



HAL
open science

Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment pour l'amélioration des performances énergétiques, thermiques et optiques

Etienne Arnal

► **To cite this version:**

Etienne Arnal. Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment pour l'amélioration des performances énergétiques, thermiques et optiques. Autre [cond-mat.other]. INSA de Lyon, 2013. Français. NNT : 2013ISAL0002 . tel-00873975

HAL Id: tel-00873975

<https://theses.hal.science/tel-00873975>

Submitted on 16 Oct 2013

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

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

THÈSE

Présentée devant

L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

École doctorale : Électronique, Électrotechnique et Automatique (E.E.A.)

Spécialité : Énergie et Systèmes

Soutenue par

Etienne ARNAL

Ingénieur ISEN en Signaux et Systèmes

**Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment
pour l'amélioration des performances énergétiques,
thermiques et optiques**

Soutenue le 11 Janvier 2013 devant la commission composée de

Rapporteurs :	P ^r Rachid OUTBIB	COSI, LSIS, Marseille
	P ^r Hervé GUEGUEN	IETR, Supélec, Rennes
Examineurs :	D ^r Nicolas MOREL	LESO-PB, EPFL, Lausanne
	P ^r Joseph VIRGONE	CETHIL, UCBL, Lyon
	M Philippe FIANI	Sherpa Engineering, La Garenne-Colombes
	M ^{me} Véronique BOUTIN	Schneider Electric, Grenoble
Directeurs :	P ^r Eric BIDEAUX	AMPERE, INSA, Lyon
	D ^r Cédric ANTHIERENS	ISM, SUPMECA, Toulon

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2011-2015

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43.12.94 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE http://ww2.ibcp.fr/ediss Sec : Safia AIT CHALAL Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr	M. Johannes KELLENDONK Université Claude Bernard Lyon 1 INFOMATHS Bâtiment Braconnier 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44.82.94 Fax 04 72 43 16 87 infomaths@univ-lyon1.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72.43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* M. OBADIA Lionel Sec : Viviane POLSINELLI Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Résumé

A notre époque, la maîtrise des consommations énergétiques est un enjeu très important pour la préservation des ressources naturelles terrestres. Face au réchauffement climatique et à la diminution des gisements d'énergies fossiles, les états se sont engagés à réduire leur consommation en encourageant, en outre, le renouvellement de leur parc immobilier. Les efforts se concentrent donc sur la construction de nouveaux bâtiments à faible consommation et sur la rénovation des bâtiments anciens. Alors que la construction basse consommation est aujourd'hui une réalité, la rénovation n'est que très rarement mise en pratique.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer les gains énergétiques potentiels issus de la rénovation d'un bâtiment ancien pour être en cohérence avec son environnement et ses modes d'exploitation. Pour cela nous nous appuyons sur l'approche systémique et l'Automatique qui permettent depuis la modélisation jusqu'à l'élaboration de lois de commande de faire coopérer toutes les installations domotiques. L'évaluation du contrôle sera réalisée en simulation sur un bâtiment ancien équipé d'un chauffage central, de luminaires et de stores vénitiens intérieurs pilotés.

L'architecture de contrôle présentée est issue d'une analyse systémique du bâtiment et se base sur une approche hiérarchique en adéquation avec les exigences des utilisateurs et les différentes échelles de représentation. Afin d'expérimenter cette architecture de contrôle, un modèle physique de bâtiment multi-échelle a été réalisé en utilisant une approche Bond-Graph et permet d'estimer le comportement optique et thermique du bâtiment en séparant les dynamiques lentes et rapides. La synthèse des lois de commande a ensuite été effectuée en réduisant ce modèle de simulation et a permis d'implémenter deux lois de commandes. La première s'exprime à l'échelle du bâtiment par une commande prédictive du chauffage central et considère l'évolution future de la température extérieure et de la puissance radiative solaire. La seconde prend place au niveau des pièces sous la forme d'une commande optimale des radiateurs, des stores et des luminaires afin d'assurer la température opérative moyenne et l'éclairage moyen souhaité par les occupants.

L'étude des gains énergétiques offerts par la rénovation du système de contrôle a permis de mettre en valeur l'intérêt du système de contrôle présenté. Les résultats ont montré que l'implantation d'une commande prédictive sur le chauffage central permet de réduire de plus de 20% ses consommations énergétiques. Par ailleurs, le contrôle optimal dans les pièces offre un gain d'environ 20% sur le confort thermique et de 75% sur le confort optique.

Abstract

In our time, the control of energy consumption is a very important issue for the preservation of the natural resources. With the global warming and the reduction of fossil energy sources, states have committed to reduce their consumption by encouraging the renewal of their buildings. Efforts are focused on construction of new low consumption buildings and renovation of old buildings. And while low energy building is now a reality, the renovation is rarely put into practice.

The objective of this thesis is to evaluate the potential energy savings resulting from the renovation of old buildings. Specifically focusing on automatic and the interest of designing control laws for global cooperation to all home automation. Our approach is to design a hierarchical control architecture and to simulate it in an old building with central heating, lighting and interior Venetian blinds.

The control architecture is designed from a systemic analysis of buildings. It is based on a hierarchical approach in order to adapt to user requirements and to different scales of spatial representation (from the building to the room). To experiment this control architecture, a physical multi-scale model of building was developed using a Bond-Graph approach. This model allows to estimate the optical and thermal behavior of the building separating the slow dynamics of the fast dynamics. The synthesis of actuators control laws was then performed by reducing the simulation model. It helped to implement two control laws : The first is expressed throughout the building by a predictive control of central heating system and considers the future behaviour of the outdoor temperature and solar radiative power. The second takes place at the rooms level as an optimal control of radiators, Venetian blinds and lighting to ensure the operative temperature and illumination desired by the occupants.

The study of energy savings offered by the renovation of the control system helped to highlight the interest of the presented control system. The results showed that the implementation of predictive control on the central heating leads to reduce more than 20% of its energy consumption. Moreover, the optimal control in rooms increase thermal comfort around of 20% and the visual comfort of 75%.

Avant-propos

Je voudrais avant tout remercier ceux qui m'ont aidé, guidé et supporté tout au long de mes trois années de thèse. Leur présence m'a permis d'achever cette thèse dans de très bonnes conditions :

- ◆ M. Eric BIDEAUX, Professeur, mon directeur de thèse, pour m'avoir donné la possibilité de réaliser cette thèse au sein du laboratoire AMPERE de l'INSA Lyon, pour sa rigueur scientifique et pour ses bons conseils.
- ◆ M. Cédric ANTHIERENS, Maître de Conférence, mon encadrant de thèse, pour son savoir faire technique et sa grande disponibilité. Il a su porter une attention quotidienne à l'avancement de mes recherches.
- ◆ M. Jean BRUNET, Président Directeur Général de Sherpa Engineering, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse en relation avec son entreprise.
- ◆ M. Pierrick DER-ARSLANIAN, Philippe FIANI et Michel GUÉRIN, employés de Sherpa Engineering, pour leurs connaissances en thermique du bâtiment et pour leurs conseils en analyse système.
- ◆ Et tous les employés de Sherpa Engineering, de SUPMECA Toulon et du laboratoire AMPERE pour m'avoir accueilli dans un environnement de travail convivial et studieux.

Enfin, je souhaiterais remercier ma grande famille et mes nombreux amis pour leur présence et leurs encouragements. Ils ont eux aussi une grande importance dans le bon déroulement de ma thèse.

à mes grands-parents, Françoise et François

« The significant problems we face cannot be solved by
the same level of thinking that created them. »

Albert EINSTEIN (1879–1955)

Table des matières

Page de titre	i
Liste des écoles doctorales	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Avant-propos	v
Table des matières	viii
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Liste des symboles	xv
Introduction générale	1
I Le système bâtiment	10
I.1 Étude systémique du bâtiment	12
I.1.1 Le cadre de l'étude	12
I.1.2 La démarche système	13
I.1.3 L'étude du système bâtiment	15
I.1.4 La vivabilité	20
I.2 Confort thermique et optique	23
I.2.1 Le confort thermique	23
I.2.2 Le confort optique	28
I.2.3 Le soleil, principale source d'inconfort	31
I.3 Architecture de contrôle du bâtiment	34
I.3.1 Le contrôle du bâtiment	34
I.3.2 L'architecture de contrôle	35
I.3.3 Le bâtiment d'étude	38
II La simulation du bâtiment	44
II.1 Simulation thermique et optique du bâtiment	46
II.1.1 Les méthodes de modélisation thermique	46
II.1.2 Les méthodes de modélisation optique	49
II.1.3 Les méthodes de modélisation de l'apport solaire	51
II.1.4 Les spécifications du modèle de simulation	55
II.1.5 L'implémentation logicielle	57

II.2	Modélisation des équipements de confort	58
II.2.1	Le chauffage central	58
II.2.2	Les stores vénitiens intérieurs	62
II.2.3	Les luminaires	68
II.3	Modélisation du bâtiment	70
II.3.1	La modélisation du comportement thermique global	72
II.3.2	La modélisation du comportement thermique local	83
II.3.3	La modélisation du comportement optique local	89
II.4	Résultats de simulation	93
II.4.1	Les mesures de l'environnement extérieur	93
II.4.2	Le comportement du bâtiment	97
III	Le contrôle du bâtiment	107
III.1	Spécification du contrôle du bâtiment	109
III.1.1	Les problématiques	109
III.1.2	Le cahier des charges	110
III.2	Régulation des équipements de confort.	115
III.2.1	Le chauffage central et les radiateurs.	115
III.2.2	Les stores vénitiens	117
III.2.3	Les luminaires	123
III.3	Contrôle des besoins thermiques niveau bâtiment	125
III.3.1	La synthèse d'un modèle de commande	125
III.3.2	La commande proportionnelle intégrale	133
III.3.3	La commande prédictive	136
III.4	Contrôle de l'ambiance niveau pièce	150
III.4.1	La commande proportionnelle par thermostat d'ambiance	150
III.4.2	La commande globale par optimisation numérique	151
IV	Les résultats de simulation	166
IV.1	Simulation du contrôle des besoins thermiques	169
IV.1.1	Les scénarios et les critères d'évaluation	169
IV.1.2	La simulation du contrôle du chauffage central	170
IV.1.3	La simulation du contrôle des radiateurs.	173
IV.2	Simulation du contrôle du confort dans les pièces	180
IV.2.1	Le scénario et les critères d'évaluation	180
IV.2.2	La simulation du contrôle du confort thermique	181
IV.2.3	La simulation du contrôle du confort optique	183
IV.2.4	La simulation du contrôle du confort thermique et optique	185
	Conclusion générale	191
	Bibliographie	203

Table des figures

1	<i>Hypocauste à Vieux-la-Romaine, France (a) et Moucharabieh à Grenade, Espagne (b)</i>	2
2	<i>Boucle de régulation du confort visuel</i>	6
I.1	<i>Architecture globale d'un système</i>	15
I.2	<i>Système bâtiment et son sur-système</i>	16
I.3	<i>Décomposition en système de systèmes d'un complexe universitaire</i>	18
I.4	<i>Missions et fonctions d'un logement</i>	20
I.5	<i>Décomposition de la vivabilité et de la génération de l'ambiance en EOF.</i>	21
I.6	<i>Echanges thermiques entre l'homme et son environnement</i>	25
I.7	<i>Zones à éviter (1,2,3) et à privilégier (4) pour le confort (source [Energie+, 2009]).</i>	26
I.8	<i>Evolution du PPD en fonction du PMV</i>	27
I.9	<i>Exemples d'éblouissements provoqués par le soleil (a), par une réflexion (b) et par un fort contraste (c)</i>	29
I.10	<i>Composition spectrale du rayonnement solaire</i>	32
I.11	<i>Architecture fonctionnelle du contrôle d'un bâtiment</i>	36
I.12	<i>Vue globale de l'architecture du système de contrôle du bâtiment</i>	37
I.13	<i>Illustration du bâtiment d'étude inspiré du bâtiment du laboratoire AM-PERE</i>	38
I.14	<i>Illustration de la pièce d'étude</i>	39
I.15	<i>Vue globale de l'architecture de contrôle du bâtiment d'étude</i>	40
I.16	<i>Températures moyennes à Lyon.</i>	41
II.1	<i>Principe des calculs par radiosité (a) et par lancer de rayons (b).</i>	50
II.2	<i>Comparaison d'un rendu par radiosité (a) et par lancer de rayons (b).</i>	50
II.3	<i>Référentiel angulaire de la voûte céleste</i>	53
II.4	<i>Organisation du simulateur du bâtiment.</i>	55
II.5	<i>Principe de fonctionnement du chauffage central</i>	58
II.6	<i>Températures et puissances du chauffage central</i>	61
II.7	<i>Indicatrices d'occultation optique du store vénitien en diffus (a) et en direct (b).</i>	64
II.8	<i>Indicatrices d'occultation en diffus (a) et en direct (b).</i>	65
II.9	<i>Transmittances optiques diffuse (a) et directe (b) du store vénitien</i>	66

