par rapport à l'horizontale (pour une fenêtre verticale, $\beta_{s_j} = \pi/2$).

En ce qui concerne les flux énergétiques solaires diffusé par l'atmosphère $q^{6}_{z_i}(t)$ et réfléchi par la surface de la terre $q^{7}_{z_i}(t)$, ils sont calculés sur la base des équations suivantes pour des conditions normales de ciel dégagé [Gen11], [Gen29] :

$$\begin{cases} q^{6}_{z_i}(t) = \displaystyle\sum_{s_j\in\mathcal{S}_i} q^{6}_{z_i,s_j}(t) = 62.5\cdot\sin^{0.4}\left(\alpha^{sol}(t)\right)\cdot\sum_{s_j\in\mathcal{S}_i} T^{sol}_{s_j}\cdot S^{w}_{s_j}\cdot\left(1+\cos(\beta_{s_j})\right) \\ q^{7}_{z_i}(t) = \displaystyle\sum_{s_j\in\mathcal{S}_i} q^{7}_{z_i,s_j}(t) = 540\cdot\rho_f\cdot\sin^{1.22}\left(\alpha^{sol}(t)\right)\cdot\sum_{s_j\in\mathcal{S}_i} T^{sol}_{s_j}\cdot S^{w}_{s_j}\cdot\left(1-\cos(\beta_{s_j})\right) \end{cases} \tag{2.23}$$

en tenant compte du fait que la réflectance diffuse du sol et des meubles inférieurs est égale à ρ_f. Pour les ondes courtes et longues combinées, une valeur approximative de ρ_f peut être 0.3 + 0.3.

Remarque 2. *Lorsque les rayons du soleil atteignent une paroi opaque, une partie du flux énergétique solaire est absorbée par les différents matériaux qui la composent. Il n'y a pas en revanche de transmission de rayonnement. L'inertie de la paroi détermine le temps de réponse. Afin d'évaluer l'apport énergétique du soleil sur une paroi opaque et de considérer son inertie, nous pouvons utiliser le concept de température extérieure équivalente, qui combine le flux énergétique solaire et les caractéristiques de la paroi opaque (capacité d'absorption et inertie).*

Comme mentionné dans l'introduction, la température et l'humidité relative de l'air ambiant dans une zone ne sont pas suffisantes pour évaluer le confort d'une personne. Le paragraphe suivant clarifie le concept de confort hygrothermique et suggère d'autres variables microclimatiques plus pertinentes pour son évaluation.

2.3 Confort hygrothermique

Le confort ressenti par une personne est principalement lié à la température et à l'humidité de la zone dans laquelle elle se trouve. Cependant, pour les personnes qui n'ont pas besoin du même niveau de température / humidité, le niveau de confort est différent. Cela est notamment dû au fait que chacun s'habille différemment, ce qui entraîne plus ou moins une dépendance vis-à-vis du temps qu'il fait à l'extérieur. Sachant que la chaleur échangée par l'homme par convection est presque la même que la chaleur échangée par rayonnement, il ne suffit pas de considérer la température de l'air pour caractériser le confort. Malheureusement, la plupart des stratégies de commande ne prennent en compte que la température de l'air. Outre le fait que la température ambiante et / ou l'humidité relative sont trop basses ou trop élevées, il existe d'autres désagréments [Gen32] :

- L'asymétrie de température radiante des fenêtres (ou autre surface verticale) doit être inférieure à 10 K (mesurée à 0.6 m du sol). Cette mesure est utilisée pour comparer la façon dont le rayonnement échange de la chaleur de tous les côtés du corps humain vers l'environnement. Si la différence entre la température moyenne de la fenêtre et la température moyenne de la paroi arrière dans cette zone est supérieure à 10 K, la personne est dans un état d'inconfort.
- L'asymétrie de la température radiante d'un plafond chaud (chauffé) doit être inférieure à 5 K (mesurée à 0.6 m du sol). Au-delà de cette valeur, davantage de personnes sont insatisfaites de l'excès de chaleur sur le dessus de leur tête.
- La température de la surface du sol doit généralement se situer entre 292 et 299 K, mais le système de chauffage par le sol peut être conçu pour 302 K pour les périodes froides.
- La stratification verticale de la température doit être limitée à 3 K entre 0.1 et 1.1 m au-dessus du sol.

2.3.1 Confort thermique

Dans la norme ISO 7730 [Gen32], un indicateur de confort est introduit, appelé "température opérative". Il est utilisé pour quantifier la chaleur et l'inconfort des personnes exposées à des environnements à température modérée, spécifiant ainsi des conditions thermiques de confort acceptables. En considérant la zone z_i délimitée par un ensemble de $N^s_{z_i}$ couches de matériau $\mathcal{S}_i = \{s_{i_j}\}$ (murs, plafonds, sols), cette température opérative est définie par :

$$T^{op}_{z_i}(t) \approx \frac{T^{\text{MRT}}_{z_i}(t) + T_{z_i}(t)}{2} \tag{2.24}$$

où T_{z_i} est la température de l'air ambiant dans la zone z_i et $T^{\text{MRT}}_{z_i}$ est la température radiante moyenne (TRM) dans la zone définie selon la référence technique Energy Plus par :

$$T^{\text{MRT}}_{z_i}(t) = \frac{\sum\limits_{s_j \in \mathcal{S}_i} \epsilon_{s_j} \cdot S_{z_i,s_j} \cdot T_{z_i,s_j}(t)}{\sum\limits_{s_j \in \mathcal{S}_i} \epsilon_{s_j} \cdot S_{z_i,s_j}} \tag{2.25}$$

avec T_{z_i,s_j} la température et ϵ_{s_j} $(1 \leqslant j \leqslant N^s_{z_i})$ l'émissivité de la couche s_j ayant une surface d'échange avec la zone z_i égale à S_{z_i,s_j}. Il est important de mentionner que la température radiante des murs doit être la température ressentie par les occupants là où ils se trouvent. Elle doit donc être "personnalisée" en fonction de la position des occupants dans la zone z_i

et de leur proximité avec tous les murs. Par exemple, dans la même zone, une personne assise directement à côté d'une surface vitrée n'aura pas la même sensation de température qu'une personne assise à l'arrière de la zone. Par conséquent, la température moyenne des murs doit être ajustée en fonction de l'angle solide de chaque mur "vu" par l'occupant. Dans la suite de ce chapitre, nous ne considérerons pas cette position relative, et traiterons $T_{z_i}^{\text{MRT}}$ comme un bon reflet moyen de la température radiante ressentie par les personnes dans la zone z_i quelle que soit leur position.
Le calcul de la température radiante moyenne (2.25) ne prend pas en compte l'impact du rayonnement solaire sur le corps humain. Cependant, la présence de sources de rayonnement de haute intensité comme le soleil peut modifier de manière significative le champ de rayonnement auquel les personnes sont exposées. Pour pallier cette lacune, la définition de la température radiante moyenne est ajustée pour prendre en compte le flux énergétique solaire direct et diffus de courte longueur d'onde [Mod2], [Gen26] en plus du flux énergétique de grande longueur d'onde émis par les surfaces intérieures. Le modèle simplifié SolarCal [Mod2] peut être utilisé pour déterminer un incrément de température radiante moyenne $T_{z_i}^{\Delta\text{MRT}}(t)$ qui reflète l'impact du flux énergétique à ondes courtes sur le confort thermique :

$$T_{z_i}^{\Delta\text{MRT}}(t) = \frac{\alpha_{sw}}{f_{z_i}^{\text{eff}} \cdot h_r \cdot \alpha_{lw}} \cdot \left(E_{z_i}^{\text{dir}}(t) + E_{z_i}^{\text{diff}}(t) + E_{z_i}^{\text{refl}}(t)\right) \tag{2.26}$$

avec (voir liste page ix) :

- $E_{z_i}^{\text{dir}}(t) = f_{z_i}^{\text{eff}} \cdot f_{\text{p}}(t) \cdot f_{z_i}^{\text{bes}}(t) \cdot \sum_{s_j \in \mathcal{S}_i} \frac{q_{z_i,s_j}^{5}(t)}{S_{s_j}^{\text{w}} \cdot \cos\left(\theta_{s_j}(t)\right)}$: éclairement énergétique solaire direct à ondes courtes (W/m^2) ;
- $E_{z_i}^{\text{diff}}(t) = f_{z_i}^{\text{eff}} \cdot f_{z_i}^{\text{svv}} \cdot \sum_{s_j \in \mathcal{S}_i} \frac{q_{z_i,s_j}^{6}(t)}{S_{s_j}^{\text{w}} \cdot \left(1 + \cos(\beta_{s_j})\right)}$: éclairement énergétique solaire diffusé par l'atmosphère (W/m^2) ;
- $E_{z_i}^{\text{refl}}(t) = f_{z_i}^{\text{eff}} \cdot f_{z_i}^{\text{svv}} \cdot \sum_{s_j \in \mathcal{S}_i} \frac{q_{z_i,s_j}^{7}(t)}{S_{s_j}^{\text{w}} \cdot \left(1 - \cos(\beta_{s_j})\right)}$: éclairement énergétique solaire réfléchi vers le haut par le sol (W/m^2) ;
- α_{lw} (resp. α_{sw}) : facteur d'absorption du corps humain en ondes longues (resp. en ondes courtes). $\alpha_{lw} \approx 0.95$ et $\alpha_{sw} \approx 0.67$ pour la peau (blanche) et les vêtements ordinaires ;
- $f_{z_i}^{\text{eff}}$: fraction de la surface du corps exposée aux radiations environnementales (= 0.696 pour une personne assise et 0.725 pour une personne debout) ;
- $f_{z_i}^{\text{svv}} \approx \frac{2}{\pi^2} \cdot \arctan\left(\frac{h}{2d}\right) \cdot \arctan\left(\frac{w}{2d}\right)$: proportion du ciel dans le champ de vision de l'occupant. w (resp. h) est la largeur (resp. la hauteur) de la fenêtre ; d est la distance entre l'occupant et la fenêtre ;
- $f_{z_i}^{\text{bes}}(t)$: proportion du corps humain exposée au soleil ;
- $f_{\text{p}}(t)$: facteur de la surface projetée de la personne assise et debout, qui est fonction de l'angle azimutal $Z^{sol}(t)$, et de l'angle d'élévation $\alpha^{sol}(t)$.

La température radiante moyenne globale dans la zone z_i peut être déterminée en ajoutant les termes à droite de (2.25) et (2.26). Selon l'équation (2.24), la température opérative dans la zone z_i peut alors être ajustée pour tenir compte des effets du rayonnement

solaire :

$$T_{z_i}^{op}(t) \approx \frac{T_{z_i}^{\text{MRT}}(t) + T_{z_i}^{\Delta\text{MRT}}(t) + T_{z_i}(t)}{2} \tag{2.27}$$

Le premier critère à prendre en compte lors de l'analyse du confort thermique dans la zone z_i est de s'assurer que la température opérative $T_{z_i}^{op}(t)$ (2.27) se situe dans la plage de température de confort définie par $T_{\text{C}} \pm 2$ K, où la température de confort $T_{\text{C}}(t)$ est une simple régression linéaire de la température filtrée $T_{\text{RM}}(t)$ de l'air extérieur :

$$T_{\text{C}}(t) = \begin{cases} 0.049 \cdot T_{\text{RM}}\big(D(t)\big) + 282.35 & \text{si } T_{\text{RM}}\big(D(t)\big) \leq 283.15 \text{ K} \\ 0.206 \cdot T_{\text{RM}}\big(D(t)\big) + 238.3 & \text{si } T_{\text{RM}}\big(D(t)\big) > 283.15 \text{ K} \end{cases} \tag{2.28}$$

avec $T_{\text{RM}}\big(D(t)\big)$ tel que :

$$T_{\text{RM}}\big(D(t)\big) = 0.8 \cdot T_{\text{RM}}\big(D(t)-1\big) + 0.2 \cdot T_{\text{DM}}\big(D(t)-1\big) \tag{2.29}$$

et $T_{\text{DM}}\big(D(t)-1\big)$ la température extérieure moyenne $T_{out}(t)$ du jour $\big(D(t)-1\big)$.

Le concept de confort hygrothermique dans la norme HQE (Haute Qualité Environnementale) dépend non seulement de la température, mais aussi de l'humidité de l'air [Gen16]. Plus précisément, le confort hygrothermique dépend du mouvement de l'air, de la température de l'air et des surfaces environnantes et de l'humidité de l'air. L'objectif de la section suivante est d'expliquer la notion de confort hygrométrique.

2.3.2 Confort hygrométrique

L'humidité relative a un impact significatif sur le confort thermique des bâtiments résidentiels. L'humidité relative de l'air $\phi_{z_i}(\%, t)$ est le rapport (exprimé en pourcentage) entre la quantité d'eau dans l'air à la température de la zone et la quantité maximale d'eau que l'air peut transporter (avant condensation de la vapeur = gouttelettes d'eau) :

$$\phi_{z_i}(\%, t) = 100 \cdot \frac{P_{z_i}^{\text{V}}(t)}{P_{z_i}^{\text{VS}}(t)} = 100 \cdot \frac{\rho_{z_i}^{\text{V}}(t)}{\rho_{z_i}^{\text{VS}}(t)} \tag{2.30}$$

où $\rho_{z_i}^{\text{V}}(t)$ et $\rho_{z_i}^{\text{VS}}(t)$ sont les densités de vapeur d'eau dans la zone z_i liées à la pression de vapeur $P_{z_i}^{\text{V}}(t)$ et à la pression de vapeur saturante $P_{z_i}^{\text{VS}}(t)$, respectivement. La formule empirique de Tetens [Gen2] est utilisée pour déterminer $P_{z_i}^{\text{VS}}(t)$:

$$P_{z_i}^{\text{VS}}(t) = 610.78 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot \big(T_{z_i}(t) - 273.15\big)}{T_{z_i}(t) - 35.85}\right) \tag{2.31}$$

Le confort hygrométrique reflète la sensation du corps humain à une température donnée lorsqu'il essaie d'expulser l'excès de chaleur par la transpiration (et la respiration). Le niveau d'humidité relative interne est le résultat de l'équilibre hydrique interne. Il est influencé par de nombreux facteurs, tels que les sources d'humidité (occupation, végétation), la ventilation (flux d'air, humidité de l'air extérieur), l'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment, la condensation et l'échange d'humidité entre les matériaux et l'air.

L'ASHRAE Fundamental-2017 (chapitre 36 - Gestion de l'humidité des bâtiments) recommande une humidité comprise entre 40 à 60 % pour assurer la santé et le confort des

personnes. Une humidité excessive affecte le confort thermique et respiratoire [Gen46], l'hydratation de la peau [Gen45] et la qualité de l'air intérieur [Gen18]. Une humidité relative élevée accélèrera la croissance des moisissures (irritation des muqueuses et allergie pulmonaire). En outre, l'humidité peut affecter par conduction les charges sensibles et latentes [Gen31] et peut entraîner la détérioration des bâtiments. Selon [Gen37], lorsque l'humidité relative dans une zone dépasse 80 % plusieurs fois par semaine, le risque de moisissure augmente considérablement.

Sur la base des différentes relations de la section 2.30, le paragraphe suivant est utilisé pour générer un modèle spatial nodal ou une représentation d'état pour estimer les variables de confort microclimatique $T_{z_i}^{op}(t)$ (2.27) et $\phi_{z_i}(\%, t)$ (2.30) dans une seule zone, et par généralisation aux bâtiments multizones.

2.4 Modélisation du confort hygrothermique des bâtiments multi-zones

2.4.1 Modélisation nodale

La méthode nodale a été initialement développée pour la modélisation des réseaux électriques dans les années 1950, puis rapidement adaptée à la modélisation thermique, en particulier dans les années 1980, lorsque les problèmes thermiques ont commencé à devenir particulièrement importants et que les capacités informatiques étaient encore limitées.
En utilisant cette méthode, basée sur une description simplifiée des phénomènes, la représentation graphique du modèle s'apparente à un schéma électrique. Sa "granulométrie" correspond au volume d'une zone dans le bâtiment. Cette représentation est très facile à utiliser et à développer, et nécessite des moyens de calcul limités, mais au prix d'hypothèses simplificatrices dont il faut se souvenir lors de la mise en œuvre du modèle.

Les modèles nodaux ont été développés et utilisés dans les logiciels de simulation des flux d'air depuis plus de 30 ans. Dans le domaine de la ventilation et de l'évaluation de la qualité de l'air, certains des modèles les plus connus sont :

- CONTAM, développé par le "National Institute of Standards and Technology" (NIST). Ce programme d'analyse de la qualité de l'air intérieur et de la ventilation multizone est conçu pour aider à déterminer le débit d'air, la concentration de polluants et l'exposition humaine dans les bâtiments multizones ;
- le modèle d'infiltration COMIS (Conjunction of Multizone Infiltration Specialists), développé au "Lawrence Berkeley National Laboratory" (LBNL). Il prédit les flux d'air en régime permanent et la transmission dynamique des polluants en représentant les bâtiments comme un ensemble de zones interconnectées ;
- SIREN (SImulation du RENouvellement d'air), développé par le CSTB. Ce dernier a proposé une méthode de calcul pour caractériser le comportement de l'air des bâtiments et l'exposition des habitants aux polluants ;
- MATHIS (Modélisation de l'Aéraulique, de la Thermique, et de l'Humidité InstationnaireS d'un bâtiment), développé par le CSTB. Il permet de modéliser numériquement la relation entre le débit d'air, la température et l'humidité à l'échelle d'un bâtiment entier.

Cependant, ces logiciels ne proposent pas de modèles couplés thermique et flux d'air, ce

qui limite parfois leur champ d'application. A notre connaissance, ce n'est qu'en combinant les outils CONTAM ou COMIS avec TRNSYS que l'on peut d'obtenir un modèle thermique et aéraulique fiable.

Le modèle hygrothermique développé est conçu par analogie avec la loi d'Ohm : la tension électrique représente la température ou la densité de vapeur d'eau d'une couche de matériau ou d'une zone, et le transfert de chaleur et d'humidité (à travers les murs, portes, fenêtres, etc.) est lié au courant électrique [Mod1], [Mod4], [Mod15]. En termes de composants, les résistances thermiques et à l'humidité sont représentées par des résistances électriques, et les capacités de rétention de la chaleur et de l'humidité sont représentées par des condensateurs électriques. Le modèle nodal global est généré en ajoutant toutes les sources d'énergie (occupation, équipement, rayonnement solaire) au schéma électrique équivalent, en utilisant toujours la même correspondance entre le flux de chaleur et le courant électrique. Les relations décrivant le comportement hygrothermique du bâtiment sont suffisantes pour construire ce type de modèle sans aucune autre conversion. La section 4 montre son réel intérêt pour la simulation de la plateforme "Eco-Sûr". Ce type de modèle est très utile en simulation, mais il perd beaucoup de son intérêt lorsqu'il ne constitue que la première étape de la synthèse de lois de commande, où une représentation d'état est généralement requise.

Dans l'environnement MATLAB / Simulink, l'outil Simscape fournit une méthode acausale pour la modélisation et la simulation de systèmes physiques multi-domaines via l'assemblage de composants. Les modèles de composants physiques sont prédéfinis sur la base de connexions physiques qui sont directement intégrées aux schémas-blocs et autres paradigmes de modélisation. Il est ainsi possible de modéliser un système sans avoir à écrire des équations différentielles qui caractérisent son comportement. Le reste de ce paragraphe présente spécifiquement une méthode de modélisation de bâtiments multi-zones sous forme nodale. Le lien avec la modélisation de Simscape est clairement établi.

Un modèle Simscape qui reflète le comportement hygrothermique d'une zone z_i d'un bâtiment peut être défini en utilisant les blocs Simscape [Mod21] et plus précisément la bibliothèque "Thermal Elements", qui contient les éléments thermiques suivants :

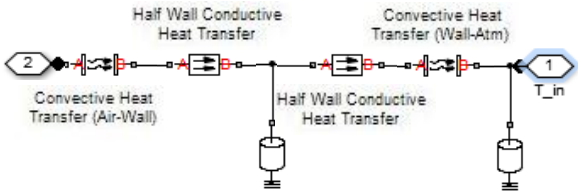
- Le bloc "masse thermique" reflète la capacité d'un matériau ou d'une combinaison de matériaux à stocker l'énergie interne. Cette propriété est caractérisée par la qualité du matériau et sa chaleur spécifique. Elle est décrite par les équations (2.4) et (2.7) ;
- Le bloc "transfert de chaleur par conduction" entre deux couches d'un même matériau. Le transfert est régi par la loi de Fourier et décrit par la première partie de l'équation (2.7) ;
- le bloc "transfert de chaleur par convection" qui signifie un transfert de chaleur par convection entre deux objets par le mouvement d'un fluide. Le transfert est régi par la loi de Newton et décrit par l'équation (2.6).

Les capteurs de température et les capteurs / sources de flux thermique des bibliothèques "Thermal Sensors" et "Thermal Sources" sont des compléments à divers modèles de simulation.

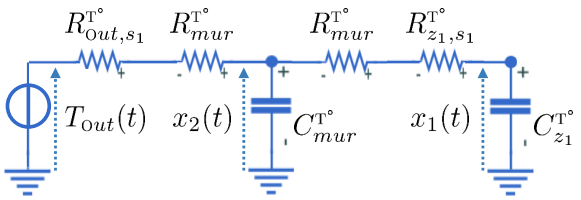
2.4.1.1 Transfert thermique d'un mur

Le bilan thermique est établi en considérant l'échange convectif entre le mur et l'air environnant. Dans le mur, la chaleur est transférée par conduction. Le modèle de mur développé par Simscape est présenté sur la figure 2.1a, en supposant que le mur s_1 est situé à l'interface entre l'intérieur d'une zone z_1 et l'air extérieur. Par analogie électrique, le mur peut également être décrit par le modèle 2R - 1C illustré à la figure 2.1b avec les notations suivantes :

- $T_{z_1}(t) = x_1(t)$: température ambiante (K) dans la zone z_1 ;
- $T_{s_1}(t) = x_2(t)$: température (K) au milieu du mur s_1 ;
- $T_{out}(t)$: température extérieure (K) ;
- $R^{\mathrm{T}^\circ}_{z_1,s_1} = \dfrac{1}{h_c \cdot S_{z_1,s_1}}$ et $R^{\mathrm{T}^\circ}_{out,s_1} = \dfrac{1}{h_c \cdot S_{out,s_1}}$: résistances thermiques de convection (K/W), où $S_{z_1,s_1} = S_{out,s_1}$ est la surface d'échange entre le mur s_1 et la zone z_1 ou l'extérieur. En contact avec la zone intérieure, le coefficient d'échange thermique par convection est $h_c = 8.3$ W/(m^2·K) et la résistance résultante est notée R_{11}. En contact avec l'extérieur, le coefficient devient $h_c = 34.4$ W/(m^2·K) et la résistance résultante est alors notée R_{41} ;
- $R^{\mathrm{T}^\circ}_{s_1} = \dfrac{e_{s_1}}{2 \cdot \lambda_{s_1}} = R^{\mathrm{T}^\circ}_{mur} = R_{21} = R_{31}$: résistance thermique de conduction (K/W) de la paroi s_1 d'épaisseur $e_{s_1}/2$ et de conductivité thermique λ_{s_1} ;
- $C^{\mathrm{T}^\circ}_{z_1} = 1.15 \cdot C_{P^{\mathrm{DA}}} \cdot V_{z_1} = C_{11}$: capacité thermique (J/K) de la zone z_1 ;
- $C^{\mathrm{T}^\circ}_{mur} = \rho_{s_1} \cdot V_{s_1} \cdot C_{P,s_1} = C_{21}$: capacité thermique (J/K) du mur s_1 avec $m_1 = \rho_{s_1} \cdot V_{s_1}$ sa masse et C_{P,s_1} la capacité thermique massique du matériau constituant la paroi.



(a) par Simscape



(b) par analogie électrique

FIGURE 2.1 – Modèle de transfert thermique d'un mur s_1 séparant une zone z_1 de l'extérieur.

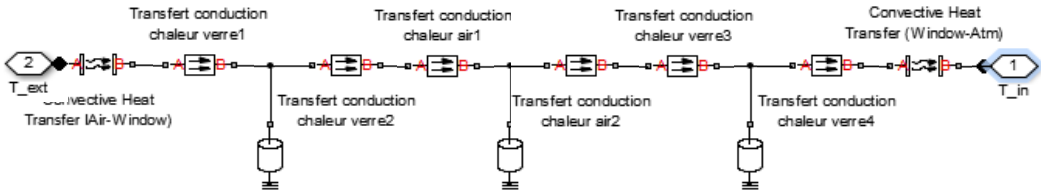
En appliquant le théorème de Millman, on peut obtenir la représentation d'état suivante :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}^{\mathrm{T}^\circ}_{\mathrm{mur}} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^{\mathrm{T}^\circ}_{\mathrm{mur}} \cdot T_{out}(t) \tag{2.32}$$

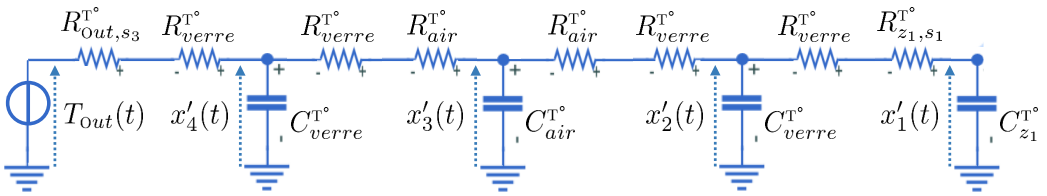
$$\text{avec } \mathbf{A}^{\mathrm{T}^\circ}_{\mathrm{mur}} = \begin{bmatrix} \dfrac{-1}{C_{11} \cdot (R_{11} + R_{21})} & \dfrac{1}{C_{11} \cdot (R_{11} + R_{21})} \\ \dfrac{1}{C_{21} \cdot (R_{11} + R_{21})} & \dfrac{-(R_{11} + R_{21} + R_{31} + R_{41})}{C_{21} \cdot (R_{11} + R_{21}) \cdot (R_{31} + R_{41})} \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{B}^{\mathrm{T}^\circ}_{\mathrm{mur}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{1}{C_{21} \cdot (R_{31} + R_{41})} \end{bmatrix}.$$

2.4.1.2 Transfert thermique d'une fenêtre à double vitrage

Afin de modéliser le comportement thermique de toutes les fenêtres d'une même façade dans une zone donnée, on peut supposer qu'il est identique au comportement thermique d'une seule fenêtre de surface équivalente. Si toutes les fenêtres de cette zone sont à double vitrage, la modélisation doit prendre en compte non seulement la résistance de surface des échanges internes et externes (transfert par convection) mais aussi le transfert par conduction à l'intérieur des deux vitrages dans l'espace d'air qui les sépare (cf. Fig. 2.2a). Par analogie, le modèle 6R - 3C est utilisé pour déterminer le modèle nodal et l'équation



(a) par Simscape



(b) par analogie électrique

FIGURE 2.2 – Modèle de transfert thermique d'une fenêtre à double vitrage séparant une zone z_1 de l'extérieur.

d'état associée (cf. Fig. 2.2b) avec :

- $T_{z_1}(t) = x'_1(t)$: température ambiante (K) dans la zone z_1 ;
- $T_{s_1}(t) = x'_2(t)$: température (K) au milieu de la vitre intérieure s_1 ;
- $T_{s_2}(t) = x'_3(t)$: température (K) au milieu de la lame d'air s_2 qui est un meilleur isolant que le verre ;
- $T_{s_3}(t) = x'_4(t)$: température (K) au milieu de la vitre extérieure s_3 ;
- $T_{out}(t)$: température extérieure (K) ;
- $R^{T^\circ}_{z_1,s_1} = \dfrac{1}{h_c \cdot S_{z_1,s_1}}$ et $R^{T^\circ}_{out,s_3} = \dfrac{1}{h_c \cdot S_{out,s_3}}$: résistances thermiques de convection (K/W) où $S_{z_1,s_1} = S_{out,s_3}$ est la surface d'échange entre le verre s_1 et la zone z_1, ou de manière équivalente, entre le verre s_3 et l'extérieur. En contact avec la zone intérieure, le coefficient d'échange thermique par convection est $h_c = 8.3$ W/(m^2·K) et la résistance résultante est notée R_{12}. En contact avec l'extérieur, le coefficient devient $h_c = 34.4$ W/(m^2·K) et la résistance résultante est alors notée R_{82} ;
- $R^{T^\circ}_{s_1} = \dfrac{e_{s_1}}{2 \cdot \lambda_{s_1}}$ et $R^{T^\circ}_{s_3} = \dfrac{e_{s_3}}{2 \cdot \lambda_{s_3}}$: résistances thermiques de conduction (K/W) de la vitre intérieure s_1 et de la vitre extérieure s_3 d'épaisseur respective $e_{s_1}/2$ et $e_{s_3}/2$ et de conductivité thermique respective λ_{s_1} et λ_{s_3}. En supposant que les caractéristiques des deux verres sont identiques, on pose $R_{22} = R_{32} = R^{T^\circ}_{s_1} = \dfrac{e_{s_1}}{2 \cdot \lambda_{s_1}} = \dfrac{e_{s_3}}{2 \cdot \lambda_{s_3}} = R^{T^\circ}_{s_3} = R_{62} = R_{72} = R^{T^\circ}_{verre}$.

- $R^{T^\circ}_{s_2} = \dfrac{e_{s_2}}{2 \cdot \lambda_{s_2}} = R^{T^\circ}_{air} = R_{42} = R_{52}$: résistance thermique de conduction (K/W) de la lame d'air s_2 d'épaisseur $e_{s_2}/2 = 8$ mm et de conductivité thermique λ_{s_2} ;
- $C^{T^\circ}_{z_1} = 1.15 \cdot C_{P^{DA}} \cdot V_{z_1} = C_{12}$: capacité thermique (J/K) de la zone z_1 ;
- $C^{T^\circ}_{verre} = \rho_{s_1} \cdot V_{s_1} \cdot C_{P,s_1} = \rho_{s_3} \cdot V_{s_3} \cdot C_{P,s_3} = C_{22} = C_{42}$: capacité thermique (J/K) des vitres s_1 et s_3 avec $m_1 = \rho_{s_1} \cdot V_{s_1} = \rho_{s_3} \cdot V_{s_3} = m_3$ leur masse et $C_{P,s_1} = C_{P,s_3}$ leur capacité thermique massique ;
- $C^{T^\circ}_{air} = 1.15 \cdot C_{P^{DA}} \cdot V_{s_2} = C_{32}$: capacité thermique (J/K) de la demi lame d'air s_2.

La représentation d'état reflétant le comportement thermique d'une fenêtre à double vitrage est donc la suivante :

$$\dot{\mathbf{x}}'(t) = \mathbf{A}^{T^\circ}_{\text{fen}} \cdot \mathbf{x}'(t) + \mathbf{B}^{T^\circ}_{\text{fen}} \cdot T_{out}(t) \tag{2.33}$$

avec $\mathbf{B}^{T^\circ}_{\text{fen}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dfrac{1}{C_{42} \cdot (R_{72} + R_{82})} \end{bmatrix}^T$ et

$$\mathbf{A}^{T^\circ}_{\text{fen}} = \begin{bmatrix} \dfrac{-1}{C_{12} \cdot (R_{12} + R_{22})} & \dfrac{1}{C_{12} \cdot (R_{12} + R_{22})} & 0 & 0 \\ \dfrac{1}{C_{22} \cdot (R_{12} + R_{22})} & \dfrac{-(R_{12} + R_{22} + R_{32} + R_{42})}{C_{22} \cdot (R_{12} + R_{22}) \cdot (R_{32} + R_{42})} & \dfrac{1}{C_{22} \cdot (R_{32} + R_{42})} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{C_{32} \cdot (R_{32} + R_{42})} & \dfrac{-(R_{32} + R_{42} + R_{52} + R_{62})}{C_{32} \cdot (R_{32} + R_{42}) \cdot (R_{52} + R_{62})} & \dfrac{1}{C_{32} \cdot (R_{52} + R_{62})} \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{C_{42} \cdot (R_{52} + R_{62})} & \dfrac{-(R_{52} + R_{62} + R_{72} + R_{82})}{C_{42} \cdot (R_{52} + R_{62}) \cdot (R_{72} + R_{82})} \end{bmatrix}$$

2.4.1.3 Transfert thermique d'une zone

Comme une zone peut être composée de plusieurs murs, dalles et plafonds (dont le comportement thermique est parfois similaire à celui des murs) et d'éventuelles fenêtres, une représentation d'état unique peut être obtenue en intégrant le modèle de chaque élément. Par exemple, les 2 éléments précédents (mur + fenêtre à double vitrage) peuvent être intégrés dans une représentation d'état en considérant le schéma électrique de la figure 2.3. Elle résulte de la mise en parallèle des deux diagrammes des figures 2.1b et 2.2b après

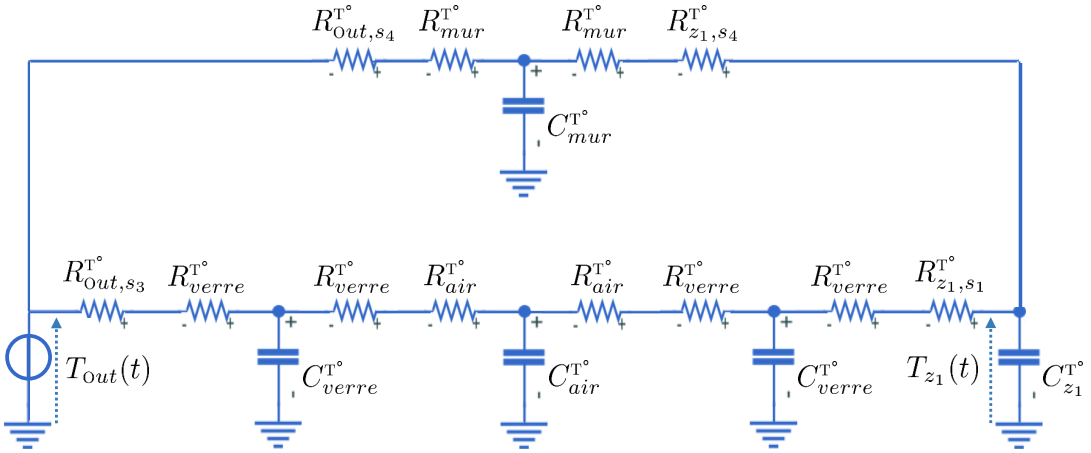


FIGURE 2.3 – Modèle de transfert thermique d'une fenêtre à double vitrage et d'un mur séparant une zone z_1 de l'extérieur.

avoir connecté les deux "tensions" $x_1(t)$ et $x_1'(t)$ qui représentent la température ambiante $T_{z_1}(t)$ dans la zone considérée.

La modélisation nodale impliquant des composants électroniques de base, le couplage $h_v \cdot g_{z_1}^1(t)$ (2.6) qui figure dans la définition de $q_{z_i}^1(t)$ ne peut être pris en compte. En effet, puisque le flux thermique convectif $q_{z_i}^1(t)$ n'affecte pas $g_{z_1}^1(t)$, il est impossible de représenter le terme $h_v \cdot g_{z_1}^1(t)$ en ajoutant une simple résistance au modèle nodal. En hiver, cette approximation associée au modèle nodal n'a pas importante, car dans ce cas, le terme $h_v \cdot g_{z_1}^1(t)$ peut être négligé. En revanche, lorsque la température est plus élevée, cette approximation est moins justifiée et peut conduire à des performances de simulation moins précises avec le modèle nodal par rapport à la représentation d'état.

2.4.1.4 Transfert hydrique d'un mur

Étant donné la similitude structurelle des équations décrivant le bilan de chaleur et d'eau dans une zone (2.4), (2.5) et dans un mur (2.7), (2.9), un modèle de transfert hydrique nodal peut être établi par analogie avec la loi d'Ohm, comme le montre la figure 2.4 avec :

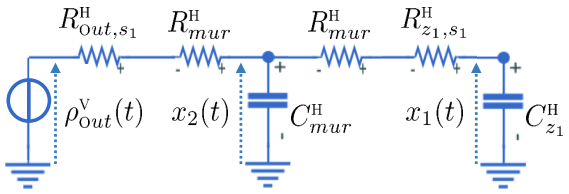


FIGURE 2.4 – Modèle de transfert hydrique d'un mur s_1 séparant une zone z_1 de l'extérieur.

- $\rho^{\mathrm{V}}_{z_1}(t) = x_1''(t)$: densité de vapeur d'eau (kg/m^3) dans la zone z_1 ;
- $\rho^{\mathrm{V}}_{s_1}(t) = x_2''(t)$: densité de vapeur d'eau (kg/m^3) au cœur du matériau s_1 ;
- $\rho^{\mathrm{V}}_{out}(t)$: densité de vapeur d'eau (kg/m^3) à l'extérieur ;
- $R^{\mathrm{H}}_{z_1,s_1} = \dfrac{1}{2500 \cdot h_m \cdot S_{z_1,s_1}}$ et $R^{\mathrm{H}}_{out,s_1} = \dfrac{1}{2500 \cdot h_m \cdot S_{out,s_1}}$: résistances massiques (s/m^3) de convection. En contact avec la zone intérieure, la résistance est notée R_{13} alors qu'elle est notée R_{43} en contact avec l'extérieur ;
- $R^{\mathrm{H}}_{s_1} = \dfrac{e_{s_1}}{2 \cdot \delta^{\mathrm{P}}_{s_1}} = R^{\mathrm{H}}_{mur} = R_{23} = R_{33}$: résistance à la diffusion (s/m^3) du mur s_1 d'épaisseur $e_{s_1}/2$ et de conductivité massique $\delta^{\mathrm{P}}_{s_1}$;
- $C^{\mathrm{H}}_{z_1} = V_{z_1} = C_{13}$: volume (m^3) de la zone z_1 ;
- $C^{\mathrm{H}}_{mur} = V_{s_1} = C_{23}$: volume (m^3) de la paroi s_1.

La représentation d'état reflétant le comportement hydrique d'un mur est donc la suivante :

$$\dot{\mathbf{x}}''(t) = \mathbf{A}^{\mathrm{H}}_{\mathrm{mur}} \cdot \mathbf{x}''(t) + \mathbf{B}^{\mathrm{H}}_{\mathrm{mur}} \cdot \rho^{\mathrm{V}}_{out}(t) \tag{2.34}$$

avec $\mathbf{A}^{\mathrm{H}}_{\mathrm{mur}} = \begin{bmatrix} \dfrac{-1}{C_{13} \cdot (R_{13} + R_{23})} & \dfrac{1}{C_{13} \cdot (R_{13} + R_{23})} \\ \dfrac{1}{C_{23} \cdot (R_{13} + R_{23})} & \dfrac{-(R_{13} + R_{23} + R_{33} + R_{43})}{C_{23} \cdot (R_{13} + R_{23}) \cdot (R_{33} + R_{43})} \end{bmatrix}$ et $\mathbf{B}^{\mathrm{H}}_{\mathrm{mur}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{1}{C_{23} \cdot (R_{33} + R_{43})} \end{bmatrix}$.