II.10	<i>Modélisation thermique du store vénitien</i>	66
II.11	<i>Principe de modélisation thermique par décomposition fréquentielle.</i>	70
II.12	<i>Principe de modélisation thermique utilisé</i>	71
II.13	<i>Apports (en rouge) et pertes (en noir) thermiques dans les bâtiments.</i>	73
II.14	<i>Répartition du flux radiatif solaire dans le bâtiment</i>	75
II.15	<i>Représentation Bond Graph d'un vitrage</i>	76
II.16	<i>Représentation Bond Graph d'une façade</i>	77
II.17	<i>Représentation Bond Graph du bâti</i>	78
II.18	<i>Représentation Bond Graph de l'air intérieur</i>	79
II.19	<i>Représentation Bond Graph du modèle thermique global</i>	80
II.20	<i>Apports (en rouge) et pertes (en noir) thermiques dans les pièces</i>	83
II.21	<i>Représentation Bond Graph des parois intérieures</i>	85
II.22	<i>Représentation Bond Graph de l'air intérieur</i>	87
II.23	<i>Approche Bond Graph du modèle thermique local</i>	88
II.24	<i>Apports optiques dans les pièces</i>	90
II.25	<i>Statistiques climatiques de Vaulx-en-Velin en 2009.</i>	95
II.26	<i>Températures des noeuds du modèle de bâtiment en 2009</i>	98
II.27	<i>Eclairements dans la pièce en 2009</i>	103
III.1	<i>Vue globale de l'architecture de contrôle du bâtiment d'étude</i>	110
III.2	<i>Schéma bloc de contrôle de la vanne trois voies.</i>	116
III.3	<i>Schéma bloc de contrôle d'un store vénitien.</i>	118
III.4	<i>Schéma mécanique d'un store vénitien</i>	119
III.5	<i>Diagramme d'état de la commande d'un store vénitien</i>	120
III.6	<i>Suivi de position du store vénitien</i>	121
III.7	<i>Quantification de la position du store vénitien</i>	122
III.8	<i>Schéma bloc de contrôle des luminaires</i>	123
III.9	<i>Cartographie des apports lumineux d'un luminaire</i>	124
III.10	<i>Valeurs propres de la matrice de dynamique</i>	130
III.11	<i>Schéma bloc de commande par PID du chauffage central</i>	133
III.12	<i>Régulation par PID du chauffage central</i>	134
III.13	<i>Schéma bloc de commande prédictive du chauffage central</i>	138
III.14	<i>Réaction de l'air intérieur suite à une augmentation brutale de la température extérieure</i>	140
III.15	<i>Réaction de l'air intérieur suite à une augmentation brutale de la température des radiateurs</i>	141
III.16	<i>Surface d'enveloppe insolée en fonction de la position du soleil.</i>	142
III.17	<i>Réaction de l'air intérieur suite à un créneau de puissance radiative solaire</i>	143
III.18	<i>Comparaison entre modèle de simulation et modèle de commande sur une journée entière</i>	143
III.19	<i>Modélisation du procédé et point de coïncidence</i>	144
III.20	<i>Prédiction de la température extérieure et de la puissance solaire</i>	146

III.21	<i>Exemple de calcul de la commande prédictive du chauffage central</i>	147
III.22	<i>Modélisation du procédé et trajectoire de référence</i>	148
III.23	<i>Schéma bloc de commande du radiateur par thermostat d'ambiance . . .</i>	150
III.24	<i>Schéma bloc de contrôle de l'ambiance dans une pièce.</i>	152
III.25	<i>Occultation complète du rayon solaire par un store vénitien</i>	155
III.26	<i>Espace des ambiances thermiques accessibles dans la pièce non insolée . .</i>	159
III.27	<i>Espace des ambiances thermiques accessibles dans la pièce insolée.</i>	160
III.28	<i>Représentation de l'espace des ambiances optiques accessibles</i>	162
IV.1	<i>Interface du logiciel de simulation intégré à Matlab et Simulink</i>	168

Liste des tableaux

I.1	<i>Exemple de recommandations issues de la norme [NF EN 12464-1, 2011].</i>	30
I.2	<i>Rapports de luminance maximaux recommandés.</i>	31
I.3	<i>Équipements de confort présents dans le bâtiment d'étude.</i>	40
II.1	<i>Types de ciel définis par la CIE.</i>	54
II.2	<i>Caractéristiques des contacts du bâtiment avec l'environnement extérieur.</i>	81
II.3	<i>Capacités thermiques des différents noeuds du modèle thermique global.</i>	81
II.4	<i>Conductances thermiques entre les différents noeuds du modèle thermique global.</i>	82
II.5	<i>Conductance thermique des pertes par ventilation.</i>	82
II.6	<i>Caractéristiques des contacts de la pièce avec l'environnement extérieur.</i>	88
II.7	<i>Capacités thermiques des différents noeuds du modèle thermique local.</i>	88
II.8	<i>Conductances thermiques entre les différents noeuds du modèle thermique local.</i>	89
II.9	<i>Conductance thermique des pertes par transmission d'air.</i>	89
II.10	<i>Caractéristiques de la pièce pour le modèle optique.</i>	92
II.11	<i>Mesures et capteurs de la station IDMP de Vaulx-en-Velin.</i>	94
II.12	<i>Données climatiques des 4 journées de référence.</i>	96
II.13	<i>Températures dans la pièce et puissances échangées en hiver.</i>	99
II.14	<i>Températures dans la pièce et puissances échangées en été.</i>	100
II.15	<i>Impact des stores vénitiens intérieurs sur la thermique en été.</i>	102
II.16	<i>Impact des stores vénitiens sur l'éclairage dans la pièce.</i>	104
IV.1	<i>Contrôle de la température du bâtiment sur les 4 journées de référence.</i>	172
IV.2	<i>Comparaison entre contrôle PI et contrôle prédictif du chauffage central.</i>	173
IV.3	<i>Température des pièces passives sur les 4 journées de référence.</i>	175
IV.4	<i>Contrôle par thermostat d'ambiance de la température des pièces sur les 4 journées de référence.</i>	176
IV.5	<i>Comparaison entre avec et sans régulateur d'ambiance dans les pièces Sud et Nord.</i>	177
IV.6	<i>Contrôle de la température opérative dans la pièce Sud sur les 4 journées de référence.</i>	182
IV.7	<i>Contrôle de l'éclairage moyen dans la pièce Sud sur les 4 journées de référence.</i>	184

IV.8	<i>Contrôle de l'éclairage moyen dans la pièce Sud sur les 4 journées de référence</i>	186
IV.9	<i>Comparaison des contrôles d'ambiance dans la pièce Sud</i>	187

Liste des symboles

α	Le coefficient d'absorption	—
η	Le rendement	—
γ_s	L'altitude du soleil	°
λ	Le coefficient de conduction	$W/m/K$
$\mathcal{F}_{x \rightarrow y}$	Le facteur de forme de x vers y	—
ω_0	La pulsation propre	rad/s
ω_0	La variable complexe de la transformée de Laplace	s^{-1}
$\overline{T_x}$	La température moyenne du noeud x	°C
\overrightarrow{XE}	Le barycentre lumineux	m
Φ	Le flux thermique	W
ϕ	Le flux lumineux	<i>lumen</i>
ρ	La masse volumique	kg/L
σ	La constante de Stefan-Boltzmann	$5,6703 \cdot 10^{-8} W/m^2/K^{-4}$
τ	La constante de temps	s
τ	Le coefficient de transmission	—
θ	L'angle des lamelles du store vénitien	°
θ_m	L'angle de rotation du moteur du store vénitien	°
θ_{inc}	L'angle d'incidence du rayon solaire	°
ε	L'erreur	—
ξ	Le taux d'amortissement	—
C	La capacité thermique	J/K
C_p	La capacité thermique massique	J/K
D	La distance inter-lamelles du store vénitien	m
d	La descente du store vénitien	%
E	L'éclairement lumineux	<i>lux</i>
E	L'épaisseur des lamelles du store vénitien	m
e	L'épaisseur	m
E_{dif}	L'éclairement lumineux diffus	<i>lux</i>
E_{dir}	L'éclairement lumineux direct	<i>lux</i>
E_{esc}	La constante solaire énergétique hors atmosphère	$1367 W/m^2$
E_{ext}	L'éclairement lumineux extérieur	<i>lux</i>
E_g	L'éclairement lumineux global	<i>lux</i>
E_{vsc}	La constante solaire lumineuse hors atmosphère	$133800 Lux$
h	Le coefficient de convection	$W/m^2/K$
J	Le jour Julien	—
K	Le coefficient de transfert thermique	W/K
K	Le gain	—

L	La largeur des lamelles du store vénitien	m
M	L'émittance lumineuse	lux
M_{dif}	L'émittance lumineuse diffuse	lm/m^2
M_{dir}	L'émittance lumineuse directe	lm/m^2
P	La puissance énergétique	W
P_s	La puissance solaire normale au rayon	W/m^2
Q	Le débit dans le circuit de distribution	m^3/s
q	Le débit d'entrée de la vanne trois voies	m^3/s
r	Le coefficient de réflexion	—
R_d	Le rayon de l'enroulement du fil de descente du store vénitien	m
R_l	Le rayon de l'enroulement de l'échelle des lamelles du store vénitien	m
S	La surface	m^2
T	La température	$^{\circ}C$
T^r	La température radiative	$^{\circ}C$
T_o	La température opérative	$^{\circ}C$
T_o	La transmittance optique	—
Tt	La transmittance thermique	—
V	Le volume	L

Introduction générale

Ce mémoire fait état de mes travaux de doctorat sur le développement de concepts innovants pour la régulation de l'ambiance lumineuse et de la température d'une pièce en exploitant les apports énergétiques solaires. Cette thèse a été conduite dans le cadre d'une convention CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la REcherche) liant la société Sherpa Engineering¹ et le laboratoire AMPERE² de l'INSA Lyon. Dans ce chapitre d'introduction, nous présenterons les problématiques actuelles qui ont motivé ces recherches. Après une présentation de l'entreprise et du laboratoire, nous développerons l'historique et le cadre de travail. Enfin, nous exposerons les objectifs et la démarche que nous avons suivis pour mener à bien nos travaux.

L'homme a toujours fait preuve d'une grande ingéniosité pour améliorer son confort de vie. De la préhistoire à nos jours, les relations avec son habitation ont énormément évolué. Les premières grottes ne servaient que de refuge, puis l'Homo erectus domestiqua le feu et l'utilisa pour s'éclairer et se chauffer. Bien plus tard, des systèmes de chauffage et d'éclairage très aboutis furent développés par les grandes civilisations. Par exemple, les romains inventèrent au IV^e siècle av. J.-C. le chauffage par hypocauste qui consiste à construire des murs équipés de canalisations pour y faire circuler de l'air chauffé par un feu. Habitants des pays désertiques, les arabes mirent au point dès le XVII^e siècle la ventilation par moucharabieh qui permettait une meilleure aération de leurs palais et une réduction des risques d'éblouissement tout en offrant le luxe de voir sans être vu. Bien d'autres techniques furent utilisées au cours des siècles mais la plus importante révolution au sein des bâtiments fit conséquence à la découverte des énergies fossiles.

Au XIX^e siècle, l'exploitation du charbon, du pétrole et du gaz a initié les deux grandes révolutions industrielles qui ont permis de mettre à la disposition de tous de grandes quantités d'énergie. Ces énergies ont permis aux ingénieurs de créer des systèmes de chauffage et d'éclairage très performants. Au fil des avancées scientifiques, ces organes ont évolué et leur efficacité énergétique s'est améliorée. Mais l'observation du

1. Sherpa Engineering, 12 Avenue de Verdun, 92250 La Garenne Colombes

2. Laboratoire AMPERE, Bât. Saint Exupéry, 24 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne cedex



FIGURE 1 – Hypocauste à Vieux-la-Romaine, France (a) et Moucharabieh à Grenade, Espagne (b)

réchauffement climatique a mis en évidence la nécessité de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre (GES). A l'heure actuelle, le monde scientifique s'attache donc à innover sur l'amélioration du confort dans les bâtiments tout en réduisant ses consommations énergétiques.

La révolution énergétique

L'accès à l'énergie dans tous les foyers a révolutionné les équipements industriels et ménagers. La population a été l'acteur principal de cette révolution, à tel point que la consommation énergétique finale en France a augmenté de plus de 25% durant les quarantes dernières années [Service de l'observation et des statistiques, 2010]. Elle dépasse actuellement les 160 millions de tonnes équivalent pétrole soit plus de $1,86 \cdot 10^{12}$ kWh. Cette consommation opulente d'énergie est selon de nombreux scientifiques à l'origine de l'accélération du réchauffement climatique. Le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat [GIEC, 2008] conclut qu'une stabilisation des taux de GES présents dans l'atmosphère est possible en 2050 si l'on diminue les émissions de 50 à 80% par rapport à l'an 2000. La température moyenne annuelle aurait alors augmenté en France entre 2 et 2,4°C en 50 ans.

En réponse au réchauffement climatique, 183 pays de la communauté internationale ont ratifié le protocole de Kyōto. En vigueur depuis 2005, il définit les prémisses d'un droit international de l'environnement. Il est basé sur un marché international nommé « bourse du carbone » permettant l'échange d'autorisations d'émissions et sur un mé-

canismes d'« observance » contrôlant le respect des engagements. Les pays européens s'y sont engagés pour une réduction de 8% de leurs émissions entre 1992 et 2012. De plus, la France s'est positionnée en leader de la lutte contre le réchauffement climatique en se fixant des objectifs ambitieux à plus long terme dans le cadre du Grenelle de l'Environnement et du plan d'action européen Energie-Climat adopté le 23 janvier 2008 par la Commission européenne. Pour 2020, l'Europe a pour objectifs :

- une réduction de 20% des émissions de GES ;
- une diminution de 20% de la consommation énergétique ;
- une part d'énergie renouvelable dans la production énergétique d'au moins 20%.

Le Grenelle de l'environnement s'est déroulé en 2007 sous la forme de rencontres entre plusieurs groupes de travail. La table ronde finale a permis à la France de prendre des décisions à long terme en matière d'environnement et de développement durable. Selon le récapitulatif de cette table ronde, le « bâti consomme 42,5% de l'énergie finale française. [...] C'est le gisement principal d'économie d'énergie exploitable immédiatement » [[Le Grenelle Environnement, 2007](#)].

Pour cette raison, l'état français s'est engagé dans la construction de bâtiment à hautes performances énergétiques et incite financièrement la rénovation des bâtiments anciens les plus énergivores. Parallèlement, de multiples projets scientifiques ont été lancés pour définir le bâtiment de demain. Nous l'imaginons tous comme une construction à très faible consommation, capable de produire une grande partie des énergies dont il a besoin et offrant une amélioration du confort de vie à ses occupants.

Le bâtiment écologique et intelligent

Un bâtiment n'est pas conçu pour consommer et il semble logique qu'un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur. Malheureusement, ce n'est que trop rarement le cas. Au cours du XX^e siècle, beaucoup de bâtiments ont été conçus comme des constructions découplées de leur environnement extérieur. Ainsi de nombreux immeubles ont été construits sans tenir compte de leur contexte environnemental mais en les équipant de multiples dispositifs chauffants et éclairants contrôlés indépendamment ou actionnés uniquement par les occupants au grès de leur ressenti. Ces bâtiments sont aujourd'hui parmi les plus gros consommateurs d'énergie.

Les contraintes énergétiques citées précédemment poussent les scientifiques à repenser le bâtiment comme un système écologique et intelligent. Les bâtiments écologiques sont des constructions à basse consommation capables de produire toutes les énergies dont ils ont besoin. Par une démarche d'éco-conception, les ingénieurs dimen-

sionnent les matériaux et les équipements pour exploiter au mieux les caractéristiques de l'environnement (rayonnement solaire, géothermie...). Cette approche écologique n'est envisageable que pour des nouvelles constructions ce qui limite son application dans le parc immobilier actuel. Pour des rénovations, nous cherchons davantage à réduire le gaspillage énergétique par le biais de systèmes intelligents. Dans un bâtiment intelligent, tous les équipements sont interconnectés et communiquent pour réduire la consommation énergétique et améliorer le confort.

L'enjeu économique et social est grand. Le bâtiment intelligent n'est qu'à ses balbutiements et offre de grandes perspectives. Les projets et les financements autour de la gestion de l'énergie dans les bâtiments sont en pleine croissance autant dans les entreprises privées que dans les laboratoires de recherche. De nombreux pôles d'innovation et de compétitivité ont été créés, à l'image du pôle CAPENERGIES au sein duquel Sherpa Engineering est un membre actif.

Sherpa Engineering et l'ingénierie du bâtiment

Sherpa Engineering est une SSIS (Société de Services en Ingénierie Système) spécialisée dans la conception, la réalisation, la validation et le contrôle de systèmes techniques. Les secteurs industriels visés par Sherpa Engineering sont l'automobile, l'aéronautique, les transports et l'industrie. Forte de ses compétences dans les domaines de l'énergétique (moteur thermique, pile à combustible...), de l'automatique (commande prédictive, commande multi-variable...), de l'hydraulique et de l'électrique, Sherpa Engineering a déployé les méthodes de l'ingénierie système dans le secteur du bâtiment.

Depuis 2004, Sherpa Engineering développe son offre de service en ingénierie du bâtiment. Plusieurs études de recherche et développement ont été réalisées dans le cadre de projets labellisés (ANR, CAPENERGIES). Ces projets ont permis en particulier l'étude d'un store à lamelles électrochromes inséré dans un double vitrage ou encore l'étude d'un puit de lumière naturelle orientable permettant de suivre le soleil. En 2006, le projet SAPB labellisé par le pôle CAPENERGIES [Capenergies, 2006] a permis à Sherpa Engineering de se pencher sur les problématiques de la consommation énergétique et du confort au sein d'une pièce. A l'heure actuelle, Sherpa Engineering a pour ambition de développer un référentiel de modélisation pour le contrôle commande du bâtiment. L'objectif à court terme est d'implémenter un simulateur numérique pour l'évaluation, le diagnostic et le contrôle des équipements de confort utilisés dans les bâtiments (chauffage, luminaires, stores vénitiens, VMC...). Ce simulateur a pour mission de représenter le comportement dynamique d'un bâtiment soumis à diverses stratégies de contrôle. Les problématiques industrielles ciblées sont la gestion des consommations

énergétiques et des communications dans les bâtiments.

Parallèlement, Sherpa Engineering a financé deux thèses en collaboration avec le laboratoire AMPERE sur le pilotage du confort optique et thermique dans les bâtiments. La première thèse a été soutenue en 2009 par M. Maximilien Leclercq [Leclercq, 2009] et la deuxième fait l'objet de ce mémoire.

Le laboratoire AMPERE et l'ingénierie des systèmes

Le laboratoire AMPERE a été créé en 2007. Il est issu de la fusion du CEGELY (Centre de Génie Electrique de Lyon), du LAI (Laboratoire d'Automatique Industrielle de Lyon) et de l'intégration de chercheurs spécialisés en Microbiologie Environnementale. Les domaines scientifiques du laboratoire sont :

- L'énergie électrique : créer et optimiser les dispositifs de transport, de distribution et de conversion de l'énergie électrique en prenant en compte leurs environnements ;
- La bio-ingénierie : faire émerger des concepts fondamentaux, des méthodes et des applications en bio-ingénierie par une synergie entre le génie électrique, la science des microsystèmes et la biologie ;
- Les méthodes pour l'ingénierie des systèmes : développer des méthodologies d'analyse et de synthèse pour une conception maîtrisée intégrant les contraintes de commande, de fiabilité et de suivi des systèmes multi-physiques en relation avec leur environnement.

Autour de la problématique des bâtiments, le laboratoire AMPERE a déjà encadré plusieurs études et doctorats sur la gestion de l'énergie dans les habitats multi-sources. Comme par exemple les travaux des doctorants de M. Joseph Virgone et M. Eric Blanco qui ont montrés que l'utilisation de modèles explicites de type boîte grise permettait non seulement un dimensionnement plus pertinent des sources [Catalina *et al.*, 2008] mais également une meilleure maîtrise des ambiances et donc une amélioration du confort des occupants [Raffenel *et al.*, 2008]. D'autres recherches se sont portées sur la prise en compte du confort dans l'élaboration de lois de commande [Leclercq *et al.*, 2011].

L'historique de la thèse

La thèse de M. Leclercq a permis d'aborder le problème de la gestion de l'éclairage dans les bureaux. En effet, la lumière y est souvent mal gérée, ce qui engendre des pertes énergétiques et des situations d'inconfort. Le comportement humain est au coeur de cette mauvaise gestion. Le système imaginé permet de coordonner le pilotage de deux stores vénitiens afin de réguler l'ambiance lumineuse. Pour enrichir le contrôle, la mesure de l'ambiance est réalisée à partir d'une caméra positionnée face aux stores. L'ambiance désirée par l'utilisateur est définie par la quantité de lumière dans la pièce et par un mode de fonctionnement (lecture ou projection) qui permet de basculer entre différentes stratégies de contrôle. Le système développé est économe dans le sens où il module les flux lumineux naturels pénétrant dans la pièce et exploite donc en priorité les apports gratuits pour retarder l'activation des luminaires.

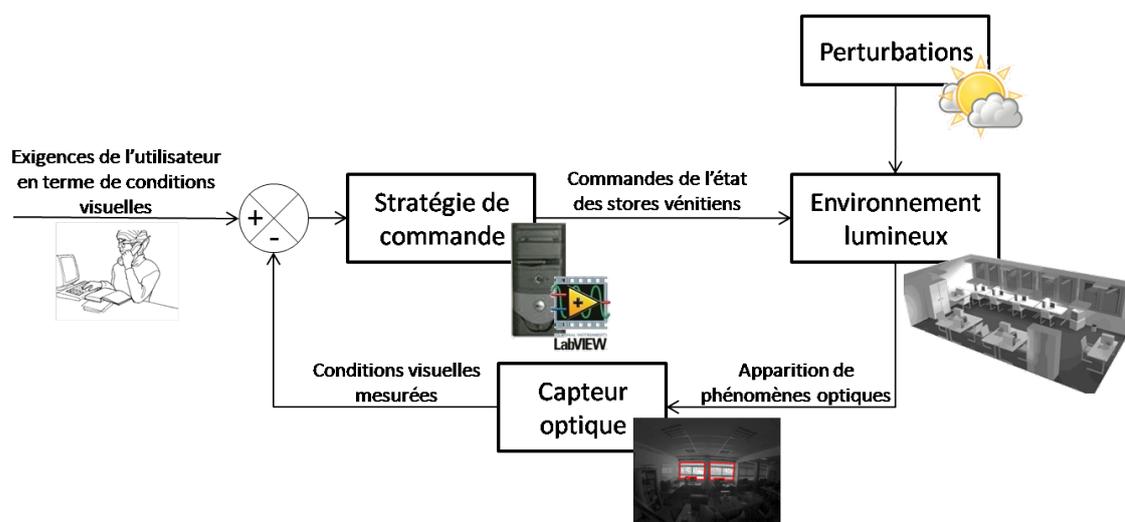


FIGURE 2 – Boucle de régulation du confort visuel

Dans son fonctionnement, la boucle de régulation (voir Figure 2) s'appuie sur un capteur optique spécifique [Anthierens *et al.*, 2008] situé face aux ouvrants pour mesurer l'intensité des sources, l'éclairement dans la pièce et la répartition de la lumière. La réalisation de ce capteur logiciel a permis de mesurer la transmittance optique des stores vénitiens et d'identifier un modèle optique de la pièce [Leclercq *et al.*, 2011]. Ensuite, le niveau de confort visuel est calculé à l'aide d'un noyau flou qui agrège différentes mesures issues d'une image prise par une caméra. La commande consiste simplement à maximiser cet indice de confort en fonction du potentiel lumineux extérieur.