2.4.2 Modélisation sous forme d'état

Sur la base des développements précédents, en introduisant le formalisme descripteur, également appelé implicite ou encore singulier, le modèle d'état suivant peut représenter le comportement dynamique hygrothermique d'une zone z_i délimitée par un ensemble de $N^{\mathrm{s}}_{z_i}$ couches de matériaux $\mathcal{S}_i$ ($\mathcal{S}_i = \left\{s_{i_j}\right\}_{1\leq j\leq N^{\mathrm{s}}_{z_i}}$) :

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{z_i}\cdot\dot{\mathbf{x}}_{z_i}(t) = \mathbf{A}_{z_i}\cdot\mathbf{x}_{z_i}(t) + \displaystyle\sum_{s_{i_j}\in\mathcal{S}_i}\mathbf{B}_{z_i,s_{i_j}}\cdot\begin{bmatrix} T_{s_{i_j}}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{s_{i_j}}(t)\end{bmatrix} + \mathbf{f}^{\mathrm{PAC}}_{z_i}\left(\begin{bmatrix} T_{z_i}(t)-T_{\mathrm{H/C}}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_i}(t)-\rho^{\mathrm{v}}_{\mathrm{H/C}}(t)\end{bmatrix}\right) \\ \qquad\qquad + \mathbf{f}^{\mathrm{VMC}}_{z_i}\left(\begin{bmatrix} T_{z_i}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_i}(t)\end{bmatrix},\begin{bmatrix} T_{z_\ell}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_\ell}(t)\end{bmatrix},\begin{bmatrix} T_{\mathrm{out}}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{\mathrm{out}}(t)\end{bmatrix}\right) + \mathbf{B}_{z_i}\cdot\displaystyle\sum_{\xi\geq 4}\begin{bmatrix}\displaystyle\sum_{s_{i_j}\in\mathcal{S}_i} q^{\xi}_{z_i,s_{i_j}}(t)\\ g^{\xi}_{z_i}(t)\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_{z_i}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_i}(t)\\ T^{op}_{z_i}(t)\end{bmatrix} = \mathbf{C}_{z_i}\cdot\mathbf{x}_{z_i}(t) + \displaystyle\sum_{\xi\geq 5}\sum_{s_{i_j}\in\mathcal{S}_i}\mathbf{D}^{\xi}_{z_i,s_{i_j}}\cdot q^{\xi}_{z_i,s_{i_j}}(t)\end{cases} \tag{2.35}$$

avec $\mathbf{x}_{z_i}(t) = \begin{bmatrix} T_{z_i}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_i}(t)\\ \hline T_{z_i,s_{i_1}}(t)\\ \vdots\\ T_{z_i,s_{i_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}}}}(t)\\ \hline \rho^{\mathrm{v}}_{z_i,s_{i_1}}(t)\\ \vdots\\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_i,s_{i_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}}}}(t)\end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_{z_i} = \left[\begin{array}{cc|c|c} * & * & [*\ \cdots\ *] & [*\ \cdots\ *]\\ 0 & * & [0\ \cdots\ 0] & [*\ \cdots\ *]\\ \hline \begin{bmatrix}*\\ \vdots\\ *\end{bmatrix} & \begin{bmatrix}0\\ \vdots\\ 0\end{bmatrix} & \multicolumn{2}{c}{\multirow{2}{*}{$\begin{bmatrix} * & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots\\ \vdots & \ddots & \ddots & 0\\ 0 & \cdots & 0 & *\end{bmatrix}$}}\\ \cline{1-2} \begin{bmatrix}0\\ \vdots\\ 0\end{bmatrix} & \begin{bmatrix}*\\ \vdots\\ *\end{bmatrix} & & \end{array}\right]$, $\mathbf{B}_{z_i,s_{i_j}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2\times 2}\\ \hline \mathbf{0}_{(j-1)\times 2}\\ [*\quad *]\\ \mathbf{0}_{(N^{\mathrm{s}}_{z_i}-j)\times 2}\\ \hline \mathbf{0}_{(j-1)\times 2}\\ [0\quad *]\\ \mathbf{0}_{(N^{\mathrm{s}}_{z_i}-j)\times 2}\end{bmatrix}$,

$\mathbf{B}_{z_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2\\ \hline \mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times 2}\\ \hline \mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times 2}\end{bmatrix}$, $\mathbf{C}_{z_i} = \left[\begin{array}{cc|c|c} 1 & 0 & \mathbf{0}_{1\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}} & \mathbf{0}_{1\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}\\ 0 & 1 & \mathbf{0}_{1\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}} & \mathbf{0}_{1\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}\\ * & 0 & [*]_{1\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}} & \mathbf{0}_{1\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}\end{array}\right]$, $\mathbf{D}^{\xi}_{z_i,s_{i_j}} = \begin{bmatrix}0\\0*\end{bmatrix}$, $\mathbf{E}_{z_i} = \left[\begin{array}{cc|c|c} * & 0 & \multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{2\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}$} & \multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{2\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}$}\\ 0 & * & & \\ \hline \multicolumn{2}{c|}{\multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times 2}$}} & \multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}$} & \multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}$}\\ & & & \\ \hline \multicolumn{2}{c|}{\multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times 2}$}} & \multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}$} & \multirow{2}{*}{$\mathbf{0}_{N^{\mathrm{s}}_{z_i}\times N^{\mathrm{s}}_{z_i}}$}\\ & & & \\ \end{array}\right]$.

Quant aux fonctions $\mathbf{f}^{\mathrm{PAC}}_{z_i}(.)$ et $\mathbf{f}^{\mathrm{VMC}}_{z_i}(.)$, elles sont définies par les relations (2.12-2.15) et dépendent des zones où se trouvent les différents appareils (VMC, pompe à chaleur, etc.).

Les interconnexions avec les autres zones z_ℓ du bâtiment sont réalisées par le biais du modèle d'état de toutes les parois s_{i_j} délimitant la zone z_i :

$$\dot{\mathbf{x}}_{s_{i_j}}(t) = \mathbf{A}_{s_{i_j}}\cdot\mathbf{x}_{s_{i_j}}(t) + \mathbf{B}_{s_{i_j}}\cdot\begin{bmatrix} T_{z_i,s_{i_j}}(t)+T_{z_\ell,s_{i_j}}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{z_i,s_{i_j}}(t)+\rho^{\mathrm{v}}_{z_\ell,s_{i_j}}(t)\end{bmatrix} \tag{2.36}$$

avec $\mathbf{x}_{s_{i_j}}(t) = \begin{bmatrix} T_{s_{i_j}}(t)\\ \rho^{\mathrm{v}}_{s_{i_j}}(t)\end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_{s_{i_j}} = \begin{bmatrix} * & *\\ 0 & *\end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_{s_{i_j}} = \begin{bmatrix} * & *\\ 0 & *\end{bmatrix}$.

Dans le cas particulier où la paroi s_{i_j} est en contact avec l'air extérieur ($z_\ell = out$) caractérisé par une température de $T_{out}(t)$ et une densité de vapeur d'eau égale à $\rho^{\mathrm{V}}_{out}(t)$, (2.36) devient :

$$\dot{\mathbf{x}}_{s_{i_j}}(t) = \mathbf{A}_{s_{i_j}} \cdot \mathbf{x}_{s_{i_j}}(t) + \mathbf{B}_{s_{i_j}} \cdot \begin{bmatrix} T_{z_i,s_{i_j}}(t) + T_{\mathrm{Out},s_{i_j}}(t) \\ \rho^{\mathrm{V}}_{z_i,s_{i_j}}(t) + \rho^{\mathrm{V}}_{\mathrm{Out},s_{i_j}}(t) \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

sachant, selon les équations (2.4), (2.5), (2.7), (2.9) et (2.6), que $T_{\mathrm{Out},s_{i_j}}(t) = a_{s_{i_j}} \cdot T_{s_{i_j}}(t) + f_{s_{i_j}} \cdot T_{out}(t)$ et $\rho^{\mathrm{V}}_{\mathrm{Out},s_{i_j}}(t) = c_{s_{i_j}} \cdot \rho^{\mathrm{V}}_{s_{i_j}}(t) + d_{s_{i_j}} \cdot \rho^{\mathrm{V}}_{out}(t)$ (les coefficients $a_{s_{i_j}}$, $f_{s_{i_j}}$, $c_{s_{i_j}}$ et $d_{s_{i_j}}$ sont liés à h_c, h_m, $\lambda_{s_{i_j}}$ et $\delta^{\mathrm{P}}_{s_{i_j}}$).

Le modèle d'état hygrothermique pour un bâtiment multizone peut être défini de différentes manières en fonction des relations (2.35), (2.36) et (2.37), selon le nombre de zones $N_{\mathbf{z}}$ le constituant.

2.4.2.1 Modèle centralisé

Si $N_{\mathbf{z}}$ est relativement petit (quelques unités au maximum), tous les modèles précédents associés à chaque zone z_i et mur s_{i_j} peuvent être agrégés dans un modèle d'état. Puisque les variables $T_{z_i,s_{i_j}}(t)$ et $\rho^{\mathrm{V}}_{z_i,s_{i_j}}(t)$ apparaissant dans la définition de chaque $\mathbf{x}_{z_i}(t)$ peuvent être exprimées en fonction des vecteurs d'état $\mathbf{x}_{s_{i_j}}(t)$ et leurs dérivés $\dot{\mathbf{x}}_{s_{i_j}}(t)$, l'agrégation de tous les modèles de zones et de murs permet de les éliminer par substitution. Ainsi, les différentes équations algébriques des $N_{\mathbf{z}}$ modèles d'état implicites (2.35) peuvent être implicitement considérées dans une représentation d'état standard, c'est-à-dire non implicite :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(t) = \mathbf{A}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(t) + \mathbf{B}^{out}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \begin{bmatrix} T_{out}(t) \\ \rho^{\mathrm{V}}_{out}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{f}^{\mathrm{PAC}}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}}(t) - \mathbf{T}_{\mathrm{H/C}}(t) \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}}(t) - \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathrm{H/C}}(t) \end{bmatrix} \right) \\ \qquad + \mathbf{f}^{\mathrm{VMC}}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}}(t) \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} T_{out}(t) \\ \rho^{\mathrm{V}}_{out}(t) \end{bmatrix} \right) + \mathbf{B}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \sum_{\xi \geq 4} \begin{bmatrix} \mathbf{q}^{\xi}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(t) \\ \mathbf{g}^{\xi}_{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}}(t) \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}}(t) \\ \mathbf{T}^{op}_{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(t) + \mathbf{D}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \sum_{\xi \geq 5} \mathbf{q}^{\xi}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(t) \end{cases} \tag{2.38}$$

$$\text{avec } \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(t) = \left[\begin{array}{c} \mathbf{T}_{\mathbf{z}}(t) \\ \hline \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}}(t) \\ \hline \mathbf{T}_{\mathbf{s}}(t) \\ \hline \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}}(t) \end{array}\right], \mathbf{T}_{\mathbf{z}}(t) = \begin{bmatrix} T_{z_1}(t) \\ \vdots \\ T_{z_{N_{\mathbf{z}}}}(t) \end{bmatrix}, \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}}(t) = \begin{bmatrix} \rho^{\mathrm{V}}_{z_1}(t) \\ \vdots \\ \rho^{\mathrm{V}}_{z_{N_{\mathbf{z}}}}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{\mathbf{s}}(t) = \begin{bmatrix} T_{s_1}(t) \\ \vdots \\ T_{s_{N_{\mathbf{s}}}}(t) \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}}(t) = \begin{bmatrix} \rho^{\mathrm{V}}_{s_1}(t) \\ \vdots \\ \rho^{\mathrm{V}}_{s_{N_{\mathbf{s}}}}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{diag}(*) & \mathbf{diag}(*) & [*]_{N_{\mathbf{z}} \times N_{\mathbf{s}}} & [*]_{N_{\mathbf{z}} \times N_{\mathbf{s}}} \\ \hline \mathbf{0}_{N_{\mathbf{z}} \times N_{\mathbf{z}}} & \mathbf{diag}(*) & \mathbf{0}_{N_{\mathbf{z}} \times N_{\mathbf{s}}} & [*]_{N_{\mathbf{z}} \times N_{\mathbf{s}}} \\ \hline [*]_{N_{\mathbf{s}} \times N_{\mathbf{z}}} & \mathbf{0}_{N_{\mathbf{s}} \times N_{\mathbf{z}}} & \mathbf{diag}(*) & \mathbf{0}_{N_{\mathbf{s}} \times N_{\mathbf{s}}} \\ \hline \mathbf{0}_{N_{\mathbf{s}} \times N_{\mathbf{z}}} & [*]_{N_{\mathbf{s}} \times N_{\mathbf{z}}} & \mathbf{0}_{N_{\mathbf{s}} \times N_{\mathbf{s}}} & \mathbf{diag}(*) \end{array}\right],$$

$$\mathbf{B}_{\mathbf{z,s}} = \left[\begin{array}{ccc|c} [*]_{1\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} \cdots & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{z}} \\ \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & \overset{N_\mathbf{z}\text{ times}}{\ddots} & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & \vdots \\ \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & \cdots \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & [*]_{1\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{z}} \\ \hline \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} & \cdots & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{I}_{N_\mathbf{z}} \\ \hline \mathbf{0}_{N_\mathbf{s}\times N_\mathbf{s}} & \cdots & \mathbf{0}_{N_\mathbf{s}\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{s}\times N_\mathbf{z}} \\ \hline \mathbf{0}_{N_\mathbf{s}\times N_\mathbf{s}} & \cdots & \mathbf{0}_{N_\mathbf{s}\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{s}\times N_\mathbf{z}} \end{array}\right],$$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{z,s}} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{I}_{N_\mathbf{z}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{z}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} \\ \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{z}} & \mathbf{I}_{N_\mathbf{z}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} \\ \mathbf{diag}(*) & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{z}} & [*]_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} \end{array}\right], \mathbf{D}_{\mathbf{z,s}} = \left[\begin{array}{ccc} \mathbf{0}_{2N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} & \cdots & \mathbf{0}_{2N_\mathbf{z}\times N_\mathbf{s}} \\ [*]_{1\times N_\mathbf{s}} & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} \cdots & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} \\ \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & \overset{N_\mathbf{z}\text{ times}}{\ddots} & \vdots \\ \vdots & & \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} \\ \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & \cdots \mathbf{0}_{1\times N_\mathbf{s}} & [*]_{1\times N_\mathbf{s}} \end{array}\right],$$

$\mathbf{q}^{\xi}_{\mathbf{z,s}}(t) = \left(\left(q^{\xi}_{z_i,s_j}(t)\right)_{1\le j\le N_\mathbf{s}}\right)_{1\le i\le N_\mathbf{z}}$, $\mathbf{g}^{\xi}_{\mathbf{z}}(t) = \left(g^{\xi}_{z_i}(t)\right)_{1\le i\le N_\mathbf{z}}$. Compte tenu de la localisation des différents équipements (VMC, pompes à chaleur, etc.) dans les zones, les fonctions $\mathbf{f}^{\text{PAC}}_{\mathbf{z,s}}(.)$ et $\mathbf{f}^{\text{VMC}}_{\mathbf{z,s}}(.)$ sont définies par les relations (2.12-2.15). Les lignes non nulles de la matrice $\mathbf{B}^{out}_{\mathbf{z,s}}$ reflètent le flux de chaleur / humidité entre l'air extérieur et les murs extérieurs du bâtiment. Afin de ne pas causer de problèmes de calcul, la taille du vecteur d'état associé à la représentation d'état globale ne doit pas être trop importante.

2.4.2.2 Modèle distribué

Si $N_\mathbf{z}$ est plus élevé, la simulation hygrothermique d'un bâtiment multizone peut être exécutée de manière coopérative. En effet, la co-simulation [Mod29] est un scénario de simulation dans lequel au moins deux simulateurs résolvent séparément un système d'équations algébriques différentielles et partagent les données couplant ces systèmes dans un processus d'intégration temporelle. L'efficacité numérique et la stabilité de la co-simulation dépendent dans une large mesure de l'implémentation choisie et du type de données à échanger. Selon [Mod31], la stratégie de couplage parallèle n'est généralement pas très efficace (cf. Fig. 2.5) alors que la stratégie de couplage fort, utilisant les températures comme données d'échange, produit les meilleures performances. Bien que cela soit généralement vrai, il s'avère que la stratégie de couplage parallèle donne des résultats très satisfaisants en considérant les équations de couplage (2.35), (2.36) et (2.37).

Quelle que soit la stratégie choisie pour réaliser cette simulation coopérative, le bâtiment multi-zones doit être décomposé en un nombre réduit d'ensembles cohérents de zones. À cette fin, le bâtiment est représenté par un graphe $\mathcal{G}_\mathbf{z} = (\mathcal{V}_\mathbf{z}, \mathcal{E}_\mathbf{z})$ non orienté, où $\mathcal{V}_\mathbf{z}$ est un ensemble de $N_\mathbf{z}$ sommets dans le graphe et correspond aux zones du bâtiment. $\mathcal{E}_\mathbf{z}$ est l'ensemble de toutes les arêtes. S'il existe une résistance thermique / d'humidité entre les zones z_i et z_j, une arête (z_i, z_j) relie les sommets associés. Afin de décomposer $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ en sous-graphes hiérarchiquement ordonnés, nous utilisons d'abord l'algorithme de décomposition en k-shell [Gen25], [Gen38]. Ce processus attribue un indice entier k_s à chaque sommet, qui représente sa "coreness" et quantifie sa centralité dans le graphe. Une valeur élevée de k_s indique que le sommet est au centre du graphe (il a donc une forte connectivité avec les autres sommets), tandis qu'une valeur faible indique un sommet qui est plus à la

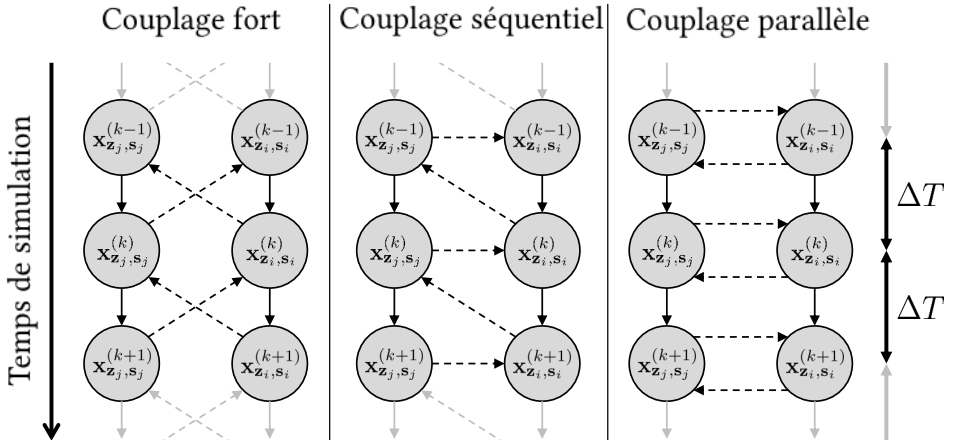


FIGURE 2.5 – Stratégies de couplage en co-simulation.

périphérie (et donc peu connecté). En utilisant cette métrique, $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ peut être décomposé en sous-graphes k-core, où les sommets sont reliés entre eux par au moins k arêtes. Les k-core peuvent être obtenus en supprimant à plusieurs reprises tous les sommets de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ qui ont moins de k sommets adjacents. Du point de vue du regroupement de sommets utile pour la simulation coopérative, il est intéressant de considérer les sommets k-shell du graphe qui, par définition, appartiennent à un k-core mais pas à un $(k+1)$-core. Les sommets k-shell de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ sont tous caractérisés par une coreness égale à k. D'après la définition de la coreness, il est évident que les sommets k-shell se répartissent en des composantes connexes et des sommets non-connexes. Si la taille des composantes k-shell connexes n'est pas trop importante, la décomposition du bâtiment multizone peut être effectuée en considérant tous les groupes de sommets k-shell connexes et non connexes. Une généralisation du concept de sommets k-shell est définie dans [Gen50] pour les graphes pondérés. Dans le contexte de la modélisation hygrothermique d'un bâtiment multizone, l'utilisation d'un tel graphe pondéré peut être particulièrement utile. En effet, la conductivité thermique / massique entre deux pièces adjacentes peut être considérée en associant un poids à chaque arête du graphe. Il est également important de mentionner que la méthode k-shell est largement utilisée pour analyser la structure hiérarchique des graphes à grande échelle, en raison de sa faible complexité de calcul.

Cependant, pour certaines structures de graphes $\mathcal{G}_\mathbf{z}$, cette décomposition en ensembles de sommets k-shell n'est pas suffisante pour les regrouper de manière cohérente. En effet, même si leurs propriétés d'étalement sont différentes, de nombreux sommets peuvent se voir attribuer la même coreness [Gen4]. Un processus de décomposition des composantes k-shell connexes, qui sont trop grandes pour être représentées par un modèle d'état unique, est introduite. Elle consiste à décomposer les composantes k-shells connexes en des composantes biconnexes, qui sont intuitivement les composantes connexes après suppression des sommets d'articulation [Gen6]. La section 4.2.3 illustre cette décomposition en composantes biconnexes sur le graphe associé à la plateforme "Eco-sûr". Le raisonnement peut être généralisé en considérant une décomposition en composantes k-shells triconnexes.

En décomposant le graphe $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ non orienté représentant un bâtiment multi-zone en un ensemble de composantes k-shell connexes et biconnexes, la discrétisation spatiale du

bâtiment se fait par zone z_i ou par ensemble de zones $\mathcal{Z}_i = \{z_{i_j}\}$ (avec $\text{card}(\mathcal{Z}_i) = N_{\mathbf{z}_i}$). Comme pour le modèle d'état global (2.38), l'intégration des modèles de zone et de paroi fournit un ensemble de représentations d'état standard, qui peuvent être simulées de manière coopérative :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(t) = \mathbf{A}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \mathbf{x}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(t) + \mathbf{B}^{Out}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \begin{bmatrix} T_{Out}(t) \\ \rho^{\mathrm{V}}_{Out}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{f}^{\mathrm{PAC}}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\left(\begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}_i}(t) - \mathbf{T}_{\mathrm{H/C}}(t) \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_i}(t) - \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathrm{H/C}}(t) \end{bmatrix} \right) \\ \qquad + \mathbf{f}^{\mathrm{VMC}}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\left(\begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}}(t) \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} T_{Out}(t) \\ \rho^{\mathrm{V}}_{Out}(t) \end{bmatrix} \right) + \mathbf{B}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \sum_{\xi \geq 4} \begin{bmatrix} \mathbf{q}^{\xi}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(t) \\ \mathbf{g}^{\xi}_{\mathbf{z}_i}(t) \end{bmatrix} + \sum_{z_j \notin \mathcal{Z}_i} \mathbf{B}^{z_j}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \begin{bmatrix} T_{z_j}(t) \\ \rho^{\mathrm{V}}_{z_j}(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}_i}(t) \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_i}(t) \\ \mathbf{T}^{Op}_{\mathbf{z}_i}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \mathbf{x}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(t) + \mathbf{D}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \sum_{\xi \geq 5} \mathbf{q}^{\xi}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(t) \end{cases} \tag{2.39}$$

avec $\mathbf{x}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}_i}(t) \\ \hline \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_i}(t) \\ \hline \mathbf{T}_{\mathbf{s}_i}(t) \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}_i}(t) \end{bmatrix}$, $\mathbf{T}_{\mathbf{z}_i}(t) = \begin{bmatrix} T_{z_{i_1}}(t) \\ \vdots \\ T_{z_{i_{N_{\mathbf{z}_i}}}}(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_i}(t) = \begin{bmatrix} \rho^{\mathrm{V}}_{z_{i_1}}(t) \\ \vdots \\ \rho^{\mathrm{V}}_{z_{i_{N_{\mathbf{z}_i}}}}(t) \end{bmatrix}$, $\mathbf{T}_{\mathbf{s}_i}(t) = \begin{bmatrix} T_{s_{i_1}}(t) \\ \vdots \\ T_{s_{i_{N_{\mathbf{s}_i}}}}(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}_i}(t) = \begin{bmatrix} \rho^{\mathrm{V}}_{s_{i_1}}(t) \\ \vdots \\ \rho^{\mathrm{V}}_{s_{i_{N_{\mathbf{s}_i}}}}(t) \end{bmatrix}$.

En remplaçant respectivement $N_{\mathbf{z}}$ par $N_{\mathbf{z}_i}$ et $N_{\mathbf{s}}$ par $N_{\mathbf{s}_i}$, les matrices $\mathbf{A}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$, $\mathbf{B}^{Out}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$, $\mathbf{B}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$, $\mathbf{D}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$ et les fonctions $\mathbf{f}^{\mathrm{PAC}}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$, $\mathbf{f}^{\mathrm{VMC}}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$ sont définies de la même manière que $\mathbf{A}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$, $\mathbf{B}^{Out}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$, $\mathbf{B}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$, $\mathbf{D}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$ et $\mathbf{f}^{\mathrm{PAC}}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$, $\mathbf{f}^{\mathrm{VMC}}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$ (2.38). Le dernier terme $\sum_{z_j \notin \mathcal{Z}_i} \mathbf{B}^{z_j}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \begin{bmatrix} T_{z_j}(t) \\ \rho^{\mathrm{V}}_{z_j}(t) \end{bmatrix}$ représente l'échange de chaleur / humidité entre les différents sous-systèmes associés à chaque composante k-shell connexe et biconnexe. A titre d'exemple, la figure 2.6 représente toutes les variables impliquées dans la modélisation hygrothermique d'un bâtiment à deux zones (température en haut de la figure et hygrométrie en bas).

Ce schéma simplifié a une vue horizontale 2D et suppose qu'il n'y a ni plafond ni plancher. Même dans ce cas simple, on peut voir que 18 sommets de température / humidité sont nécessaires pour modéliser le comportement hygrothermique de ce bâtiment : $\mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \in \mathbb{R}^{2(N_{\mathbf{z}}+N_{\mathbf{s}})=18}$ avec $N_{\mathbf{z}} = 2$ et $N_{\mathbf{s}} = 7$ ($\mathbf{T}_{\mathbf{z}} \in \mathbb{R}^2$, $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}} \in \mathbb{R}^2$, $\mathbf{T}_{\mathbf{s}} \in \mathbb{R}^7$, $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}} \in \mathbb{R}^7$). Bien que la taille de $\mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$ ne soit pas suffisante pour justifier l'utilisation du schéma de co-simulation, nous décrivons ci-dessous les différentes variables impliquées dans ce contexte en considérant chacune des deux zones séparément. Il est clair qu'il n'y a pas suffisamment de zones pour qu'il soit intéressant de décomposer ce bâtiment en deux zones. Toutefois, si une décomposition par zone est effectuée, le vecteur d'état (2.39) est défini comme suit : pour $i = 1, 2$, $\mathbf{x}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \in \mathbb{R}^{2(N_{\mathbf{z}_i}+N_{\mathbf{s}_i})=10}$ avec $N_{\mathbf{z}_i} = 1$, $N_{\mathbf{s}_i} = 4$ et :

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{\mathbf{z}_1} = T_{z_{1_1}} = T_{z_1} \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_1} = \rho^{\mathrm{V}}_{z_{1_1}} = \rho^{\mathrm{V}}_{z_1} \\ \mathbf{T}_{\mathbf{s}_1} = [T_{s_{1_1}}, T_{s_{1_2}}, T_{s_{1_3}}, T_{s_{1_4}}]^T = [T_{s_1}, T_{s_2}, T_{s_3}, T_{s_4}]^T \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}_1} = [\rho^{\mathrm{V}}_{s_{1_1}}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_{1_2}}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_{1_3}}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_{1_4}}]^T = [\rho^{\mathrm{V}}_{s_1}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_2}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_3}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_4}]^T \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{\mathbf{z}_2} = T_{z_{2_1}} = T_{z_2} \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_2} = \rho^{\mathrm{V}}_{z_{2_1}} = \rho^{\mathrm{V}}_{z_2} \\ \mathbf{T}_{\mathbf{s}_2} = [T_{s_{2_1}}, T_{s_{2_2}}, T_{s_{2_3}}, T_{s_{2_4}}]^T = [T_{s_1}, T_{s_5}, T_{s_6}, T_{s_7}]^T \\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}_2} = [\rho^{\mathrm{V}}_{s_{2_1}}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_{2_2}}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_{2_3}}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_{2_4}}]^T = [\rho^{\mathrm{V}}_{s_1}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_5}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_6}, \rho^{\mathrm{V}}_{s_7}]^T \end{cases}$$

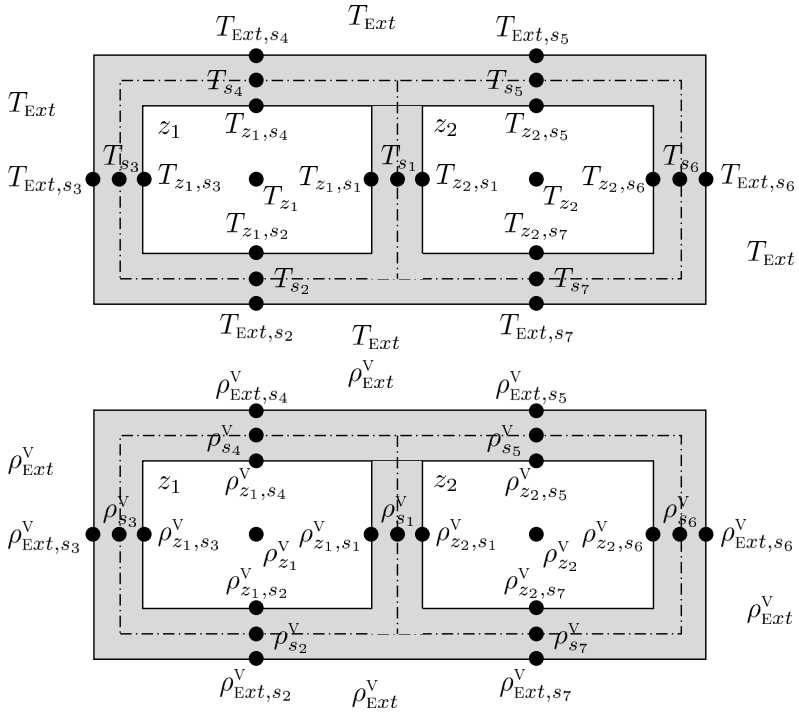


FIGURE 2.6 – Modélisation hygrothermique d'un bâtiment à deux zones.

La figure 2.7 montre le schéma de couplage parallèle lié à la décomposition zone par zone du bâtiment à deux zones. Les deux simulateurs résolvent les équations d'état discrétisées relatives aux vecteurs $\mathbf{x}_{\mathbf{z}_1,\mathbf{s}_1}$ et $\mathbf{x}_{\mathbf{z}_2,\mathbf{s}_2}$ et échangent les signaux $\begin{bmatrix} T_{z_1} \\ \rho^{V}_{z_1} \end{bmatrix}$ et $\begin{bmatrix} T_{z_2} \\ \rho^{V}_{z_2} \end{bmatrix}$ couplant ces équations pendant le processus d'intégration temporelle.

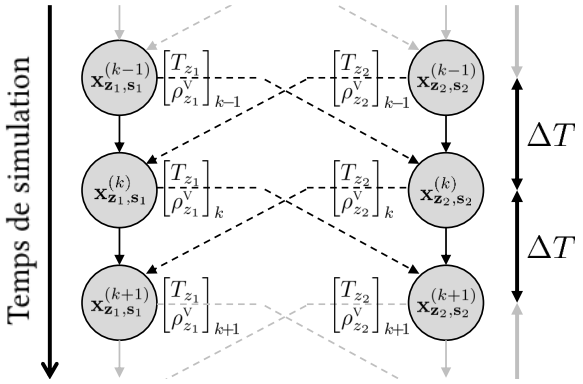


FIGURE 2.7 – Schéma de couplage parallèle pour un bâtiment à deux zones.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une méthodologie complète a été établie pour modéliser le comportement hygrothermique d'un bâtiment multizone en considérant différentes indicateurs de confort microclimatiques. Le modèle développé est du type boîte grise et est basé sur les processus de transfert de chaleur et d'humidité. Il intègre l'éclairement énergétique solaire comme source d'énergie et les systèmes de CVC comme les pompes à chaleur ou les VMC. Ce modèle hygrothermique peut estimer et prédire les données microclimatiques, telles que la température opérative, la température radiante et l'humidité relative, qui sont essentielles pour qualifier le confort thermique. Comme ce modèle n'est que la première étape d'une stratégie d'optimisation de la performance énergétique des bâtiments, sa représentation doit être adaptée à son utilisation. À des fins de simulation, un processus de génération de modèles graphiques basé sur l'analogie hygrothermique / électrique est proposé. Pour les besoins du contrôle, il prend la forme d'une représentation d'état, facilement utilisable par les stratégies de commande. Afin de s'adapter aux grands bâtiments et de permettre une simulation coopérative et la mise en oeuvre de lois de commande distribuées, une méthode originale de décomposition des bâtiments en ensembles de zones cohérentes est proposée. Elle est basée sur la représentation graphique du bâtiment et l'utilisation d'outils de décomposition en composantes k-shell connexes et biconnexes.

CHAPITRE 3

COMMANDE PRÉDICTIVE ÉCONOMIQUE L_P-RÉGULARISÉE

Sommaire du présent chapitre

3.1 Introduction **65**

3.2 Modèle hygrothermique **65**

3.3 Commande prédictive économique (EMPC) **68**

3.4 Commande prédictive régularisée (RMPC) **71**

3.4.1 Critère régularisé 71

3.4.2 Pénalisation ℓ_p 72

3.5 Confort hygrothermique dans les bâtiments multizones **77**

3.5.1 Fonction d'objectifs régularisée 77

3.5.2 Commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC) . . . 79

3.5.3 Paramètre de régularisation optimal 81

3.6 Minimisation du critère régularisé **82**

3.7 Conclusion **89**

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de proposer une nouvelle stratégie de commande prédictive économique régularisée considérant des termes de pénalité en norme ℓ_ϵ. Une fonction d'objectifs est introduite pour assurer le confort hygrothermique dans les zones occupées d'un bâtiment tout en minimisant sa consommation d'énergie. Le coût énergétique induit par les différents scénarios de régulation est traduit avec précision et est associé à la prise en compte des modes de fonctionnement des équipements de CVC. Les caractéristiques du modèle hygrothermique développé dans le chapitre précédent (2.38), qui sont suffisantes pour générer un problème d'optimisation complexe même en considérant un critère quadratique standard (1.22), rendent l'utilisation de termes de pénalité en norme ℓ_ϵ particulièrement pertinente et appropriée. L'intérêt premier de la stratégie proposée est qu'elle peut prendre en compte le stress induit par les démarrages/arrêts successifs et trop fréquents de certains équipements (pompes à chaleur, VMC, etc.) grâce à ces termes de régularisation [Com18]. Ces changements d'état sont généralement préjudiciables à la durée de vie des équipements et représentent au moins un mode de fonctionnement peu efficace sur le plan énergétique. Le deuxième avantage de la solution présentée est que le nombre d'entrées de commande actives peut être contrôlé à tout moment et que des situations de commande inappropriées peuvent être évitées. Les variables de contrôle considérées sont binaires (marche/arrêt) selon les caractéristiques de la plupart des actionneurs utilisés dans les bâtiments, mais permettent néanmoins de prendre en compte des variables continues par quantification. Le troisième intérêt de la régularisation est qu'elle permet la prise en compte d'objectifs spécifiques répondant au problème de la tolérance aux pannes [Tol4]. En cas de défaillance de certains actionneurs, il est important que le scénario de commande optimale synthétisé réduise l'utilisation de l'équipement défectueux ou même l'évite complètement.

L'organisation de ce chapitre est la suivante. Sur la base du chapitre précédent, la section 3.2 spécifie d'abord le modèle discrétisé, qui reflète le comportement hygrothermique dynamique des bâtiments multizones. En distinguant les variables de perturbation influentes des variables de commande elles-mêmes, ce modèle est adapté à la synthèse d'un scénario de commande optimal. Une fonction d'objectifs économique combinant le confort hygrothermique et le coût énergétique est ensuite proposée dans la section 3.3 avant de spécifier les contraintes d'utilisation des différents équipements conventionnels. La section 3.4 précise ces différents objectifs sous la forme d'un critère régularisé. L'intérêt de la norme ℓ_ϵ est mis en évidence par une analyse comparative détaillée. La prise en compte d'une fonction d'objectifs régularisée permet d'envisager des situations problématiques liées à des défauts dans le système de CVC. La section 3.5.2 propose une méthode de FTC active basée sur une stratégie de RMPC. La solution du problème d'optimisation régularisée sous contrainte NP-difficile est ensuite estimée au paragraphe 3.6 par un algorithme de résolution polynomial en temps basé sur une analyse en composantes principales des données prédites.

3.2 Modèle hygrothermique

Avant de définir la fonction d'objectifs et les contraintes de commande, les modèles dynamiques reflétant le comportement hygrothermique d'un ensemble de zones $\mathcal{Z}_i = \{z_{i_j}\}$ (2.39) et d'un bâtiment entier (2.38) sont d'abord réécrits sous une forme discrétisée. Contrai-

rement au chapitre précédent, les vecteurs de commande $\mathbf{u}_{\mathbf{z}_i}(k)$ sont maintenant clairement distingués des vecteurs de perturbations $\mathbf{q}_{\mathbf{z}_i}(k)$ et $\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}_i}(k)$.