Cette thèse, sur un domaine de compétence nouveau tant pour l'entreprise que pour le laboratoire, a offert des contributions importantes sur la caractérisation du confort visuel, sur la modélisation optique et sur le contrôle des stores vénitiens. Fort

de cette expérience, Sherpa Engineering a reconduit la collaboration avec le laboratoire AMPERE pour, cette fois, mettre en place une architecture de modélisation et de contrôle du bâtiment pour réguler le confort optique et thermique sous contraintes énergétiques.

Les objectifs et la démarche de recherche

L'objectif central de ce travail de recherche est de développer une méthode de contrôle permettant de coordonner tous les équipements présents dans un bâtiment pour répondre à des critères de consommation énergétique ainsi qu'à des critères de confort optique et thermique. Du point de vue de l'Automatique, cela consiste à optimiser un système multi-entrées (les états des actionneurs) et multi-sorties (la consommation et le confort), en interaction avec de fortes perturbations (la température extérieure et l'ensoleillement).

Cette thèse a pour ambition d'apporter des solutions innovantes permettant d'associer de façon cohérente les multiples équipements domotiques déjà présents dans les bâtiments. Nous adoptons pour cela une approche d'automaticien en nous concentrons en majeure partie sur la commande des actionneurs.

Comme chacun sait, il existe de nombreuses solutions techniques aux problèmes d'énergie et de confort dans les bâtiments. Pour la plupart, ces solutions répondent de manière efficace à des problèmes locaux (contrôle d'une chaufferie, d'une ventilation, des luminaires. . .) mais peu d'études visent à faire coordonner ces différentes solutions locales dans un système de contrôle global. Notre approche a donc été la suivante : nous souhaitons concevoir et expérimenter une architecture de contrôle hiérarchisée en adoptant une vision globale du système bâtiment. Ainsi nous espérons tirer parti des approches locales en les intégrant dans une démarche unifiée sur l'ensemble du bâtiment.

Ce sujet est porteur de nombreuses difficultés techniques et sociales. En effet, la complexité des échanges énergétiques au sein d'un bâtiment ainsi que la subjectivité de la notion de confort rendent difficile l'expression d'une solution unique et absolue. Nous avons donc fait le choix de nous orienter vers la simulation et la modélisation pour éviter l'instrumentation coûteuse d'un bâtiment réel. De plus, nous avons travaillé sur un bâtiment représentatif du parc immobilier actuel en cherchant à démontrer l'apport potentiel de l'Automatique pour la rénovation des bâtiments anciens.

Du point de vue industriel, la société Sherpa Engineering vise le développement

d'une offre d'ingénierie système reposant sur la réalisation d'un simulateur de bâtiment équipé d'actionneurs pilotés. Ce simulateur doit disposer d'une généricité adaptée afin de permettre la conception et l'expérimentation de différentes stratégies de contrôle applicables à de multiples bâtiments. Le résultat technique de cette thèse est donc le développement d'un modèle de contrôle de bâtiment répondant aux spécifications suivantes :

- L'architecture du simulateur devra être cohérente avec les systèmes en présence dans le bâtiment. C'est à dire qu'une réflexion doit être initiée afin de caractériser les missions, les fonctions et les interactions entre les systèmes. Cela afin de définir un référentiel commun pour faciliter la modélisation et l'intégration de nouveaux équipements dans le simulateur.
- À partir de ce référentiel, le développement du simulateur sera appliqué à un bâtiment classique équipé d'actionneurs couramment utilisés (chauffage central, radiateurs à eau, luminaires et stores vénitiens).
- Le contrôle des équipements de confort du bâtiment devra permettre de répondre aux deux grandes problématiques que sont la diminution des consommations énergétiques et l'amélioration du confort.

Pour mener à bien cette thèse de doctorat, nous avons structuré ce mémoire en quatre parties :

I. Le système bâtiment, ses missions et son contrôle

La première partie du mémoire est consacrée à la définition de notre référentiel de travail. Ce référentiel pose les bases nécessaires pour définir le système de contrôle hiérarchisé du confort dans les bâtiments. Nous traiterons en premier lieu de la modélisation systémique du bâtiment pour mettre en valeur sa complexité ; cela nous permettra d'énoncer ses missions principales et de définir notre cadre d'étude. L'objectif que nous retiendrons est le maintien d'une atmosphère confortable. Nous présenterons par conséquent les différentes méthodes d'estimation du confort optique et thermique afin de choisir des critères de confort adaptés à la commande. Enfin, nous finaliserons ce référentiel en étudiant les attentes des utilisateurs d'un système de contrôle du bâtiment. Nous définirons ainsi une architecture de contrôle hiérarchisée basée sur un découpage spatial et phénoménologique du système contrôlé.

II. La simulation du bâtiment pour le contrôle des équipements de confort

La seconde partie du mémoire décrit le modèle de simulation du bâtiment et des actionneurs. Comme ce domaine est scientifiquement très riche, nous avons étudié les différentes approches (des plus complexes aux plus basiques) pour synthétiser une approche adaptée à nos contraintes de commande. Nous avons abouti à une modélisation hiérarchisée composée d'un modèle global décrivant l'ensemble du bâtiment, de multiples modèles locaux décrivant le comportement des pièces, et

des modèles énergétiques des actionneurs. Ce modèle de simulation nous permettra d'alimenter le contrôle en estimant les données de mesures.

III. Le contrôle coopératif des équipements de confort

La troisième partie du mémoire se focalise sur la synthèse des commandes et traite du contrôle des différents actionneurs de confort. Nous abordons les différents niveaux de contrôle : du contrôle local des actionneurs au contrôle global de tous les équipements du bâtiment. Nous traiterons dans un premier temps la commande des actionneurs et en particulier l'asservissement en position des stores vénitiens. La conception de ces contrôles bas-niveaux nous permettra de définir plus simplement les contrôles coopératifs. Ensuite, la diminution des consommations énergétiques sera abordée en implémentant une commande prédictive du chauffage central. La prédiction sera réalisée sur la température extérieure et sur l'apport énergétique solaire. Enfin, le confort optique et thermique sera traité localement dans les pièces. Nous implémenterons une commande par optimisation numérique afin de réguler la température opérative moyenne, la quantité de lumière et la répartition des éclairagements dans la pièce.

IV. Les résultats de simulations annuelles et journalières

La dernière partie du mémoire expose les résultats des simulations des différents contrôles que nous avons implémentés. Premièrement, nous montrerons l'intérêt de la commande prédictive du chauffage central en terme de suivi de consigne et les gains énergétiques potentiels. Nous confronterons cette commande à une commande classique de type Proportionnel-Intégral. Ensuite, nous présenterons les résultats du contrôle optimal du confort dans une pièce en couplant l'optique et la thermique et nous observerons la cohérence du comportement des actionneurs. Ici, nous confronterons le contrôle développé au cas d'une pièce non contrôlée et à des contrôles thermiques et optiques binaires. Ces simulations nous ont montré une diminution encourageante des consommations énergétiques du bâtiment (plus de 20%). Du point de vue du confort, nous avons observé une amélioration de la régulation de l'ambiance optique et thermique grâce au contrôle optimal couplé.

Chapitre I

Le système bâtiment

Introduction

La première partie de ce mémoire constitue une étude générale sur l'automatique dans les bâtiments et l'amélioration du bien-être des occupants. Nous aborderons ainsi les problématiques du système bâtiment, et du confort optique et thermique des occupants. Au regard de ces connaissances, nous proposerons une architecture globale de contrôle du bâtiment répondant à des missions de confort et de réduction des consommations énergétiques.

Malgré la relation forte qui lie l'homme à son habitat, le contrôle d'un bâtiment est difficile à concevoir. Pour cela, une étape importante du cycle de conception vise à organiser une pensée globale du bâtiment pour décrire les différents systèmes qui interagissent. Ces systèmes peuvent s'apparenter à des sources d'énergie et l'instrumentation du bâtiment doit permettre d'exploiter au mieux ces sources pour offrir une atmosphère confortable et saine à ses occupants. Pour cela, les stratégies de contrôle doivent être capables d'exprimer avec justesse le confort des occupants. Or le confort est une sensation de bien-être qui transparait lorsqu'une personne se trouve dans une situation agréable. Cette notion est par définition subjective et difficilement mesurable.

Dans un premier temps, nous avons formalisé une description systémique du bâtiment afin de pointer du doigt sa complexité. Cela nous amènera à décrire les différents systèmes en interaction avec le bâtiment et nous expliciterons leurs missions dont la plus importante consiste à assurer le confort des occupants. Nous examinerons donc les grandeurs physiques caractéristiques du confort optique et thermique, et les moyens d'évaluation d'une ambiance confortable. Ces études théoriques nous amèneront enfin à rentrer plus spécifiquement dans notre problématique en énonçant les caractéristiques principales d'un système de contrôle du confort, puis nous présenterons une architecture générale basée sur plusieurs centres de contrôle répartis dans le bâtiment.

I.1 Étude systémique du bâtiment

La modélisation et le contrôle des bâtiments sont des sujets difficiles à appréhender. Ce chapitre a pour ambition de rassembler les idées qui ont permis de définir l'architecture système que nous avons choisie pour le bâtiment. A partir d'une analyse générale du bâtiment, nous avons identifié les systèmes en interaction. Nous nous sommes ensuite intéressés à la décomposition du système bâtiment en différents sous-systèmes d'intérêt. De plus, les fonctions élémentaires du système bâtiment ont été identifiées et analysées afin de retenir celles répondant à notre objectif de recherche, c'est-à-dire le confort thermique et optique des occupants. L'objectif de cette démarche est aussi de poser le cadre du travail et d'étudier le bâtiment dans sa globalité afin de définir une architecture de modélisation et de contrôle adaptée.

I.1.1 Le cadre de l'étude

La vie d'un bâtiment s'étend sur plusieurs dizaines d'années et sa conception fait intervenir de multiples acteurs dans de nombreux domaines (architectes, urbanistes, constructeurs, artisans...). Chaque acteur a sa propre approche du bâtiment et réalise des actions dans le cadre de son référentiel d'activité. Le grand nombre d'acteur rend souvent très difficile leur interopérabilité. La mise en place d'un référentiel commun est en soit un travail de recherche passionnant qui ouvre de nombreuses voies d'améliorations [Oumeziane, 2005]. Pour notre étude liée à la commande des systèmes, nous nous posons dans le cadre d'un bâtiment en **phase d'exploitation**, c'est-à-dire la phase de vie qui est généralement la plus longue.

En phase d'exploitation, le bâtiment est soumis à diverses exigences. Tout d'abord les exigences des occupants, qui souhaitent que le bâtiment leur apporte un confort de vie sans cesse grandissant. L'exploitant, quant à lui, attend du bâtiment une certaine rentabilité et une gestion simplifiée. On peut identifier de cette manière de nombreuses d'exigences. Par exemple, la faible consommation énergétique ou l'accessibilité par les transports en commun. Il ne faut pas oublier les exigences sociétales propres à la fonction du bâtiment (la sécurité dans une prison, l'hygiène dans un hôpital...). Notre spectre d'étude se voulant large, nous garderons à l'esprit deux exigences primordiales qui semblent émerger quelque soit le type de bâtiment, ces exigences sont **l'efficacité énergétique** et **le confort des occupants**.

L'efficacité énergétique et le confort de vie du bâtiment sont liés en grande partie à la conception du bâtiment. En effet, les études préalables à la construction définissent déjà le potentiel intrinsèque du bâtiment à répondre à ces exigences. Cependant, au

cours de son exploitation, le bon respect de ces exigences dépend aussi de l'utilisation du bâtiment. L'action des occupants sur les organes de confort comme les chauffages et les luminaires génère souvent des gaspillages et des inconforts. De plus, ces organes nécessitent un soutien de vie (maintenance, stockage, ravitaillement). Pour notre étude, nous ne nous attarderons pas sur le soutien logistique des équipements mais nous concentrerons nos efforts sur la **coopération des différents organes de confort**.

Pour résumer, notre objectif est le contrôle-commande des différents systèmes présents dans un bâtiment en phase d'exploitation pour diminuer la consommation énergétique et améliorer le confort des occupants. Pour répondre à cet objectif, nous utiliserons une approche systémique.