D'après (2.39), le modèle d'état standard suivant peut être utilisé pour représenter le comportement hygrothermique d'un ensemble de zones $\mathcal{Z}_i$:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(k+1) = \mathbf{A}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\cdot\mathbf{x}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(k) + \mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\mathrm{T}}\cdot\mathbf{T}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k) + \mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\boldsymbol{\rho}}\cdot\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k) + \mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\mathrm{g}}\cdot\mathbf{g}_{\mathbf{z}_i}(k) \\ \qquad + \mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{q}}\cdot\mathbf{q}_{\mathbf{z}_i}(k) + \mathbf{B}^{sol}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\cdot\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}_i}(k) - \mathbf{B}^{sol}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\cdot\mathrm{diag}\big(\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}_i}(k)\big)\cdot\delta\cdot\mathbf{u}^{\mathrm{VB}}_{\mathbf{z}_i}(k) \\ \qquad + \mathbf{B}^{\mathrm{TTW}}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\big(T_{out}(k),\rho^{\mathrm{V}}_{out}(k)\big)\cdot\mathbf{u}^{\mathrm{TTW}}_{\mathbf{z}_i}(k) + \mathbf{B}^{\mathrm{PAC}}_{\mathbf{z}_i}\big(\mathbf{T}_{\mathrm{H/C}}(k),\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathrm{H/C}}(k),\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{H/C}}(k)\big)\cdot\mathbf{u}^{\mathrm{PAC}}_{\mathbf{z}_i}(k) \\ \qquad + \mathbf{B}^{\mathrm{VMC}}_{\mathbf{z}_i}\big(T_{out}(k),\mathbf{T}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k),\rho^{\mathrm{V}}_{out}(k),\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k)\big)\cdot\mathbf{u}^{\mathrm{VMC}}_{\mathbf{z}_i}(k) \\ \qquad + \ldots \text{(si d'autres équipements doivent être pris en compte)} \\ \begin{bmatrix}\mathbf{T}_{\mathbf{z}_i}\\ \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_i}\\ \mathbf{T}^{op}_{\mathbf{z}_i}\end{bmatrix}(k) = \mathbf{C}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\cdot\mathbf{x}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(k) + \mathbf{D}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\cdot\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}_i}(k) \end{cases} \tag{3.1}$$

avec :

- $\mathbf{x}^T_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(k) = \left[\mathbf{T}^T_{\mathbf{z}_i},\ (\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{z}_i})^T,\ \mathbf{T}^T_{\mathbf{s}_i},\ (\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}_i})^T\right](k)$;
- $\mathbf{T}_{\mathbf{s}_i}(k)$ (resp. $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathbf{s}_i}(k)$) : la température (resp. la densité de vapeur d'eau) centrale de toutes les couches de matériau entourant l'ensemble de zones $\mathcal{Z}_i$;
- $\mathbf{T}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k)$ (resp. $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k)$) : la température (resp. la densité de vapeur d'eau) de l'air ambiant dans chaque zone adjacente à $\mathcal{Z}_i$ (peut inclure la température extérieure $T_{out}(k)$ et la densité de vapeur d'eau extérieure $\rho^{\mathrm{V}}_{out}(k)$) ;
- $\mathbf{q}_{\mathbf{z}_i}(k)$ (resp. $\mathbf{g}_{\mathbf{z}_i}(k)$) : la valeur algébrique de tous les flux de chaleur (resp. d'humidité) entrant et sortant en $\mathcal{Z}_i$ sans tenir compte de l'éclairement énergétique solaire entrant représenté par $\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}_i}(k)$;
- $\mathbf{u}^T_{\mathbf{z}_i}(k) = \left[(\mathbf{u}^{\mathrm{PAC}}_{\mathbf{z}_i})^T,\ (\mathbf{u}^{\mathrm{VMC}}_{\mathbf{z}_i})^T,\ (\mathbf{u}^{\mathrm{TTW}}_{\mathbf{z}_i})^T,\ (\mathbf{u}^{\mathrm{VB}}_{\mathbf{z}_i})^T,\ \ldots\right](k) = \left[\left[u^{\xi}_{z_{i_j}}(k)\right]_{z_{i_j}\in\mathcal{Z}_i}\right]_{1\le\xi\le n_{sc}}$: les entrées de commande en $\mathcal{Z}_i$ respectivement liées à l'utilisation de pompes à chaleur (PAC), VMC, fenêtres oscillo-battantes (TTW), stores vénitiens (VB), etc.. Chaque variable $u^{\xi}_{z_{i_j}}(k)$ est égale à 1 ou 0, ces deux valeurs correspondant respectivement à l'utilisation ou non de la ξ^{e} entrée de commande. Sachant que $1-\delta\cdot u^{\mathrm{VB}}_{z_{i_j}}(k)$ est le coefficient de gain de chaleur solaire [Gen12], $u^{\mathrm{VB}}_{z_{i_j}}(k)$ dépend du fait que les stores soient relevés ($u^{\mathrm{VB}}_{z_{i_j}}(k)=0$) ou abaissés ($u^{\mathrm{VB}}_{z_{i_j}}(k)=1$) (avec $0\le\delta\le 1$) ;
- $\mathbf{A}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$, $\mathbf{C}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$, $\mathbf{D}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}$, $\mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\mathrm{T}}$, $\mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\boldsymbol{\rho}}$, $\mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\mathrm{g}}$ et $\mathbf{F}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{q}}$: des matrices invariantes dans le temps supposées connues et de dimensions appropriées. Elles sont définies en fonction des caractéristiques de l'ensemble de zones $\mathcal{Z}_i$ et des murs / plafonds / sols / murs environnants ;
- $\mathbf{B}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(k)$: matrice de commande à temps variant en fonction de la température extérieure $T_{out}(k)$ et de la densité de vapeur d'eau $\rho^{\mathrm{V}}_{out}(k)$ (si des VMC et/ou des oscillo-battantes sont utilisées), de la température $\mathbf{T}_{\mathrm{H/C}}(k)$, de la densité de vapeur d'eau $\boldsymbol{\rho}^{\mathrm{V}}_{\mathrm{H/C}}(k)$ et du débit d'alimentation $\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{H/C}}(k)$ de l'air dans les conduits de chauffage / refroidissement (si des pompes à chaleur sont utilisées), de l'éclairement énergétique solaire $\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}_i}(k)$ (si des stores vénitiens sont actionnés), etc. Sa définition est la

suivante :

$$\mathbf{B}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\text{PAC}}_{\mathbf{z}_i}\left(\mathbf{T}_{\text{H/C}}(k), \boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\text{H/C}}(k), \boldsymbol{\phi}_{\text{H/C}}(k)\right) \\ \mathbf{B}^{\text{VMC}}_{\mathbf{z}_i}\left(T_{Out}(k), \mathbf{T}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k), \rho^{\text{V}}_{Out}(k), \boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k)\right) \\ \mathbf{B}^{\text{TTW}}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i}\left(T_{Out}(k), \rho^{\text{V}}_{Out}(k)\right) \\ -\mathbf{B}^{sol}_{\mathbf{z}_i,\mathbf{s}_i} \cdot \text{diag}\left(\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}_i}(k)\right) \cdot \delta \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Lorsqu'un bâtiment est considéré dans son ensemble, le modèle précédent (3.1) est simplifié dans sa forme car la température et la densité de vapeur de toutes les zones sont intégrées dans le modèle, et n'apparaissent donc plus représentées par les entrées $\mathbf{T}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k)$ et $\boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\overline{\mathbf{z}_i}}(k)$. Seules la température extérieure $T_{Out}(k)$ et la densité de vapeur d'eau extérieure $\rho^{\text{V}}_{Out}(k)$ sont conservées comme entrées de perturbation en plus de $\mathbf{q}_{\mathbf{z}}(k)$. D'après (2.38), le modèle d'état standard suivant peut alors être utilisé pour représenter le comportement hygrothermique d'un bâtiment composé de $N_{\mathbf{z}}$ zones z_i :

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(k+1) = \mathbf{A}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(k) + \mathbf{F}_{\mathbf{z},\mathbf{T}} \cdot T_{Out}(k) + \mathbf{F}_{\mathbf{z},\boldsymbol{\rho}} \cdot \rho^{\text{V}}_{Out}(k) + \mathbf{F}_{\mathbf{z},\mathbf{q}} \cdot \mathbf{q}_{\mathbf{z}}(k) + \mathbf{F}_{\mathbf{z},\text{g}} \cdot \mathbf{g}_{\mathbf{z}}(k) \\ \quad + \mathbf{B}^{sol}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}}(k) + \mathbf{B}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}\left(\mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(k), \mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}}(k), T_{Out}(k), \rho^{\text{V}}_{Out}(k), \mathbf{T}_{\text{H/C}}(k), \boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\text{H/C}}(k), \boldsymbol{\phi}_{\text{H/C}}(k)\right) \cdot \mathbf{u}_{\mathbf{z}}(k) \\ \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathbf{z}} \\ \boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\mathbf{z}} \\ \mathbf{T}^{Op}_{\mathbf{z}} \end{bmatrix}(k) = \mathbf{C}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(k) + \mathbf{D}_{\mathbf{z},\mathbf{s}} \cdot \mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}}(k) \end{cases} \tag{3.3}$$

avec :

- $\mathbf{x}^T_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(k) = \left[\mathbf{T}^T_{\mathbf{z}}, \quad (\boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\mathbf{z}})^T, \quad \mathbf{T}^T_{\mathbf{s}}, \quad (\boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\mathbf{s}})^T\right](k)$: vecteur d'état où $\mathbf{T}_{\mathbf{z}}(k) = \left[T_{z_i}(k)\right]_{1\leq i\leq N_{\mathbf{z}}}$ (resp. $\boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\mathbf{z}}(k) = \left[\rho^{\text{V}}_{z_i}(k)\right]_{1\leq i\leq N_{\mathbf{z}}}$) est la température (resp. la densité de vapeur d'eau) de l'air ambiant dans les $N_{\mathbf{z}}$ zones et $\mathbf{T}_{\mathbf{s}}(k) = \left[T_{s_j}(k)\right]_{1\leq j\leq N_{\mathbf{s}}}$ (resp. $\boldsymbol{\rho}^{\text{V}}_{\mathbf{s}}(k) = \left[\rho^{\text{V}}_{s_j}(k)\right]_{1\leq j\leq N_{\mathbf{s}}}$) représente la température (resp. la densité de vapeur d'eau) centrale des $N_{\mathbf{s}}$ couches de matériau ;
- $\mathbf{q}_{\mathbf{z}}(k)$ (resp. $\mathbf{g}_{\mathbf{z}}(k)$) : vecteur des perturbations de chaleur (resp. d'humidité) entrant et sortant des $N_{\mathbf{z}}$ zones z_i. Comme le modèle précédent (3.2), l'éclairement énergétique solaire est spécifiquement représenté par $\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}}(k)$;
- $\mathbf{u}_{\mathbf{z}}(k) = \left[\left[u^{\xi}_{z_i}(k)\right]_{1\leq i\leq N_{\mathbf{z}}}\right]_{1\leq \xi\leq n_{sc}}$: vecteur récapitulant toutes les actions de commande possibles dans le bâtiment. $\mathbf{u}_{\mathbf{z}}(k)$ généralise la définition de $\mathbf{u}_{\mathbf{z}_i}(k)$ (3.2) à l'ensemble du bâtiment de sorte que chaque élément $u^{\xi}_{z_i}(k)$ est égal à 1 ou 0, ces deux valeurs correspondant respectivement à l'utilisation ou la non-utilisation de la ξ^{e} entrée de commande ;
- $\mathbf{A}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$, $\mathbf{C}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$, $\mathbf{D}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}$ et $\mathbf{F}_{\mathbf{z},\mathbf{q}}$: matrices invariantes dans le temps supposées connues et de dimensions appropriées ;
- $\mathbf{F}_{\mathbf{z},\mathbf{T}}$, $\mathbf{F}_{\mathbf{z},\boldsymbol{\rho}}$: vecteurs invariants dans le temps supposés connus et de dimensions appropriées ;
- $\mathbf{T}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(k) = \left[\mathbf{T}_{z_i,\mathbf{s}}(k)\right]_{1\leq i\leq N_{\mathbf{z}}+1}$: température de chaque paroi en contact avec chaque zone z_i. Afin de ne pas surcharger les notations, la zone $z_{N_{\mathbf{z}}+1}$ représente l'air extérieur ($\mathbf{T}_{z_{N_{\mathbf{z}}+1},\mathbf{s}} = \mathbf{T}_{Out,\mathbf{s}}$) ;
- $\mathbf{T}^{Op}_{\mathbf{z}}(k) = \left[T^{Op}_{z_i}(k)\right]_{1\leq i\leq N_{\mathbf{z}}}$: température opérative dans les $N_{\mathbf{z}}$ zones.

3.3 Commande prédictive économique (EMPC)

Le principe de la MPC [Com43] consiste à optimiser une fonction décrivant les objectifs de commande sur un horizon de prédiction N_P. À chaque instant k, une séquence de commande optimale $\left\{\mathbf{u}_\mathbf{z}^*(k+j)\right\}_{1\leq j\leq N_P}$ est calculée pour minimiser cette fonction d'objectifs et seul le premier élément $\mathbf{u}_\mathbf{z}^*(k+1)$ est appliqué au système. Cette action de recalcul continu dans le temps, appelée concept d'"horizon fuyant", procure à la MPC une structure de commande en boucle fermée. La fonction d'objectifs économique $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$ que nous proposons pour la régulation hygrothermique d'un bâtiment multizone permet :

- de considérer le confort hygrothermique par la température opérative, l'intensité et la direction du flux énergétique solaire et l'humidité intérieure ;
- de considérer la tarification dynamique de l'énergie dans le contrôle des systèmes de CVC afin de favoriser leur fonctionnement pendant les périodes creuses. Pour les pompes à chaleur, les conditions de température optimales pour leur fonctionnement peuvent également être prises en compte ;
- de considérer la présence ou l'absence de personnes dans les zones ou de mémoriser les habitudes d'ajustement du confort que certains projets de recherche ont déjà étudiées ;
- de privilégier l'utilisation de stores ou de volets en été pour éviter le rayonnement direct dans les pièces et la ventilation naturelle en contrôlant les bouches d'aération, ou la ventilation forcée au lieu de la climatisation.

Conformément à l'ICP relatif à l'inconfort thermique (1.17), la forme générale choisie est la suivante :

$$\begin{aligned} J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}) = \min_{\mathbf{u}_\mathbf{z}} \sum_{j=1}^{N_P} \Big(& f\left(\mathbf{T}_\mathbf{z}^{op}(k+j), \mathbf{T}_{\text{c,min}}(k+j), \mathbf{T}_{\text{c,max}}(k+j), \Psi_j\right) \\ & + g\left(\boldsymbol{\phi}_\mathbf{z}(\%, k+j), \boldsymbol{\phi}_{\text{c,min}}(\%, k+j), \boldsymbol{\phi}_{\text{c,max}}(\%, k+j), \Upsilon_j\right) \\ & + \left\|\mathbf{u}_\mathbf{z}(k+j-1)\right\|_{\epsilon_{\mathbf{u}_{j-1}}} + \left\|\Delta\mathbf{u}_\mathbf{z}(k+j-1)\right\|_{\epsilon'_{\Delta\mathbf{u}_{j-1}}} \Big) \cdot \Delta t \end{aligned} \tag{3.4}$$

avec :

- $$f\left(\mathbf{T}_\mathbf{z}^{op}(k+j), \mathbf{T}_{\text{c,min}}(k+j), \mathbf{T}_{\text{c,max}}(k+j), \Psi_j\right) = \left\| \max\left(\mathbf{T}_{\text{c,min}}(k+j) - \mathbf{T}_\mathbf{z}^{op}(k+j), \mathbf{0}\right) + \max\left(\mathbf{T}_\mathbf{z}^{op}(k+j) - \mathbf{T}_{\text{c,max}}(k+j), \mathbf{0}\right)\right\|_{\Psi_j}^2 \tag{3.5}$$
  un critère de performance thermique, reflétant l'intérêt d'avoir la température opérative de chaque zone proche de la température de confort à l'instant de prédiction $k+j$. Dans cette relation, $\mathbf{T}_{\text{c,min}}(k+j) = \left(T_\text{C}(k+j) - 2\right)\cdot\mathbf{1}_{N_\text{z},1}$ et $\mathbf{T}_{\text{c,max}}(k+j) = \left(T_\text{C}(k+j)+2\right)\cdot\mathbf{1}_{N_\text{z},1}$ représentent les valeurs minimale et maximale de la température de confort déterminées par (2.28) à l'instant $k+j$ et $\mathbf{T}_\mathbf{z}^{op}(k+j) = \left[T_{z_i}^{op}(k+j)\right]_{1\leq i\leq N_\text{z}}$ représente la température opérative prédite dans chaque zone z_i selon le modèle (3.3). Quant aux pondérations $\psi_{z_i}(k+j) \geq 0$, elles reflètent l'importance accordée au respect de l'inégalité $T_{\text{c,min}}(k+j) \leq T_{z_i}^{op}(k+j) \leq T_{\text{c,max}}(k+j)$ à l'instant $k+j$.
- $$g\left(\boldsymbol{\phi}_\mathbf{z}(\%, k+j), \boldsymbol{\phi}_{\text{c,min}}(\%, k+j), \boldsymbol{\phi}_{\text{c,max}}(\%, k+j), \Upsilon_j\right) = \left\| \max\left(\boldsymbol{\phi}_{\text{c,min}}(\%, k+j) - \boldsymbol{\phi}_\mathbf{z}(\%, k+j), \mathbf{0}\right) + \max\left(\boldsymbol{\phi}_\mathbf{z}(\%, k+j) - \boldsymbol{\phi}_{\text{c,max}}(\%, k+j), \mathbf{0}\right)\right\|_{\Upsilon_j}^2 \tag{3.6}$$
  un critère de performance hygrométrique, reflétant l'intérêt d'avoir l'humidité relative $\boldsymbol{\phi}_\mathbf{z}(\%, k+j) = \left[\phi_{z_i}(\%, k+j)\right]_{1\leq i\leq N_\text{z}}$ de chaque zone z_i comprise entre

$\boldsymbol{\phi}_{\text{C,min}}(\%, k+j) = 40\% \cdot \mathbf{1}_{N_z,1}$ et $\boldsymbol{\phi}_{\text{C,min}}(\%, k+j) = 60\% \cdot \mathbf{1}_{N_z,1}$ à l'instant de prédiction $k+j$. Les prédictions $\phi_{z_i}(\%, k+j) = 100\dfrac{R^{\text{v}} \cdot T_{z_i}(k) \cdot \rho^{\text{v}}_{z_i}(k)}{P^{\text{vs}}_{z_i}(k)}$ peuvent être faites à tout instant $k+j$ en utilisant la formule de Tetens (2.31) et la représentation d'état (3.1) ou (3.3). Les pondérations $v_{z_i}(k+j)$ permettent de donner plus ou moins d'importance à ce critère hygrométrique dans chacune des zones z_i.

- $\left\|\mathbf{u_z}(k+j-1)\right\|_{\epsilon_{\mathbf{u}_{j-1}}} = \sum_{i=1}^{N_z}\sum_{\xi=1}^{n_{sc}} \epsilon^{\xi}_{z_i}(k+j-1) \cdot \left|u^{\xi}_{z_i}(k+j-1)\right|$: un premier critère économique qui précise le coût d'utilisation en euros du scénario de commande $\mathbf{u_z}$ entre les instants $k+j-1$ et $k+j$. Par exemple, ce critère peut prendre en compte le coût énergétique de l'utilisation d'une pompe à chaleur ou d'une VMC sur une certaine période de temps. Les pondérations $\epsilon^{\xi}_{z_i}(k+j-1) \geq 0$ dépendent du prix de l'électricité (en €/kWh), qui varie de manière significative entre les heures "pleines" et "creuses". En effet, plus l'énergie est consommée pendant les heures de pointe, plus ses coûts de production et d'utilisation sont élevés. C'est pourquoi les termes € dépendent de l'instant de prédiction $k+j-1$.
- $\left\|\Delta\mathbf{u_z}(k+j-1)\right\|_{\epsilon'_{\Delta\mathbf{u}_{j-1}}} = \sum_{i=1}^{N_z}\sum_{\xi=1}^{n_{sc}} \epsilon^{\xi}_{\Delta,z_i}(k+j-1) \cdot \left|u^{\xi}_{z_i}(k+j-1) - u^{\xi}_{z_i}(k+j-2)\right|$: un deuxième critère économique qui convertit en euros les changements d'état entre les scénarios de commande $\mathbf{u_z}(k+j-2)$ et $\mathbf{u_z}(k+j-1)$. Par exemple, ce critère peut prendre en compte le coût d'ouverture ou de fermeture des fenêtres basculantes ou de fonctionnement des stores. Comme mentionné ci-dessus, les pondérations $\epsilon^{\xi}_{\Delta,z_i}(k+j-1) \geq 0$ dépendent de l'instant de prédiction $k+j-1$.
- $\mathbf{u_z} = \left[\mathbf{u_z}(k+j-1)\right]_{1\leq j\leq N_p}$; $\mathbf{x_{z,s}} = \left[\mathbf{x_{z,s}}(k+j)\right]_{1\leq j\leq N_p}$.

sous la contrainte de confort thermique suivante (selon la section 2.3.1) :

$$|T_{z_i}(k+j) - T_{z_i,s_j}(k+j)| < 8 \text{ K (resp. 5 K) pour les surfaces en verre (resp. les murs opaques)}$$

Remarque 3. *Le critère de confort thermique (3.5) permet de considérer une forme quadratique plus traditionnelle en posant* $\mathbf{T}_{\text{C,min}}(k+j) = \mathbf{T}_{\text{C,max}}(k+j) = T_C(k+j) \cdot \mathbf{1}_{N_z,1}$. *En effet, dans ce cas, on a :*

$$\begin{aligned} &f\left(\mathbf{T}^{op}_{\mathbf{z}}(k+j), T_C(k+j)\cdot\mathbf{1}_{N_z,1}, T_C(k+j)\cdot\mathbf{1}_{N_z,1}, \Psi_j\right) = \\ &\qquad \left\|\mathbf{T}^{op}_{\mathbf{z}}(k+j) - T_C(k+j)\cdot\mathbf{1}_{N_z,1}\right\|^2_{\Psi_j} = \sum_{i=1}^{N_z} \psi_{z_i}(k+j)\left|T^{op}_{z_i}(k+j) - T_C(k+j)\right|^2 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Remarque 4. *Comme pour le critère thermique, le critère de confort hygrométrique (3.6) permet de considérer une forme quadratique plus traditionnelle en posant* $\boldsymbol{\phi}_{\text{C,min}}(\%, k+j) = \boldsymbol{\phi}_{\text{C,max}}(\%, k+j) = \phi_C(\%, k+j)\cdot\mathbf{1}_{N_z,1}$. *En effet, dans ce cas, on a :*

$$\begin{aligned} &g\left(\boldsymbol{\phi}_{\mathbf{z}}(\%, k+j), \phi_C(\%, k+j)\cdot\mathbf{1}_{N_z,1}, \phi_C(\%, k+j)\cdot\mathbf{1}_{N_z,1}, \Upsilon_j\right) = \\ &\left\|\boldsymbol{\phi}_{\mathbf{z}}(\%, k+j) - \phi_C(\%, k+j)\cdot\mathbf{1}_{N_z,1}\right\|^2_{\Upsilon_j} = \sum_{i=1}^{N_z} v_{z_i}(k+j)\cdot\left|\phi_{z_i}(\%, k+j) - \phi_C(\%, k+j)\right|^2 \end{aligned} \tag{3.8}$$

L'hygrométrie de confort $\boldsymbol{\phi}_C(\%, k+j) = \phi_C(\%, k+j) \cdot \mathbf{1}_{N_z,1}$ *où* $\phi_C(\%, k+j)$ *doit être comprise entre* 40% *et* 60% *conformément au paragraphe 2.3.2. Traditionnellement, elle peut être prise égale à* 50%. *Cependant, lorsque la température extérieure est basse, l'humidité relative dans les zones d'un bâtiment a tendance à diminuer en raison du chauffage et de la faible humidité de l'air extérieur. D'un point de vue énergétique, il est alors opportun de diminuer* $\phi_C(\%)$ *à* 40%. *L'inverse peut être fait en été, lorsque le temps est pluvieux.*

Remarque 5. *Dans le cadre de l'efficacité énergétique des bâtiments, il est important de pouvoir assouplir les contraintes sur le confort hygrothermique d'une zone* z_i *sans habitants. Cet assouplissement des contraintes peut être obtenu par le critère de performance* $J_{MPC}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ *(3.4) en utilisant les pondérations dépendantes du temps* $\psi_{z_i}(k+j)$ *et* $\upsilon_{z_i}(k+j)$ *en fonction de l'occupation prévue des zones* z_i *au moment* $k+j$ *(par exemple, en prenant* $\psi_{z_i}(k+j) = \upsilon_{z_i}(k+j) = 0$ *pour une zone inoccupée et* $\psi_{z_i}(k+j) > 0$, $\upsilon_{z_i}(k+j) > 0$ *autrement).*

Remarque 6. *Les entrées de perturbation* $T_{out}(k)$ *et* $\mathbf{q}_\mathbf{z}^{sol}(k)$ *peuvent être estimées à partir des prévisions météorologiques à court terme. Contrairement à* $T_{out}(k)$, *un calcul de base est nécessaire pour déterminer* $\mathbf{q}_\mathbf{z}^{sol}(k)$, *en tenant compte de l'orientation des fenêtres dans chaque zone* z_i *et de l'éclairement énergétique solaire attendu. Il est important de noter que si le calendrier d'occupation des zones est connu à l'avance, il est possible à la fois de prédire la quantité d'énergie et de vapeur d'eau libérée par les occupants, telle que reflétée par une partie de la variable* $\mathbf{q_z}(k)$ *et d'optimiser l'efficacité énergétique globale du bâtiment sur la base de la remarque 5.*

Remarque 7. *Minimiser* $J_{MPC}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ *(3.4) nécessite de prédire la température opérative* $\left[\mathbf{T}_\mathbf{z}^{op}(k+j)\right]_{1\leq j\leq N_p}$ *dans chaque zone* z_i. *Selon la définition (2.27), ce calcul nécessite non seulement de mesurer ou d'estimer la température de chaque surface en contact avec ces zones, mais aussi les prédire sur l'horizon de prévision* N_p. *Dans un bâtiment correctement isolé, comme la température de l'air ambiant dans chaque zone* z_i *n'est généralement pas très différente de la température radiante moyenne, on considère généralement* $\mathbf{T_z}(k+j)$ *au lieu de* $\mathbf{T}_\mathbf{z}^{op}(k+j)$ *dans la définition du critère* $J_{MPC}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$.

Remarque 8. *A long terme, le coût économique d'un scénario de commande ne se limite pas à la simple expression du critère économique de la fonction d'objectifs* $J_{MPC}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ *(3.4). Il ne tient pas compte de l'usure anormale ou de la défaillance prématurée des actionneurs, qui entraînerait de nombreux coûts supplémentaires. Par exemple, dans l'environnement bâti, il est reconnu que l'augmentation du nombre de cycles marche/arrêt d'un compresseur de pompe à chaleur augmente sa consommation d'énergie mais aussi son usure. Par conséquent, un scénario caractérisé par un nombre limité de cycles de redémarrage est plus intéressant qu'un scénario plus agressif montrant davantage de cycles marche/arrêt sur une courte période, même si ce dernier est associé à un critère* $J_{MPC}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ *plus faible. En synthétisant le scénario de commande optimal* $\left\{\mathbf{u}_\mathbf{z}^*(k+j-1)\right\}_{1\leq j\leq N_P}$ *sur un horizon de prédiction* N_P, *il serait donc intéressant de pouvoir minimiser le nombre de cycles marche/arrêt de ces équipements pour en réduire l'usure.*

Remarque 9. *Comme les entrées de commande fonctionnent en mode "marche / arrêt", elles doivent être binaires et réglées à* 0 *ou* 1. *Il est important de pouvoir traiter ces valeurs discrètes comme des contraintes pour le problème d'optimisation (3.4).*

Afin de minimiser le critère $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ tout en tenant compte des remarques 8 et 9, un terme de régularisation est ajouté. Le paragraphe suivant clarifie sa définition.

3.4 Commande prédictive régularisée (RMPC)

3.4.1 Critère régularisé

Il est proposé d'envisager un critère régularisé tel que :

$$J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) = (1-\lambda)\cdot J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) + \lambda\cdot\Omega\left(\mathbf{u_z}\right) \tag{3.9}$$

où $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ est défini par (3.4) et $0 \leq \lambda \leq 1$ est un hyperparamètre de régularisation. Le rôle du terme supplémentaire $\lambda\cdot\Omega(\mathbf{u_z})$ est de régulariser la solution. Dans le contexte du problème ci-dessus, $\lambda\cdot\Omega\left(\mathbf{u_z}\right)$ devrait être une pénalité en faveur de la parcimonie de la dérivée première de $\mathbf{u_z}$.

La définition proposée pour $\Omega(\mathbf{u_z})$ est basée sur la méthode de régularisation de Tikhonov [Gen17]. Elle consiste à inclure un opérateur linéaire $\mathbf{R}$, et à résoudre le problème suivant :

$$\mathbf{u}^*_{\lambda,p} = \underset{\mathbf{u_z}\in\mathbb{R}^{n_\mathbf{u}}}{\arg\min}\ (1-\lambda)\cdot J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) + \lambda\cdot\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_p^{\min(1,p)} \tag{3.10}$$

où $\|\cdot\|_p$ est la norme ℓ_p définie par $\|\mathbf{w}\|_p := \left(\sum_{i=1}^{n_\mathbf{w}} |w_i|^p\right)^{\frac{1}{p}}$ pour tout vecteur $\mathbf{w}\in\mathbb{R}^{n_\mathbf{w}}$. La puissance $\min(1,p)$ du terme de régularisation $\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_p^{\min(1,p)}$ permet de considérer par continuité la norme ℓ_∞ de $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$ pour $p\to\infty$:

$$\lim_{p\to\infty}\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_p^{\min(1,p)} = \lim_{p\to\infty}\left(\sum_i \left|\left(\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\right)_i\right|^p\right)^{\frac{1}{p}\times 1} = \|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_\infty \tag{3.11}$$

et la norme ℓ_0 de $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$ pour $p\to 0$:

$$\lim_{p\to 0}\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_p^{\min(1,p)} = \lim_{p\to 0}\left(\sum_i \left|\left(\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\right)_i\right|^p\right)^{\frac{1}{p}\times p} = \|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_0 \tag{3.12}$$

L'équation (3.12) est particulièrement intéressante car théoriquement, la parcimonie de $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$ est mesurée à l'aide de la norme ℓ_0, qui correspond au nombre total d'éléments non nuls de $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$:

$$\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_0 = \#\left(i \middle| \left(\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\right)_i \neq 0\right) \tag{3.13}$$

La transformation linéaire $\mathbf{R}$ peut prendre différentes formes :

— La régularisation d'ordre zéro qui favorise les solutions avec une norme ℓ_p faible de $\mathbf{u_z}$:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R_0} = \mathbf{I} \tag{3.14}$$

— La régularisation de premier ordre qui favorise les solutions $\mathbf{u_z}$ avec de petites différences entre éléments adjacents :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R_1} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

On note que par cette définition de $\mathbf{R}$, le produit $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$ représente une discrétisation de la dérivée première du vecteur $\mathbf{u_z}$.

3.4.2 Pénalisation ℓ_p

Il existe différents types de fonctions de pénalité [Gen21]. La régression de Ridge correspond à une pénalité de norme ℓ_2. Comme le montre l'illustration simple ci-dessous, cette fonction n'annule pas les coefficients de $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$ mais les réduit à 0. Il s'agit d'un "rétrécissement" (shrinkage) des coefficients. La régression Lasso introduite par Tibshirani [Gen42] est une régression qui pénalise la norme ℓ_1 des coefficients de $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$, ce qui favorise la parcimonie. Le Fused-Lasso est une variante qui prend en compte la spatialité des variables [Gen43]. L'objectif est d'avoir des estimations proches pour la même variable lorsqu'elles sont "proches dans le temps". Cela peut être fait en pénalisant la norme ℓ_1 de la différence de cette variable à deux instants consécutifs.

Une pénalisation plus naturelle que $\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_1$ est de considérer une contrainte $\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_\epsilon^\epsilon$ (avec $0 \leq \epsilon \ll 1$) qui non seulement rétrécit la valeur des différents éléments de $\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}$ mais grâce à la forme des isolignes de $\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_\epsilon^\epsilon$ force certains éléments de $(\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z})_i$ à être strictement à zéro pour λ assez grand. À titre d'illustration, nous considérons le problème d'optimisation :

$$\mathbf{u}^*_{\lambda,p} = \arg\min_{\mathbf{u}} J_{\lambda,p}(\mathbf{u}) = \arg\min_{\mathbf{u}} (1-\lambda)\cdot J^1(\mathbf{u}) + \lambda\cdot\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)} \tag{3.16}$$

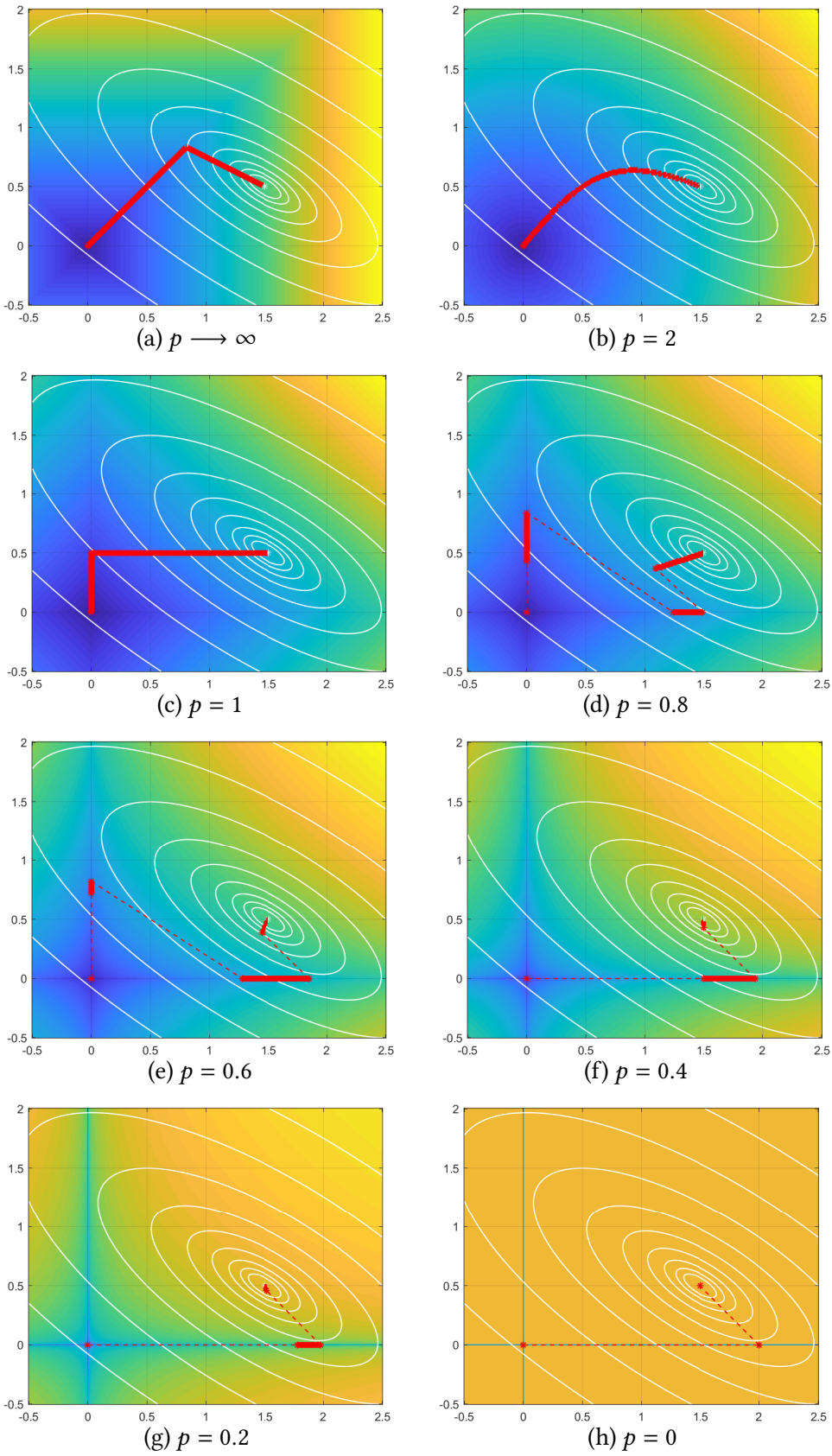
avec $J^1(\mathbf{u}) = (u_1 - 2 + u_2)^2 + (u_2 - 0.5)^2$.

D'abord, nous constatons que $\forall p \geq 0$, nous avons :

$$\begin{cases} \mathbf{u}^*_{0,p} = \begin{bmatrix} 1.5 & 0.5 \end{bmatrix}^T = \arg\min_{\mathbf{u}} J^1(\mathbf{u}) \\ \mathbf{u}^*_{1,p} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}^T = \arg\min_{\mathbf{u}} \|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)} \end{cases}$$

Entre ces deux extrêmes $\mathbf{u}^*_{0,p}$ et $\mathbf{u}^*_{1,p}$, la trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ paramétrée en λ suivie par le point optimal $\mathbf{u}^*_{\lambda,p}$ dans le plan $u_1 - u_2$ est représentée en rouge sur la figure 3.1. Les ellipsoïdes représentées en blanc sur ces figures sont des courbes isocritères de $J^1(\mathbf{u})$. Quant au fond coloré, il représente en continu la valeur de $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)}$ en fonction de u_1 et u_2. La forme des isocritères associés, qui dépend de la norme ℓ_p choisie pour le terme de régularisation, est la même que la forme des contours apparaissant en projection de la surface tridimensionnelle $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)}$ sur la figure 3.2 pour différentes valeurs de p. Par conséquent, selon la valeur de p, la forme de la trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ est très différente, comme on peut le voir sur chacune des sous-figures 3.1a-3.1h.

La régression Lasso (cf. Fig. 3.1c) offre une solution plus parcimonieuse que la régression Ridge (cf. Fig. 3.1b), qui tend à rendre les coefficients très faibles sans les annuler. Plus généralement, pour $p > 1$, la trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ tend vers $\mathbf{u}^*_{1,p}$ à mesure que λ augmente mais n'est pas "attirée" par les axes $u_1 = 0$ et $u_2 = 0$. En revanche, dès que $p \leq 1$, on observe que la convergence vers $\mathbf{u}^*_{1,p}$ se fait selon l'un des axes $u_1 = 0$ ou $u_2 = 0$. Dans ce cas ($p \leq 1$), il est important de noter la différence de résultats entre un terme de régularisation en norme ℓ_ϵ et en norme ℓ_1. Dans cet exemple, il apparaît que l'axe d'attraction peut être différent ($u_1 = 0$ pour la norme ℓ_1 (cf. Fig. 3.1c) vs. $u_2 = 0$ pour la norme ℓ_ϵ (cf. Fig. 3.1d-3.1h)). Compte tenu de la forme des isocritères $J^1(\mathbf{u})$, la solution privilégiée (dans le sens d'une



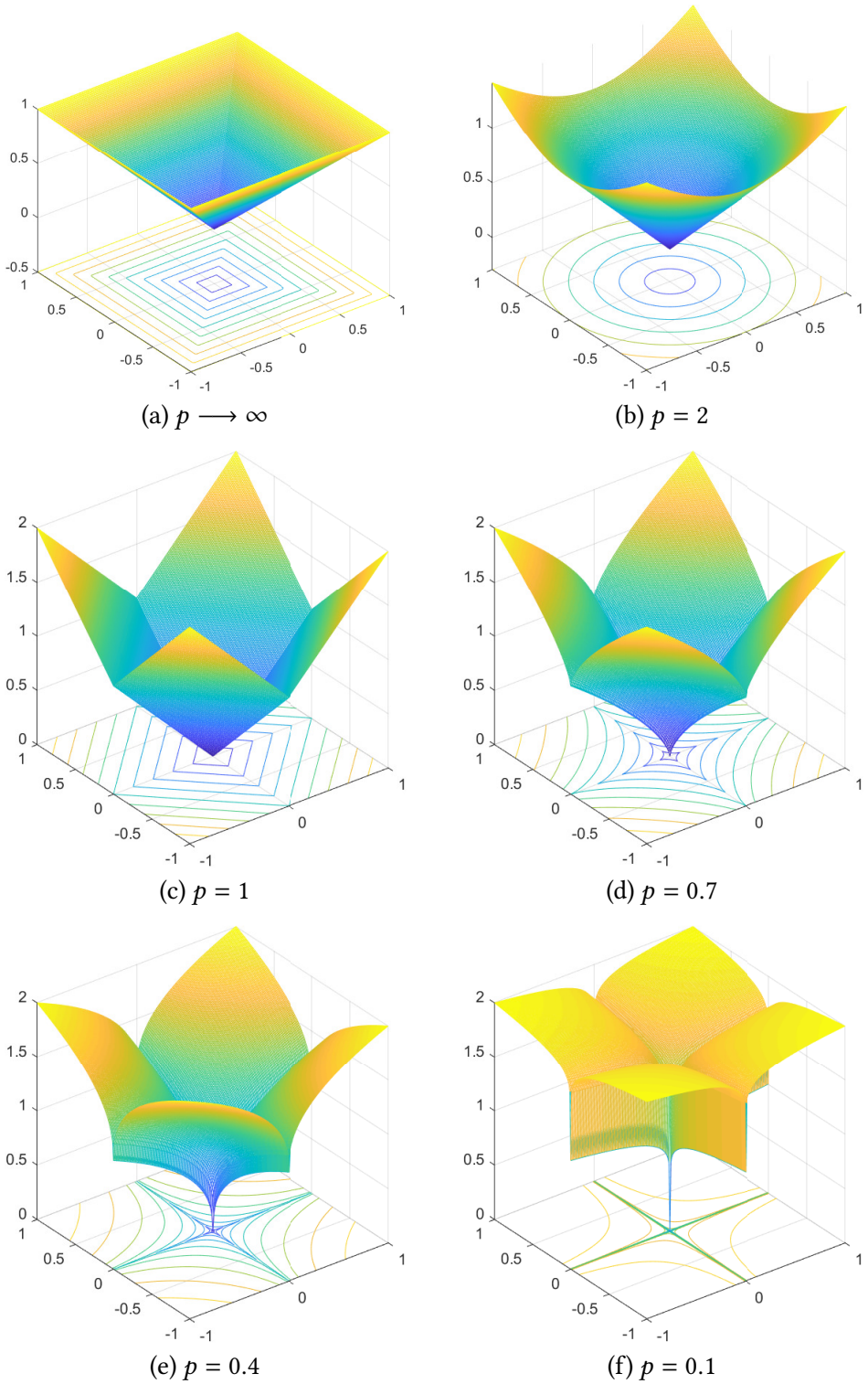
(a) $p \longrightarrow \infty$ (b) $p = 2$

(c) $p = 1$ (d) $p = 0.8$

(e) $p = 0.6$ (f) $p = 0.4$

(g) $p = 0.2$ (h) $p = 0$

FIGURE 3.1 – Trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ (en rouge) paramétrée en λ suivie par $\mathbf{u}^*_{\lambda,p}$ dans le plan $u_1 - u_2$.