I.1.2 La démarche système

Dans la langue courante, le mot *système* est très employé et se réfère à un ensemble organisé et fonctionnel. La systémique est un domaine récent [Donnadieu *et al.*, 2003] qui « regroupe des démarches scientifiques permettant d'étudier ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste ». La *systémique* est née au États-Unis et remonte à la deuxième moitié du XX^e siècle. L'ouvrage fondateur est la *Théorie Générale des Systèmes* [Bertalanffy, 1968]. Le paradigme systémique est un mode de réflexion qui définit le système comme un tout dont l'étude des éléments ne suffit pas à comprendre la totalité. L'approche systémique prend forme dans le processus de modélisation. Cette philosophie n'a pas subi de changements majeurs et a déjà donné lieu à de nombreuses applications, aussi bien en biologie, en économie, dans le management des entreprises que dans l'aménagement du territoire.

L'ingénierie système est un domaine en plein essor qui a pour objectif d'intégrer la démarche systémique dans la conception de solutions industrielles. Contrairement à l'approche analytique, qui est une approche de découpage et de reconstruction, l'ingénierie système cherche à formaliser et à appréhender la conception de systèmes complexes dans son ensemble. C'est un processus qui vise à faire travailler des personnes ensemble pour une oeuvre globale, collective et pluridisciplinaire.

La mise en oeuvre de cette démarche passe par un effort d'apprentissage conceptuel des quatre propriétés fondamentales d'un système :

Interrelation Les éléments qui composent un système sont connectés les uns aux autres. Chaque élément se voit à l'origine d'une « cause » et subit en même temps un « effet ». Ces interactions entre les éléments d'un système peuvent se compenser pour amener à un état stable ou au contraire s'amplifier pour engendrer une instabilité. Grâce aux interrelations, un système évolue et peut être régulé.

Globalité Un système est un tout et l'étude des éléments qui le constituent ne suffit pas à comprendre le tout. Le tout est plus que la somme de ses parties. C'est le phénomène d'émergence : les propriétés du système ne sont pas déductibles des propriétés élémentaires. Par exemple, une roue, une chaîne ou un pédalier ne permettent pas en eux même de se déplacer, mais l'assemblage de ces éléments sur une structure mécanique permet la mobilité.

Organisation Un système est organisé de manière structurelle et fonctionnelle. La structure d'un système permet de savoir comment est construit la totalité et ce qui maintient les éléments les uns aux autres. La structure d'un système est constituée des éléments constitutifs, de leur environnement et de leurs interrelations. La fonctionnalité d'un système décrit ce que sa structure lui permet de faire et les plans d'actions qui permettent au système d'agir.

Complexité Un système a une finalité qui est souvent complexe. La notion de complexité requise correspond à la complexité nécessaire pour qu'un système remplisse son objectif. Comme l'a décrit Kenneth E. Boulding [Boulding, 1956], on peut hiérarchiser un système en fonction de sa complexité : du système le plus simple (système mécanique ou cinétique) au système le plus compliqué (système social ou transcendantal). La complexité doit être liée à la finalité du système. Par exemple, pour un objectif de mobilité, un train a une complexité requise inférieure à une voiture car il doit seulement pouvoir aller en avant ou en arrière.

Pour décrire un système, la démarche système consiste dans un premier temps à définir les frontières du système et identifier les différents systèmes en présence. Il existe plusieurs éléments en relation avec un système :

1. Le **méta-système** décrit la connaissance universelle de l'humain sur le système. Il se définit généralement sous forme de normes et de règles.
2. Le **sur-système** décrit le cadre dans lequel se place le système, du contexte environnemental au contexte sociétal.
3. Les **sous-systèmes** sont des systèmes intégrés au système. Ils ont leur propre finalité qui peut être une fonction du système.
4. Les **fonctions** sont des ensembles structurés et fonctionnels qui permettent au système (ou aux sous-systèmes) de remplir leurs missions.

Tous ces éléments sont en interrelation et l'ensemble de ces liens forme l'architecture globale du système (voir Figure I.1). De plus, tout système est accompagné d'une logistique intégrée qui a pour objectif le soutien de vie, c'est-à-dire le maintien en condition opérationnelle du système et de ses différents équipements.

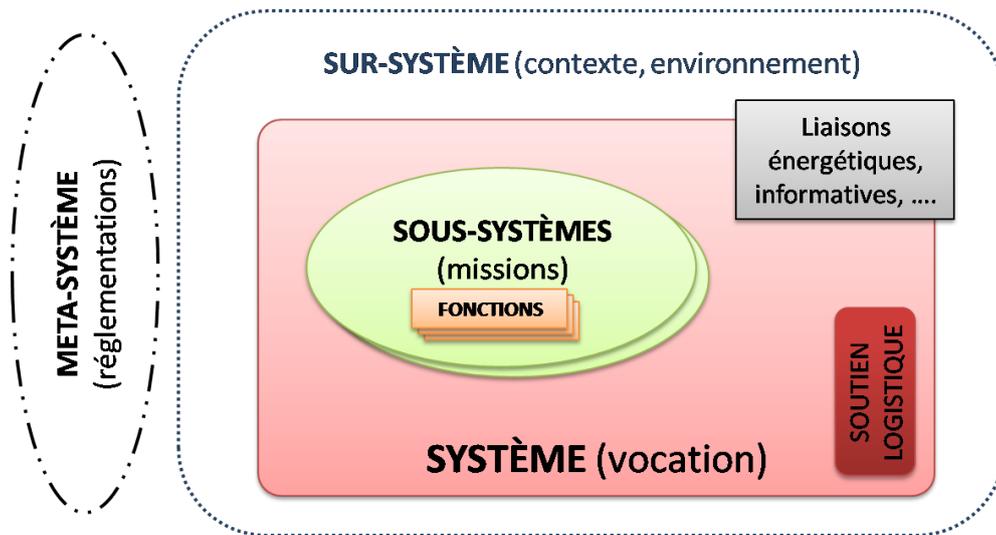


FIGURE I.1 – Architecture globale d'un système

Deux approches sont nécessaires car complémentaires pour étudier et décrire un système. La première est l'approche fonctionnelle qui observe l'activité du système avec tout ce qui interagit avec lui. L'analyse fonctionnelle vise à recenser les différentes fonctions d'un système, à les caractériser et à les hiérarchiser pour améliorer sa conception. La deuxième approche permet de décrire un système d'un point de vue structurel. L'approche structurelle s'intéresse à l'agencement des éléments et à leurs liens. Pour être complètes, les descriptions fonctionnelles et structurelles d'un système doivent bien sûr s'étendre sur l'ensemble de son cycle de vie. Dans la suite de ce chapitre, nous allons appliquer la démarche systémique à l'étude du bâtiment.

I.1.3 L'étude du système bâtiment

Comme pour tout système complexe, il est impossible de prévoir le comportement d'un bâtiment autrement que par la simulation. Ceci est dû au trop grand nombre de paramètres entrant en jeu. Pour cette raison, la systémique est un bon moyen d'aborder la conception d'un modèle de simulation. Par l'approche systémique, nous allons chercher à décrire le bâtiment sans chercher à décomposer le problème mais en tenant compte de sa globalité. La démarche d'ingénierie système que nous allons mettre en place se construit en 3 étapes : La première vise à décrire la relation entre le bâtiment et tout ce qui l'entoure. La seconde s'intéresse au système bâtiment et à sa décomposition. Enfin, la troisième étape présente les différents sous-systèmes porteurs de missions.

I.1.3.1 Le méta- et le sur-système du bâtiment

Pour décrire les interactions entre le bâtiment et tout ce qui l'entoure, nous allons dans un premier temps définir très brièvement son méta-système. Ensuite, nous nous attarderons sur les interactions entre le bâtiment et son sur-système.

Le méta-système regroupe l'ensemble des connaissances de l'homme sur le bâtiment. Une grande partie de ces connaissances sont traduites sous forme d'exigences dans les normes et les réglementations. On peut citer par exemple la Réglementation Thermique RT [Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, 2010] et la norme sur l'éclairage des lieux de travail intérieurs [NF EN 12464-1, 2011]. Il existe aussi de nombreux labels et certifications basés sur des performances à atteindre et qui permettent de bonifier les constructions. Par exemple le label Bâtiment de Basse Consommation énergétique BBC 2005, le label allemand Passiv Haus ou les certifications NF sur la Démarche HQE. Le méta-système du bâtiment est très étendu et pour le définir il est nécessaire de travailler en collaboration avec tous les acteurs du bâtiment pour mettre en commun leurs expériences et leurs référentiels [Auriat, 2008]. Pour l'industrie, la connaissance du méta-système est très importante. En effet, il est nécessaire de se baser sur des normes et sur des réglementations pour développer des produits adaptés aux exigences commerciales.

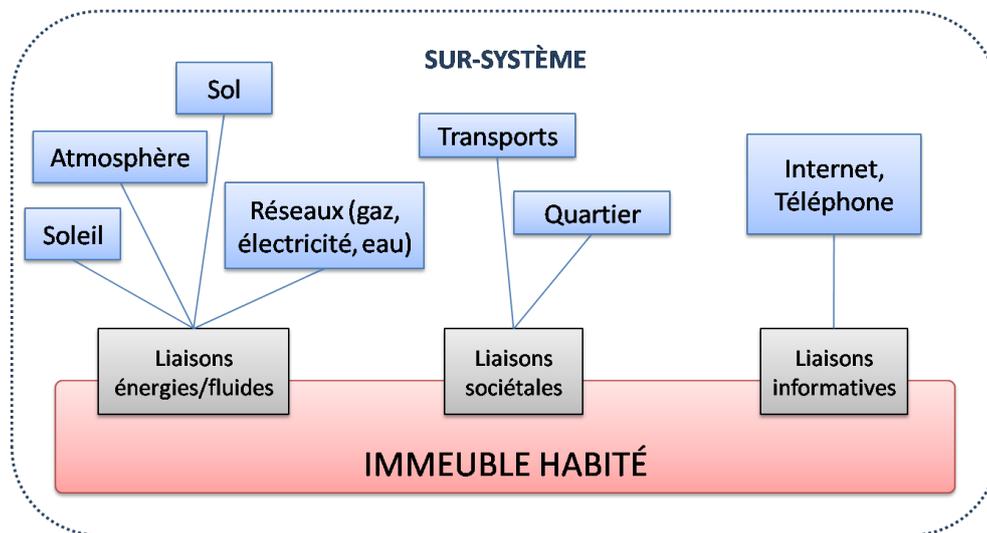


FIGURE I.2 – *Système bâtiment et son sur-système*

Le sur-système du bâtiment représente tout ce qui est extérieur, qui englobe et qui est en interaction avec le bâtiment (voir Figure I.2). Premièrement, nous pouvons y intégrer l'environnement naturel : le soleil, l'atmosphère et la végétation. Il y a aussi les réseaux d'énergies et de consommation qui apportent au bâtiment le gaz, l'électricité et l'eau. De plus, nous pouvons nous intéresser au bâtiment au sein du schéma d'ur-

banisme, c'est-à-dire son quartier, les bâtiments qui l'entourent, les voies d'accès, les routes et les transports en commun. Enfin, les réseaux informatiques (téléphone, internet) s'intègrent de surcroît dans le sur-système. Le champ d'exploration du sur-système est très vaste mais nos objectifs de diminution des consommations énergétiques nous orientent principalement vers l'étude des interrelations entre le bâtiment et les sources d'énergies. Car la forte relation énergétique entre le bâtiment et son sur-système est aujourd'hui au cœur des problématiques industrielles actuelles.

Le bâtiment est un système déjà très codifié, son méta-système est riche et nous ne nous concentrerons pas sur ces aspects réglementaires. Cependant, les problématiques énergétiques actuelles et notre objectif de modélisation du bâtiment nous orientent plutôt vers l'étude des liaisons énergétiques entre le sur-système et le bâtiment. En effet, il semble très important de savoir appréhender les apports énergétiques gratuits pour en tirer le meilleur profit et ainsi réduire les consommations finales d'énergie.