(a) $p \longrightarrow \infty$ (b) $p = 2$

(c) $p = 1$ (d) $p = 0.7$

(e) $p = 0.4$ (f) $p = 0.1$

FIGURE 3.2 – Tracé des isocritères et de la surface tridimensionnelle de $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)}$ dans le plan $u_1 - u_2$.

minimisation du critère $J^1(\mathbf{u})$) est celle associée à $p = \epsilon$:

$$\begin{cases} J^1(\mathbf{u}^*_{\lambda^*,1}) = 2.25 \text{ avec } \mathbf{u}^*_{\lambda^*,1} = \underset{\mathbf{u}|u_1=0}{\arg\min}\, J_{\lambda,1}(\mathbf{u}) \\ J^1(\mathbf{u}^*_{\lambda^*,0}) = 0.25 \text{ avec } \mathbf{u}^*_{\lambda^*,0} = \underset{\mathbf{u}|u_2=0}{\arg\min}\, J_{\lambda,0}(\mathbf{u}) \end{cases} \tag{3.17}$$

Cette remarque est particulièrement intéressante car elle prouve que dans certains cas, la solution parcimonieuse $\mathbf{u}^*_{\lambda^*,1}$ associée à la sélection Lasso n'est pas la meilleure solution parcimonieuse par rapport au critère non régularisé. En revanche, au sens du même critère, la solution parcimonieuse associée à la norme ℓ_0 est la solution optimale. L'article récent [Gen23] confirme cette constatation. En effet, les auteurs ont montré que la solution au problème de l'approximation de bas rang d'une matrice par un terme de régularisation en norme nucléaire (généralisant au cas matriciel la norme ℓ_1 d'un vecteur) peut être très différente du problème original, et que l'utilisation de relaxations non convexes peut réduire cet écart.

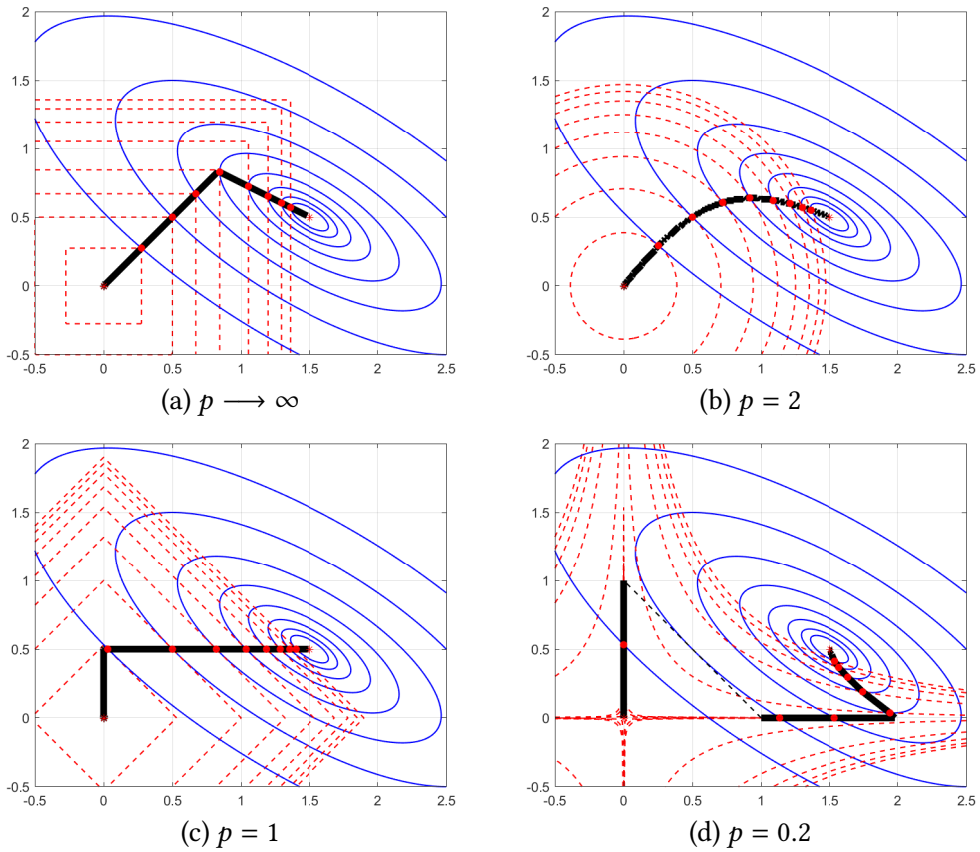
Dans la suite de ce paragraphe, l'effet de p sur la trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ est analysé précisément en fonction de la forme des isocritères $\|\mathbf{u}_\mathbf{z}\|_p^{\min(1,p)}$ qui apparaissent pour différentes valeurs de p dans la figure 3.2. À cette fin, il est d'abord utile de reformuler la minimisation de la fonction $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_\mathbf{z})$ (3.10) comme un problème d'optimisation sous contrainte, ce qui est équivalent lorsque la fonction $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_\mathbf{z})$ est convexe :

$$\begin{cases} \mathbf{u}^{**}_{\beta,p} = \underset{\mathbf{u}_\mathbf{z}\in\mathbb{R}^{n_\mathbf{u}}}{\arg\min}\, J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}) \\ \text{subject to } \|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u}_\mathbf{z}\|_p^{\min(1,p)} \leq \beta \end{cases} \tag{3.18}$$

Dans ce cas, (3.10) peut être interprété comme la forme lagrangienne équivalente du problème d'optimisation (3.18). Si la fonction d'objectifs $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$ est convexe et le terme de régularisation $\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u}_\mathbf{z}\|_p^{\min(1,p)}$ est en norme ℓ_p avec $p \geq 1$ alors la solution des problèmes (3.10) et (3.18) est la même, comme nous le verrons plus tard. La relation exacte entre β (3.18) et λ (3.10) est alors dépendante des données.

La figure 3.3 donne une interprétation géométrique de la solution du problème d'optimisation (3.18) de l'exemple donné ci-dessus (3.16), défini par une fonction d'objectifs $J^1(\mathbf{u})$ fortement convexe. Cela souligne l'intérêt de la norme ℓ_ϵ par rapport à la norme ℓ_p avec $p > 1$. Pour un β donné, les courbes de niveau pointillées rouges délimitent la zone du plan $u_1 - u_2$ centrée sur l'origine satisfaisant la condition $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)} \leq \beta$. La solution $\mathbf{u}^{**}_{\beta,p}$ du problème d'optimisation (3.18) représente les coordonnées du point (u_1, u_2) associé à la valeur minimale de $J^1(\mathbf{u})$ et appartenant à la zone délimitée par l'isocritère $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)} = \beta$. Les points optimaux $\mathbf{u}^{**}_{\beta,p}$ associés à huit isocritères différents sont indiqués par des points rouges sur chaque sous-graphe. En changeant continuellement β dans l'intervalle $\left[0, \left\|\mathbf{u}^*_{0,p}\right\|_p^{\min(1,p)}\right]$, la trajectoire $\Gamma_{\beta,p}$ paramétrée en β suivie par le point optimal $\mathbf{u}^{**}_{\beta,p}$ est représentée en noir dans le plan $u_1 - u_2$. L'analyse de la forme des isocritères de $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)}$ près des axes $u_1 = 0$ et $u_2 = 0$ peut expliquer la "force d'attraction" de ces axes pour la trajectoire $\Gamma_{\beta,p}$ quand $p \leq 1$. On peut d'abord remarquer que l'angle d'intersection entre les isocritères et les axes est égal à $\pi/2$, quel que soit $p > 1$. En revanche, pour $0 \leq p \leq 1$, il devient inférieur ou égal à $\pi/4$. Cette caractéristique conduit à une modification de la forme de la surface tridimensionnelle de $\|\mathbf{u}\|_p^{\min(1,p)}$ (cf. Fig. 3.2), qui présente un "pli" au niveau des axes dès que $p \leq 1$. Cette différence locale dans la forme des isocritères est un facteur déterminant de la force d'attraction des axes en fonction de p.

Le lien entre les trajectoires $\Gamma_{\lambda,p}$ et $\Gamma_{\beta,p}$ est facile à voir sur les figures 3.1 et 3.3. Tout d'abord, on observe que ces trajectoires sont strictement identiques dans les cas où $p = 1$, 2 et $+\infty$. Plus généralement, ces trajectoires sont similaires quel que soit $p \geq 1$ mais sont



(a) $p \longrightarrow \infty$ (b) $p = 2$

(c) $p = 1$ (d) $p = 0.2$

FIGURE 3.3 – Trajectoire $\Gamma_{\beta,p}$ (en noir) paramétrée en β suivie par $\mathbf{u}^{**}_{\beta,p}$ dans le plan $u_1 - u_2$.

différentes dans le cas contraire, comme on peut l'observer pour la valeur spécifique $p = 0,2$ avec les figures 3.3d ($\Gamma_{\beta,p}$) et 3.1g ($\Gamma_{\lambda,p}$). Cependant, on peut noter le résultat suivant, qui a été démontré dans [Gen39] :

$$\Gamma_{\lambda,p} \subseteq \Gamma_{\beta,p} \tag{3.19}$$

Il ressort clairement de cette étude que seuls les termes de régularisation définis selon la norme ℓ_p avec $p \leq 1$ ont des capacités parcimonieuses. Cependant, la solution régularisée peut varier en fonction de la valeur de p. Même si l'utilisation de la régression Lasso (norme ℓ_1) favorise une solution parcimonieuse, celle obtenue en considérant une norme ℓ_ϵ peut conduire à une solution différente qui, du point de vue de la fonction d'objectifs $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$, est plus intéressante.

Malgré cet intérêt notable, l'inconvénient d'un terme de régularisation représenté par une norme ℓ_ϵ est qu'il n'est pas convexe et conduit à un problème d'optimisation NP-difficile. Cette non-convexité est caractérisée par des discontinuités dans la trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$, qui apparaissent lorsque p est inférieur à 1 (cf. Fig. 3.1d-3.1h). Toutefois, étant donné que la minimisation de la fonction d'objectifs économique $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ associée au modèle à temps variant (3.3) nécessite déjà la mise en œuvre d'un algorithme de résolution dédié, le terme de régularisation non convexe ne complique pas davantage la résolution. La section 3.6 propose une méthode numérique pour estimer la solution optimale du problème d'optimisation globale (3.10) sous sa forme non convexe ($p = \epsilon$). Dans ce contexte, il est important de prêter attention à l'article récent [Gen23], qui promeut l'application des relaxations non convexes en comparant différentes fonctions de relaxation. Les résultats expérimentaux montrent que les relaxations non convexes offrent généralement de nombreux avantages

par rapport aux relaxations convexes.

3.5 Confort hygrothermique dans les bâtiments multizones

3.5.1 Fonction d'objectifs régularisée

Étant donné que la fonction du terme de régularisation $\Omega(\mathbf{u_z})$ est de réduire le stress de certains actionneurs et d'appliquer des valeurs discrètes à l'entrée de commande, les spécifications suivantes sont formulées :

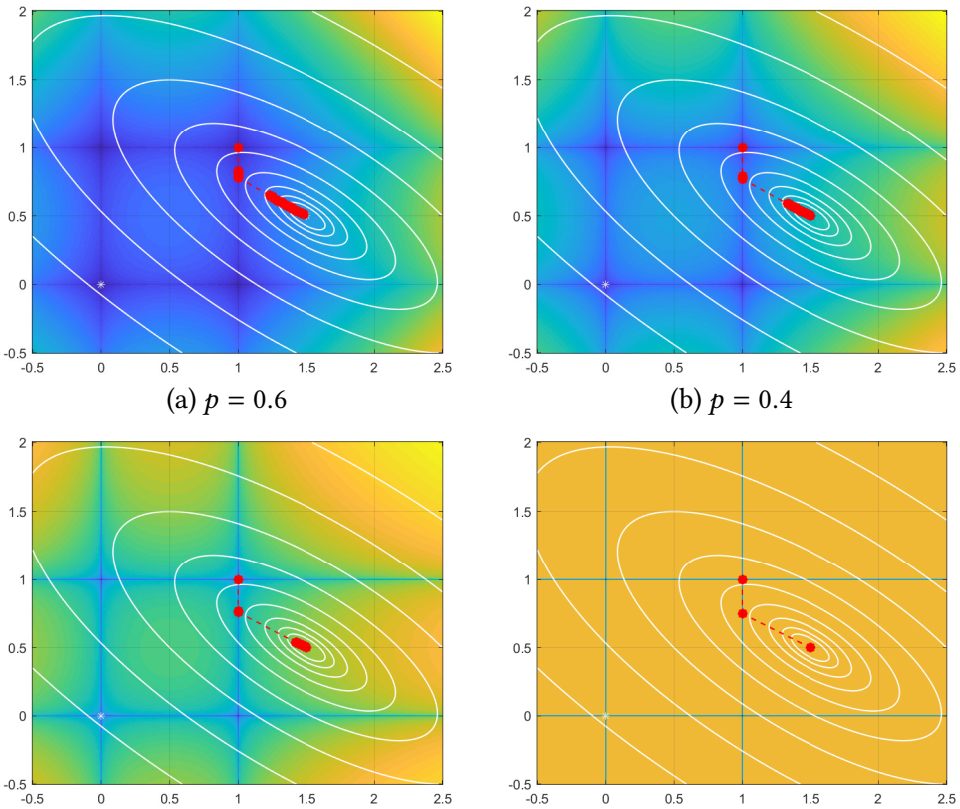
— dans toutes les zones z_i, le nombre de cycles marche / arrêt des pompes à chaleur et des VMC doit être limité. Compte tenu du paragraphe précédent, la minimisation des normes $\sum_{i=1}^{N_z} \|\mathbf{R_1}\cdot\mathbf{u}_{z_i}^{\text{PAC}}\|_\epsilon^\epsilon$ et $\sum_{i=1}^{N_z} \|\mathbf{R_1}\cdot\mathbf{u}_{z_i}^{\text{VMC}}\|_\epsilon^\epsilon$ reflète ce double objectif avec :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{z_i}^{\text{PAC}} = \left[u_{z_i}^{\text{PAC}}(k+j-1)\right]_{1\leq j\leq N_P} \\ \mathbf{u}_{z_i}^{\text{VMC}} = \left[u_{z_i}^{\text{VMC}}(k+j-1)\right]_{1\leq j\leq N_P} \end{cases} \tag{3.20}$$

— le nombre d'actionneurs utilisés dans chaque zone z_i doit être limité. Cette spécification conduit à la minimisation du terme $\sum_{i=1}^{N_z} \left\|\mathbf{R_0}\cdot\mathbf{u}_{z_i}\right\|_\epsilon^\epsilon$ avec $\mathbf{u}_{z_i} = \left[\mathbf{u}_{z_i}(k+j-1)\right]_{1\leq j\leq N_P}$ le vecteur de commande $\mathbf{u}_{z_i}(k)$ prédit sur l'horizon N_P ;

— Les entrées de commande doivent prendre des valeurs binaires dans l'ensemble discret $\{0,1\}$ (marche / arrêt ou ouvert / fermé). En utilisant le terme de régularisation $\sum_{i=1}^{N_z} \left\|\mathbf{R_0}\cdot\left(\mathbf{u}_{z_i}\odot(\mathbf{u}_{z_i}-\mathbf{1})\right)\right\|_\epsilon^\epsilon$, cela peut être fait si $\mathbf{u}_{z_i}\odot(\mathbf{u}_{z_i}-\mathbf{1})$ représente le produit élément par élément des deux vecteurs $\mathbf{u}_{z_i}$ et $(\mathbf{u}_{z_i}-\mathbf{1})$.

A titre d'exemple, à la figure 3.4 est représentée en rouge la trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ paramétrée en λ suivie par la solution optimale $\mathbf{u}_{\lambda,p}^*$ du critère ℓ_p-régularisé $J_{\lambda,p}(\mathbf{u}) = (1-\lambda)\cdot J^1(\mathbf{u}) + \lambda\cdot\left\|\mathbf{u}\odot(\mathbf{u}-\mathbf{1})\right\|_p^{\min(1,p)}$ dans le plan $u_1 - u_2$. On observe que $\Gamma_{\lambda,p}$ tend vers $\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix}\text{on} & \text{on}\end{bmatrix}^T$, qui est la loi de commande binaire (on/off) liée à la minimisation de $J^1(\mathbf{u})$. Pour ce type de régularisation, le choix d'une norme ℓ_ϵ est également justifié car la forme des isocritères $J_{\lambda,\epsilon}(\mathbf{u})$ est dans ce cas similaire à celle de $J^1(\mathbf{u})$ sauf au niveau des axes $u_1 = 0$ et $u_2 = 0$. Cette propriété est importante car le seul but du terme de régularisation utilisé ici est d'imposer des valeurs discrètes à $\mathbf{u}$ sans modifier la forme des isocritères.



(a) $p = 0.6$ (b) $p = 0.4$

(c) $p = 0.2$ (d) $p = 0$

FIGURE 3.4 – Trajectoire $\Gamma_{\lambda,p}$ (en rouge) paramétrée en λ suivie par $\mathbf{u}^*_{\lambda,p}$ dans le plan $u_1 - u_2$.

Par conséquent, $\Omega(\mathbf{u_z})$ est défini par :

$$\begin{aligned}\Omega(\mathbf{u_z}) = \alpha_1 \cdot \sum_{i=1}^{N_z} \left\| \mathbf{R_0} \bigodot_{l=1}^{\text{NB}} (\mathbf{u}_{z_i} - u_l \mathbf{1}) \right\|_\epsilon^\epsilon + \alpha_2 \cdot \sum_{i=1}^{N_z} \left\| \mathbf{R_1} \cdot \mathbf{u}_{z_i}^{\text{PAC}} \right\|_\epsilon^\epsilon \\ + \alpha_3 \cdot \sum_{i=1}^{N_z} \left\| \mathbf{R_1} \cdot \mathbf{u}_{z_i}^{\text{VMC}} \right\|_\epsilon^\epsilon + \alpha_4 \cdot \sum_{i=1}^{N_z} \left\| \mathbf{R_0} \cdot \mathbf{u}_{z_i} \right\|_\epsilon^\epsilon\end{aligned} \tag{3.21}$$

avec $\bigodot_{l=1}^{\text{NB}} (\mathbf{u}_{z_i} - u_l \mathbf{1}) = (\mathbf{u}_{z_i} - u_1 \mathbf{1}) \odot \ldots \odot (\mathbf{u}_{z_i} - u_{\text{NB}} \mathbf{1})$ où $\odot$ est le produit élément par élément de deux vecteurs et $\{u_l\}_{1 \leq l \leq \text{NB}}$ est un ensemble de valeurs constantes qui peuvent être prises par les entrées de commande. Pour les valeurs binaires on / off, nous avons NB $= 2$, $u_1 = 1$ (on) et $u_2 = 0$ (off).

Le choix de α_2 (ou α_3) proche de 0 entraîne une faible régularisation de la solution, ne réduisant guère le stress des actionneurs associés. En revanche, si α_2 (ou α_3) prend une valeur élevée, alors le stress des actionneurs associés est fortement réduit, mais en revanche, selon le critère $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$, le confort hygrothermique peut diminuer, car la solution régularisée peut s'écarter sensiblement de la solution non régularisée.

3.5.2 Commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC)

La principale contribution de ce paragraphe consiste à concevoir un système de FTC actif pour s'adapter au mieux aux défaillances des actionneurs affectant les systèmes de CVC. En cas de défaillance d'un actionneur, il peut être avantageux de continuer à l'utiliser mais avec moins de contraintes pour permettre au système de fonctionner dans un mode plus ou moins dégradé. Dans le contexte de la régulation hygrothermique des bâtiments, plusieurs situations peuvent se présenter. Par exemple, si le compresseur d'une pompe à chaleur présente un comportement anormal, il serait intéressant de réduire son utilisation en limitant le nombre de cycles de redémarrage. Comme deuxième exemple, si nous considérons une CTA pour alimenter en air une grande pièce via plusieurs terminaux à VAV, une défaillance du ventilateur d'alimentation peut entraîner une diminution du débit d'air. Une solution à ce problème peut consister à fermer certains registres qui modulent le débit d'air dans ces terminaux à VAV.

L'originalité du schéma de FTC proposé est qu'il est basé sur la synthèse d'une EMPC, dont la fonction d'objectifs est régularisée par des pénalités en norme ℓ_ϵ en cas de défaillance d'actionneurs. Cette approche active de FTC prend en compte les informations provenant d'un module de diagnostic dont le processus de synthèse ne sera pas détaillé. L'objectif de la FTMPC proposée dans ce paragraphe est de faire évoluer le scénario de commande optimal $\left\{\mathbf{u}_\mathbf{z}^*(k+j)\right\}_{1\leq j\leq N_P}$ en présence d'une défaillance d'actionneur de sorte que l'entrée de commande soit lissée sur tout l'horizon N_P (cas du premier exemple) ou que le nombre d'actionneurs utilisés soit limité (deuxième exemple). A cette fin, le critère économique $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$ (3.4) est régularisé. En choisissant soigneusement les termes de régularisation, cette méthode peut également prendre en compte le blocage des actionneurs tels que les registres d'air extérieur, les vannes trois voies pour l'alimentation des serpentins de chauffage et de refroidissement, les ventilateurs des CTA situés dans les plenums d'alimentation ou d'évacuation, les registres des équipements terminaux à VAV, les compresseurs à vitesse variable des pompes à chaleur, etc. Il est évident que si ce type de défaillance (perte d'efficacité ou blocage d'un actionneur) n'est pas pris en compte dans la synthèse de la loi de commande, le scénario mis en oeuvre peut produire de très mauvaises performances et endommager encore plus l'actionneur défectueux. Naturellement, la stratégie développée ne veut pas ignorer l'existence de défauts et devrait finalement conduire à des mesures de maintenance corrective.

Comme pour le fonctionnement normal (3.9), il est proposé de considérer une fonction d'objectifs régularisée telle que :

$$J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}) = (1-\lambda)\cdot J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}) + \lambda\cdot\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z}) \tag{3.22}$$

où $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$ est défini par (3.4) et $0 \leq \lambda \leq 1$ est un hyperparamètre de régularisation dont la valeur dépend du défaut diagnostiqué sur le système.

En cas de défaillance de l'actionneur $\xi(z_i)$, le terme de pénalité $\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z})$ peut être utilisé pour :

— réduire le nombre de cycles de marche / arrêt de l'actionneur défectueux. Compte tenu du paragraphe précédent, la minimisation de $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$ reflète cet objectif

avec $\Omega(\mathbf{u_z}) = \left\| \mathbf{R_1} \cdot \left[u_{z_i}^{\xi}(k-1) \quad \mathbf{u}_{z_i}^T \right]^T \right\|_\epsilon^\epsilon$ et $\mathbf{u_{z_i}}$ définis par (3.23) ;

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{z_i}^T = [\mathbf{u}_{z_i}^{\xi}]_{1 \le \xi \le n_{sc}} = \left[u_{z_i}^{\xi}(k) \ \dots \ u_{z_i}^{\xi}(k+N_P-1) \right]_{1 \le \xi \le n_{sc}} \\ \mathbf{u}_{\mathbf{z}}^T = [\mathbf{u}_{z_1}^T \ \dots \ \mathbf{u}_{N_z}^T] \end{cases} \tag{3.23}$$

— utiliser un nombre réduit d'actionneurs à chaque instant de prédiction $k+j$, ce qui équivaut à minimiser $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ avec $\Omega(\mathbf{u_z}) = \sum_{j=1}^{N_P} \left\| \mathbf{R_0} \cdot \mathbf{u_z}(k+j) \right\|_\epsilon^\epsilon$ et $\mathbf{u_z}(k+j) = \left[\left[u_{z_i}^{\xi}(k+j) \right]_{1 \le i \le N_z} \right]_{1 \le \xi \le n_{sc}}$;

— imposer à la commande $u_{z_i}^{\xi}(k+j)$ d'être constante et égale à $u_{z_i}^{\xi,f}$ $\forall j$ lorsque l'actionneur $\xi(z_i)$ est bloqué à $u_{z_i}^{\xi,f}$. La minimisation de $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ avec $\Omega(\mathbf{u_z}) = \left\| \mathbf{R_0} \cdot (\mathbf{u}_{z_i}^{\xi} - u_{z_i}^{\xi,f} \cdot \mathbf{1}) \right\|_\epsilon^\epsilon$ reflète cette contrainte.

Si le seul but des termes de régularisation est de prendre en compte les éventuelles défaillances de l'actionneur $\xi(z_i)$ et de minimiser le nombre d'actionneurs utilisés à tout instant, le terme de pénalité global $\Omega(\mathbf{u_z})$ est défini comme suit :

$$\Omega\left(\mathbf{u_z}\right) = \gamma_1 \cdot \left\| \mathbf{R_1} \cdot \left[u_{z_i}^{\xi}(k) \quad \mathbf{u}_{z_i}^T \right]^T \right\|_\epsilon^\epsilon + \gamma_2 \cdot \sum_{j=0}^{N_P-1} \left\| \mathbf{R_0} \cdot \mathbf{u_z}(k+j) \right\|_\epsilon^\epsilon + \gamma_3 \cdot \left\| \mathbf{R_0} \cdot (\mathbf{u}_{z_i}^{\xi} - u_{z_i}^{\xi,f} \cdot \mathbf{1}) \right\|_\epsilon^\epsilon \tag{3.24}$$

avec γ_1, γ_2 et γ_3 : des coefficients de pondération dont les valeurs dépendent de la détection ou non d'une défaillance sur l'actionneur $\xi(z_i)$, en supposant que cette information soit transmise par un module de diagnostic. En bon état de fonctionnement, $\gamma_3 = 0$. Pour γ_1 et γ_2, les objectifs qu'ils traduisent peuvent être souhaités même sans défaut. Dans ce cas, une stratégie basée sur la règle de Bryson permet de les définir en les prenant égaux à l'inverse de la valeur maximale des termes qu'ils pondèrent. Dans le cas où un blocage est détecté et identifié sur l'actionneur $\xi(z_i)$, il faut sélectionner γ_3 très grand pour imposer la valeur $u_{z_i}^{\xi,f}$ à $u_{z_i}^{\xi}(k+j)$ indépendamment de j. Si la défaillance observée n'est pas un blocage, mais que l'actionneur montre tout de même des signes de faiblesse, une stratégie peut consister soit à augmenter le paramètre γ_2 pour minimiser son utilisation, soit à l'utiliser comme d'habitude, mais en imposant à $u_{z_i}^{\xi}(k+j)$ d'être lisse sur l'horizon de prédiction N_P et de n'avoir que de faibles variations dans le temps. Dans ce cas, le coefficient γ_1 sera augmenté. Schématiquement, la stratégie proposée de FTMPC est illustrée à la figure 3.5.

Remarque 10. *Que le système de CVC soit en bon état de fonctionnement ou non, les termes de régularisation dans la définition de $\Omega\left(\mathbf{u_z}\right)$ (3.21) sont importants. Étant donné la nature discrète des signaux de commande, le terme lié à α_1 est même particulièrement important. Par conséquent, une stratégie flexible peut consister à prendre en compte tous les termes de régularisation et à modifier leur pondération en temps réel sur la base d'informations de diagnostic.*

Compte tenu de l'importance des paramètres de régularisation et en particulier de λ (3.10), pour lequel un choix judicieux doit être fait afin d'éviter un sous- et sur-ajustements,

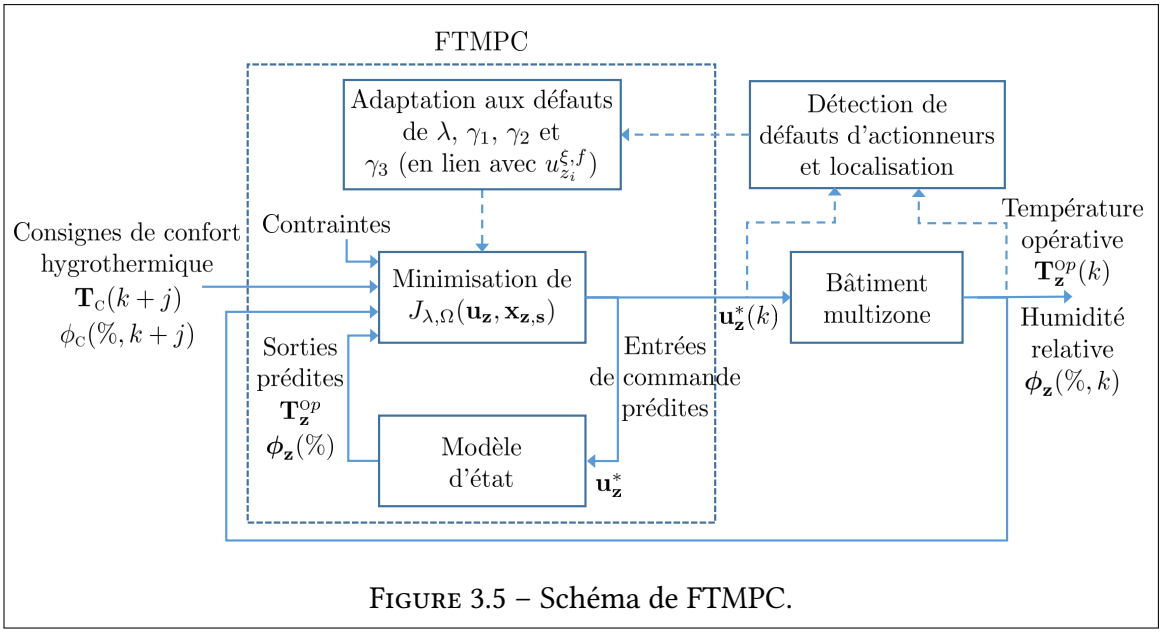


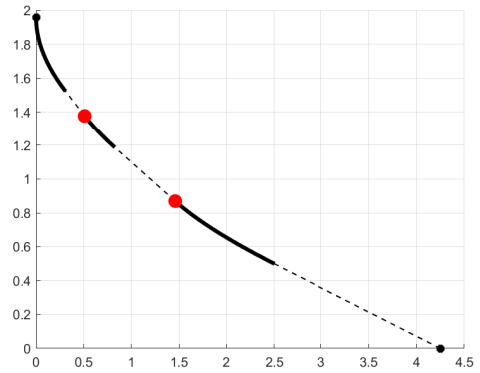
FIGURE 3.5 – Schéma de FTMPC.

le paragraphe suivant adapte une méthode de détermination classique pour contrôler le degré de parcimonie du terme de régularisation $\|\mathbf{R}\cdot\mathbf{u_z}\|_p^{\min(1,p)}$.

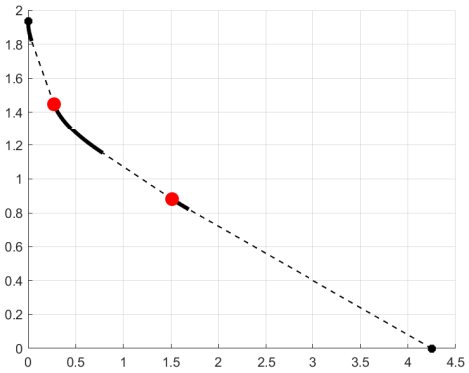
3.5.3 Paramètre de régularisation optimal

Le paramètre λ (3.10) permet d'établir un compromis entre la fonction d'objectifs $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ et le terme de pénalité $\Omega(\mathbf{u_z})$. Le choix "optimal" de λ est un problème difficile et reste, d'un point de vue théorique, largement ouvert. Il existe plusieurs techniques de sélection du paramètre de régularisation, comme le critère de Morozov (régularisation ajustée au bruit de mesure), le critère de validation croisée ou la technique de la "courbe en L". Seule cette dernière approche est adaptée à notre contexte. La méthode de la courbe en L [Gen20] consiste à tracer une trajectoire paramétrée en λ montrant l'évolution de $\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*)$ en fonction de $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*, \mathbf{x}_{\mathbf{z,s}}^*)$, les deux étant associés à la valeur minimale $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*, \mathbf{x}_{\mathbf{z,s}}^*) = (1-\lambda)\cdot J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*, \mathbf{x}_{\mathbf{z,s}}^*) + \lambda\cdot\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*)$.

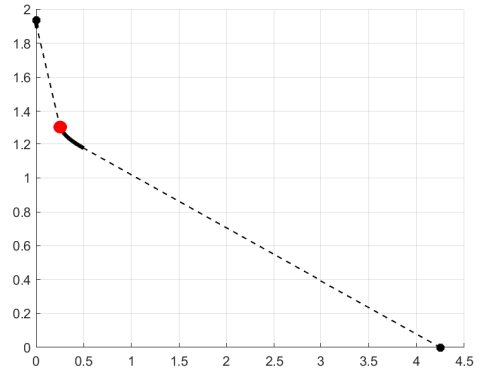
À titre d'illustration, la figure 3.6 montre ces courbes en L pour le critère régularisé $J_{\lambda,p}(\mathbf{u})$ (3.16) en considérant différentes valeurs de p. La courbe a généralement la forme d'un L, et la valeur optimale λ^* est celle qui correspond à la région de courbure maximale de ce L. On peut voir que ces courbes en L sont discontinues pour des valeurs faibles de p. Les ruptures observées peuvent être multiples et sont liées au degré de parcimonie (nombre de "0") apparaissant dans la pénalité $\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*)$ ($= \|\mathbf{u}^*\|_p^{\min(1,p)}$ pour l'exemple). Par conséquent, si la pénalité est en norme ℓ_p pour $p < 1$, la détermination de λ^* est simple. Si l'on souhaite que le terme de pénalité $\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*)$ n'ait qu'un seul "0", alors la solution optimale $\mathbf{u}_\mathbf{z}^*$ est liée à la première rupture de la courbe en L examinée de gauche à droite ($J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ croissante ($= J^1(\mathbf{u}^*)$ pour l'exemple)). Sur la figure 3.6, cela correspond aux points rouges les plus à gauche. Les discontinuités suivantes dans la courbe reflètent la présence d'un "0" supplémentaire dans la pénalité $\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*)$. La valeur de λ^* dépend donc du degré de parcimonie souhaité dans la pénalité $\Omega(\mathbf{u}_\mathbf{z}^*)$.



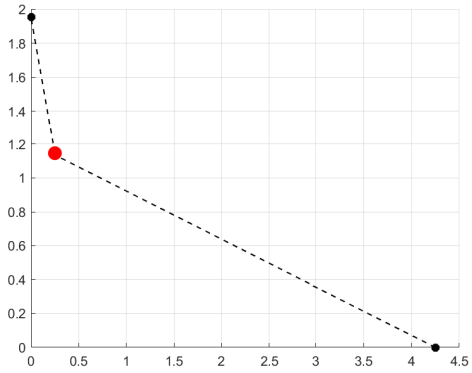
(a) $p = 0.8$.



(b) $p = 0.6$.



(c) $p = 0.4$.



(d) $p = 0.2$.

FIGURE 3.6 – Courbe en L $\left(\|\mathbf{u}^*\|_p^{\min(1,p)}\right.$ en ordonnée en fonction de $\left.J^1(\mathbf{u}^*)\right.$ en abscisse) associée au problème d'optimisation (3.16) pour différentes valeurs de p.

3.6 Minimisation du critère régularisé

La mise en œuvre de la RMPC nécessite à tout moment la détermination de la solution du problème d'optimisation (3.9). Pour les problèmes non convexes, il est généralement difficile de trouver rapidement la solution optimale (et de prouver son optimalité). Cependant, il est important de noter que la minimisation de la fonction d'objectifs économique non régularisée $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$ contrainte par le modèle à temps variant (3.3) ne présente pas de solution analytique principalement en raison du fait que la matrice de commande $\mathbf{B}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}\left(\mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}}(k), \mathbf{q}_\mathbf{z}^{sol}(k), T_{Out}(k), \rho_{Out}^{\text{V}}(k), \mathbf{T}_{\text{H/C}}(k), \boldsymbol{\rho}_{\text{H/C}}^{\text{V}}(k), \boldsymbol{\phi}_{\text{H/C}}(k)\right)$ dépend du temps et du scénario de commande. Par conséquent, même si la non-convexité de la norme ℓ_ϵ rend NP-difficile le problème d'optimisation régularisée, la complexité de l'algorithme de résolution n'augmente pas de manière significative avec le terme de régularisation. Bien que des solveurs tels que "Interior Point OPTimizer" (IPOPT) [Gen47] puissent trouver efficacement des solutions locales aux problèmes de programmation non linéaire, ces solutions ne sont pas particulièrement adaptées à notre problème.

Le programme Yalmip (dans l'environnement MATLAB) peut être utilisé pour minimiser le critère $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$[Gen30]. Son utilisation est naturellement limitée par la charge de calcul, qui augmente fortement avec l'horizon de prédiction N_P. Par exemple, pour un nombre d'entrées de commande (n_{sc}) égal à 10, la valeur de N_P ne peut pas dépasser 6 en raison de l'explosion combinatoire du temps de calcul. Pour des valeurs plus importantes de N_P, l'utilisation du logiciel Yalmip ne fournit plus de solution numérique au problème

d'optimisation. Cependant, il a été démontré que si l'horizon de prédiction N_P n'est pas assez grand, les performances de la commande prédictive sont fortement réduites [Com1]. Il est donc important de pouvoir considérer un grand horizon de prédiction, car le scénario de commande optimal $\mathbf{u}^*_{\lambda,p}$ sur un petit horizon de prédiction peut devenir inapproprié sur un horizon plus long.

Cette sensibilité de la solution optimale à l'horizon de prédiction N_P se produit surtout lorsque la capacité de chauffage / refroidissement (et/ou d'humidification / déshumidification) du bâtiment est modérée ou lorsque $T_c\,(k)$ (et/ou $\phi_c(\%,k)$) est dépendant du temps. Il est important de rappeler que les variations temporelles de $T_c\,(k)$ et $\phi_c(\%,k)$ sont bénéfiques pour réduire les coûts énergétiques, car les contraintes de confort thermique dans les zones de bâtiment sont différentes en l'absence ou en présence de personnes. Les figures 3.7 et 3.8 montrent schématiquement ce phénomène dans le cas simple de la régulation thermique d'un bâtiment monozone ($\mathbf{z} = z_i$) avec 4 scénarios de commande $n_{sc} = 4$ et un horizon de prédiction N_P égal à 4. La figure 3.7 montre en rouge le scénario de commande optimal prédit de $k+1$ à $k+4$ (selon le critère régularisé $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_{z_i}, \mathbf{x}_{z_i,\mathbf{s}})$ dessiné verticalement sur le côté droit de la figure) pour une température de confort T_c définie par un intervalle constant à tout moment. Ce scénario est caractérisé par la séquence de commande optimale $\mathbf{u}^*_{z_i} = \left[\left[u^{\xi*}_{z_i}(k+j-1)\right]_{1\le\xi\le n_{sc}}\right]_{1\le j\le N_P}$ avec :

$$\begin{cases} u^{\xi*}_{z_i}(k+j-1) = 1 & \text{pour } \xi = i_{k+j-1} \\ u^{\xi*}_{z_i}(k+j-1) = 0 & \forall \xi \neq i_{k+j-1} \end{cases} \tag{3.25}$$

$i_k = 2$, $i_{k+1} = 3$, $i_{k+2} = 2$ et $i_{k+3} = 3$. Dans le cas où les bornes de l'intervalle de confort $T_c\,(k)$ changent au fil du temps (cf. Fig. 3.8), il apparaît que la séquence de commande optimale est modifiée en $i_k = 1$, $i_{k+1} = 2$, $i_{k+2} = 1$ et $i_{k+3} = 1$ (toujours en cohérence avec $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_{z_i}, \mathbf{x}_{z_i,\mathbf{s}})$ dessiné sur le côté droit de la figure). Par conséquent, dans cet exemple, si l'horizon de prédiction N_P est égal à 1, 2 ou 3, le scénario de commande optimal à appliquer à l'instant courant k est tel que $i_k = 2$ mais devient $i_k = 1$ pour $N_P = 4$.
Afin de prendre en compte des horizons de prédiction plus longs (de quelques heures à plus d'une journée) utiles pour mieux anticiper les effets des différents flux hygrothermiques, une méthode d'approximation itérative est présentée ci-dessous [Com16] pour estimer $\mathbf{u}^*_{\lambda,p}$. Elle permet de considérer des entrées de commande discrètes et de réduire la charge de calcul. L'idée directrice est de choisir un nombre limité de scénarios de commande parmi tous ceux qui sont possibles.

Afin de comprendre ce processus d'estimation de $\mathbf{u}^*_{\lambda,p}$, le cas d'un bâtiment simple à zone unique ($z = z_i$) est à nouveau considéré avec le confort thermique comme seul critère de performance. L'intervalle de valeurs possibles pour $T^{op}_{z_i}(k+j)$ peut être défini de manière récursive à chaque instant de prédiction $(k+j)$. Noté $I_{z_i}(j)$, il est calculé sur la base de tous les scénarios de commande $\left\{u^{\xi}_{z_i}(k+j-1)\right\}_{1\le\xi\le n_{sc}}$ et de l'intervalle $I_{z_i}(j-1)$ déterminé à la $(j-1)^{\text{e}}$ itération (correspondant à l'instant de prédiction $k+j-1$). En tenant compte de la contrainte de confort thermique $T_{c,\min}(k+j) \le T^{op}_{z_i}(k+j) \le T_{c,\max}(k+j)$, l'intervalle $I_{z_i}(j)$ est défini mathématiquement par la relation suivante :

$$I_{z_i}(j) = \left[I_{z_i,\min}(j),\quad I_{z_i,\max}(j)\right] \tag{3.26}$$

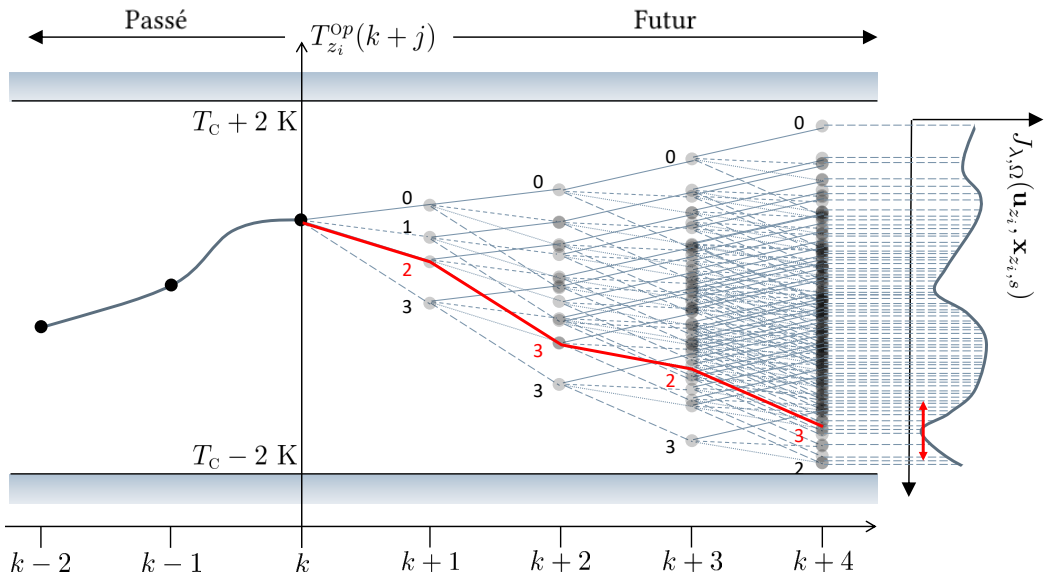


FIGURE 3.7 – Scénario de commande planifié de $k+1$ à $k+4$ pour un intervalle de confort T_C constant.

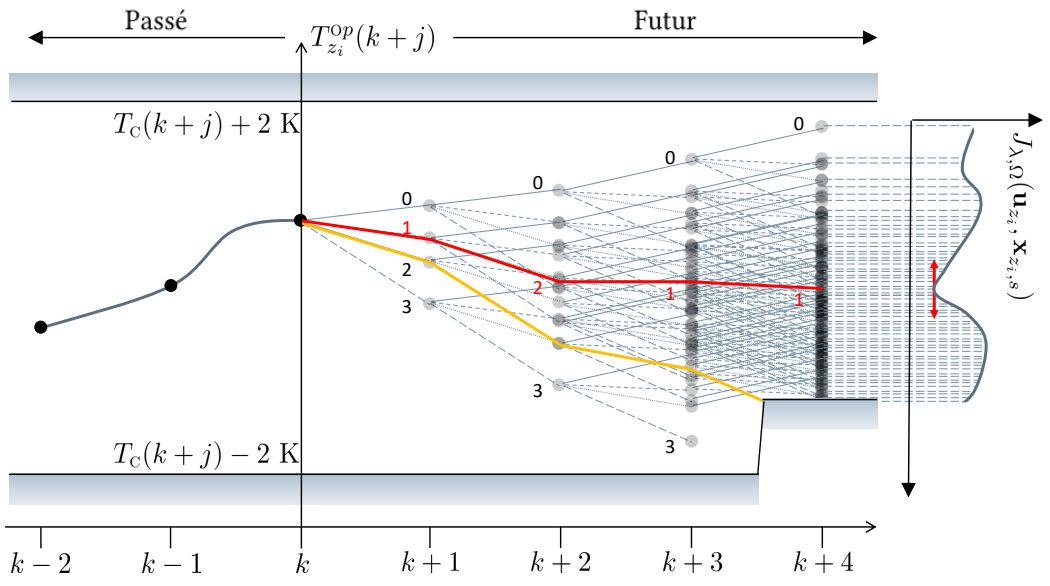


FIGURE 3.8 – Scénario de commande planifié de $k+1$ à $k+4$ pour un intervalle de confort T_C dépendant du temps.

avec $\begin{cases} I_{z_i,\min}(j) = \min\limits_{T_{z_i}^{op}(k+j) \geq T_{C,\min}(k+j)} \left\{ T_{z_i}^{op}(k+j) \middle| T_{z_i}^{op}(k+j-1) \right\}_{1 \leq \xi \leq n_{sc}} \\ I_{z_i,\max}(j) = \max\limits_{T_{z_i}^{op}(k+j) \leq T_{C,\max}(k+j)} \left\{ T_{z_i}^{op}(k+j) \middle| T_{z_i}^{op}(k+j-1) \right\}_{1 \leq \xi \leq n_{sc}} \end{cases}$

et $\left\{ T_{z_i}^{op}(k+j) \middle| T_{z_i}^{op}(k+j-1) \right\}_{1 \leq \xi \leq n_{sc}} = \left\{ T_{z_i}^{op}(k+j) \right\}$ reflétant toutes les prédictions de $T_{z_i}^{op}$ au moment $(k+j)$ à partir des scénarios de commande $\left\{ u_z^{\xi}(k+j-1) \right\}_{1 \leq \xi \leq n_{sc}}$ et de toutes les valeurs de $\left\{ T_{z_i}^{op}(k+j-1) \right\}$ déterminées à l'itération précédente. On peut constater qu'en

recherchant exhaustivement tous les scénarios de commande possibles sur l'horizon de prédiction N_P, le nombre de calculs à effectuer est égal à $n_{sc}\left(n_{sc}^{N_P}-1\right)/\left(n_{sc}-1\right)$. Pour éviter toute explosion combinatoire, parmi toutes les prédictions $\left\{T_{z_i}^{op}(k+j)\right\}$, seules n valeurs sont sélectionnées pour être prises en compte dans l'itération suivante. A cet effet, à la j^{e} itération (correspondant à la prédiction à l'instant $k+j$), l'intervalle $I_{z_i}(j)$ est approché par $\hat{I}_{z_i}(j)$ de sorte que :

$$\hat{I}_{z_i}(j) = \left[\hat{I}_{z_i,\min}(j),\quad \hat{I}_{z_i,\max}(j)\right] \tag{3.27}$$

avec $\begin{cases} \hat{I}_{z_i,\min}(j) = \min\limits_{T_{z_i}^{op}(k+j)\geq T_{c,\min}(k+j)} \left\{T_{z_i}^{op}(k+j)\middle|T_{z_i}^{*\eta}(k+j-1)\right\}_{1\leq\eta\leq n,\,1\leq\xi\leq n_{sc}} \\ \hat{I}_{z_i,\max}(j) = \max\limits_{T_{z_i}^{op}(k+j)\leq T_{c,\max}(k+j)} \left\{T_{z_i}^{op}(k+j)\middle|T_{z_i}^{*\eta}(k+j-1)\right\}_{1\leq\eta\leq n,\,1\leq\xi\leq n_{sc}} \end{cases}$

et $\left\{T_{z_i}^{op}(k+j)\middle|T_{z_i}^{*\eta}(k+j-1)\right\}_{1\leq\eta\leq n,\,1\leq\xi\leq n_{sc}} = \left\{T_{z_i}^{\xi,\eta}(k+j)\right\}$ reflétant toutes les prédictions $T_{z_i}^{op}(k+j)$ issues des scénarios de commande $\left\{u_{z_i}^{\xi}(k+j-1)\right\}_{1\leq\xi\leq n_{sc}}$ et des n valeurs "optimales" $\left\{T_{z_i}^{*\eta}(k+j-1)\right\}_{1\leq\eta\leq n}$ sélectionnées à l'itération $(j-1)$. D'une manière générale, la sélection de ces n termes à l'itération (j) se fait en subdivisant $\hat{I}_{z_i}(j)$ en un ensemble ordonné de n intervalles consécutifs $\hat{I}_{z_i}^{l}(j)$ de même longueur :

$$\hat{I}_{z_i}(j) = \bigcup_{l=1}^{n} \hat{I}_{z_i}^{l}(j) \tag{3.28}$$

Chaque intervalle $\hat{I}_{z_i}^{l}(j)$ est associé à un sous-ensemble $\left\{T_{z_i}^{l,\eta}(k+j)\right\}$ de prédictions $\left\{T_{z_i}^{\xi,\eta}(k+j)\right\}$ dont les valeurs sont prises dans cet intervalle. Le critère régularisé peut être calculé pour chacune de ces prédictions en utilisant la relation récursive suivante :

$$J_{\lambda,\Omega}^{\xi,\eta}(k+j) = \Delta J_{\lambda,\Omega}\left(u_{z_i}^{\xi}(k+j-1),\, T_{z_i}^{op}(k+j)\right) + J_{\lambda,\Omega}^{*\eta}(k+j-1) \tag{3.29}$$

avec :

- $J_{\lambda,\Omega}^{*\eta}(k+j-1) = \min\limits_{\xi} J_{\lambda,\Omega}^{\xi,\eta}(k+j-1)$ (si $j>1$) : valeur du critère régularisé (3.9) considérant un horizon de prédiction égal à $j-1$ et le scénario de commande $\mathbf{u}_{z_i}(k) \rightarrow \mathbf{u}_{z_i}(k+j-2)$ conforme à la trajectoire temporelle $T_{z_i}^{op}(k) \rightarrow T_{z_i}^{*\eta}(k+j-1)$;
- $J_{\lambda,\Omega}^{*\eta}(k) = 0$;
- $\Delta J_{\lambda,\Omega}\left(u_{z_i}^{\xi}(k+j-1),\, T_{z_i}^{op}(k+j)\right)$: incrément du critère régularisé (3.9) pour un horizon de prédiction évoluant de $j-1$ à j en considérant $u_{z_i}^{\xi}(k+j-1)$ comme le scénario de commande au moment de la prédiction $k+j-1$ et $T_{z_i}^{op}(k+j)$ comme la température opérative au moment $k+j$.

Dans ce sous-ensemble de prédictions, une valeur spécifique $T_{z_i}^{*l}(k+j)$, représentant l'ensemble de l'intervalle $\hat{I}_{z_i}^{l}(j)$, est sélectionnée. Elle est choisie comme la valeur associée au minimum du critère régularisé :

$$J_{\lambda,\Omega}^{*l}(k+j) = \min_{\xi,\,T_{z_i}^{op}(k+j)\in\hat{I}_{z_i}^{l}(j)} J_{\lambda,\Omega}^{\xi,\eta}(k+j) \tag{3.30}$$

En répétant cette génération récursive de $\left\{T_{z_i}^{*l}(k+j)\right\}_{1\leq l\leq n}$ et $\left\{J_{\lambda,\Omega}^{*l}(k+j)\right\}_{1\leq l\leq n}$ pour j variant de 1 à N_P, la solution optimale $\mathbf{u}_{z_i}^{*} = \left[\mathbf{u}_{z_i}^{*}(k+j-1)\right]_{1\leq j\leq N_p}$ peut être estimée en

considérant l'ensemble des scénarios de commande $\mathbf{u}^*_{z_i}(k) \rightarrow \mathbf{u}^*_{z_i}(k+N_P-1)$ correspondant à la trajectoire temporelle $T^{op}_{z_i}(k) \rightarrow T^{op*}_{z_i}(k+1) \rightarrow \ldots \rightarrow T^{op*}_{z_i}(k+N_P)$, où $T^{op*}_{z_i}(k+N_P)$ est associé à la valeur $\min_l J^{*l}_{\lambda,\Omega}(k+N_P)$. Comme indiqué dans l'introduction de ce paragraphe, la méthode d'approximation itérative proposée considère non seulement le critère régularisé non convexe $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_{z_i}, \mathbf{x}_{z_i,\mathbf{s}})$ (3.9) mais aussi les grandes valeurs pour l'horizon de prédiction N_P. Sa charge de calcul est en effet limitée. Pour un N_P donné, le nombre de calculs à effectuer est égal à $n_{sc}(nN_P - n + 1)$, ce qui est à comparer aux $n_{sc}\left(n_{sc}^{N_P} - 1\right)/\left(n_{sc} - 1\right)$ calculs nécessaires pour rechercher de manière exhaustive tous les scénarios de commande possibles.

La figure 3.9 représente le principe de la méthode itérative testée sur le même exemple que précédemment (cf. Fig. 3.8) avec $n = 4$, $N_P = 4$, $\mathbf{u}_{z_i}(k) = [u^{\xi}_{z_i}(k)]_{0\leq\xi\leq n_{sc}-1}$ et $n_{sc} = 4$. Les n meilleures prédictions $\left\{T^{*l}_{z_i}(k+j)\right\}_{1\leq l\leq N_P}$ (au sens du critère régularisé $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_{z_i}, \mathbf{x}_{z_i,\mathbf{s}})$)

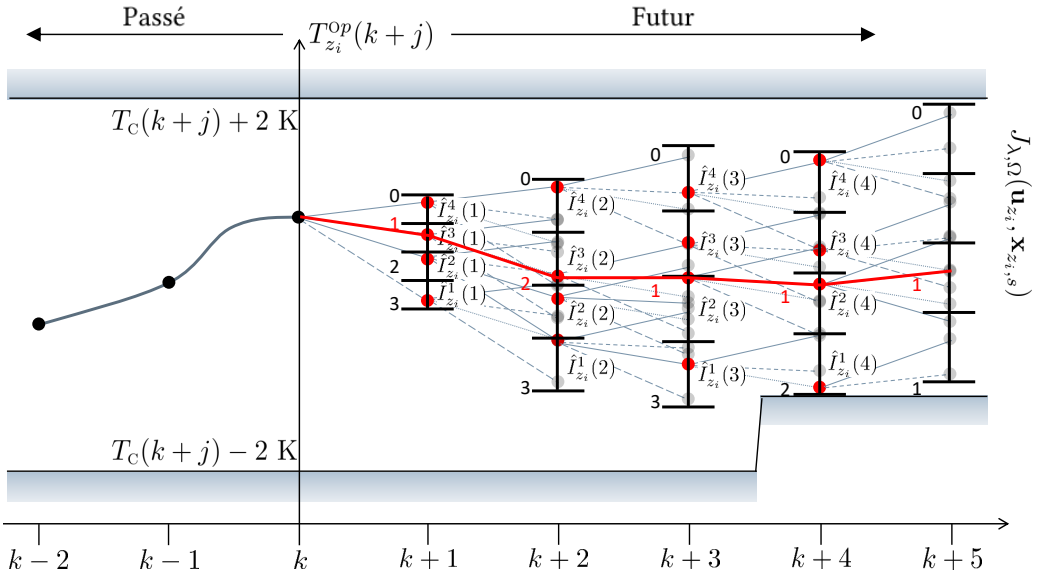


FIGURE 3.9 – Scénario de commande planifié de $k+1$ à $k+5$ en utilisant l'approche itérative proposée pour un intervalle de confort T_C dépendant du temps.

sont indiquées en rouge sur le diagramme à chaque instant de prédiction $k+j$. On observe que la séquence de commande optimale $\mathbf{u}^*_{z_i} = \left[\left[u^{\xi*}_{z_i}(k+j-1)\right]_{0\leq\xi\leq n_{sc}-1}\right]_{1\leq j\leq N_P}$ avec :

$$\begin{cases} u^{\xi*}_{z_i}(k+j-1) = 1 & \text{pour } \xi = i_{k+j-1} \\ u^{\xi*}_{z_i}(k+j-1) = 0 & \forall \xi \neq i_{k+j-1} \end{cases} \tag{3.31}$$

$i_k = 1$, $i_{k+1} = 2$, $i_{k+2} = 1$ et $i_{k+3} = 1$ est la même que lorsque l'on considère globalement tous les scénarios de commande.

La prise en compte d'une fonction d'objectifs économique plus générale (3.4) ou de bâtiments multizones ne pose pas de problème spécifique et se fait en généralisant la méthode développée. La division d'un intervalle de points dans $\mathbb{R}$ ((3.28) pour une zone) est alors remplacée par la division d'un nuage de points dans $\mathbb{R}^{2N_z}$ (pour les N_z zones z_i avec deux critères de confort (thermique + hygrométrique)). À cette fin, une analyse en composantes

principales (ACP) est effectuée sur un nombre limité de points soigneusement sélectionnés dans l'espace des variables $\left(T_{z_1}^{op}(k+j),\ldots,T_{z_{N_z}}^{op}(k+j),\phi_{z_1}(\%,k+j),\ldots,\phi_{z_{N_z}}(\%,k+j)\right)$ afin de déterminer une base appropriée pour la représentation de toutes les réalisations possibles de $\left(T_{z_i}^{op}(k+j),\phi_{z_i}(\%,k+j)\right)$ avec $i=1,\ldots,N_z$. À chaque instant de prédiction $k+j$, le partitionnement du nuage de points permet de remplacer l'ensemble de toutes les réalisations exhaustives par un sous-ensemble plus petit dont la cardinalité n est fixée *a priori*. Comme dans le cas d'une zone unique, ce processus est répété N_p fois de manière récursive pour j variant de 1 à N_p. Bien entendu, plus le nombre n est élevé, plus l'approximation du scénario de contrôle optimal est bonne.

Un exemple schématique illustrant cette généralisation est présenté aux figures 3.10 et 3.11 en considérant la régulation des deux variables microclimatiques $\phi_{z_1}(\%,k)$ et $T_{z_1}^{op}(k)$ au sein d'un bâtiment monozone ($N_z=1$). Les paramètres de synthèse sont choisis tels que : $N_P=5$, $n_{sc}=4$ et $n=10$. Dans l'espace tridimensionnel représenté, (x,y,z) correspond à $\left(k+j,\phi_{z_1}(\%,k+j),T_{z_1}^{op}(k+j)\right)$. La figure 3.10 montre de manière exhaustive toutes les trajectoires $\left(n_{sc}^{N_P}\right)$ associées à tous les scénarios de commande possibles, tandis que la figure 3.11 ne montre que les $n.n_{sc}$ trajectoires judicieusement sélectionnées selon le critère régularisé $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_{z_1},\mathbf{x}_{z_1,s})$ (3.9). Chaque arc reliant deux sommets ($x=k+j-1$ à $x=k+j$) est associé à un scénario de commande $u_z^{\xi}(k+j-1)$ et à un coût $\Delta J_{\lambda,\Omega}\left(u_{z_1}^{\xi}(k+j-1),\right.$ $\left.\phi_{z_1}(\%,k+j),\ T_{z_1}^{op}(k+j)\right)$ calculé selon le critère $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_{z_1},\mathbf{x}_{z_1,s})$. La figure 3.12 représente plus précisément les différents types de sommets apparaissant dans les plans cyan verticaux des figures 3.10 et 3.11. À chaque instant de prédiction $k+j$ (pour $j=1,\ldots,N_P$), les points

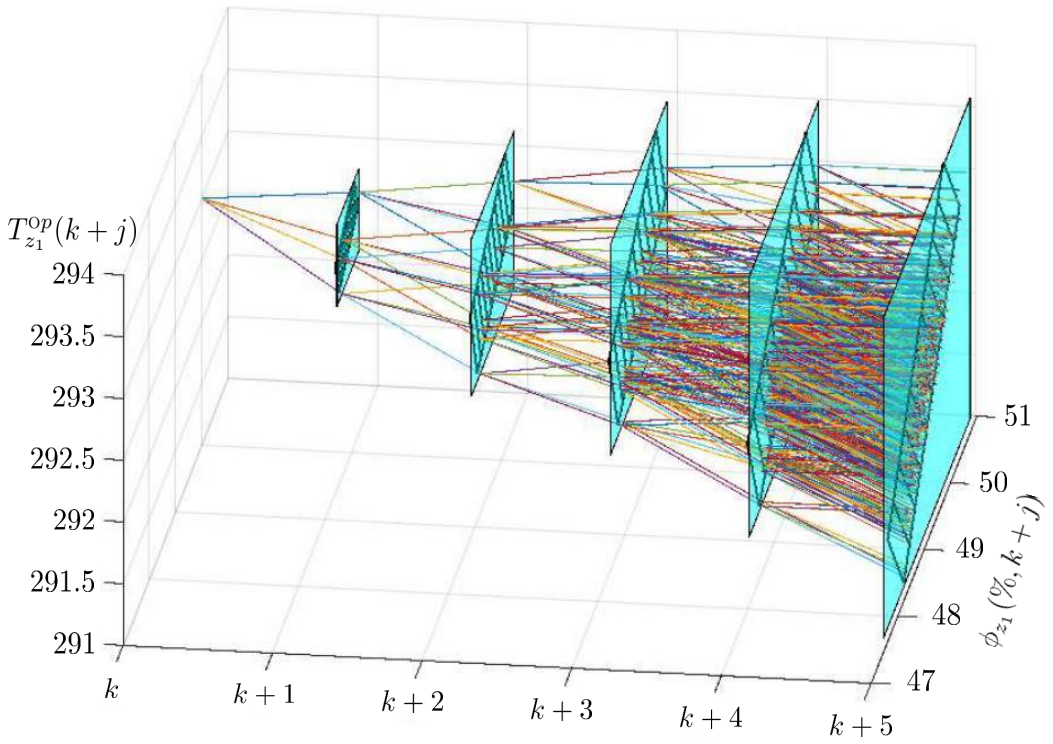


FIGURE 3.10 – Prédiction de $\left(\phi_{z_1}(\%,k+j),T_{z_1}^{op}(k+j)\right)$ pour $j=1,\ldots,N_p$ en utilisant toutes les combinaisons de commandes possibles.

bleus de la figure 3.12 représentent les sommets de fin $\left\{\phi_{z_1}(\%,k+j),T_{z_1}^{op}(k+j)\right\}$ de tous les

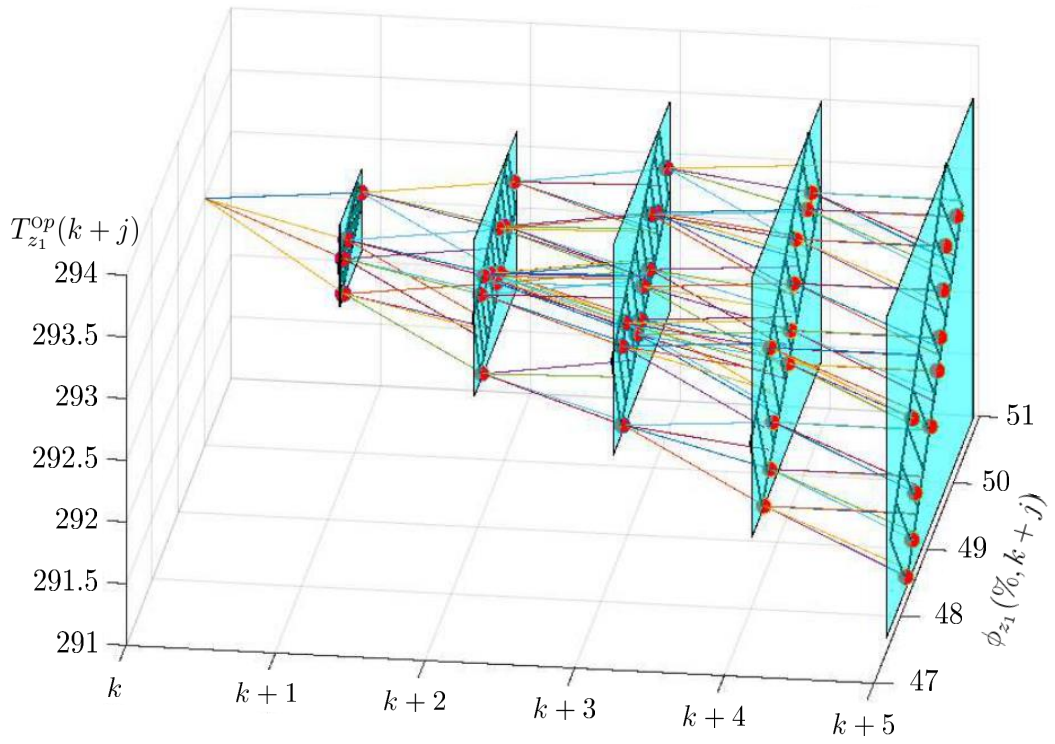
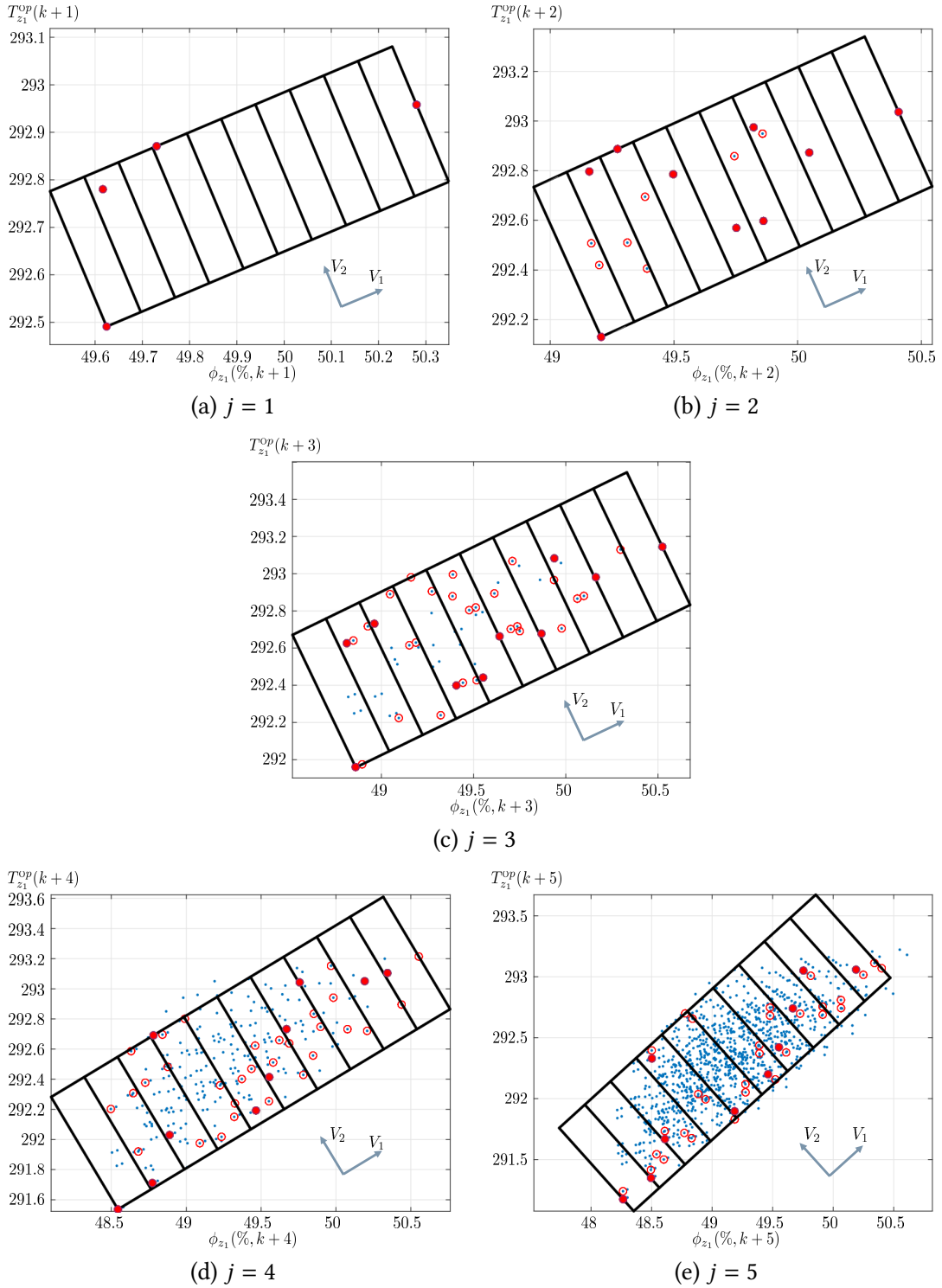


FIGURE 3.11 – Prédiction de $\left(\phi_{z_1}(\%, k+j), T_{z_1}^{op}(k+j)\right)$ pour $j = 1, ..., N_p$ en utilisant l'approche itérative proposée.

arcs générés de manière exhaustive (cf. Fig. 3.10). Les symboles représentés par des cercles et des disques rouges correspondent aux sommets de fin des arcs, qui ont été générés en considérant un ensemble de n points "optimaux" $\left\{\phi_{z_1}^{*\eta}(\%, k+j-1), T_{z_1}^{*\eta}(k+j-1)\right\}_{1\leq\eta\leq n}$ déterminés à l'instant de prédiction précédent $k+j-1$ (cf. Fig. 3.11). Les points représentés par des disques rouges sont choisis en raison de leur représentativité des points encerclés en rouge (et donc des points bleus) et du faible coût des trajectoires $\left\{\phi_{z_1}(\%, k), T_{z_1}^{op}(k)\right\} \rightarrow \left\{\phi_{z_1}^{*\eta}(\%, k+j-1), T_{z_1}^{*\eta}(k+j-1)\right\}_{1\leq\eta\leq n}$ selon le critère régularisé $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_{z_1}, \mathbf{x}_{z_1,\mathbf{s}})$ (3.9).

Ces n points "optimaux" (disques rouges) sont déterminés à chaque instant de prédiction en utilisant une analyse en composantes principales [Gen24]. A l'instant de prédiction $k+j$, les deux composantes principales liées aux deux plus grandes valeurs propres λ_1 et λ_2 de la matrice de corrélation de Pearson formée par la matrice de coordonnées de tous les points rouges (cercles + disques) $\left\{\phi_{z_1}^{\xi,\eta}(\%, k+j), T_{z_1}^{\xi,\eta}(k+j)\right\}_{1\leq\xi\leq n_{sc}, 1\leq\eta\leq n}$ définissent deux directions orthogonales (V_1, V_2) (cf. Fig. 3.12). La projection orthogonale de tous ces points rouges sur V_1 et V_2 permet de générer un rectangle qui les entoure complètement. Ce rectangle est subdivisé en n petits rectangles (dont la distribution dépend du rapport λ_2/λ_1), dans chacun desquels 1 point "optimal" $\left\{\phi_{z_1}^{*\eta}(\%, k+j), T_{z_1}^{*\eta}(k+j)\right\}_{1\leq\eta\leq n}$ (représenté par un disque rouge) est sélectionné parmi tous les points encerclés de rouge pour être réutilisé par un raisonnement similaire au prochain instant de prédiction $k+j+1$.

Cette technique de priorisation peut non seulement prendre en compte le critère régularisé non convexe $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u}_\mathbf{z}, \mathbf{x}_{\mathbf{z},\mathbf{s}})$ (3.9) mais aussi considérer des valeurs importantes pour l'horizon de prédiction N_P. Elle sera utilisée dans le chapitre suivant lors de la mise en oeuvre des approches de RMPC et FTMPC sur la plateforme "Eco-Sûr".



(a) $j = 1$ (b) $j = 2$

(c) $j = 3$

(d) $j = 4$ (e) $j = 5$

FIGURE 3.12 – $\left\{\phi_{z_1}(\%, k+j), T_{z_1}^{op}(k+j)\right\}$ (points bleus), $\left\{\phi_{z_1}^{\xi,\eta}(\%, k+j), T_{z_1}^{\xi,\eta}(k+j)\right\}$ (cercles et disques rouges), $\left\{\phi_{z_1}^{*\eta}(\%, k+j), T_{z_1}^{*\eta}(k+j)\right\}$ (disques rouges).

3.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté un nouveau schéma de synthèse d'une RMPC, qui vise à assurer le confort hygrothermique des bâtiments multizones, tout en améliorant leur efficacité énergétique à long terme et en favorisant les modes de fonctionnement nominaux des

différents équipements. Pour atteindre cet objectif, une fonction d'objectifs économique a d'abord été spécifiée et des contraintes de commande ont été ajoutées par le biais de termes de régularisation. La première concerne la limitation de la fréquence des cycles marche / arrêt de certains actionneurs (tels que les pompes à chaleur). Le démarrage et l'arrêt fréquents de ces dispositifs rendent en effet leur fonctionnement énergétique inefficace et, surtout, peuvent causer de graves dommages. Des termes de régularisation ont également été incorporés pour tenir compte d'autres contraintes, telles que la réduction du nombre d'actionneurs utilisés à un moment donné, et la nature discrète des entrées de commande. En cas de défaillance d'actionneurs, le schéma de commande optimale est ajusté, en tenant compte de leur nature supposée connue. Des termes de régularisation spécifiques sont ajoutés pour lisser l'entrée de commande des actionneurs défectueux ou pour réduire le nombre d'actionneurs utilisés simultanément. Leur rôle est également d'imposer des valeurs particulières aux entrées de commande des actionneurs bloqués.

Une analyse détaillée a montré que lors de la définition des termes de régularisation, le choix de la norme ℓ_p (avec $p \ll 1$) était très important. La norme ℓ_ϵ est préférée car elle est a des capacités de parcimonie et offre une solution régularisée qui peut être plus intéressante que la norme ℓ_1 au sens de la fonction d'objectifs économique. Ce point important est conforme à l'étude menée par [Gen23] dans le cadre de la régularisation des problèmes mal posés. Cependant, comme son utilisation combinée à un modèle discrétisé variant dans le temps du bâtiment multizone conduit à un problème d'optimisation non convexe, une méthode itérative basée sur l'analyse en composantes principales (ACP) des données prédites a été proposée pour approximer la solution optimale sans explosion combinatoire.

CHAPITRE 4

APPLICATION À LA PLATEFORME "ECO-SÛR"

Sommaire du présent chapitre

4.1 Présentation de la plateforme **93**

4.2 Modélisation de la plateforme **93**

4.2.1 Modèle thermique sous Simscape 93

4.2.2 Modèle hygrothermique nodal par analogie électrique . . . 94

4.2.3 Modèle d'état hygrothermique 95

4.2.4 Identification paramétrique 98

4.2.5 Résultats de simulation 99

4.3 Commande prédictive économique ℓ_ϵ-régularisée **101**

4.4 Conclusion **106**

4.1 Présentation de la plateforme

La plateforme "Eco-Sûr" se compose de six pièces et d'un couloir (cf. Fig. 4.1). Ces

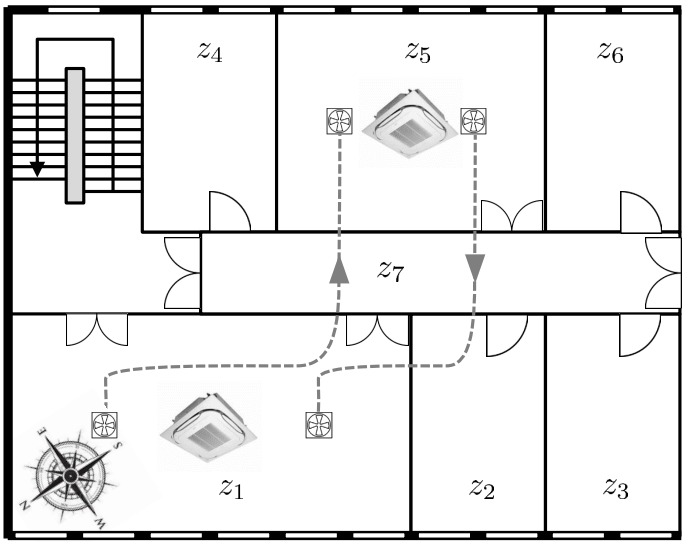


FIGURE 4.1 – plateforme "Eco-Sûr".

zones sont équipées d'une série de capteurs et d'actionneurs qui servent à modéliser / simuler leur comportement hygrothermique et à surveiller leur confort. Les deux zones les plus utilisées sont la "zone de recherche et développement" (R&D, zone z_1) de 51 m^2 et la "zone de manipulation" (zone z_5) de 34 m^2. Les quatre autres zones, d'une surface de 17 m^2 chacune, sont utilisées pour stocker des outils et divers matériaux. Comme elles ont un comportement hygrothermique "neutre", les zones z_3 et z_6 servent également à estimer la température ambiante et l'humidité relative des niveaux supérieur et inférieur. La température des zones z_1 et z_5 peut être contrôlée par deux pompes à chaleur réversibles indépendantes, qui peuvent générer de la chaleur et du froid. De plus, deux VMC peuvent être utilisées pour créer un flux d'air entre ces deux zones. Enfin, une station météorologique contenant plusieurs capteurs communique avec la plateforme pour estimer les apports de chaleur et d'humidité de l'air extérieur (par rayonnement ou par conduction).