I.1.3.2 Le système bâtiment

Le système bâtiment se définit par sa vocation, sa raison d'être. La finalité d'un bâtiment dépend de son type. Ainsi, un hôpital a pour vocation de permettre d'assurer des soins aux malades et l'école permet d'assurer l'éducation des enfants. Chaque bâtiment répond à des missions spécifiques. Par conséquent, la description des missions d'un bâtiment nécessite de figer le type du bâtiment que l'on souhaite étudier.

Il semble important à ce niveau d'analyse de pousser la réflexion sur la décomposition du système bâtiment. Prenons l'exemple d'un bâtiment de ville qui comporte des logements de particuliers, mais aussi des locaux d'entreprise et des commerces. Chacun de ces logements doit répondre à des missions spécifiques car les besoins d'une entreprise ne sont pas les mêmes que ceux d'une famille. Il est donc clair qu'il existe très souvent un système complexe à un niveau inférieur à celui du bâtiment. Pour s'en assurer, nous pouvons exprimer les quatre propriétés fondamentales des systèmes : Un logement d'entreprise ou de particulier est-il un système au sens de la systémique ?

- Premièrement, tout logement est en échange permanent avec le bâtiment, cette interrelation est forte.
- Deuxièmement, le logement porte une globalité, on ne peut pas vivre décemment uniquement dans une salle de bain, ni dans une cuisine ou dans une chambre, mais le regroupement de ces trois pièces dans un logement assure une vie convenable.
- Troisièmement, un logement est organisé, il est structuré en pièces qui, dans la majorité des cas, répondent justement à une fonction (manger, dormir, discuter).
- Quatrièmement, le logement est porteur d'une finalité complexe et nous pouvons associer au terme de confort.

Ces quatre points (définissant les propriétés fondamentales d'un système) confirment notre vision du logement en tant que système au sein du bâtiment.

Raisonnons plus globalement, en considérant maintenant un îlot de bâtiment. Prenons l'exemple d'un complexe universitaire (voir Figure I.3). Un campus est un espace qui rassemble toute l'infrastructure d'une université, chaque bâtiment y tient une mission qui lui est propre (une résidence, un restaurant, un amphithéâtre, un laboratoire...). Nous sommes clairement dans le même type d'architecture système que dans le cas du bâtiment de ville mais à une échelle d'abstraction plus haute. Le bâtiment s'intègre donc dans une logique de système de systèmes.

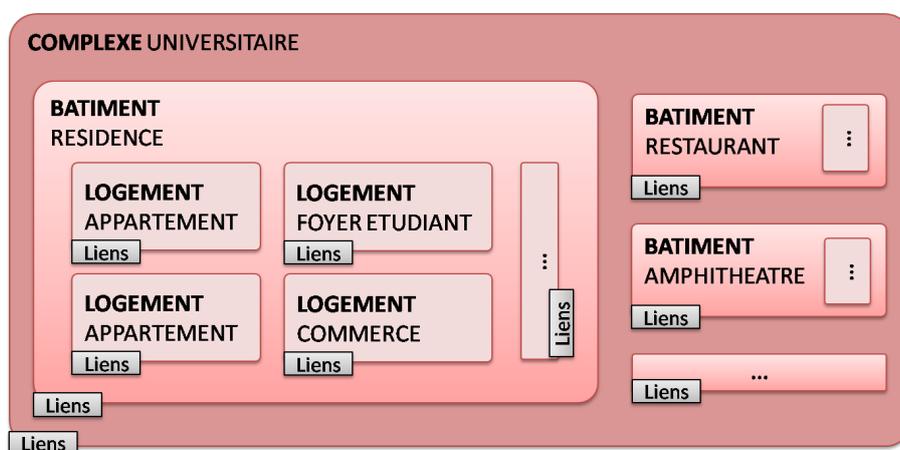


FIGURE I.3 – Décomposition en système de systèmes d'un complexe universitaire

Nous pourrions aussi pousser notre réflexion sur l'échelle de représentation et nous demander si la pièce n'est pas, elle-même, un système complexe. Si la pièce est un système alors elle a sa propre finalité, sinon la pièce peut être vue comme une solution pour répondre à une fonction du logement. L'occupant présent dans une pièce y cherche son optimum personnel. Lorsqu'il conçoit ou aménage la pièce, il le fait en réponse à un besoin. Par exemple, une cuisine a sa place dans un appartement mais n'est pas nécessaire dans une entreprise. La pièce est alors un moyen de satisfaire une fonction, nous sommes par conséquent plus dans le domaine de la solution que du système. La pièce n'est donc pas un système, c'est une solution pour réaliser une fonction.

I.1.3.3 Les sous-systèmes du bâtiment

Dans la démarche d'ingénierie système, les sous-systèmes sont portés par les missions du système. Dans la section précédente, en cherchant à définir le système bâtiment nous avons en fait identifié différents niveaux de systèmes dénommés COMPLEXE, BATIMENT et LOGEMENT. Chacun de ces systèmes a des missions spécifiques. Cette

section vise à décrire les missions communes à ces systèmes.

La vocation principale et commune à tous ces systèmes est qu'ils sont des lieux de vie habités. Ils peuvent être vus comme un soutien de vie pour l'homme. Il doivent donc assurer la protection et le confort des occupants. Nous utiliserons pour ces missions les appellations de *survivabilité* et de *vivabilité* (voir Figure I.4). Par ailleurs, ces systèmes sont vivants et doivent posséder une logistique intégrée pour se maintenir en condition opérationnelle. La logistique du système correspond :

- au ravitaillement en énergies et en fluides ;
- à la maintenance des espaces, des structures et des équipements.

D'un côté, la **survivabilité** est la mission associée à la protection des occupants. Assurer la survie dans le bâtiment nécessite de prendre en compte de nombreux phénomènes dangereux, comme les incendies, les tremblements de terre, la pollution de l'air, les intrusions... De nos jours, la mission de survivabilité est déjà bien intégrée. Par exemple, d'ici 2015, tous les logements devront être équipés d'au moins un détecteur de fumée et d'une alarme [Le président de la République française, 2010]. De manière générale, les contrôles associés à la gestion de la survivabilité sont de type binaire avec des détections d'alarmes. Par exemple les capteurs de fumée qui, s'ils sont activés, déclenchent l'activation de sprinklers¹.

D'un autre côté, la **vivabilité** est la mission associée au confort des occupants. Assurer le confort dans le bâtiment nécessite de se mettre à la place de l'humain pour tenir compte de son ressenti. Les sensations de bien-être physiologique dépendent entre autres de la perception visuelle, de l'équilibre thermique, de l'environnement sonore et des capacités respiratoires liées à la qualité de l'air. Rares sont les bâtiments qui intègrent une gestion active de la vivabilité. Les sources d'inconfort sont pourtant aujourd'hui bien connues grâce notamment aux études sur le Sick-Building-Syndrome datant des années 1970 [Gebbersa et Glück, 2003].

Ici, nous nous gardons bien de définir une mission associée à la diminution des consommations énergétiques. En effet, selon notre approche, l'efficacité énergétique n'est pas une mission, c'est plutôt une contrainte forte pour l'amélioration des organes de confort et du contrôle du bâtiment. La diminution des consommations énergétiques est donc une exigence du contrôle et nous l'aborderons plus tard, lorsque nous nous intéresserons au contrôle du confort et à ses objectifs.

Le confort est une notion subjective dont la modélisation et le contrôle peuvent s'avérer très complexes. Pour continuer la démarche systémique et améliorer notre

1. extincteurs automatiques à eau

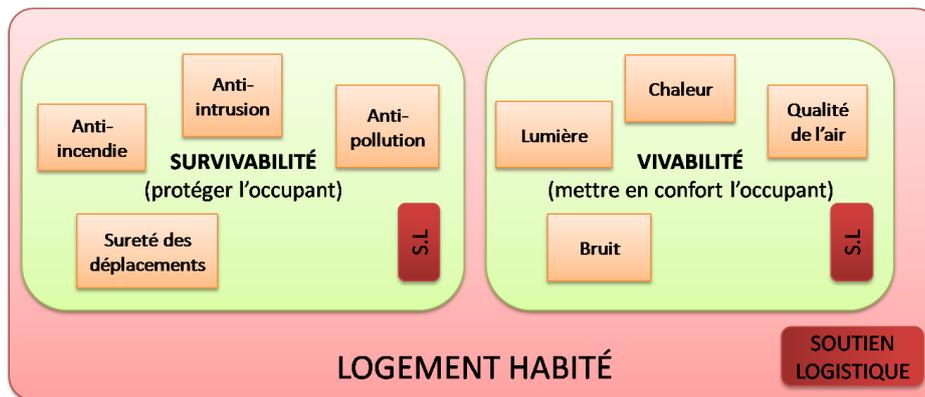


FIGURE I.4 – Missions et fonctions d'un logement

représentation du système bâtiment, nous pouvons maintenant représenter les fonctions de confort sous la forme d'ensemble organico-fonctionnel.

I.1.4 La vivabilité

La vivabilité regroupe l'ensemble des fonctions de confort. L'humain y tient naturellement une place très importante car le confort est une notion subjective qui, par définition, dépend de la disposition des individus à percevoir. Nous pouvons définir le confort comme la sensation de bien-être d'un occupant provoquée par les relations énergétiques qu'il entretient avec son environnement [Roulet, 2008].

On peut distinguer trois ensembles organisés et fonctionnels (EOF) différents dans un sous-système. Ces ensembles peuvent de manière assez générique être dénommés la *Gestion des entrées*, le *Transformateur* et l'*Effecteur*. Dans le cas du sous-système vivabilité, nous les avons identifiés respectivement à la *génération de l'ambiance dans la pièce*, aux *échanges entre l'occupant et son environnement* et à l'*interprétation en sensation de confort* (voir Figure I.5).

La gestion des entrées est représentée par la pièce et ses différents équipements fournisseurs d'énergies. Les équipements, qu'ils soient pilotables ou non, apportent à la pièce de multiples flux énergétiques. Par exemple, un radiateur apporte un flux de chaleur et un luminaire met à disposition un flux lumineux. Certains équipements ont des apports plus complexes comme les ouvrants qui sont une interface directe entre la pièce et l'environnement extérieur. D'autres, tels les stores ou les électrochromes, permettent de moduler l'apport naturel. Toutes ces énergies se rassemblent dans l'espace de la pièce et forment l'ambiance. Le transformateur est l'occupant qui, par le biais de ses sens, perçoit l'ambiance. Les occupants possèdent de nombreux récepteurs capables

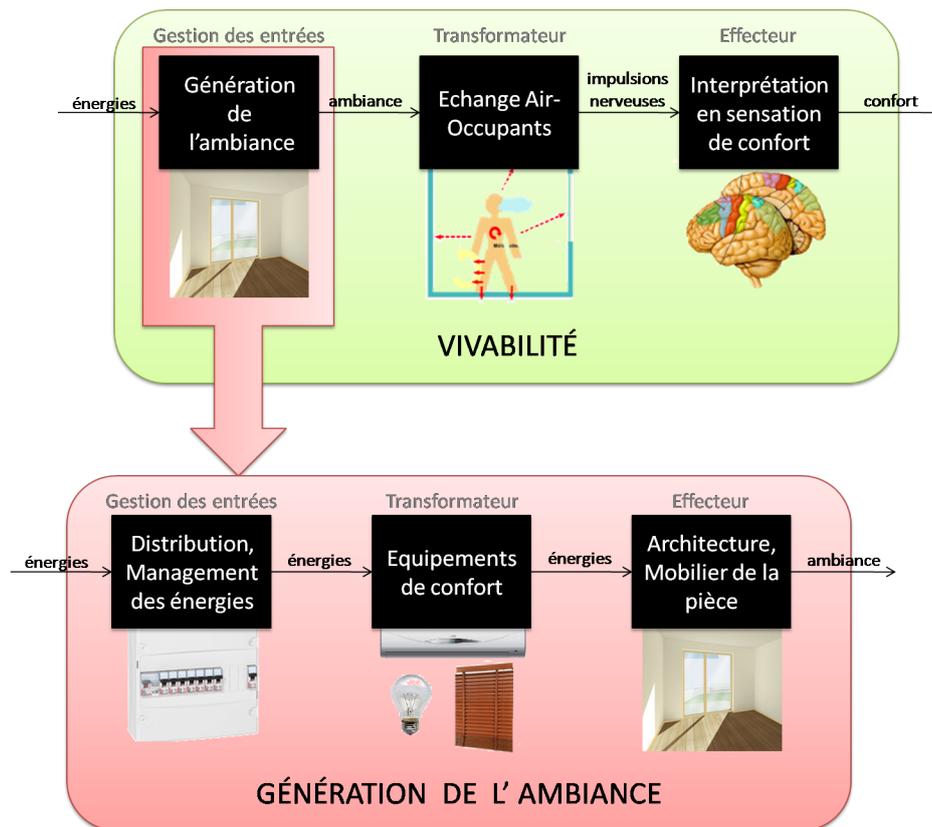


FIGURE I.5 – Décomposition de la vivabilité et de la génération de l'ambiance en EOF

de capter et de traduire les énergies présentes dans la pièce en stimuli nerveux. Par exemple, la thermoception est le processus de perception de la chaleur par la peau, la vision est le processus de perception des luminances par l'oeil. Toutes ces « mesures » de l'ambiance sont par la suite transformées en influx nerveux et transmises à l'encéphale. L'effecteur est représenté par les hémisphères cérébraux de l'occupant qui lui permettent d'avoir conscience de ses sensations. Les influx nerveux sont ici analysés et interprétés en émotions. Ces émotions traduisent la notion de confort. Il est clair que ce processus d'interprétation est subjectif car il est associé à la conscience individuelle.