4.2 Modélisation de la plateforme

Reconnaissant que l'expérience est la méthode la plus efficace et la plus importante pour valider le modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité proposé au chapitre 2, l'efficacité de la méthode de modélisation est évaluée en comparant les données microclimatiques expérimentales recueillies sur la plateforme expérimentale [Mod13] avec leurs valeurs estimées.

4.2.1 Modèle thermique sous Simscape

La plateforme est modélisée par un ensemble de zones, qui sont délimitées par des murs en contact par conduction et convection avec l'environnement extérieur et les zones adjacentes. Le diagramme Simscape de la zone R&D (z_1) de la plateforme est présenté

à la figure 4.2, à gauche sous sa forme détaillée et à droite sous une forme condensée. Comme mentionné précédemment, dans ce modèle, les valeurs de température des niveaux

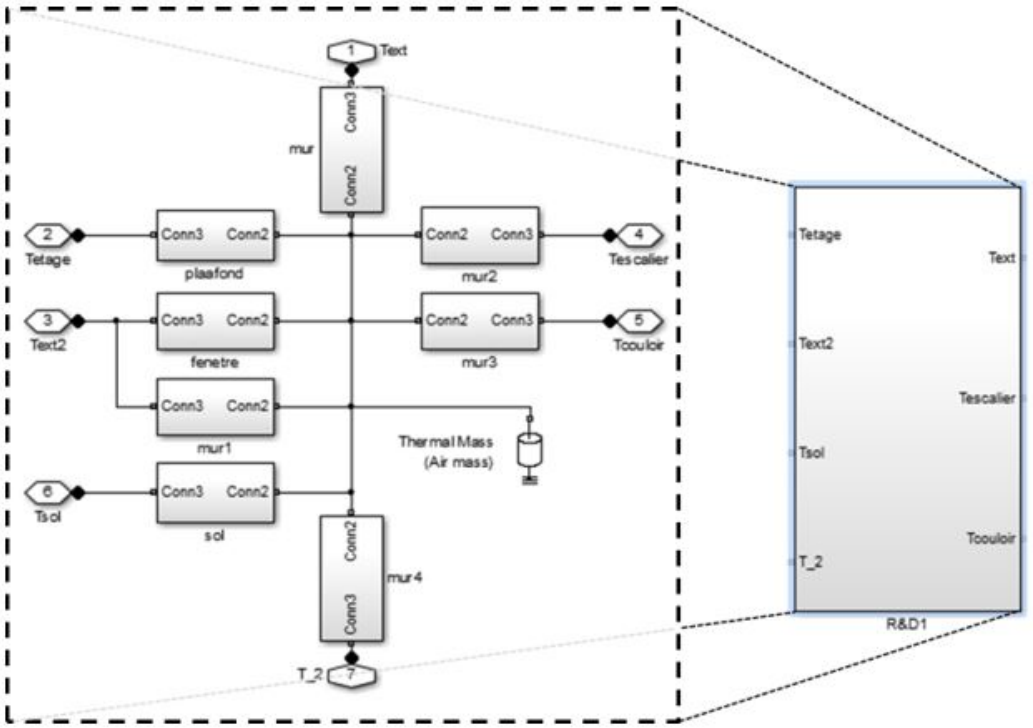


FIGURE 4.2 – Modèle Simscape de la zone R&D (z_1).

supérieur et inférieur sont considérées comme identiques à celles des zones de référence (z_3 et z_6). Le modèle Simscape de la figure 4.3 généralise la modélisation précédente à toutes les zones de la plateforme. Il intègre également les équipements produisant de la chaleur ou du froid ou générant des mouvements d'air dans le bâtiment, à savoir deux pompes à chaleur réversibles qui alimentent les zones z_1 et z_5 et le système de VMC reliant les zones z_1 et z_5. Le modèle prend également en compte les effets du rayonnement solaire et des occupants sur la plateforme conformément à la section 2.2.

4.2.2 Modèle hygrothermique nodal par analogie électrique

Les circuits électriques représentant les modèles d'énergie et de masse de la plateforme sont indiqués en haut de la figure 4.4. La décomposition zone par zone prend en compte l'orientation de chaque zone pour modéliser l'effet du rayonnement solaire. Pour chaque zone, un modèle local est élaboré en assemblant les différents blocs hygrothermiques associés aux quatre murs, aux fenêtres à double vitrage, au sol et au plafond. Le modèle hygrothermique de la zone z_1 est présenté à titre d'exemple dans le coin inférieur droit de la figure 4.4. Il convient de noter que la prise en compte de surfaces hétérogènes (par exemple fenêtre et mur) donne lieu à autant de circuits *RC* parallèles. À titre d'illustration, un modèle de mur avec une fenêtre à double vitrage est présenté dans le coin inférieur gauche de la figure 4.4.

Le simulateur est mis en œuvre en intégrant toutes les sources d'énergie décrites dans le paragraphe précédent pour le modèle Simscape de la plateforme. En considérant

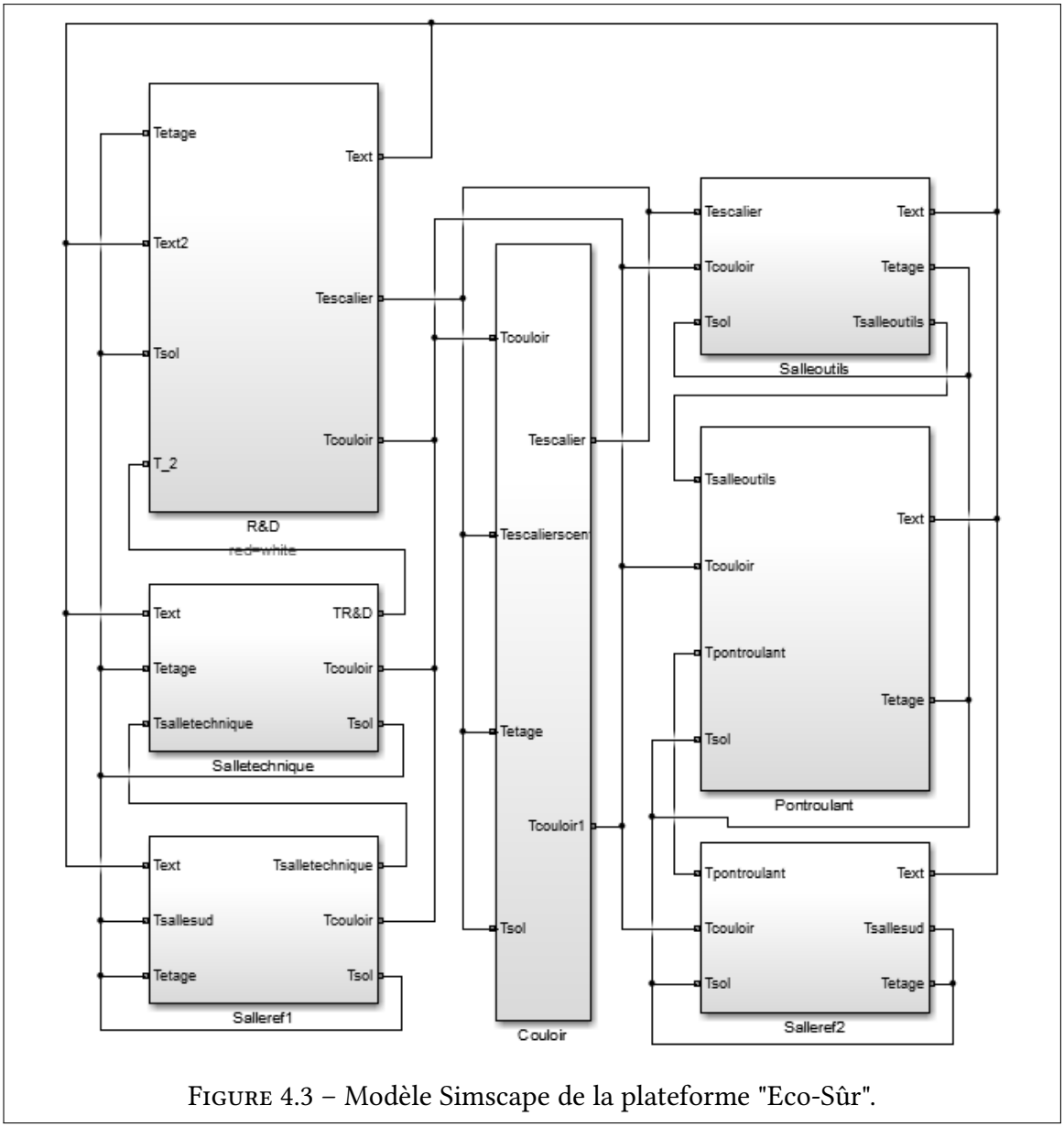


FIGURE 4.3 – Modèle Simscape de la plateforme "Eco-Sûr".

l'équivalence entre un flux thermique / massique et un courant électrique par analogie hygrothermique / électrique, les différentes sources d'énergie et d'humidité dans une zone sont retranscrites par des générateurs de courant parfaits.

4.2.3 Modèle d'état hygrothermique

En considérant la zone R&D (z_1) de la plateforme, le modèle d'état obtenu reflétant le comportement thermique est d'ordre 11 (5 murs adjacents (ordre 1) + 1 plafond (ordre 1) + 1 plancher (ordre 1) + 1 ensemble de fenêtres (ordre 3) + 1 capacité thermique de la zone (ordre 1)). Pour cette même zone z_1, le modèle hygrométrique est d'ordre 8 (5 murs adjacents (ordre 1) + 1 plafond (ordre 1) + 1 plancher (ordre 1) + 1 capacité massique de la zone (ordre 1)) sachant que les fenêtres sont des obstacles à la diffusion de l'humidité en raison d'une perméabilité nulle à la vapeur d'eau (cf. Tabl. 4.1). Ainsi, pour la seule zone z_1, le comportement hygrothermique est transcrit par un modèle d'état d'ordre 19 (11 + 8). Si l'on considère toutes les zones de la plateforme, la taille du vecteur d'état serait

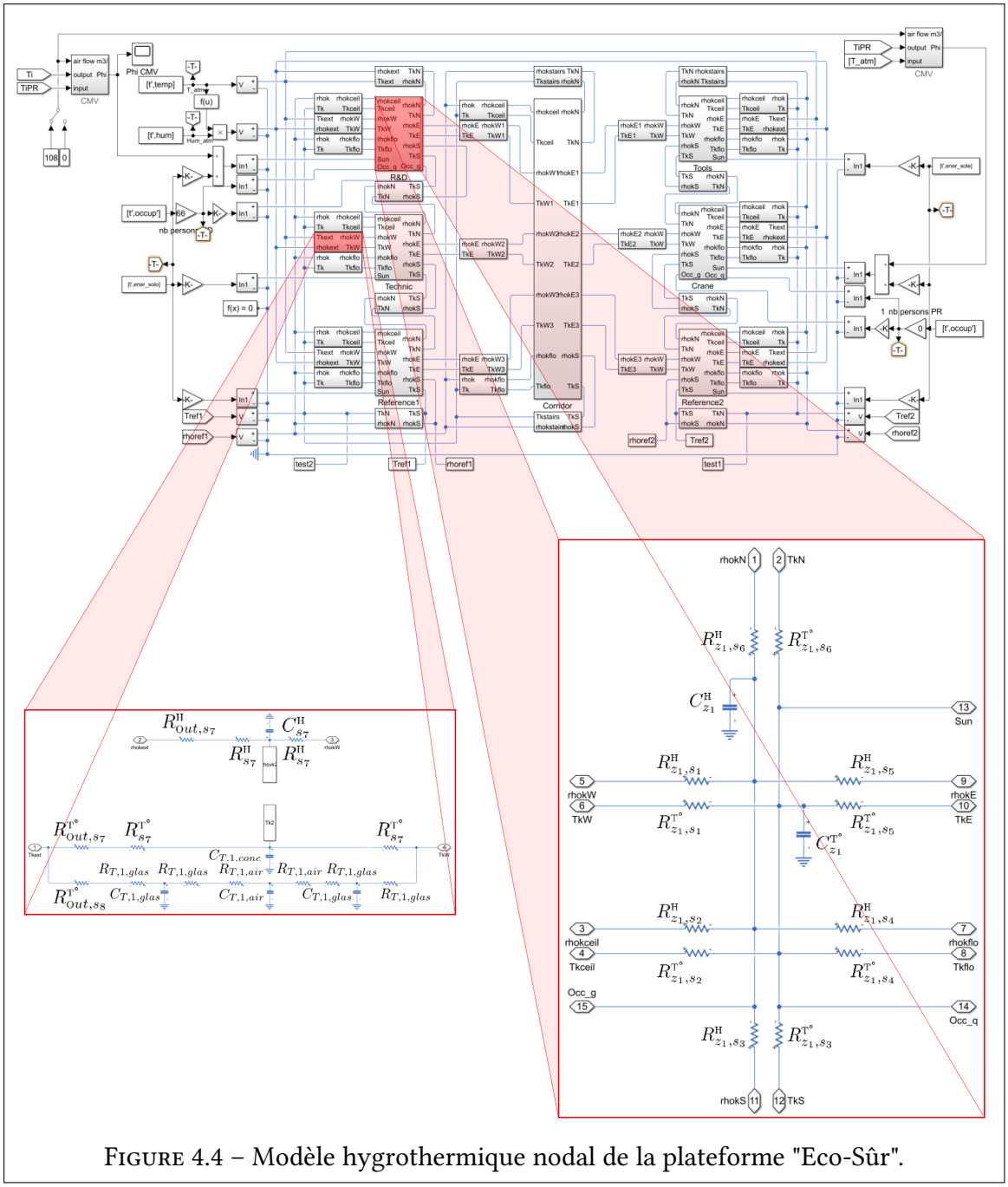
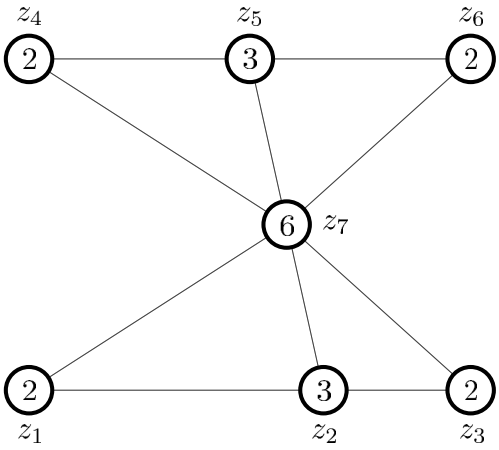


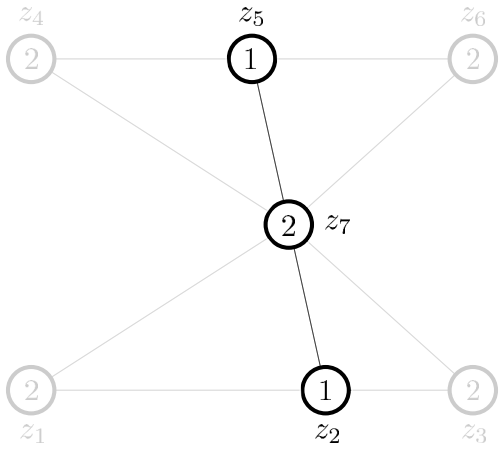
FIGURE 4.4 – Modèle hygrothermique nodal de la plateforme "Eco-Sûr".

trop importante pour envisager un modèle d'état global centralisé. Il est à noter que ce problème ne se pose pas explicitement pour les modèles nodaux qui sont décomposés par zone. Cependant, lorsque le nombre de zones simulées augmente, la lenteur de la simulation peut devenir un problème.

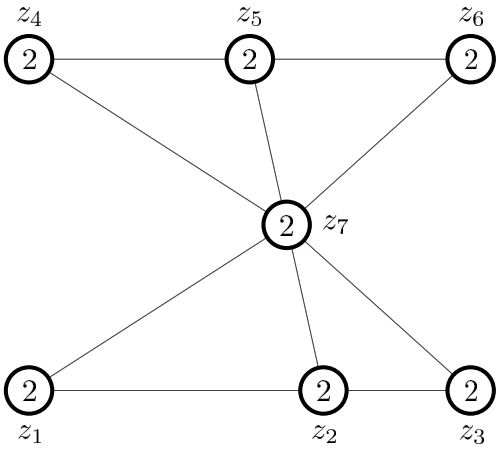
Par conséquent, afin de définir un modèle d'état de la plateforme utile pour la synthèse d'une MPC, nous appliquons la décomposition graphique en composantes connexes et biconnexes considérée dans la section 2.4.2.2. La figure 4.5a représente le graphe non orienté $\mathcal{G}_z = (\mathcal{V}_z, \mathcal{E}_z)$ associé à la plateforme "Eco-sûr" en reprenant la même disposition qu'à la figure 4.1. La décomposition de ce graphe nécessite d'abord de déterminer les degrés des sommets, qui sont représentés à la figure 4.5a et qui par définition correspondent au nombre d'arêtes les reliant à d'autres sommets. Ensuite, lorsqu'un sommet $\{z_i\}$ appartient



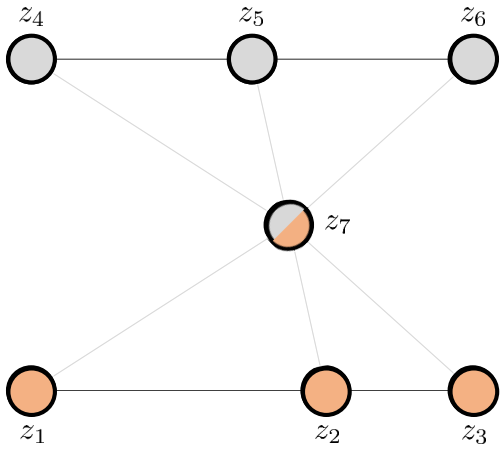
(a) Degré des sommets de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$.



(b) Degré des sommets restants de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$.



(c) Coreness des sommets de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$.



(d) Composantes biconnexes de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$.

FIGURE 4.5 – Décomposition de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ en composantes connexes et biconnexes.

à un k-core mais pas à un (k+1)-core, on lui attribue un coreness de valeur k, sachant qu'un k-core est un sous-graphe connexe de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ où chaque sommet est adjacent à au moins k autres sommets de ce sous-graphe. Pour définir tous les k-core de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$, il suffit de supprimer récursivement tous les sommets de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ de degré inférieur à k en faisant varier k du plus petit au plus grand degré de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$. Les sommets restants appartiennent à un k-core.

Pour le graphe $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ de la figure 4.5a, on observe que le degré minimal des sommets est 2, ce qui signifie que chaque sommet appartient à un 2-core. Pour déterminer les sommets $\{z_i\}$ de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ appartenant éventuellement à un sous-graphe 3-core, tous les sommets de degré inférieur à 3 sont d'abord supprimés. On obtient alors le sous-graphe de la figure 4.5b qui n'affiche que des sommets de degré inférieur à 3 et qui sont donc à leur tour supprimés. Par conséquent, $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ n'a pas de sous-graphe 3-core et forme donc à lui seul un graphe 2-core. Cela signifie que les sommets de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ ont tous une coreness égale à 2 (cf. Fig. 4.5c) et forment une composante indécomposable selon un critère de connexité. Nous décomposons alors $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ en composantes biconnexes. Un sous-graphe $\mathcal{G}_{\mathbf{z}_i} = (\mathcal{V}_{\mathbf{z}_i}, \mathcal{E}_{\mathbf{z}_i})$ de $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ est dit biconnexe si pour tout sommet z_{i_j} de $\mathcal{V}_{\mathbf{z}_i}$, le sous-graphe construit à partir de l'ensemble des sommets $\mathcal{V}_{\mathbf{z}_i} \backslash \{z_{i_j}\}$ est connexe. Par conséquent, s'il existe des sommets $\{z_{i_j}\}$ de $\mathcal{V}_\mathbf{z}$ générant des sous-graphes $\left(\mathcal{V}_\mathbf{z} \setminus \{z_{i_j}\}, \mathcal{E}_\mathbf{z}\right)$ non connexes, $\mathcal{G}_\mathbf{z}$ est décomposable en composantes biconnexes. Dans ce cas, les sommets $\{z_{i_j}\}$ sont appelés "sommets d'articulation".

La figure 4.5d montre clairement que le sous-graphe de $\mathcal{G}_{\mathbf{z}}$ associé aux sommets $\mathcal{V}_{\mathbf{z}} \backslash \{z_7\}$ n'est pas connexe alors qu'il l'est pour tout autre ensemble de sommets $\mathcal{V}_{\mathbf{z}} \backslash \{z_{i_j}\}$ avec $z_{i_j} \neq z_7$. $\{z_7\}$ est donc un sommet d'articulation et $\left(\mathcal{V}_{\mathbf{z}} \backslash \{z_7\}, \mathcal{E}_{\mathbf{z}}\right)$ a deux composantes connexes $\{z_1, z_2, z_3\}$ et $\{z_4, z_5, z_6\}$. On en déduit que $\{z_1, z_2, z_3, z_7\}$ et $\{z_4, z_5, z_6, z_7\}$ sont deux composantes biconnexes de $\mathcal{G}_{\mathbf{z}}$. La modélisation de la plateforme peut donc s'établir autour de deux modèles interdépendants liés aux groupes de zones $\mathcal{Z}_1 = \{z_1, z_2, z_3\}$ et $\mathcal{Z}_2 = \{z_4, z_5, z_6, z_7\}$ après avoir rattaché le sommet d'articulation $\{z_7\}$ à une seule composante biconnexe.

4.2.4 Identification paramétrique

Quel que soit le type de modélisation choisi (Simscape, forme nodale par analogie électrique, forme d'état), une identification des paramètres est nécessaire pour que le modèle de comportement entrée / sortie reflète au mieux celui observé sur la plateforme. Plutôt que de considérer tous les paramètres indépendamment, les similitudes observées dans la composition de certaines parois (murs, fenêtres, cloisons, plafonds, etc.) nous amènent plutôt à déterminer les paramètres R et C qui les caractérisent. Ces paramètres physiques peuvent être identifiés en considérant les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans les cloisons, murs et fenêtres de la plateforme, et les analogies suivantes :

— pour la zone z_i :

$$\begin{cases} R^{\mathrm{T}^\circ}_{z_i,s_j} = \dfrac{1}{h_c \cdot S_{z_i,s_j}} \\ R^{\mathrm{H}}_{z_i,s_j} = \dfrac{1}{2\,500 \cdot h_m \cdot S_{z_i,s_j}} \end{cases} ; \begin{cases} C^{\mathrm{T}^\circ}_{z_i} = 1.15 \cdot C_{P^{\mathrm{DA}}} \cdot V_{z_i} \\ C^{\mathrm{H}}_{z_i} = V_{z_i} \end{cases} \tag{4.1}$$

— pour les murs / cloisons / fenêtres / plafonds / sols s_j :

$$\begin{cases} R^{\mathrm{T}^\circ}_{s_j} = \dfrac{e_{s_j}}{2 \cdot \lambda_{s_j}} \\ R^{\mathrm{H}}_{s_j} = \dfrac{e_{s_j}}{2 \cdot \delta^{\mathrm{P}}_{s_j}} \end{cases} ; \begin{cases} C^{\mathrm{T}^\circ}_{s_j} = \rho_{s_j} \cdot C_{P,s_j} \cdot e_{s_j} \\ C^{\mathrm{H}}_{s_j} = V_{s_j} \end{cases} \tag{4.2}$$

Les valeurs théoriques de certains paramètres physiques sont définies dans le tableau 4.1. Grâce aux mesures de température et d'humidité effectuées sur la plateforme du 20 décembre 2019 au 6 janvier 2020 (cf. Fig. 4.7a et 4.7b), tous ces paramètres ont été ajustés en minimisant la somme des erreurs de prédiction au carré par la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO). Les murs de la plateforme ont été équipés de capteurs d'humidité et de température permettant d'avoir une mesure des différents signaux T_{z_i,s_j} importants dans le réglage des paramètres de convection et de conduction des murs.

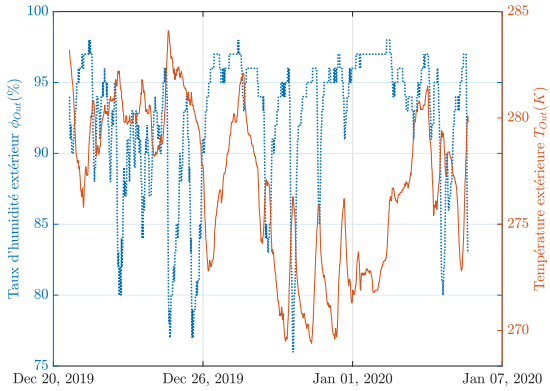
	ρ_{s_j}	$\delta^{\mathrm{P}}_{s_j}(e^{-12})$	C_{P,s_j}	λ_{s_j}
Béton	2 400	1.4	1 000	2
Air	1.23	185	1 006	0.025
Polystyrène	40	3.1	1 450	0.04
Verre	2 580	0	720	1.2

Tableau 4.1 – Valeurs théoriques des paramètres hygrothermiques [Gen9].

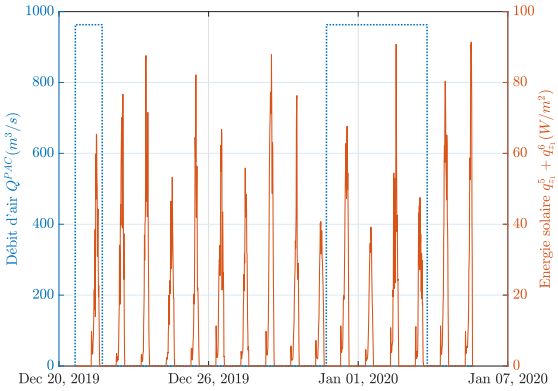
4.2.5 Résultats de simulation

Pour la simulation, la période d'échantillonnage du modèle d'état discrétisé est de 5 mn. D'après les figures 4.7a et 4.7b, il apparaît que les courbes de température et d'humidité relative réelles et estimées sont très similaires. Ces simulations ont été générées à partir des données météorologiques $T_{out}(t)$ et $\phi_{out}(\%, t) = 100 \cdot \dfrac{\rho^{\mathrm{v}}_{out}(t)}{\rho^{\mathrm{vs}}_{out}(t)}$ représentées aux figures 4.6a et 4.6b. Afin de modéliser correctement l'effet hygrothermique des pompes à chaleur, l'une d'entre elles a été utilisée avec un débit d'air chaud maximal comme le montre la figure 4.6b.

En plus d'étudier les effets de différents paramètres structurels, le simulateur peut également être utilisé pour estimer la température opérative de chaque zone. La figure 4.8a montre l'effet du flux énergétique de grande longueur d'onde émis par les surfaces intérieures à travers l'évolution de la température opérative sans tenir compte de l'influence du rayonnement solaire. Cette estimation est faite en tenant compte de toutes les températures de contact (cf. Fig. 4.8c) selon (2.25). La figure 4.8b donne une estimation de la température

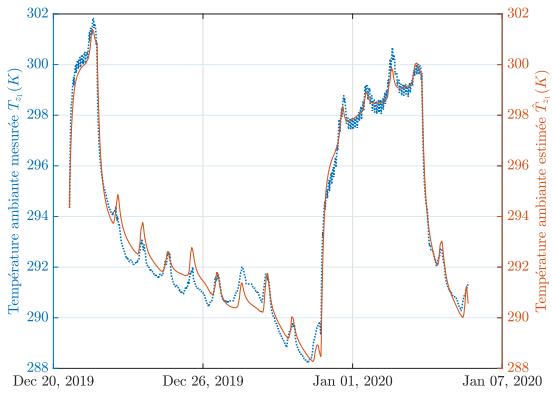


(a) Taux d'humidité extérieur ϕ_{out} et température extérieure T_{out}.

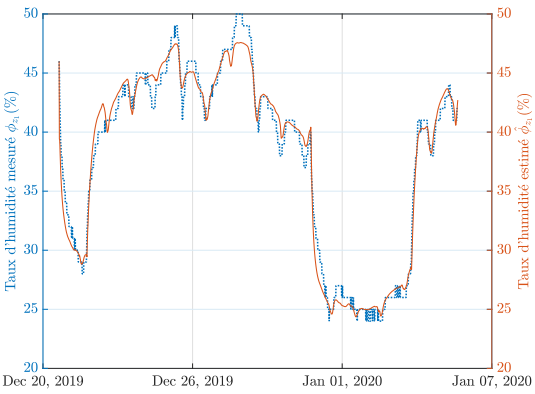


(b) Débit d'air Q^{PAC} fourni par la PAC dans la zone z_1 et énergie solaire $q^5_{z_1} + q^6_{z_1}$.

FIGURE 4.6 – Perturbations et entrées de commande de la zone z_1 sur la période 20/12/2019 - 06/01/2020.



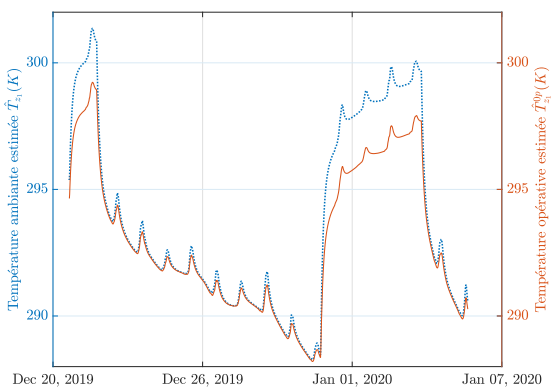
(a) Température T_{z_1}.



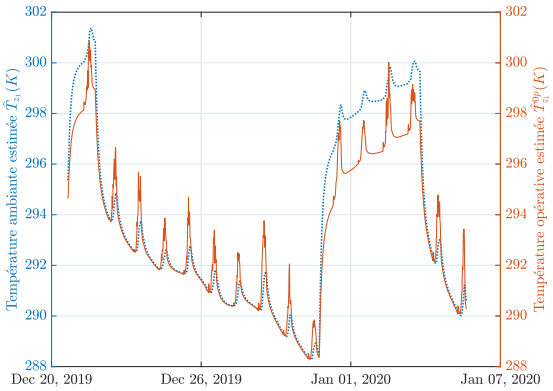
(b) Taux d'humidité $\phi_{z_1}(\%)$.

FIGURE 4.7 – Température et humidité relative mesurées et estimées dans la zone z_1.

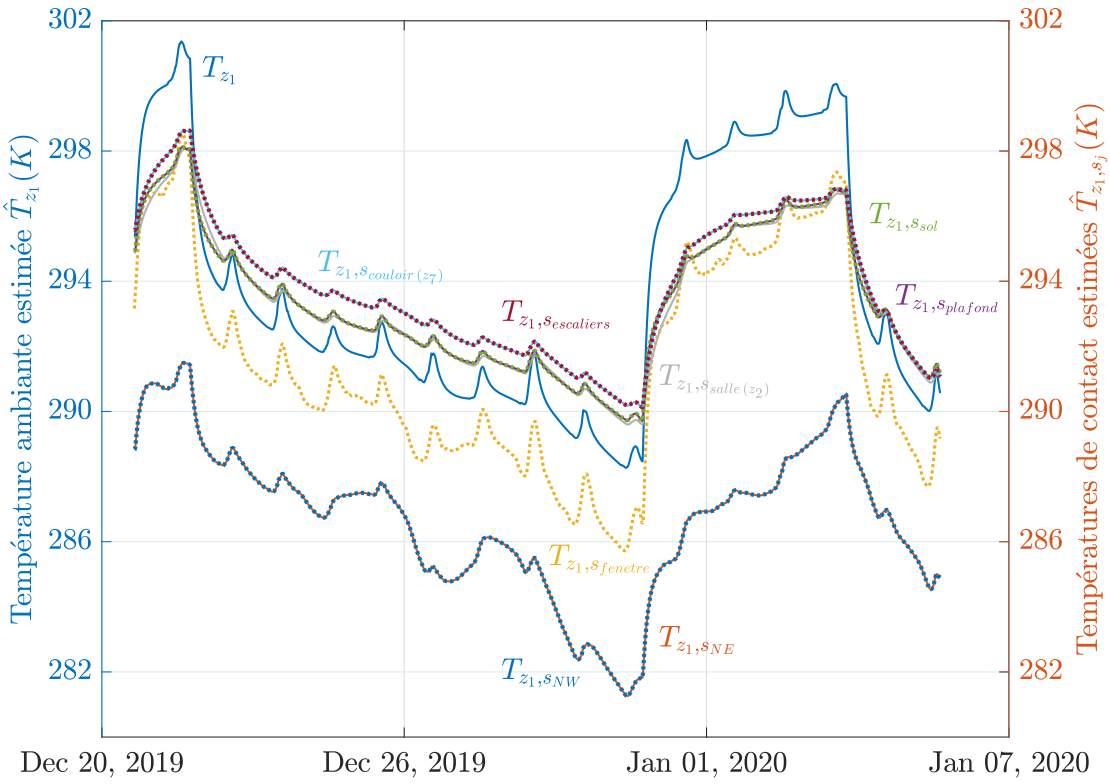
opérative en tenant compte l'impact du rayonnement solaire sur le corps humain (2.27). Afin de vérifier cette estimation, il serait intéressant d'acquérir une sonde de température à boule noire qui considère directement le rayonnement thermique intérieur. Bien entendu, ces estimations de température ne différent que lorsque l'énergie solaire (directe, rayonnée et réfléchie) entre dans la zone z_1. Les températures de contact montrent clairement que



(a) $T^{op}_{z_i}$ estimée sans tenir compte du flux énergétique solaire direct (2.25).



(b) $T^{op}_{z_i}$ estimée en tenant compte du flux énergétique solaire direct (2.27).

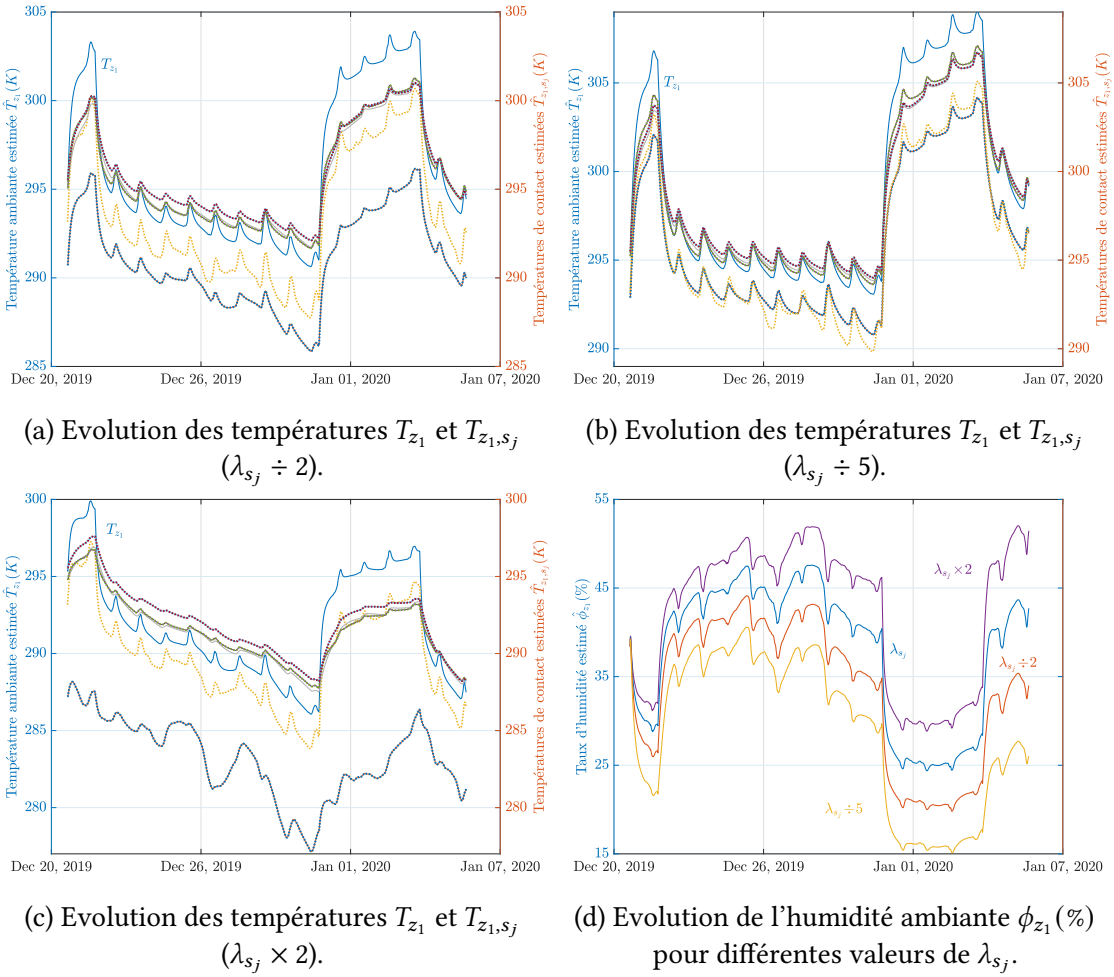


(c) Températures de contact estimées entre la zone z_1 et les différentes surfaces s_j.

FIGURE 4.8 – Températures ambiante, opérative et de contact estimées dans la zone z_1 avec ou sans prise en compte du flux énergétique solaire.

l'isolation du bâtiment, qui date des années 1970, est mauvaise. En effet, les températures sont très dispersées et sont naturellement plus basses sur les façades directement exposées à l'extérieur. Afin de vérifier la sensibilité du simulateur à des paramètres d'isolation importants, nous avons pondéré la conductivité thermique λ_{s_j} des murs extérieurs par différents

coefficients (cf. Fig. 4.9). En divisant ce paramètre par 2 (cf. Fig. 4.9a) et 5 (cf. Fig. 4.9b), nous pouvons améliorer considérablement les performances d'isolation et réduire la sensibilité à la température extérieure T_{out}. Les températures de contact sont beaucoup plus uniformes et la chaleur fournie par la pompe à chaleur lors de son utilisation a un impact plus important sur la température ambiante de z_1. Au contraire, si on multiplie λ_{s_j} par 2 (cf. Fig. 4.9c), les températures de contact sont plus dispersées et la température opérative tombe à une valeur très inconfortable (287 K). On peut remarquer que la modification du paramètre provoque également la modification de l'humidité relative ambiante $\phi_{z_1}(\%)$ (cf. Fig. 4.9d). Ce phénomène est dû au fait que dans une même zone, l'humidité relative change avec les changements de température : elle augmente si la température baisse et diminue si elle augmente. Ces courbes permettent d'observer ce phénomène.



(a) Evolution des températures T_{z_1} et T_{z_1,s_j} ($\lambda_{s_j} \div 2$).

(b) Evolution des températures T_{z_1} et T_{z_1,s_j} ($\lambda_{s_j} \div 5$).

(c) Evolution des températures T_{z_1} et T_{z_1,s_j} ($\lambda_{s_j} \times 2$).