En observant cette décomposition de la vivabilité, on arrive à dissocier clairement deux grandes problématiques de recherches. La première est la modélisation du bâtiment et la caractérisation de l'ambiance. La deuxième est l'estimation du confort des occupants. C'est sur cette deuxième problématique que nous allons nous pencher dans le chapitre suivant en cherchant à mettre en avant une définition de l'ambiance adaptée au contrôle et à la gestion du confort. En effet, dans notre approche d'automaticien, le cœur de notre étude sera au sein du bloc *Génération de l'ambiance*.

Résumé L'étude systémique présentée dans ce chapitre a mis en exergue les systèmes en présence et leurs interactions au sein d'un bâtiment. Le bâtiment a été défini comme un système vivant complexe ayant une vocation et nécessitant un soutien logistique intégré. Il nous a aussi semblé important de définir les logements comme des systèmes dont les missions peuvent varier en fonction de leurs utilisations (locaux d'entreprise, appartement particulier. . .). Dans cette logique où le bâtiment est un système de systèmes, nous nous sommes intéressés aux missions communes à ces différents systèmes. Ces systèmes ayant pour vocation d'être habités, nous avons identifié les missions de soutien de vie dénommées survivabilité et vivabilité. Nous nous pencherons particulièrement dans la suite de nos travaux sur la vivabilité qui a pour objectif d'assurer le confort des occupants. Dans la suite de cette première partie, nous étudierons donc les notions de confort puis nous nous appuyerons sur cette analyse système pour construire une architecture de modélisation et de contrôle du confort dans le bâtiment.

I.2 Confort thermique et optique

Comme nous venons de l'énoncer dans le chapitre précédent, le confort est la mission principale du bâtiment habité. Pour un scientifique, le confort est une notion difficile à appréhender car liée à la sensibilité de l'occupant, il est donc subjectif. Caractériser le confort est avant tout un travail d'objectivation qui vise à identifier l'impact des différents phénomènes physiques sur la sensation de bien-être chez l'occupant. Ce chapitre présente différentes approches pour l'estimation du confort optique et thermique. Cette étude nous permettra, par la suite, de mettre en avant les critères adaptés à notre problématique de contrôle du confort dans les bâtiments.

I.2.1 Le confort thermique

Comme la plupart des mammifères, l'être humain conserve sa température corporelle constante à environ 37°C en dépit des variations de température du milieu dans lequel il évolue. Pour cela, le corps humain est équipé d'un système de thermorégulation qui exploite les organes pour dissiper ou produire de la chaleur. La perte de chaleur (thermolyse) est assurée par l'hypothalamus dès que la température interne dépasse 37°C . La production de chaleur (thermogénèse) est quant à elle assurée par l'activité musculaire, le métabolisme et la peau dès que la température interne descend en dessous de 34°C . D'un point de vue physique, le confort thermique est atteint lorsqu'il y a un équilibre thermique entre le corps humain et son environnement. C'est à dire lorsque le système de thermorégulation est à son activité la plus faible [Givoni, 1978]. Nous présentons dans ce chapitre les indices et les critères de confort thermique les plus connus présents dans la bibliographie.

I.2.1.1 Les indicateurs du confort thermique

Plusieurs grandeurs physiques impactent le confort thermique. Nous avons regroupé ici les principaux indicateurs trouvés dans la bibliographie.

La température de l'air La température de l'air (notée T_a , aussi appelée température ambiante sèche) est une grandeur physique exprimée en $^{\circ}\text{C}$ qui représente l'agitation thermique de l'air. Elle se mesure facilement avec un thermomètre. C'est l'indicateur le plus connu du grand public, cependant elle ne reflète pas parfaitement la sensation de confort.

La température radiative moyenne La température radiative moyenne (notée T_m^r) est une température qui intègre tous les échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement.

$$T_m^r = \sqrt[4]{\sum_j (\mathcal{F}_{h \rightarrow j} T_j^4)}$$

Avec :

- $\mathcal{F}_{h \rightarrow j}$ le facteur de forme de l'homme vers la source radiative ;
- T_j la température de la source radiative.

En pratique, elle est obtenue en calculant le bilan radiatif entre l'occupant et les diverses sources radiatives (soleil, murs, fenêtres, plafond, sol, radiateurs...).

La température opérative La température opérative (notée T_o , aussi appelée température résultante sèche) est un indicateur qui tient compte de la température de l'air et des températures radiatives. Elle s'exprime comme la moyenne entre la température radiative moyenne et la température ambiante sèche, pondérée respectivement par leur coefficient de transfert thermique.

$$T_o = \frac{h_r T_m^r + h_c T_a}{h_r + h_c}$$

Avec les coefficients de transfert entre l'occupant et son environnement :

- h_r le coefficient de transfert thermique radiatif ;
- h_c le coefficient de transfert thermique convectif.

A l'intérieur d'un bâtiment, les vitesses d'air sont faibles et la température opérative peut être simplifiée :

$$T_o = \frac{T_m^r + T_a}{2}$$

L'humidité relative L'humidité relative (notée φ [%]), aussi appelée degré d'hygrométrie) est le rapport entre la pression de vapeur d'eau de l'air et la pression maximale dans les mêmes conditions. L'humidité relative de l'air ambiant influence l'évaporation de la sueur et par conséquent la thermorégulation du corps.

$$\varphi[\%] = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(T)} \times 100$$

Avec :

- P_{vap} la pression de vapeur d'eau présente dans l'air ;
- $P_{sat}(T)$ la pression saturante qui dépend de la température de l'air.

La charge thermique La charge thermique (notée L'' , aussi appelée stress thermique) correspond à l'écart entre la chaleur produite par le corps et la chaleur dissipée. Pour la calculer, on utilise le modèle de Fanger [Fanger, 1967] qui est le modèle

de confort thermique le plus utilisé car il intègre l'effet de l'aéraulique et de l'humidité sur le confort. Pour réduire l'activité de thermorégulation, il doit y avoir un équilibre entre les pertes de chaleur et la chaleur interne produite. Le modèle de Fanger s'appuie sur l'équation de cet équilibre thermique pour prédire la charge thermique nécessaire à la thermorégulation. On trouve de nombreuses descriptions de ce modèle dans la littérature [Jung, 2009], nous ne nous attarderons pas sur la mise en équation de ce modèle mais nous nous limiterons à énoncer les différentes grandeurs physiques prises en considération. Selon Fanger, il y a cinq modes d'échanges thermiques entre l'occupant et son environnement (voir Figure I.6).

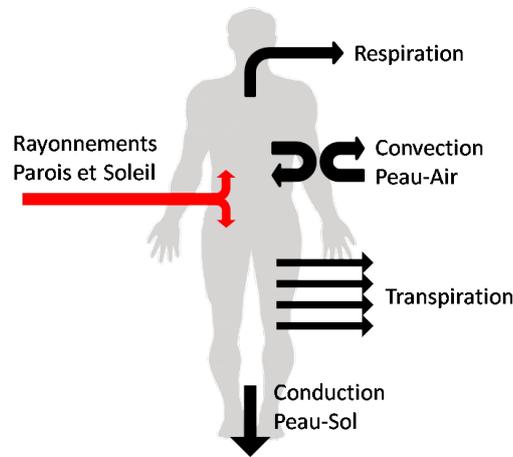


FIGURE I.6 – *Echanges thermiques entre l'homme et son environnement*

La charge thermique correspond à l'écart entre la situation de confort et la situation observée. Cette charge s'exprime en fonction de variables environnementales qui traduisent l'ambiance thermique de la pièce et de variables physiologiques qui décrivent la sensibilité de l'occupant. Les 4 variables environnementales sont :

- la température de l'air ;
- la température radiative moyenne ;
- l'humidité de l'air ;
- la vitesse de l'air ;

et les 2 variables physiologiques sont (valeurs numériques tirées de [Roulet, 2008]) :

- la vêtue qui représente une résistance thermique entre la surface de la peau et l'environnement. Elle s'exprime en m^2K/W ou en *clo* (pour clothing). La vêtue varie de 0 *clo* sans vêtements à 3 *clo* pour une tenue d'hiver ;
- l'activité du métabolisme qui est rapportée à un taux conventionnel exprimé en *met*. Le *met* correspond à une puissance de 58W dissipée par mètre carré de surface du corps. Pour une morphologie classique (homme, 70kg, 1.8m² de surface de peau), l'activité du métabolisme est de 46W au repos, de 93W en activité de travail sur bureau et de 464W en course à pied.

I.2.1.2 L'évaluation du confort thermique

Maintenant que les différents critères de confort thermique sont énoncés, il faut pouvoir les comparer à une référence d'ambiance confortable. Pour la plupart, ces références de confort ont été obtenues à l'aide de statistiques sur des résultats d'études expérimentales effectuées sur un grand panel de sujets humains.

La zone de confort En faisant varier la température et l'humidité de l'air dans une pièce d'étude, Fauconnier a proposé [Fauconnier, 1992] un diagramme de confort hygrothermique (voir Figure I.7). Nous y observons que pour créer une atmosphère confortable, la température de l'air doit être située entre 17 et 26°C et l'humidité relative entre 40 et 60%.

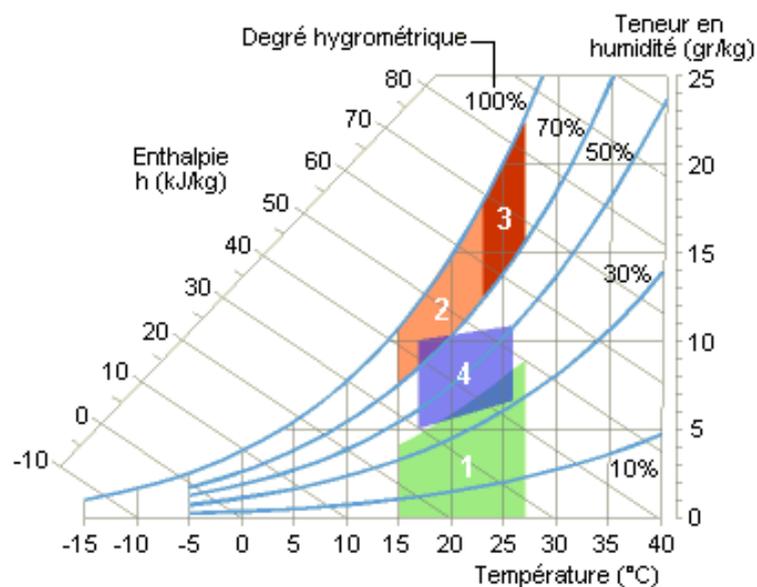


FIGURE I.7 – Zones à éviter (1,2,3) et à privilégier (4) pour le confort (source [Energie+, 2009])

Le PMV et le PPD Le Predicted Mean Vote (PMV) est une échelle de notation du confort thermique allant de -3 (très froid) à +3 (très chaud). En effectuant un millier d'études expérimentales, Fanger a relié la charge thermique (calculée grâce à son modèle) aux votes des sujets (entre -3 et +3). Comme il est basé sur des statistiques, le PMV est un indice moyen qui n'intègre pas le niveau de dispersion des votes. Fanger a donc introduit le Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) qui exprime le pourcentage d'occupant en situation d'inconfort. Le PPD est directement relié au PMV (voir Figure

I.8). L'approche statistique de ces travaux met en exergue la sensibilité des occupants. En effet, nous observons qu'au point de confort thermique optimal (PMV nul) il reste tout de même 5% d'insatisfaits.