(d) Evolution de l'humidité ambiante $\phi_{z_1}(\%)$ pour différentes valeurs de λ_{s_j}.

FIGURE 4.9 – Influence de la conductivité thermique λ_{s_j} des murs extérieurs sur les variables T_{z_1}, T_{z_1,s_j} et $\phi_{z_1}(\%)$.

4.3 Commande prédictive économique ℓ_ϵ-régularisée

Pour cette plateforme expérimentale, on peut envisager 9 scénarios de commande pour améliorer le confort thermique dans les différentes zones :

— Scénario 0 ($u_{\mathbf{z}}^0 = 1$) : aucune opération n'est effectuée sur le système ;

- Scénario 1 ($u_{\mathbf{z}}^1 = 1$) : la VMC est utilisée pour faire circuler l'air de la zone z_5 à la zone z_1 ;
- Scénario 2 ($u_{\mathbf{z}}^2 = 1$) : la VMC est utilisée pour faire circuler l'air de la zone z_1 à la zone z_5 ;
- Scénario 3 ($u_{\mathbf{z}}^3 = 1$) : la pompe à chaleur est utilisée en mode refroidissement dans la zone z_1 (débit d'air constant, température de sortie égale à 291 K) ;
- Scénario 4 ($u_{\mathbf{z}}^4 = 1$) : la pompe à chaleur est utilisée en mode refroidissement dans la zone z_5 (mêmes caractéristiques que le scénario 3) ;
- Scénario 5 ($u_{\mathbf{z}}^5 = 1$) : les deux pompes à chaleur fonctionnent simultanément en mode refroidissement dans les zones z_1 et z_5 (mêmes caractéristiques que le scénario 3) ;
- Scénario 6 ($u_{\mathbf{z}}^6 = 1$) : la pompe à chaleur est utilisée en mode chauffage dans la zone z_1 (débit d'air constant, température de sortie égale à 313 K) ;
- Scénario 7 ($u_{\mathbf{z}}^7 = 1$) : la pompe à chaleur est utilisée en mode chauffage dans la zone z_5 (mêmes caractéristiques que le scénario 6) ;
- Scénario 8 ($u_{\mathbf{z}}^8 = 1$) : les deux pompes à chaleur fonctionnent simultanément en mode chauffage dans les zones z_1 et z_5 (mêmes caractéristiques que le scénario 6).

La fonction d'objectifs est une forme particulière de l'expression générale (3.4). La plateforme ne disposant d'aucun équipement pour humidifier ou déshumidifier les zones, seul le confort thermique est pris en compte, associé à un critère économique, à savoir :

$$J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) = \min_{\mathbf{u_z}} \sum_{j=1}^{N_P} \Big(f\big(\mathbf{T}_{\mathbf{z}}^{op}(k+j), \mathbf{T}_{\text{C,min}}(k+j), \mathbf{T}_{\text{C,max}}(k+j), \Psi_j\big) + \big\|\mathbf{u_z}(k+j-1)\big\|_{\epsilon_{\mathbf{u}_{j-1}}} \Big) \cdot \Delta t \tag{4.3}$$

L'horizon de prédiction N_p est choisi égal à 12 en raison de la période d'échantillonnage qui est de 5 mn. Un horizon de prédiction d'une heure est en effet adapté aux capacités de chauffage et de refroidissement de la plateforme. La matrice de pondération Ψ_j est diagonale et variable dans le temps. Le i^{e} terme $\psi_{z_i}(k+j)$ de la diagonale est mis à zéro lorsque la zone z_i est prédite inoccupée au moment $k+j$. Sinon, ce terme est défini comme positif et permet selon sa valeur de donner plus ou moins d'importance au critère de performance (première partie de (4.3)) par rapport au critère énergétique (deuxième partie de (4.3)).

Pour cet exemple d'illustration, nous supposons que seule la zone z_1 est occupée pendant les heures de travail normales. Par conséquent, les poids $\big(\psi_{z_i}(k+j)\big)_{2\leq i\leq 7}$ associés aux zones inoccupées $(z_i)_{2\leq i\leq 7}$ sont pris égaux à 0. Le terme $\big\|\Delta\mathbf{u}_z(k+j-1)\big\|^2_{\epsilon'_{\Delta\mathbf{u}_{j-1}}}$ n'apparait pas dans le critère $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_z, \mathbf{x}_{z,s})$ (4.3) car la plateforme ne dispose pas d'actionneurs dont la consommation d'énergie serait liée à des changements d'état, comme l'ouverture ou la fermeture automatique de fenêtres oscillo-battantes ou l'actionnement de store électriques. Les actionneurs considérés (VMC + pompes à chaleurs) ont un coût énergétique tout au long de leur fonctionnement et pas seulement lorsqu'ils passent de "marche" à "arrêt" ou inversement. Compte tenu de ces hypothèses, la fonction d'objectifs ((4.3)) se simplifie et

devient :

$$\begin{aligned} J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) = \min_{\mathbf{u_z}} \sum_{j=1}^{12} \left\| \mathbf{u_z}(k+j-1) \right\|_{€_{\mathbf{u}_{j-1}}} \\ + \psi_{z_1}(k+j) \cdot \Big(\max\left(293 - T_{z_1}^{op}(k+j), 0\right) + \max\left(T_{z_1}^{op}(k+j) - 295, 0\right) \Big)^2 \end{aligned} \tag{4.4}$$

où la matrice $€_{\mathbf{u}_{j-1}}$ reflète par ses éléments diagonaux la puissance en W de tous les scénarios de commande $u_{\mathbf{z}}^{\xi}$ énumérés au début de ce paragraphe :

$$€_{\mathbf{u}_{j-1}} = \frac{1}{12} \cdot \text{diag}\big([0 \quad 30 \quad 30 \quad 1\,000 \quad 1\,000 \quad 2\,000 \quad 1\,000 \quad 1\,000 \quad 2\,000]\big) \tag{4.5}$$

En supposant que le coût horaire de l'électricité est constant quels que soient le jour et l'heure, les termes diagonaux de $€_{\mathbf{u}_{j-1}}$ sont directement liés au coût de mise en œuvre des différents scénarios. Selon les développements du chapitre 3 et la définition générale du terme de régularisation $\Omega(\mathbf{u_z})$ (3.21), le critère régularisé considéré (3.9) prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) &= (1-\lambda) \cdot J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) + \lambda \cdot \Omega\left(\mathbf{u_z}\right) \\ &\propto J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}}) + \alpha_1 \cdot \left\| \mathbf{R_0} \cdot \mathbf{u_z} \odot (\mathbf{u_z} - \mathbf{1}) \right\|_\epsilon^\epsilon + \alpha_2 \cdot \sum_{\xi=1}^{8} \| \mathbf{R_1} \cdot \mathbf{u}_{\mathbf{z}}^{\xi} \|_\epsilon^\epsilon \end{aligned} \tag{4.6}$$

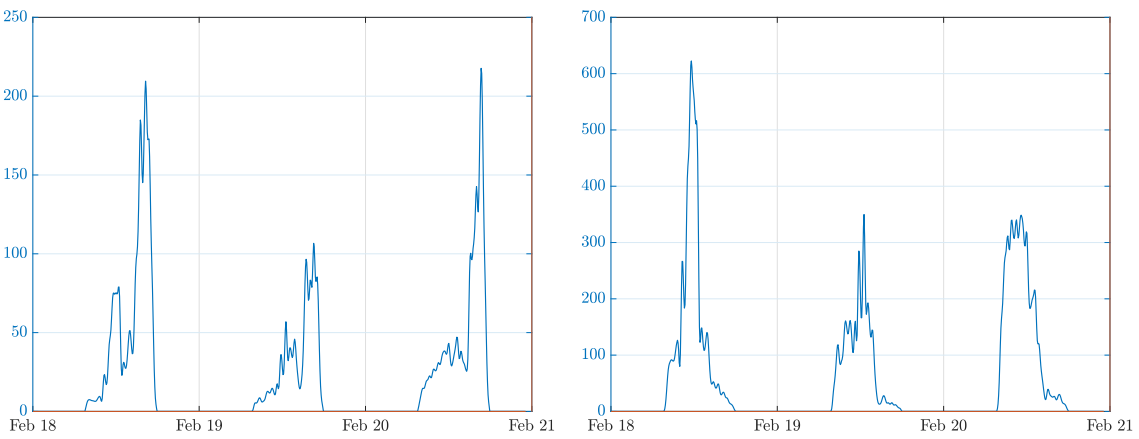
en posant $\lambda = 0.5$ et en organisant les éléments du vecteur de commande comme suit :

$$\mathbf{u_z} = \left[\mathbf{u}_{\mathbf{z}}^{\xi}\right]_{1 \le \xi \le 8} \text{ et } \mathbf{u}_{\mathbf{z}}^{\xi} = \left[u_{\mathbf{z}}^{\xi}(k+j-1)\right]_{0 \le j \le 12} \tag{4.7}$$

Les termes de régularisation $\left\| \mathbf{R_0} \cdot \mathbf{u_z} \odot (\mathbf{u_z} - \mathbf{1}) \right\|_\epsilon^\epsilon$ et $\sum_{\xi=1}^{8} \| \mathbf{R_1} \cdot \mathbf{u}_{\mathbf{z}}^{\xi} \|_\epsilon^\epsilon$ visent respectivement à imposer une valeur binaire aux entrées de commande et à les lisser pour limiter le nombre de cycles de marche/arrêt. La valeur du paramètre α_1 est prise très grande de sorte que le critère qu'il pondère est proche de 0. L'utilisation de la norme ℓ_ϵ dans sa définition permet de satisfaire strictement à l'égalité $\left\| \mathbf{R_0} \cdot \mathbf{u_z} \odot (\mathbf{u_z} - \mathbf{1}) \right\|_\epsilon^\epsilon = 0$. Quant à α_2, son effet peut être apprécié grâce aux simulations effectuées à la suite de ce paragraphe où différentes valeurs lui seront attribuées. Il est important de noter qu'imposer $\lambda = 0.5$ n'est en rien restrictif car ce paramètre de régularisation est pondéré par α_1 et α_2 dans la définition de $J_{\lambda,\Omega}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$ (4.6). Ces deux paramètres α_1 et α_2 sont donc suffisants pour considérer toutes les combinaisons possibles avec la fonction d'objectifs $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u_z}, \mathbf{x_{z,s}})$.

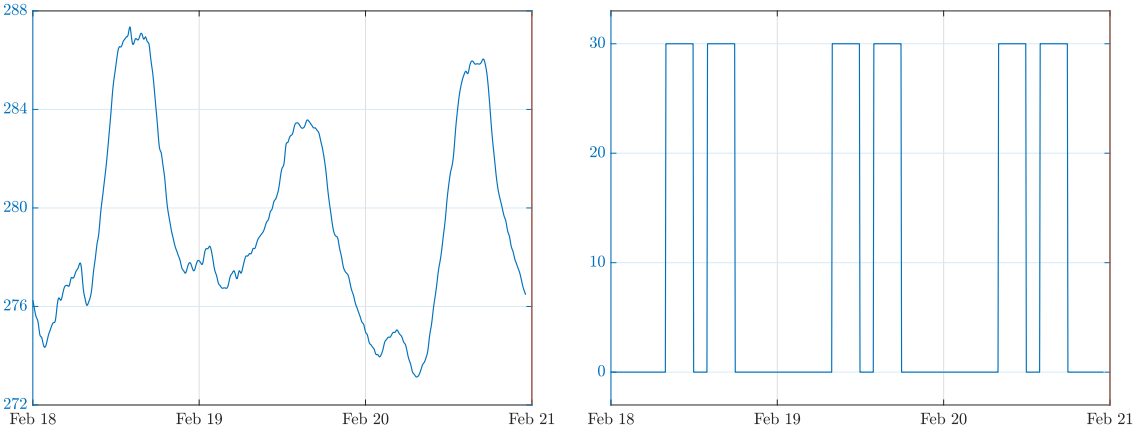
Les signaux d'entrée / sortie des deux représentations d'état (3.1) associées aux ensembles de zones $\mathcal{Z}_1 = \{z_1, z_2, z_3\}$ et $\mathcal{Z}_2 = \{z_4, z_5, z_6, z_7\}$ de la plateforme sont définis comme suit :

- $\mathbf{y}_{\mathcal{Z}_1}^T(k) = \left[\mathbf{y}_{z_1}^T, \mathbf{y}_{z_2}^T, \mathbf{y}_{z_3}^T\right](k)$ et $\mathbf{y}_{\mathcal{Z}_2}^T(k) = \left[\mathbf{y}_{z_4}^T, \mathbf{y}_{z_5}^T, \mathbf{y}_{z_6}^T, \mathbf{y}_{z_7}^T\right](k)$ sont les deux vecteurs d'observation avec $\mathbf{y}_{z_i}^T(k) = \left[T_{z_i} \quad T_{z_i,\mathbf{s}} \quad \rho_{z_i}^{\text{v}}\right](k)$. Sur cette plateforme, la température opérative $T_{z_i}^{op}(k)$ n'est pas mesurée ;
- les entrées de commande $\left[u_{\mathbf{z}}^{\xi}(k)\right]_{0 \le \xi \le 8}$, dont les composantes binaires sont soit 0 soit 1, sont globalisées pour les deux ensembles $\mathcal{Z}_1$ et $\mathcal{Z}_2$ car leurs effets ne sont pas spécifiques à chacun d'eux. Elles sont définies de telle sorte que $u_{\mathbf{z}}^{\xi}(k) = 1$ et



(a) $q^{sol}_{West}(k)$; $z_i = z_1, z_2, z_3$. (b) $q^{sol}_{East}(k)$; $z_i = z_4, z_5, z_6$.

FIGURE 4.10 – Éclairement énergétique solaire (W/m^2) dans les zones z_i.



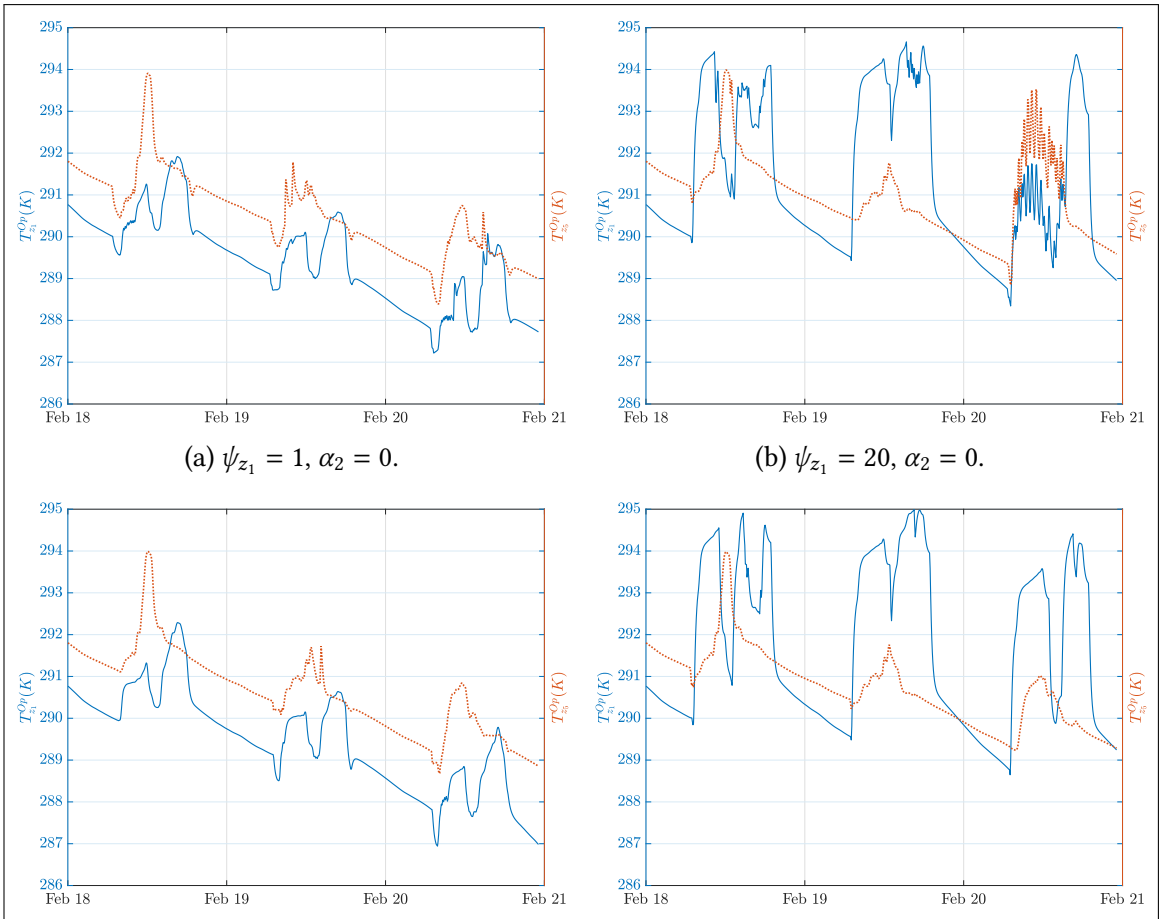
(a) Température extérieure $T_{out}(k)$ (K). (b) Nombre d'occupants.

FIGURE 4.11 – Perturbations exogènes (en plus de celles liées à l'éclairement énergétique solaire).

$u^{\overline{\xi}}_{\mathbf{z}}(k) = 0$ pour tout $\overline{\xi} \neq \xi$ lorsque le scénario $u^{\xi}_{\mathbf{z}}$ est mis en œuvre à l'instant k ;

- $q_{\mathbf{z}}(k)$ est le flux énergétique libéré par les personnes dans la zone z_1. Le signal indiqué à la figure 4.11b indique le nombre d'occupants dans cette zone ;
- $\mathbf{q}^{sol}_{\mathbf{z}}(k)$ est l'éclairement énergétique solaire à ondes courtes. Ce vecteur est composé de deux signaux $q^{sol}_{west}(k)$ et $q^{sol}_{East}(k)$ qui spécifient l'éclairement énergétique solaire reçu par les zones z_1, z_2, z_3 et z_4, z_5, z_6 en fonction de leur orientation (nord-ouest / sud-est) ;
- $T_{\text{PAC}}(k)$ est la température de l'air d'alimentation à la sortie des pompes à chaleur ($T_{\text{PAC}}(k) = 291$ K en mode refroidissement ou 313 K en mode chauffage).

Pendant la période du 18 au 20 février 2019, les figures 4.12a à 4.12d reflètent l'évolution des températures opératives dans les zones z_1 et z_5 selon les scénarios de commande présentés aux figures 4.13a à 4.13d. Ces scénarios sont le résultat de la minimisation de la fonction d'objectifs régularisée à l'aide de différents jeux de paramètres ψ_{z_1} et α_2. Le coût énergétique cumulé de chacun de ces scénarios est indiqué aux figures 4.14a à 4.14d. Les



(a) $\psi_{z_1} = 1$, $\alpha_2 = 0$.

(b) $\psi_{z_1} = 20$, $\alpha_2 = 0$.

(c) $\psi_{z_1} = 1$, $\alpha_2 = 3$.

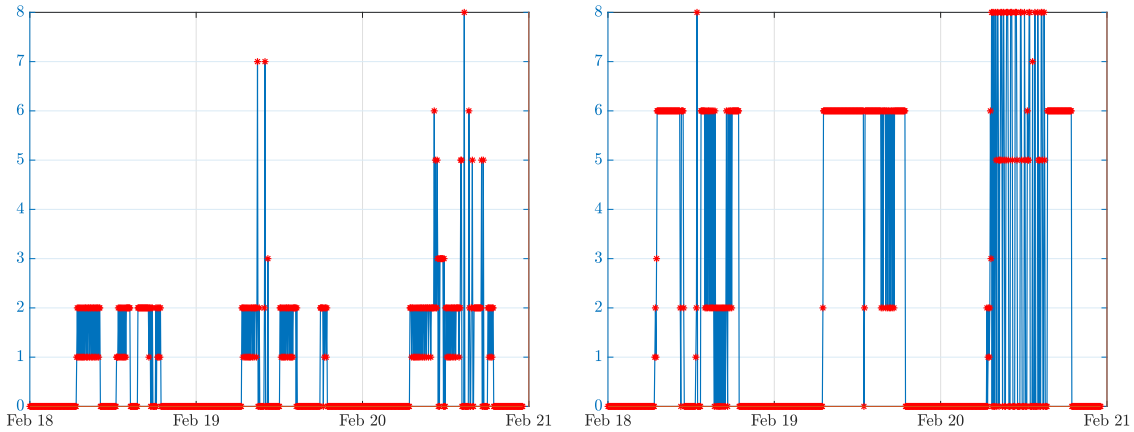
(d) $\psi_{z_1} = 20$, $\alpha_2 = 10$.

FIGURE 4.12 – Températures opératives $T_{z_1}^{op}(k)$ (K, ligne bleue continue) et $T_{z_5}^{op}(k)$ (K, ligne rouge pointillée) pour différents jeux de paramètres ψ_{z_1}, α_2.

figures 4.10a, 4.10b et 4.11a reflètent les conditions météorologiques pendant cette période à l'emplacement de la plateforme (Nancy, France). Les deux premières figures montrent l'évolution quotidienne de l'énergie solaire pénétrant dans les zones de la plateforme, en fonction de leur orientation. La troisième figure montre l'évolution de la température extérieure en K. Enfin, la figure 4.11b montre le nombre d'occupants dans la zone z_1 (nous supposons que chaque personne dégage une puissance de 80 W).

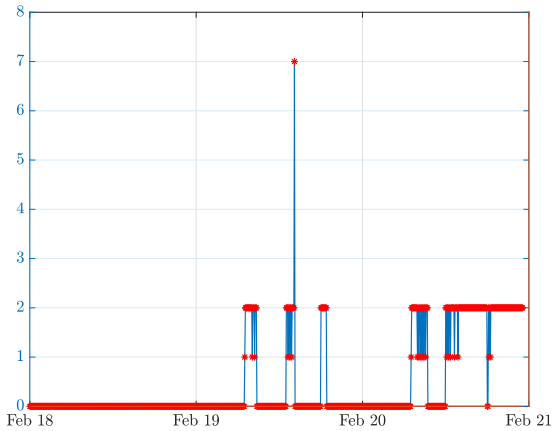
Les figures 4.13a à 4.13d représentent l'évolution temporelle de l'indice ξ associé aux éléments non nuls du vecteur $\mathbf{u_z}(k)$. A tout moment k, une croix rouge sur la ligne horizontale ξ reflète l'implémentation du scénario ξ sur la plateforme $\left(u_z^\xi(k) = 1\right)$. Par exemple, la figure 4.13c montre que l'élément non nul de $\mathbf{u_z}(k)$ pendant toute la première journée est $u_\mathbf{z}^0(k)$. Ce scénario de commande est associé aux paramètres $\psi_{z_1} = 1$ et $\alpha_2 = 3$. Une simple analyse de ces différentes figures montre :

— l'effet du paramètre ψ_{z_1}. Plus ce paramètre est élevé par rapport à termes de $€_{\mathbf{u}_{j-1}}$, plus le critère de performance thermique devient important dans la fonction d'objectifs $J_{\text{MPC}}(\mathbf{u}_z, \mathbf{x}_{z,s})$ au détriment de la consommation d'énergie. Inversement, plus ce paramètre est faible, plus le facteur énergétique est élevé par rapport au confort thermique. Ceci est particulièrement remarquable dans le cas extrême de la figure 4.13c, où aucune action n'est mise en œuvre sur la plateforme (scénario 0) pendant

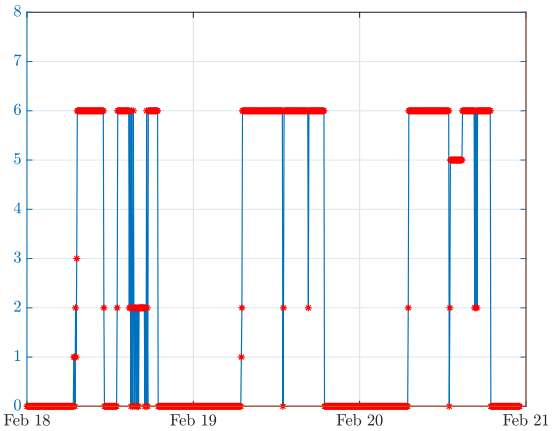


(a) $\psi_{z_1} = 1$, $\alpha_2 = 0$.

(b) $\psi_{z_1} = 20$, $\alpha_2 = 0$.



(c) $\psi_{z_1} = 1$, $\alpha_2 = 3$.



(d) $\psi_{z_1} = 20$, $\alpha_2 = 10$.

FIGURE 4.13 – Scénarios de commande optimale pour différents jeux de paramètres ψ_{z_1}, α_2.

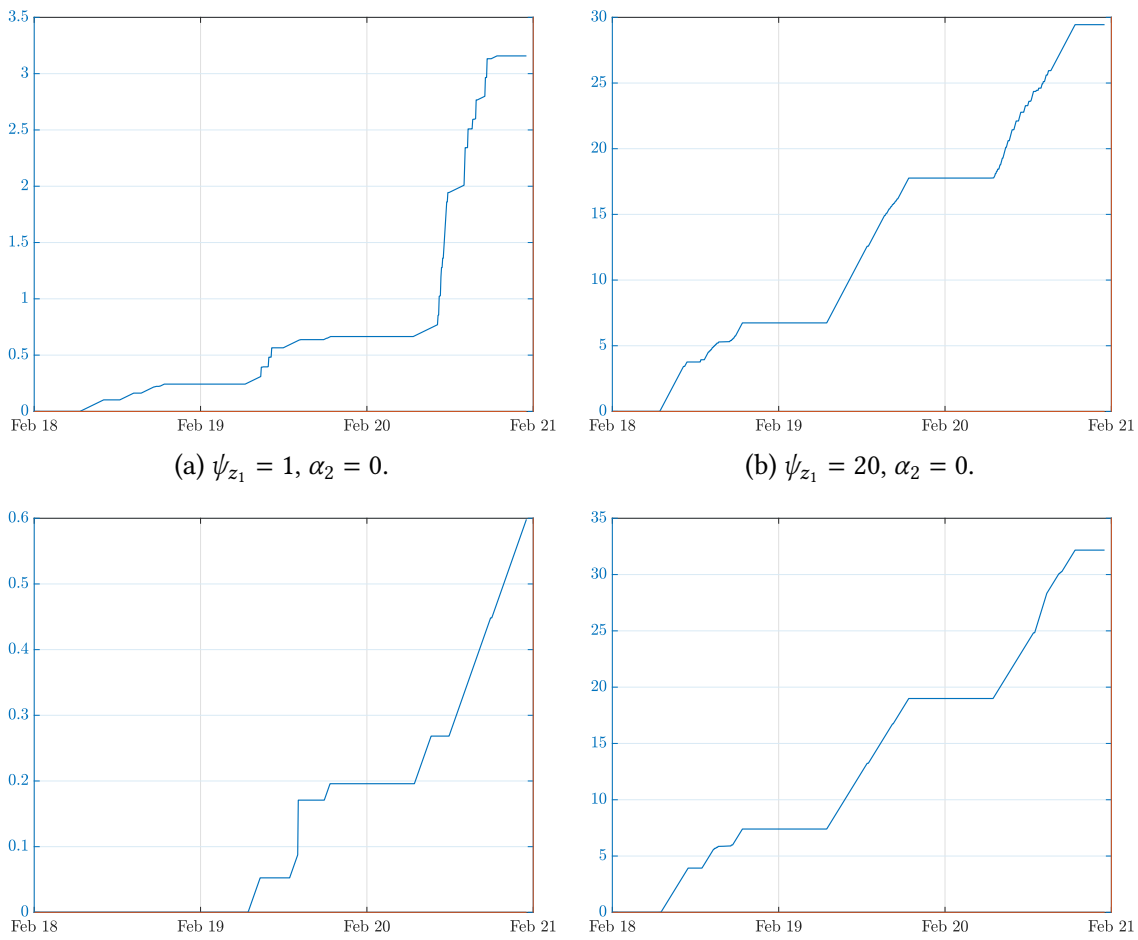
plus d'un jour. Dans ce cas, la figure 4.12c montre que la température opérative $T_{z_1}^{op}(k)$ s'écarte sensiblement de la plage de température de confort [293 K 295 K] ;

— l'intérêt des termes de régularisation liés à α_2. En comparant les figures 4.13a et 4.13b avec les figures 4.13c et 4.13d respectivement, il est clair que l'augmentation de α_2 réduit considérablement le nombre de commutations (on/off) de la VMC et des pompes à chaleur. L'effet direct est que presque aucune oscillation n'est observée sur $T_{z_1}^{op}(k)$ et $T_{z_5}^{op}(k)$ (cf. Fig. 4.12d vs. Fig. 4.12b).

— l'intérêt du terme de régularisation en α_1, qui permet d'imposer des valeurs discrètes à la solution optimale $\mathbf{u}_\mathbf{z}^*$ du critère régularisé. Dans cet exemple, seules les valeurs binaires sont autorisées pour tous les éléments de $\mathbf{u}_\mathbf{z}$.

4.4 Conclusion

Ce chapitre illustre les différents résultats obtenus en modélisation et en EMPC régularisée sur la plateforme "Eco-sûr". Un modèle hygrothermique a d'abord été généré sous différentes formes (Simscape, forme nodale par analogie électrique et représentations d'état) en fonction de son utilisation future (pour la simulation ou le contrôle). Les



(a) $\psi_{z_1} = 1$, $\alpha_2 = 0$.

(b) $\psi_{z_1} = 20$, $\alpha_2 = 0$.

(c) $\psi_{z_1} = 1$, $\alpha_2 = 3$.

(d) $\psi_{z_1} = 20$, $\alpha_2 = 10$.

FIGURE 4.14 – Coût énergétique cumulé (kWh) pour différents jeux de paramètres ψ_{z_1}, α_2.

variables de confort microclimatiques telles que la température ambiante et l'humidité relative sont estimées avec précision. Les températures opératives avec ou sans prise en compte du flux énergétique solaire sont également estimées, mais cela n'a pu être validé expérimentalement sans capteur de température à boule noire. Une stratégie de EMPC a été mise en œuvre sur le simulateur de la plateforme sans mise en oeuvre réelle en raison du déménagement de la plateforme commencé plus tôt cette année. Les résultats obtenus montrent clairement la contribution des termes de régularisation, notamment dans leur capacité à lisser les scénarios de commande et à imposer des valeurs discrètes aux entrées de commande.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La première partie de cette thèse propose une méthodologie complète pour modéliser et simuler le comportement hygrothermique des bâtiments multizones et pour surveiller en permanence leur efficacité énergétique. Elle répond à un manque car, à notre connaissance, il n'existe pas d'étude antérieure définissant de manière simple une stratégie de modélisation unifiée de variables microclimatiques spécifiquement utilisées pour évaluer le confort des bâtiments. Le principe physique de l'analyse nodale associé à une logique de décomposition d'un bâtiment multizone montre un intérêt certain dans la définition d'un modèle hygrothermique. Par une modélisation intégrant le comportement hygrothermique des éléments de construction et des différentes zones, les systèmes de CVC, le rayonnement solaire, l'occupation des zones, etc., l'influence de ces facteurs sur la consommation énergétique nette du bâtiment peut être analysée. Il est possible d'étudier l'influence de la masse thermique du bâtiment et de la température de l'air de soufflage des différents systèmes de CVC sur le modèle de consommation énergétique nette du bâtiment. A partir de cette analyse nodale, la définition d'un modèle d'état ne présente pas de difficultés majeures, mais pour les bâtiment comportant de nombreuses zones, l'ordre du système peut devenir problématique. Il a été envisagé d'utiliser les outils classiques de la théorie des graphes pour décomposer le modèle d'état global en un ensemble de modèles d'état interconnectés. Outre l'intérêt de la stratégie pour une simulation coopérative de l'ensemble du bâtiment, elle permet également d'envisager l'utilisation de stratégies de commande distribuées.

Le développement d'une nouvelle stratégie de contrôle prédictif économique régularisé (REMPC) pour assurer le confort hygrothermique dans les zones occupées d'un bâtiment tout en minimisant sa consommation d'énergie constitue la deuxième partie de cette thèse. Son originalité repose sur la définition d'un critère de minimisation régularisé intégrant des indicateurs de confort hygrothermique explicites, le coût d'utilisation des différents équipements ainsi que leurs spécifications d'utilisation. Par exemple, le stress causé par les démarrages/arrêts successifs et trop fréquents de certains équipements est pris en compte. Ces changements d'état sont généralement préjudiciables à la durée de vie des équipements et représentent, à tout le moins, un mode de fonctionnement inefficace sur le plan énergétique. La solution proposée permet également de contrôler le nombre d'entrées de commande actives à tout moment et d'éviter des scénarios de commande inappropriés. Les avantages d'une stratégie de commande parcimonieuse sont mis en évidence dans les termes de régularisation exprimés en norme ℓ_ϵ. Une méthode itérative pour estimer la solution optimale de la stratégie REMPC est ensuite présentée. Elle peut prendre en compte les termes de régularisation non convexes, le modèle hygrothermique à temps variable du bâtiment mais aussi de grands horizons de prédiction sans crainte de problèmes numériques. La tolérance des scénarios de commande optimale à l'occurrence de certaines

défaillances d'actionneurs est également une propriété qui est prise en compte. Ceci est particulièrement important compte tenu de la surconsommation importante générée par l'occurrence de certaines défaillances.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses et comprennent à la fois des aspects de modélisation et de contrôle. Le reste de cette section leur est consacré. Les perspectives à court terme directement liées au travail de cette thèse sont différentes des perspectives à long terme pour lesquelles les résultats présentés dans ce manuscrit pourraient servir de support.

En ce qui concerne la modélisation du comportement hygrothermique des grands bâtiments multizones, la taille du vecteur d'état devient rapidement trop importante pour considérer un seul modèle, ce qui prouve la rationalité de décomposer le système en un ensemble de zones pertinentes, comme cela a été fait au chapitre 2. Cependant, l'étape intermédiaire consistant à transcrire le bâtiment multizone en un graphe non orienté formé de sommets et d'arêtes mérite d'être approfondie étant donné son importance pour le développement d'outils permettant de générer automatiquement des modèles hygrothermiques. La structure de ce graphe peut être volumineuse et sa réduction / décomposition devrait être optimisée par exemple par des techniques de simplification de modèles prenant en compte les différentes capacités massiques/thermiques. Il serait également intéressant de pouvoir modéliser et simuler le comportement hygrothermique d'un bâtiment en considérant un nombre de zones plus petit que celui lié à sa description globale.

D'autre part, il pourrait être intéressant d'associer la qualité sanitaire de l'air au confort thermique et hygrométrique à l'intérieur d'un bâtiment, qui est un autre vecteur de bien-être pour les utilisateurs. La modélisation de cet aspect pourrait s'inspirer du développement récent par le CSTB de l'outil MATHIS-QAI, qui permet de prédire la concentration de polluants dans les bâtiments et de déterminer la meilleure stratégie pour améliorer la qualité de l'air intérieur.

En termes de commande, plusieurs perspectives semblent intéressantes. Tout d'abord, par rapport à la perspective évoquée en modélisation, le contrôle d'un système de CVC dans les grands bâtiments nécessite l'utilisation de stratégies de commande distribuées ou au moins décentralisées. Dans ce contexte, une attention particulière devrait être accordée à la définition des fonctions d'objectifs spécifiques pour chaque groupe de pièces contrôlées par une EMPC locale. En particulier, au vu des travaux réalisés dans [Com34], et afin d'améliorer les performances de la commande coopérative, il apparaît que les fonctions d'objectifs spécifiques pour chaque groupe de pièces homogènes pourraient prendre en compte les besoins des zones adjacentes par le biais de termes de régularisation, ces termes joueraient le rôle d'interconnexion entre les différentes zones et complèteraient l'échange de données qui caractérise déjà une commande distribuée.

Il serait intéressant de mener une autre étude sur l'impact de prévisions météorologiques imprécises sur les performances de la MPC [Gen22]. En effet, dans les simulations de contrôle réalisées, les prévisions météorologiques et la charge interne sont supposées être précises avec une fiabilité de 100%, ce qui est naturellement impossible en pratique, surtout lorsque l'horizon de prédiction dépasse quelques heures. Cette hypothèse, qui justifie la mise en œuvre de stratégies de MPC déterministe et non stochastique, est acceptable car à chaque itération, le contrôleur réévalue la solution optimale avec des prévisions météorologiques actualisées. Néanmoins, les performances de commande peuvent être affectées. Il serait donc utile d'étudier comment la précision des prévisions météorologiques

et de la charge interne affecte la consommation d'énergie et le confort hygrothermique en envisageant des stratégies de MPC stochastique [Com31], [Com36].

Dans le cadre général des bâtiments intelligents, de nombreux outils de commande servant à la gestion des équipements internes (CTA, ventilo-convecteurs, VMC, etc.) pourraient être déployés pour la gestion globale du bâtiment incluant toutes les sources d'énergie disponibles. En effet, la diffusion croissante des systèmes d'énergie renouvelable et des petits systèmes de polygénération (intégrant éventuellement des systèmes de stockage d'énergie thermique) dans les bâtiments modifie considérablement le paradigme de la distribution d'énergie et le rôle des bâtiments dans le réseau [Gen35]. On s'attend à ce que la mise en œuvre de stratégies actives de planification de la demande et de réduction de la charge de pointe s'intensifie dans un avenir proche afin de promouvoir l'intégration de ces ressources distribuées et de ces systèmes de production dans les réseaux de distribution intelligents [Gen19], [Gen28]. Dans ce cas, l'utilisation de méthodes de contrôle avancées pour mettre en œuvre des stratégies efficaces de gestion de l'énergie est une solution intéressante. Elles peuvent être utilisées pour réduire la demande énergétique opérationnelle des bâtiments et l'écart entre leur demande énergétique et la production sur site, en maximisant l'utilisation des systèmes d'énergie renouvelable. Une MPC peut être utilisée pour contrôler et optimiser l'équipement résidentiel [Gen33], l'interaction des bâtiments et des réseaux intelligents ou des micro-réseaux [Gen27], ou les systèmes de production d'énergie renouvelable sur site. Aussi, le service le plus riche et le plus complet est celui de l'optimisation automatisée entre la production locale, la consommation et le stockage, qui peut être avantageusement combiné avec la gestion de la demande. Jusqu'à présent, la production était la seule variable d'ajustement permettant d'assurer un équilibre entre la production et la demande. À l'avenir, les évolutions du système électrique favoriseront une plus grande intégration de la demande.

La stratégie de contrôle établie pourrait intégrer différents souhaits, tels que :

- Réduire les pics d'énergie en déchargeant le chauffage électrique pendant la période de pointe de la consommation quotidienne ;
- Optimiser la charge des accumulateurs d'énergie (y compris les réservoirs d'eau chaude pour les pompes à chaleur) pendant les heures creuses afin de lisser la charge. De cette façon, la pompe à chaleur pourrait être mise en marche en décalage avec la demande de chauffage ;
- Adapter la commande du système de CVC à la production locale d'énergie photovoltaïque en été pour soulager un réseau particulièrement sollicité ;
- Envisager des tarifs énergétiques dynamiques, qui tiennent compte des coûts de production réels, y compris les coûts réels et prévus des énergies renouvelables en fonction du temps et du stockage.

La "réponse à la demande" est l'idée principale de cette perspective. Elle comprend toutes les mesures visant à modifier indirectement la demande d'énergie par un contrôle direct de son utilisation par le client ou par une tarification dynamique. Son objectif, qui consiste à limiter les pics de consommation aux heures de pointe et à réduire le niveau global de consommation, est directement lié aux souhaits exprimés précédemment. D'une manière générale, le bâtiment à énergie positive du futur devra adapter sa consommation aux coûts de l'énergie, et pas seulement répondre à la demande. Il pourra stocker l'énergie (les voitures électriques y contribueront) et la produire. Lorsque les coûts énergétiques seront au plus bas, le bâtiment reconstituera son stock énergétique. Grâce aux accumulateurs, le bâtiment pourra puiser dans ses réserves lorsque les prix de l'énergie seront élevés.

Une dernière perspective de ce travail, très intéressante en termes d'applicabilité, s'appuie sur les travaux très récents de [Com7]. Elle consiste à définir une MPC basée sur des données pour contrôler les systèmes linéaires invariants dans le temps. Cette stratégie utilise une description de modèle implicite basée sur la théorie des systèmes comportementaux et des trajectoires mesurées dans le passé. Son grand avantage est qu'elle ne nécessite aucune étape d'identification préalable, mais seulement les trajectoires d'entrée-sortie initialement mesurées et la limite supérieure de l'ordre inconnu du système.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Modélisation

[Mod1] G. G. J. Achterbosch, P. P. G. D. Jong, C. E. Krist-Spit, S. F. V. D. Meulen et J. Verberne, « The Development of a Convenient Thermal Dynamic Building Model, » *Energy and Buildings*, vol. 8, pp. 183-196, 1985.

[Mod2] E. Arens, T. Hoyt, X. Zhou, L. Huang, H. Zhang et S. Schiavon, « Modeling the Comfort Effects of Short-Wave Solar Radiation Indoors, » *Building and Environment*, vol. 88, pp. 3-9, 2015.

[Mod3] W. A. Beckman, L. Broman, A. Fiksel, S. A. Klein, E. Lindberg, M. Schuler et J. Thornton, « TRNSYS The Most Complete Solar Energy System Modeling and Simulation Software, » *Renewable Energy*, vol. 5, n° 1-4, pp. 486-488, Climate change Energy and the environment, août 1994.

[Mod4] H. Boyer, J. P. Chabriat, B. Grondin-Perez, C. Tourrand et J. Brau, « Thermal Building Simulation and Computer Generation of Nodal Models, » *Building and Environment*, vol. 31, n° 3, pp. 207-214, mai 1996.

[Mod5] R. Bui, M. Labat et S. Lorente, « Impact of the Occupancy Scenario on the Hygrothermal Performance of a Room, » *Building and Environment*, vol. 160, article 106 178, août 2019.

[Mod6] S. T. Bushby, M. A. Galler, N. Milesi Ferretti et C. Park, « The Virtual Cybernetic Building Testbed — A Building Emulator, » *ASHRAE Transactions*, vol. 116, n° 1, 2010 Winter Conference, Orlando, FL, USA 2010.

[Mod7] J. Clarke, *Energy Simulation in Building Design*. Routledge, 2015.

[Mod8] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte et J. Glazer, « EnergyPlus : Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program, » *Energy and Buildings*, vol. 33, n° 4, pp. 319-331, Special Issue : Building Simulation'99, avr. 2001.

[Mod9] D. A. De Vries, « Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media, » *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 39, n° 5, pp. 909-916, oct. 1958.

[Mod10] W. Dong, Y. Chen, Y. Bao et A. Fang, « A Validation of Dynamic Hygrothermal Model with Coupled Heat and Moisture Transfer in Porous Building Materials and Envelopes, » *Journal of Building Engineering*, vol. 32, page 101 484, 2020.

[Mod11] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie et G. Achard, « Development of a Simplified and Accurate Building Model Based on Electrical Analogy, » *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 10, pp. 1017-1031, 2002.

[Mod12] V. M. S. Frances, E. J. S. Escriva et J. M. P. Ojer, « A Hygrothermal Dynamic Zone Model for Building Energy Simulation, » *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 389-402, 2016.

[Mod13] F. Gabsi, F. Hamelin et N. Sauer, « Building Hygrothermal Modeling by Nodal Method, » in *8th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT)*, (Singapore), mai 2018, pp. 1103-1108.

[Mod14] F. Gabsi, F. Hamelin et N. Sauer, « Hygrothermal Comfort Modeling of Multi-Zone Buildings, » soumis à « Journal of Building Performance Simulation ».

[Mod15] F. Gabsi, F. Hamelin, R. Pannequin et M. Chaabane, « Energy Efficiency of a Multizone Office Building : MPC-Based Control and Simscape Modelling, » in *6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, (Porto, Portugal), avr. 2017, pp. 227-234.

[Mod16] V. Harish et A. Kumar, « A Review on Modeling and Simulation of Building Energy Systems, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1272-1292, 2016.

[Mod17] P. Haves, L. K. Norford et M. DeSimone, « A Standard Simulation Testbed for the Evaluation of Control Algorithms & Strategies, » *ASHRAE Transactions*, vol. 104, n° 1A, 1998 Winter Meeting, San Francisco, CAL, USA 1998.

[Mod18] A. Husaunndee, R. Lahrech, H. Vaezi-nejad et J. C. Visier, « SIMBAD : A Simulation Toolbox for the Design and Test of HVAC Control Systems, » in *Proceedings of Building Simulation 1997 : 5th Conference of International Building Performance Simulation Association IBPSA*, (Prague, Czech Republic), sept. 1997, pp. 269-276.

[Mod19] S. Klein. « TRNSYS 18 : A TRaNsient SYstems Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA. » (2017), adresse : http://sel.me.wisc.edu/trnsys.

[Mod20] R. Lahrech, P. Gruber, P. Riederer, P. Tessier et J. C. Visier, « Development of a Testing Method for Control HVAC Systems by Emulation, » *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 9, pp. 909-916, A View of Energy and Building Performance Simulation at the start of the third millennium, oct. 2002.

[Mod21] C. Lapusan, R. Balan, O. Hancu et A. Plesa, « Development of a Multi-Room Building Thermodynamic Model Using Simscape Library, » *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 320-328, 2016.

[Mod22] Z. Li, Y. Han et P. Xu, « Methods for Benchmarking Building Energy Consumption against Its Past or Intended Performance : An Overview, » *Applied Energy*, vol. 124, pp. 325-334, 2014.

[Mod23] X. Lü, « Modelling of Heat and Moisture Transfer in Buildings : I. Model Program, » *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 10, pp. 1033-1043, 2002.

[Mod24] G. Mustafaraj, J. Chen et G. Lowry, « Development of Room Temperature and Relative Humidity Linear Parametric Models for an Open Office Using BMS Data, » *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 3, pp. 348-356, 2010.

[Mod25] G. Mustafaraj, G. Lowry et J. Chen, « Prediction of Room Temperature and Relative Humidity by Autoregressive Linear and Nonlinear Neural Network Models for an Open Office, » *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 6, pp. 1452-1460, 2011.

[Mod26] C. Park, D. R. Clark et G. E. Kelly, « An Overview of HVACSIM+ : A Dynamic Building/HVAC/Control Simulation Program, » in *First Annual Building Energy Simulation Conference (BESC)*, (Seattle, WA, USA), août 1985.

[Mod27] X. Shi, W. Lu, Y. Zhao et P. Qin, « Prediction of Indoor Temperature and Relative Humidity Based on Cloud Database by Using an Improved BP Neural Network in Chongqing, » *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30 559-30 566, 2018.

[Mod28] F. Tariku, K. Kumaran et P. Fazio, « Integrated Analysis of Whole Building Heat, Air and Moisture Transfer, » *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, n° 15-16, pp. 3111-3120, juill. 2010.

[Mod29] M. Trčka, J. L. Hensen et M. Wetter, « Co-Simulation for Performance Prediction of Integrated Building and HVAC Systems – An Analysis of Solution Characteristics Using a Two-Body System, » *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, n° 7, pp. 957-970, 2010.

[Mod30] C. Underwood, « An Improved Lumped Parameter Method for Building Thermal Modelling, » *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 191-201, 2014.

[Mod31] M. Vanpachtenbeke, W. [D. Walle], H. Janssen et S. Roels, « Analysis of Coupling Strategies for Building Simulation Programs, » *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2554-2559, 2015.

[Mod32] H. Wang et Z. (Zhai, « Advances in Building Simulation and Computational Techniques : A Review between 1987 and 2014, » *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 319-335, 2016.

[Mod33] Z. Wang, Y. Chen et Y. Li, « Development of RC Model for Thermal Dynamic Analysis of Buildings through Model Structure Simplification, » *Energy and Buildings*, vol. 195, pp. 51-67, 2019.

[Mod34] M. Wetter, M. Fuchs, P. Grozman, L. Helsen, F. Jorissen, M. Lauster, D. Müller, C. Nytsch-Geusen, D. Picard, P. Sahlin et M. Thorade, « Iea Ebc Annex 60 Modelica Library – an International Collaboration to Develop a Free Open-Source Model Library for Buildings and Community Energy Systems, » in *Proceedings of Building Simulation 2015 : 14th Conference of International Building Performance Simulation Association IBPSA*, (Hyderabad, India), déc. 2015, pp. 395-402.

Commande

[Com1] O. Adeodu, B. Omell et D. J. Chmielewski, « On the Theory of Economic MPC : ELOC and Approximate Infinite Horizon EMPC, » *Journal of Process Control*, vol. 73, pp. 19-32, 2019.

[Com2] A. Afram et F. Janabi-Sharifi, « Theory and Applications of HVAC Control Systems – A Review of Model Predictive Control (MPC), » *Building and Environment*, vol. 72, pp. 343-355, 2014.

[Com3] R. P. Aguilera, G. Urrutia, R. A. Delgado, D. Dolz et J. C. Agüero, « Quadratic Model Predictive Control Including Input Cardinality Constraints, » *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 62, n° 6, pp. 3068-3075, juin 2017.

[Com4] R. P. Aguilera, R. Delgado, D. Dolz et J. C. Agüero, « Quadratic MPC with l_0-Input Constraint, » in *19th IFAC World Congress*, (Cape Town, South Africa), août 2014, pp. 10 888-10 893.

[Com5] T. Amy, H. Kong, D. Auger, G. Offer et S. Longo, « Regularized MPC for Power Management of Hybrid Energy Storage Systems with Applications in Electric Vehicles, » *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n° 11, pp. 265-270, 2016.

[Com6] N. Aste, M. Manfren et G. Marenzi, « Building Automation and Control Systems and Performance Optimization : A Framework for Analysis, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 313-330, 2017.

[Com7] J. Berberich, J. Koehler, M. A. Muller et F. Allgower, « Data-Driven Model Predictive Control with Stability and Robustness Guarantees, » *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 1-16, 2020, article admis à la publication.

[Com8] D. Blum, F. Jorissen, S. Huang, Y. Chen, J. Arroyo, K. Benne, V. Gavan, L. Rivalin, L. Helsen, D. Vrabie, M. Wetter, M. Sofos et Y. Li, « Prototyping the BOPTEST Framework for Simulation-Based Testing of Advanced Control Strategies in Buildings, » in *IBPSA Building Simulation 2019*, (Rome, Italy), juill. 2019.

[Com9] E. Camacho et C. Alba, *Model Predictive Control*, série Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London, 2013.

[Com10] N. Challapalli, M. Nagahara et M. Vidyasagar, « Continuous Hands-off Control by CLOT Norm Minimization, » in *20th IFAC World Congress*, (Toulouse, France), juill. 2017, pp. 14 454-14 459.

[Com11] P. D. Christofides, R. Scattolini, D. M. de la Peña et J. Liu, « Distributed Model Predictive Control : A Tutorial Review and Future Research Directions, » *Computers & Chemical Engineering*, vol. 51, pp. 21-41, 2013.

[Com12] E. G. Cojocaru, J. M. Bravo, M. J. Vasallo et D. Marín, « A Binary-Regularization-Based Model Predictive Control Applied to Generation Scheduling in Concentrating Solar Power Plants, » *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 41, n° 1, pp. 215-238, 2020.

[Com13] A. I. Dounis et C. Caraiscos, « Advanced Control Systems Engineering for Energy and Comfort Management in a Building Environment—A Review, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 6-7, pp. 1246-1261, août 2009.

[Com14] M. Ellis, H. Durand et P. D. Christofides, « A Tutorial Review of Economic Model Predictive Control Methods, » *Journal of Process Control*, vol. 24, n° 8, pp. 1156-1178, Economic nonlinear model predictive control, août 2014.

[Com15] M. Fiorentini, P. Cooper, Z. Ma et D. A. Robinson, « Hybrid Model Predictive Control of a Residential HVAC System with PVT Energy Generation and PCM Thermal Storage, » *Energy Procedia*, vol. 83, pp. 21-30, 2015.

[Com16] F. Gabsi, F. Hamelin et N. Sauer, « Hygrothermal Modeling and MPC-Based Control for Energy and Comfort Management in Buildings, » in *7th International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, (Kuala Lumpur, Malaysia), mai 2018, pp. 156-161.

[Com17] F. Gabsi, F. Hamelin, N. Sauer et J. Yamé, « Regularized Economic Model Predictive Control for Building Automation and Control Systems, » soumis à « Energy and Buildings ».

[Com18] F. Gabsi, F. Hamelin, N. Sauer et J.-J. Yamé, « ℓ_ϵ-Regularized Economic Model Predictive Control for Thermal Comfort in Multizone Buildings, » in *Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems, SMARTGREENS*, Prague, Czech Republic : SCITEPRESS, mai 2020, pp. 137-148.

[Com19] M. Gallieri et J. M. Maciejowski, « ℓ_{asso} MPC : Smart Regulation of over-Actuated Systems, » in *American Control Conference (ACC)*, (Montreal, QC, Canada), juin 2012, pp. 1217-1222.

[Com20] M. Gallieri et J. M. Maciejowski, « Model Predictive Control with Prioritised Actuators, » in *14th European Control Conference (ECC)*, (Linz, Austria), juill. 2015, pp. 533-538.

[Com21] M. Gallieri, *Lasso-MPC – Predictive Control with ℓ_1-regularised least squares*, série Springer Theses, Recognizing Outstanding Ph.D. Research. Springer International Publishing, 2016.

[Com22] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, E. Pouresmaeil, J. C. O. Matias et J. P. S. Catalão, « Model Predictive Control Home Energy Management and Optimization Strategy with Demand Response, » *Applied Sciences*, vol. 8, n° 3, article 408, mars 2018. doi : 10.3390/app8030408.

[Com23] A. Grancharova et T. A. Johansen, *Explicit Nonlinear Model Predictive Control : Theory and Applications*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012, 234 pages.

[Com24] M. Gwerder et J. Siemens, « Predictive Control for Integrated Room Automation, » in *Proc. of the 8th REHVA World Congress for Building Technologies – CLIMA 2005*, (Lausanne, Switzerland), oct. 2005.

[Com25] N. Hashempour, R. Taherkhani et M. Mahdikhani, « Energy Performance Optimization of Existing Buildings : A Literature Review, » *Sustainable Cities and Society*, vol. 54, page 101 967, 2020.

[Com26] I. Hazyuk, C. Ghiaus et D. Penhouet, « Optimal Temperature Control of Intermittently Heated Buildings Using Model Predictive Control : Part II – Control Algorithm, » *Building and Environment*, vol. 51, pp. 388-394, 2012.

[Com27] S. Huang, W. Wang, M. R. Brambley, S. Goyal et W. Zuo, « An Agent-Based Hardware-in-the-Loop Simulation Framework for Building Controls, » *Energy and Buildings*, vol. 181, pp. 26-37, déc. 2018.

[Com28] A. Jarrou, D. Sauter, B. Chouri, K. Alami et A. Ailane, « Model Predictive Control (MPC) for Building Optimal Temperature Control, » in *2nd International Conference on Smart Application and Data Analysis for Smart Cities, SADASC'18*, Casablanca, Morocco, févr. 2018.

[Com29] J. Ma, J. Qin, T. Salsbury et P. Xu, « Demand Reduction in Building Energy Systems Based on Economic Model Predictive Control, » *Chemical Engineering Science*, vol. 67, n° 1, pp. 92-100, 2012.

[Com30] J. Ma, S. J. Qin et T. Salsbury, « Application of Economic MPC to the Energy and Demand Minimization of a Commercial Building, » *Journal of Process Control*, vol. 24, n° 8, pp. 1282-1291, 2014.

[Com31] Y. Ma, J. Matuško et F. Borrelli, « Stochastic Model Predictive Control for Building HVAC Systems : Complexity and Conservatism, » *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, n° 1, pp. 101-116, 2015.

[Com32] D. Mariano-Hernández, L. Hernández-Callejo, A. Zorita-Lamadrid, O. Duque-Pérez et F. Santos García, « A Review of Strategies for Building Energy Management System : Model Predictive Control, Demand Side Management, Optimization, and Fault Detect & Diagnosis, » *Journal of Building Engineering*, vol. 33, page 101 692, 2021.

[Com33] P. Mhaskar et A. B. Kennedy, « Robust Model Predictive Control of Nonlinear Process Systems : Handling Rate Constraints, » *Chemical Engineering Science*, vol. 63, n° 2, pp. 366-375, 2008.

[Com34] P.-D. Moroşan, R. Bourdais, D. Dumur et J. Buisson, « Building Temperature Regulation Using a Distributed Model Predictive Control, » *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 9, pp. 1445-1452, 2010.

[Com35] M. Nagahara, D. E. Quevedo et J. Østergaard, « Sparse Packetized Predictive Control for Networked Control over Erasure Channels, » *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 59, n° 7, pp. 1899-1905, juill. 2014.

[Com36] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones, M. Morari, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann et K. Wirth, « Energy Efficient Building Climate Control Using Stochastic Model Predictive Control and Weather Predictions, » in *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 2010, pp. 5100-5105.

[Com37] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann et M. Morari, « Use of Model Predictive Control and Weather Forecasts for Energy Efficient Building Climate Control, » *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 15-27, févr. 2012.

[Com38] S. K. Pakazad, H. Ohlsson et L. Ljung, « Sparse Control Using Sum-of-Norms Regularized Model Predictive Control, » in *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, (Florence, Italy), déc. 2013, pp. 5758-5763.

[Com39] A. Parisio, L. Fabietti, M. Molinari, D. Varagnolo et K. H. Johansson, « Control of HVAC Systems via Scenario-Based Explicit MPC, » in *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2014, pp. 5201-5207.

[Com40] J. B. Petersen, J. D. Bendtsen et J. Stoustrup, « Nonlinear Model Predictive Control for Energy Efficient Cooling in Shopping Center HVAC, » in *2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, 2019, pp. 611-616.

[Com41] C. V. Rao, « Sparsity of Linear Discrete-Time Optimal Control Problems With l_1 Objectives, » *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 63, n° 2, pp. 513-517, févr. 2018.

[Com42] J. B. Rawlings, N. R. Patel, M. J. Risbeck, C. T. Maravelias, M. J. Wenzel et R. D. Turney, « Economic MPC and Real-Time Decision Making with Application to Large-Scale HVAC Energy Systems, » *Computers & Chemical Engineering*, vol. 114, pp. 89-98, FOCAPO/CPC 2017, juin 2018.

[Com43] P. Rockett et E. A. Hathway, « Model-Predictive Control for Non-Domestic Buildings : A Critical Review and Prospects, » *Building Research & Information*, vol. 45, n° 5, pp. 556-571, 2017.

[Com44] B. Rodríguez-Soria, J. Domínguez-Hernández, J. M. Pérez-Bella et J. J. del Coz-Díaz, « Review of International Regulations Governing the Thermal Insulation Requirements of Residential Buildings and the Harmonization of Envelope Energy Loss, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 78-90, 2014.

[Com45] J. Salazar, L. Valverde et F. Tadeo, « Predictive Control of a Renewable Energy Microgrid with Operational Cost Optimization, » in *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, (Vienna, Austria), nov. 2013, pp. 7950-7955.

[Com46] T. I. Salsbury, « A Survey of Control Technologies in the Building Automation Industry, » in *16th IFAC World Congress*, (Prague, Czech Republic), juill. 2005, pp. 90-100.

[Com47] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini et A. Bemporad, « Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency : Problem Formulation, Applications and Opportunities, » *Energies*, vol. 11, n° 3, article 631, mars 2018. doi : 10.3390/en11030631.

[Com48] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi et T. Ibrahim, « A Review on Optimized Control Systems for Building Energy and Comfort Management of Smart Sustainable Buildings, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 409-429, 2014.

[Com49] J. Široký, F. Oldewurtel, J. Cigler et S. Prívara, « Experimental Analysis of Model Predictive Control for an Energy Efficient Building Heating System, » *Applied Energy*, vol. 88, n° 9, pp. 3079-3087, 2011.

[Com50] M. Wetter, « Co-Simulation of Building Energy and Control Systems with the Building Controls Virtual Test Bed, » *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 4, n° 3, pp. 185-203, 2011.

[Com51] J. J. Yamé, F. Gabsi, T. Darure, T. Jain, F. Hamelin et N. Sauer, « Optimality Condition Decomposition Approach to Distributed Model Predictive Control, » in *American Control Conference (ACC)*, (Philadelphia, PA, USA), juill. 2019, pp. 742-747.

[Com52] Y. Zong, G. M. Böning, R. M. Santos, S. You, J. Hu et X. Han, « Challenges of Implementing Economic Model Predictive Control Strategy for Buildings Interacting with Smart Energy Systems, » *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 1476-1486, mars 2017.

Tolérance aux pannes

[Tol1] S. C. Bengea, P. Li, S. Sarkar, S. Vichik, V. Adetola, K. Kang, T. Lovett, F. Leonardi et A. D. Kelman, « Fault-Tolerant Optimal Control of a Building HVAC System, » *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 21, n° 6, pp. 734-751, Predictive controls, modeling and technology assessment for high performance buildings, août 2015.

[Tol2] T. Darure, J. J. Yamé et F. Hamelin, « Fault-Adaptive Control of VAV Damper Stuck in a Multizone Building, » in *3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, (Barcelona, Spain), sept. 2016, pp. 170-176.

[Tol3] Z. Du et X. Jin, « Tolerant Control for Multiple Faults of Sensors in VAV Systems, » *Energy Conversion and Management*, vol. 48, n° 3, pp. 764-777, mars 2007.

[Tol4] F. Gabsi, F. Hamelin, N. Sauer et D. Sauter, « Fault-Tolerant Economic Model Predictive Control for Building Temperature Regulation Using ℓ_ε-Regularization, » in *4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol)*, (Casablanca, Morocco), sept. 2019, pp. 232-237.

[Tol5] A. Jarrou, D. Sauter et K. Alami, « Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control Based on Model Predictive Control for Nearly Zero Energy Buildings, » in *4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol)*, (Casablanca, Morocco), 2019, pp. 219-225.

[Tol6] S. A. Mona, T. Jain et J. J. Yamé, « Decentralized eMPC Based Fault Tolerant Control for Energy Efficiency in a Multi-Zone Building, » in *4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol)*, (Casablanca, Morocco), sept. 2019, pp. 238-243.

[Tol7] P. M. Papadopoulos, V. Reppa, M. M. Polycarpou et C. G. Panayiotou, « Distributed Adaptive Sensor Fault Tolerant Control for Smart Buildings, » in *54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, (Osaka, Japan), déc. 2015, pp. 3143-3148.

[Tol8] D. Sauter, « Fault Tolerant Control of HVAC Systems for Energy Efficient Buildings, » in *SIAM Conference on Control and Its Applications, CT 15*, (Paris, France), juill. 2015.

[Tol9] M. Subramaniam et T. Jain, « Fault Tolerant Economic Model Predictive Control for Energy Efficiency in a Multi-Zone Building, » in *2nd IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, (Copenhagen, Denmark), août 2018, pp. 205-210.

[Tol10] R. Zhang et T. Hong, « Modeling of HVAC Operational Faults in Building Performance Simulation, » *Applied Energy*, vol. 202, pp. 178-188, sept. 2017.

[Tol11] Y. Zhang et J. Jiang, « Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems, » *Annual Reviews in Control*, vol. 32, n° 2, pp. 229-252, 2008.

Général

[Gen1] M. H. Albadi et E. F. El-Saadany, « Demand Response in Electricity Markets : An Overview, » in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-5.

[Gen2] M. Ambaum, *Thermal Physics of the Atmosphere*, série Advancing Weather and Climate Science. Wiley, 2010.

[Gen3] M. Backman et J. Fagerberg, « Smart Homes and Home Automation, » nov. 2019, 297 pages.

[Gen4] J. Bae et S. Kim, « Identifying and Ranking Influential Spreaders in Complex Networks by Neighborhood Coreness, » *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 395, pp. 549-559, 2014.

[Gen5] N. Balta-Ozkan, R. Davidson, M. Bicket et L. Whitmarsh, « Social Barriers to the Adoption of Smart Homes, » *Energy Policy*, vol. 63, pp. 363-374, 2013.

[Gen6] C. Barefoot, « Block-Cutvertex Trees and Block-Cutvertex Partitions, » *Discrete Mathematics*, vol. 256, n° 1, pp. 35-54, 2002.

[Gen7] D. Bertsimas, M. S. Copenhaver et R. Mazumder. « The Trimmed Lasso : Sparsity and Robustness. » arXiv : 1708.04527 [stat.ME]. (2017).

[Gen8] L. Bratasz, R. Kozlowski, A. Kozlowska et B. Rachwal, « Sorption of Moisture and Dimensional Change of Wood Species Used in Historic Objects, » in *Proc. of the International Conference Held by COST Action IE0601*, Braga, Portugal, nov. 2008.

[Gen9] « Building Materials and Products. Hygrothermal Properties. Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values, » British Standards Institution, déc. 2007, 32 pages.

[Gen10] P. Calow, *Blackwell's Concise Encyclopedia of Environmental Management*. Oxford England ; Malden, MA : Blackwell Science, juill. 1999, 192 pages.

[Gen11] F. Chabane, F. Guellai, M.-Y. Michraoui, B. Djamel, A. Bima et M. Noureddine, « Prediction of the Global Solar Radiation on Inclined Area, » *Applied Solar Energy*, vol. 55, pp. 41-47, janv. 2019.

[Gen12] K.-J. Cho et D.-W. Cho, « Solar Heat Gain Coefficient Analysis of a Slim-Type Double Skin Window System : Using an Experimental and a Simulation Method, » *Energies*, vol. 11, n° 1, article 115, janv. 2018. doi : 10.3390/en11010115.

[Gen13] S. Cociorva et A. Iftene, « Indoor Air Quality Evaluation in Intelligent Building, » *Energy Procedia*, vol. 112, pp. 261-268, mars 2017. doi : 10.1016/j.egypro.2017.03.1095.

[Gen14] H. Cui et M. Overend, « A Review of Heat Transfer Characteristics of Switchable Insulation Technologies for Thermally Adaptive Building Envelopes, » *Energy and Buildings*, vol. 199, pp. 427-444, 2019.

[Gen15] L. C. De Silva, C. Morikawa et I. M. Petra, « State of the Art of Smart Homes, » *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, n° 7, pp. 1313-1321, 2012.

[Gen16] T. Ebert, N. Essig et G. Hauser, *Green Building Certification Systems : Assessing Sustainability - International System Comparison - Economic Impact of Certifications*, série Detail Green Books. München : Walter de Gruyter, mars 2013, 144 pages.

[Gen17] H. W. Engl, M. Hanke et A. Neubauer, *Regularization of Inverse Problems*, série Mathematics and Its Applications. Dordrecht : Springer Netherlands, mars 2000, 322 pages.

[Gen18] L. Fang, G. Clausen et P. O. Fanger, « Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures, » *Indoor Air*, vol. 8, n° 4, pp. 276-284, déc. 1998.

[Gen19] L. Gelazanskas et K. A. Gamage, « Demand Side Management in Smart Grid : A Review and Proposals for Future Direction, » *Sustainable Cities and Society*, vol. 11, pp. 22-30, 2014.

[Gen20] P. C. Hansen, « Analysis of Discrete Ill-Posed Problems by Means of the L-Curve, » *SIAM Review*, vol. 34, n° 4, pp. 561-580, déc. 1992.

[Gen21] T. Hastie, R. Tibshirani et J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction*, 2e édition, série Springer Series in Statistics. New York : Springer-Verlag, août 2009, 745 pages.

[Gen22] G. Henze, D. Kalz, C. Felsmann et G. Knabe, « Impact of Forecasting Accuracy on Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory, » *Hvac&r Research*, vol. 10, pp. 153-178, avr. 2004.

[Gen23] Z. Hu, F. Nie, R. Wang et X. Li, « Low Rank Regularization : A Review, » *Neural Networks*, 2020, article admis à la publication.

[Gen24] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, 2e édition, série Springer Series in Statistics. New York : Springer-Verlag, oct. 2002, 524 pages.

[Gen25] Y.-X. Kong, G.-Y. Shi, R.-J. Wu et Y.-C. Zhang, « K-Core : Theories and Applications, » *Physics Reports*, vol. 832, pp. 1-32, 2019.

[Gen26] M. La Gennusa, A. Nucara, G. Rizzo et G. Scaccianoce, « The Calculation of the Mean Radiant Temperature of a Subject Exposed to the Solar Radiation—a Generalised Algorithm, » *Building and Environment*, vol. 40, n° 3, pp. 367-375, 2005.

[Gen27] G. K. Larsen, N. D. van Foreest et J. M. Scherpen, « Power Supply–Demand Balance in a Smart Grid : An Information Sharing Model for a Market Mechanism, » *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, n° 13, pp. 3350-3360, 2014.

[Gen28] T. M. Lawrence, M.-C. Boudreau, L. Helsen, G. Henze, J. Mohammadpour, D. Noonan, D. Patteeuw, S. Pless et R. T. Watson, « Ten Questions Concerning Integrating Smart Buildings into the Smart Grid, » *Building and Environment*, vol. 108, pp. 273-283, 2016.

[Gen29] B. Y. Liu et R. C. Jordan, « The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors : With Design Data for the U.S., Its Outlying Possessions and Canada, » *Solar Energy*, vol. 7, n° 2, pp. 53-74, 1963.

[Gen30] J. Lofberg, « YALMIP : A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB, » in *2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design (CACSD)*, Taipei, Taiwan, sept. 2004, pp. 284-289.

[Gen31] N. Mendes, F. C. Winkelmann, R. Lamberts et P. C. Philippi, « Moisture Effects on Conduction Loads, » *Energy and Buildings*, vol. 35, n° 7, pp. 631-644, août 2003.

[Gen32] B. Olesen et K. Parsons, « Introduction to Thermal Comfort Standards and to the Proposed New Version of EN ISO 7730, » *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 6, pp. 537-548, 2002.

[Gen33] K. X. Perez, M. Baldea et T. F. Edgar, « Integrated HVAC Management and Optimal Scheduling of Smart Appliances for Community Peak Load Reduction, » *Energy and Buildings*, vol. 123, pp. 34-40, 2016.

[Gen34] J. Qin et S. Wang, « A Fault Detection and Diagnosis Strategy of VAV Air-Conditioning Systems for Improved Energy and Control Performances, » *Energy and Buildings*, vol. 37, n° 10, pp. 1035-1048, 2005.

[Gen35] D. Sandoval, P. Goffin et H. Leibundgut, « How Low Exergy Buildings and Distributed Electricity Storage Can Contribute to Flexibility within the Demand Side, » *Applied Energy*, vol. 187, pp. 116-127, 2017.

[Gen36] M. Santamouris et P. Wouters, *Building Ventilation : The State of the Art*. CRC Press, 2006, isbn : 978-1-136-57072-8. adresse : https://books.google.fr/books?id=0aCOAwAAQBAJ.

[Gen37] K. Sedlbauer, « Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, » *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 25, n° 4, pp. 321-336, avr. 2002.

[Gen38] S. B. Seidman, « Network Structure and Minimum Degree, » *Social Networks*, vol. 5, n° 3, pp. 269-287, 1983.

[Gen39] C. Soussen, J. Idier, J. Duan et D. Brie, « Homotopy Based Algorithms for ℓ_0-Regularized Least-Squares, » *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, n° 13, pp. 3301-3316, juill. 2015.

[Gen40] J. W. Spencer, « Fourier Series Representation of the Position of the Sun, » *Search*, vol. 2, pp. 162-172, 1971.

[Gen41] M. Tawarmalani et N. V. Sahinidis, « A Polyhedral Branch-and-Cut Approach to Global Optimization., » *Mathematical Programming*, vol. 103, n° 2, pp. 225-249, 2005.

[Gen42] R. Tibshirani, « Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso, » *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, vol. 58, n° 1, pp. 267-288, 1996.

[Gen43] R. Tibshirani, M. Saunders, S. Rosset, J. Zhu et K. Knight, « Sparsity and Smoothness via the Fused Lasso, » *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*, vol. 67, n° 1, pp. 91-108, 2005.

[Gen44] A. N. Tikhonov, « Solution of Incorrectly Formulated Problems and the Regularization Method, » *Soviet Math. Dokl.*, vol. 4, pp. 1035-1038, 1963.

[Gen45] J. Toftum, A. S. Jørgensen et P. O. Fanger, « Upper Limits for Indoor Air Humidity to Avoid Uncomfortably Humid Skin, » *Energy and Buildings*, vol. 28, n° 1, pp. 1-13, août 1998.

[Gen46] J. Toftum, A. S. Jørgensen et P. O. Fanger, « Upper Limits of Air Humidity for Preventing Warm Respiratory Discomfort, » *Energy and Buildings*, vol. 28, n° 1, pp. 15-23, août 1998.

[Gen47] A. Wächter et L. Biegler, « On the Implementation of an Interior-Point Filter Line-Search Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming, » *Mathematical programming*, vol. 106, pp. 25-57, mars 2006.

[Gen48] L. Wang et T. Hong, « Modeling and Simulation of HVAC Faulty Operations and Performance Degradation Due to Maintenance Issues, » in *ASim 2012 - 1st Asia Conference of International Building Performance Simulation Association*, (Shanghai), nov. 2012.

[Gen49] R. L. Webb, « Standard Nomenclature for Mass Transfer Processes, » *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 17, n° 5, pp. 529-535, sept. 1990.

[Gen50] B. Wei, J. Liu, D. Wei, C. Gao et Y. Deng, « Weighted K-Shell Decomposition for Complex Networks Based on Potential Edge Weights, » *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 420, pp. 277-283, 2015.

[Gen51] P. Wolkoff, « Indoor Air Humidity, Air Quality, and Health – An Overview, » *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 221, n° 3, pp. 376-390, avr. 2018. doi : 10.1016/j.ijheh.2018.01.015.

[Gen52] H. Zou et T. Hastie, « Regularization and Variable Selection via the Elastic Net, » *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*, vol. 67, n° 2, pp. 301-320, 2005.

INDEX

Dans cet index, un numéro de page **en gras italique** indique une page contenant des informations importantes sur l'entrée correspondante, par exemple sa définition.

C

Centrale de Traitement d'Air (CTA) . vii, 11, 12, 23, 34, 43, 79, 111
Chauffage, Ventilation et Climatisation (CVC) . ***vii***, 3, 5, 9, 14–16, 20–23, 30–36, 39, 40, 62, 65, 68, 79, 80, 109–111
Commande prédictive (MPC) . ***viii***, 9, 14, 18–21, 23, 24, 26, 33, 34, 36, 68, 96, 110–112
Commande prédictive régularisée (RMPC) . . ***viii***, ***24***, 25–28, 30, 65, ***71***, 82, 88, 89
Commande prédictive tolérante aux défauts (FTMPC) . ***vii***, ***30***, 35, ***79***, 79–81, 88
Commande prédictive économique (EMPC) ***vii***, ***21***, 21–24, 30, 34, 79, 106, 107, 110

F

FTC . . . . . ***vii***, 32, 36, 65, 79

G

Gestion Technique et Energétique des Bâtiments (GTEB) 3, 34

I

Indicateur clé de performance (ICP) . 23, 24, 68

S

SIMBAD . . . . . ***viii***, 15, 16

T

TRNSYS . . . . . ***viii***, 10, 15, 16

V

Volume d'air variable (VAV) . ***viii***, 32, 34, 35, 79

Efficacité énergétique des bâtiments : modélisation hygrothermique et commande prédictive économique régularisée

Résumé

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une méthodologie complète pour simuler le comportement hygrothermique et surveiller en continu l'efficacité énergétique des bâtiments. Le modèle multizone développé est de type boîte grise et est fondé sur des processus de transfert de chaleur et d'humidité. Il intègre le rayonnement solaire comme source d'énergie ainsi que des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation tels que les pompes à chaleur ou les VMC. Ce modèle hygrothermique permet d'estimer et de prédire des données microclimatiques telles que la température opérative, la température radiante et le taux d'humidité qui sont essentielles pour la qualification du confort thermique. Le modèle généré est utilisé pour développer de nouvelles stratégies de commande prédictive économique permettant d'assurer le confort hygrothermique dans les zones occupées du bâtiment tout en minimisant sa consommation d'énergie. Les indicateurs de confort thermique sont pris en compte dans la définition d'un critère de performance et le coût d'utilisation des différents équipements est utilisé pour définir un critère économique. Les spécifications liées à l'utilisation des différents équipements sont prises en compte par un terme de régularisation. Le stress causé par les démarrages/arrêts successifs et trop fréquents de certains équipements est pris en considération. Ces changements d'état sont généralement néfastes à la durée de vie des équipements et représentent, à tout le moins, un mode de fonctionnement inefficace sur le plan énergétique. La solution présentée permet également de contrôler à tout moment le nombre d'entrées de commande actives et d'éviter des scénarios de commande inappropriés. En réponse au problème d'optimisation, les avantages d'une stratégie de commande parcimonieuse sont soulignés. La tolérance des scénarios de commande optimale à l'apparition de certains défauts d'actionneurs est également une propriété qui est prise en considération.

Mots clés : modélisation hygrothermique, commande prédictive économique, régularisation

---

Energy efficiency of buildings: hygrothermal modeling and regularized economic model predictive control

Abstract

In this thesis, we propose a comprehensive methodology to simulate the hygrothermal behaviour and continuously monitor the energy efficiency of buildings. The multi-zone model developed is of the grey box type and is based on heat and moisture transfer processes. It integrates solar radiation as an energy source as well as heating, ventilation and air conditioning systems such as heat pumps or VMCs. This hygrothermal model allows the estimation and prediction of microclimatic data such as operative temperature, radiant temperature and humidity rate which are essential for the qualification of thermal comfort. The generated model is used to develop new economic model predictive control strategy to ensure hygrothermal comfort in occupied areas of the building while minimizing its energy consumption. Thermal comfort indicators are taken into account in the definition of a performance criterion and the cost induced by the use of the different equipments is used to define an economic criterion. The specifications related to the use of the different equipment are taken into account by a regularization term. The stress caused by the successive and too frequent start/stop of certain equipment is taken into account. These changes of state are generally detrimental to the lifetime of the equipment and represent, at the very least, an energy inefficient mode of operation. The solution presented also allows the number of active control inputs to be monitored at any time and inappropriate control scenarios to be avoided. In response to the optimization problem, the advantage of a sparse control strategy is highlighted. The fault-tolerance of optimal control scenarios to the occurrence of certain actuator faults is also a property that is taken into consideration.

Keywords: hygrothermal modeling, economic model predictive control, regularization

---

CRAN – Campus Sciences – Boulevard des Aiguillettes – BP 70239 – 54506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex – France
LGIPM – Bâtiment A de l'UFR MIM – 3 rue Augustin Fresnel – BP 45112 – 57073 Metz Cedex 03 – France