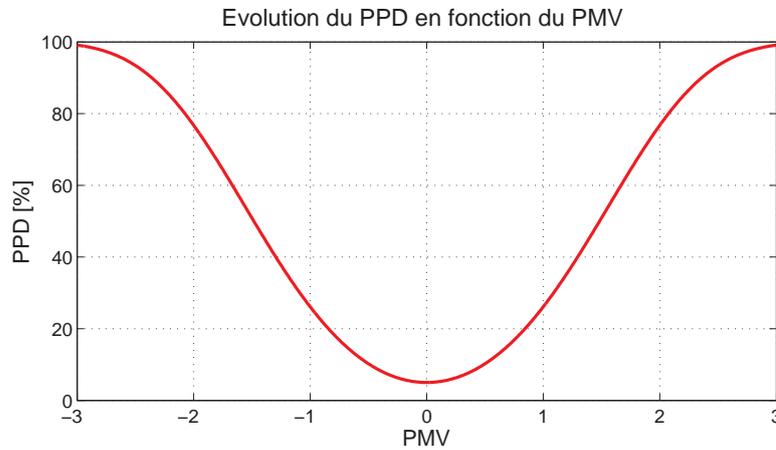


FIGURE I.8 – Evolution du PPD en fonction du PMV

L'ACA L'Algorithme de Confort Adaptatif (ACA) est un indice adaptatif, c'est-à-dire qu'il prend en compte la réaction naturelle de l'occupant face à une situation thermique. L'ACA établit une relation entre température de confort et température extérieure. Le principe sous-jacent est que l'occupant s'adapte au climat (changement de vêture, acclimatation...). L'ACA propose donc de définir la température de confort en fonction des températures moyennes des jours précédents. La température de confort T_c du jour j s'exprime donc :

$$T_c^j = a \sum_{i=1}^n (\alpha_i T_{ext}^{j-i}) + b$$

Avec :

- a et b des constantes déterminées empiriquement ;
- α_i les pondérations sur les jours précédents ;
- T_{ext}^{j-i} la moyenne de la température extérieure du jour $j - i$.

Dans les bâtiments actuels, la régulation des systèmes de chauffage est basée uniquement sur la mesure de la température de l'air. Il semblerait intéressant d'y intégrer l'influence des flux radiatifs pour un meilleur maintien du confort thermique. Parmi les différents modèles de confort, nous retiendrons évidemment le plus connus : le modèle de Fanger. Cependant, la température opérative est aussi un critère très intéressant car sa mise en œuvre est aisée tout en prenant en compte l'influence des flux radiatifs.

I.2.2 Le confort optique

La perception visuelle est assurée par l'oeil. Cet organe sensoriel permet à l'être humain de prendre conscience de l'espace et de distinguer les couleurs. L'oeil capte le flux lumineux qui le pénètre et transforme l'énergie lumineuse absorbée par la rétine en influx nerveux. C'est ensuite le cerveau qui interprète le signal du nerf optique pour reconstituer la scène observée. L'anatomie de l'oeil lui confère des capacités d'adaptation exceptionnelles grâce, entre autres, au contrôle de la sensibilité par l'ouverture de la pupille et au contrôle de la focale par la courbure du cristallin. Le confort optique est atteint lorsque les occupants peuvent distinguer nettement les objets de l'espace dans lequel ils évoluent, sans impliquer une sensation de fatigue [Reiter et Herde, 2004]. Nous présentons dans ce chapitre les indices et les critères de confort optique les plus connus présents dans la bibliographie.

I.2.2.1 Les indicateurs du confort optique

Plusieurs grandeurs physiques impactent le confort optique. Nous avons regroupé ici les principaux indicateurs trouvés dans la bibliographie.

L'éclairement L'éclairement (noté E) est la densité de flux lumineux reçu par unité de surface. Son unité est le lux (lx). L'éclairement est une grandeur ponctuelle et orientée. On parlera généralement d'éclairement vertical ou horizontal.

La luminance La luminance (notée L) est l'intensité lumineuse émise par une source dans une direction par unité de surface apparente. C'est la seule grandeur perceptible par l'oeil. Son unité est le candela par mètre carré (cd/m^2). Dans le cas des surfaces diffusantes, nous pouvons exprimer la luminance émise en fonction de l'éclairement reçu :

$$L = \rho\pi E$$

Avec ρ le coefficient de réflexion de la surface diffusante.

Le contraste des luminances Le contraste des luminances dans le champ visuel permet de mettre en valeur l'homogénéité de la lumière dans l'espace et dans le temps. La présence de zones très sombres ou très lumineuses (contraste spatial) provoque un inconfort visuel important puisque l'oeil n'arrive pas à s'adapter. De la même manière,

le passage d'un environnement très lumineux à un environnement sombre (contraste temporel) nécessite un temps d'adaptation généralement inconfortable.

Le spectre lumineux Le spectre lumineux d'une source correspond au flux énergétique rayonné en fonction de la longueur d'onde. La caractérisation du spectre lumineux est utilisée pour décrire les sources artificielles. Deux indices permettent de caractériser le spectre lumineux :

- la température de couleur, qui est la température à laquelle il faudrait chauffer un corps noir pour que son spectre de rayonnement soit similaire au spectre considéré ;
- l'Indice de Rendu des Couleurs (IRC), qui est la capacité d'une source à restituer les différentes couleurs du spectre visible.

La lumière ayant le spectre le plus riche est évidemment la lumière du jour qui offre par conséquent un confort accru par rapport à la lumière artificielle.

L'éblouissement L'éblouissement est dû à la présence dans le champ visuel d'une source très lumineuse et peut provoquer une réduction importante des capacités visuelles. Un contraste élevé peut aussi engendrer un éblouissement important.

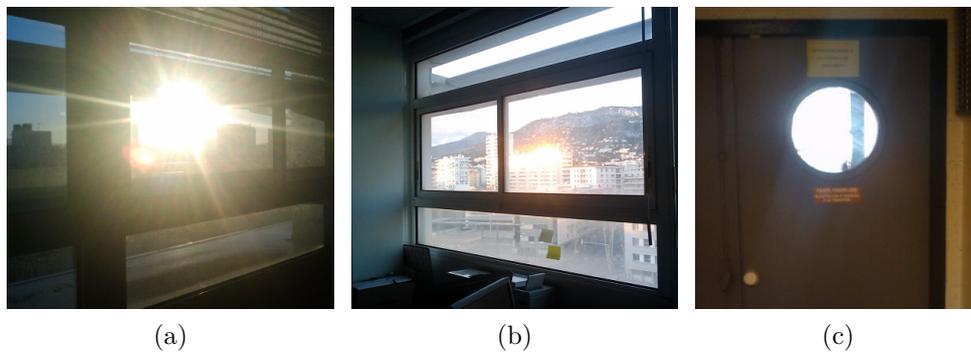


FIGURE I.9 – Exemples d'éblouissements provoqués par le soleil (a), par une réflexion (b) et par un fort contraste (c)

I.2.2.2 L'évaluation du confort optique

Pour évaluer le confort optique, il faut comparer les indicateurs de confort à des références d'ambiances confortables. Comme pour le confort thermique, ces références de confort ont été obtenues à l'aide de statistiques sur des résultats d'études expérimentales effectuées sur un grand panel de sujets humains.

Les indices d'éblouissement Il existe de nombreux indices d'éblouissement (bien répertoriés dans [Dubois, 2001]). Les indices les plus courants sont le Daylight Glare Index DGI [Chauvel *et al.*, 1982], le New Daylight Glare Index DGI_N [Nazzal, 2005], le Unified Glare Rating UGR [CIE, 1992]... Tous ces indices d'éblouissement sont des formules empiriques obtenues à partir d'expérimentations. Les variables importantes utilisées dans la plupart de ces indices sont :

- la luminance de la source potentiellement éblouissante ;
- l'angle solide de la source vue par l'occupant ;
- la position de la source dans le champ visuel de l'occupant ;
- la luminance moyenne dans le champ visuel de l'occupant (luminance de fond).

Le niveau d'éblouissement fourni par ces indices peut ensuite être comparé à une échelle d'éblouissement pour déterminer si son effet est imperceptible, acceptable, gênant ou intolérable.

L'éclairement moyen recommandé Une représentation simple du confort optique est de fixer un niveau d'éclairement recommandé. Dans les bureaux, ce niveau d'éclairement est généralement défini sur le plan de travail en fonction de la fonctionnalité de la pièce et de l'activité qui doit y être exercée (voir Table I.1). On retiendra que pour un bureau d'entreprise, il faut assurer un éclairage moyen d'au moins 500 lux. La grande majorité des normes se basent sur des données d'éclairement car elles sont facilement mesurables ; la mesure des luminances est nettement plus difficile.

Fonctions du bureau	E_m	UGR	IRC
Classement, transcription	300	19	80
Ecriture, Lecture, PC	500	19	80
Dessin industriel	750	16	80
Postes de travail CAO	500	19	80
Salles de conférence et de réunion	500	19	80
Réception	300	22	80
Archives	200	25	80

TABLE I.1 – Exemple de recommandations issues de la norme [NF EN 12464-1, 2011]

Les écarts de luminance L'étude de l'impact des écarts de luminance dans le champ visuel a permis de proposer le Luminance-Ratio [Rea, 1993] comme critère de confort. Ce critère ne permet pas d'évaluer le confort mais plutôt le niveau d'inconfort (ce qui, indirectement, est équivalent). Pour ne pas provoquer d'inconfort, il faut s'assurer que les écarts de luminance sont respectés (voir Table I.2).

Zones de champ visuel	Luminance-Ratio
Tâche visuel/entourage	3/1
Tâche visuel/périphérie	10/1
Sources lumineuses/parois	20/1
Ensemble de l'espace intérieur	40/1

TABLE I.2 – *Rapports de luminance maximaux recommandés*

En optique, pour créer une atmosphère confortable, nous retiendrons qu'il faut utiliser en priorité la lumière naturelle qui a un spectre très riche. De plus, il faut prévenir les variations trop intenses de luminance car elles sont à l'origine d'éblouissements.

I.2.3 Le soleil, principale source d'inconfort

La source primaire de lumière et de chaleur sur notre Terre est l'astre solaire. L'énergie produite par les réactions thermonucléaires du soleil est rayonnée dans l'espace sous la forme d'une onde électromagnétique. Cette énergie est interceptée par la Terre. Sur la couche externe de l'atmosphère, la constante énergétique solaire définie dans la norme CIE 85-1989 est de 1367 W/m^2 et la constante lumineuse est de 133800 Lux [Chain, 2004]. En traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement subit des modifications spectrales et directionnelles : une partie est réfléchi hors atmosphère, une partie est absorbée, une partie est diffusée et le reste impacte la surface de la Terre (voir Figure I.10). L'absorption et la diffusion atmosphérique sont d'autant plus fortes que la couche traversée est importante², elle dépend donc de la position du soleil dans la voute celeste mais aussi de la composition chimique de l'atmosphère et de la présence ou non de nuages.

En France, en été, lorsque le soleil est au plus haut, la densité de flux thermique atteignant le sol peut valoir de 700 à 1000 W/m^2 . L'ensoleillement moyen annuel est de $1600 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Le rayonnement solaire direct représente donc une source très importante d'énergie. Lorsque qu'un occupant est insolé, sa température radiante moyenne augmente donc fortement. Sa température opérative peut alors augmenter instantanément de plus de 8°C [Roulet, 2008] si le rayonnement solaire est supérieur à 500 W/m^2 et son habillage à $0,6 \text{ clo}$.

D'un point de vue optique, la luminance du soleil peut atteindre, sous ciel clair, plus de 10^9 cd/m^2 . La vue du soleil est donc plus qu'inconfortable car elle peut causer des lésions irrémédiables à la rétine. De plus, du fait de la diffusion du rayonnement

2. c'est pour cela que le soleil prend une teinte rouge au lever et au coucher

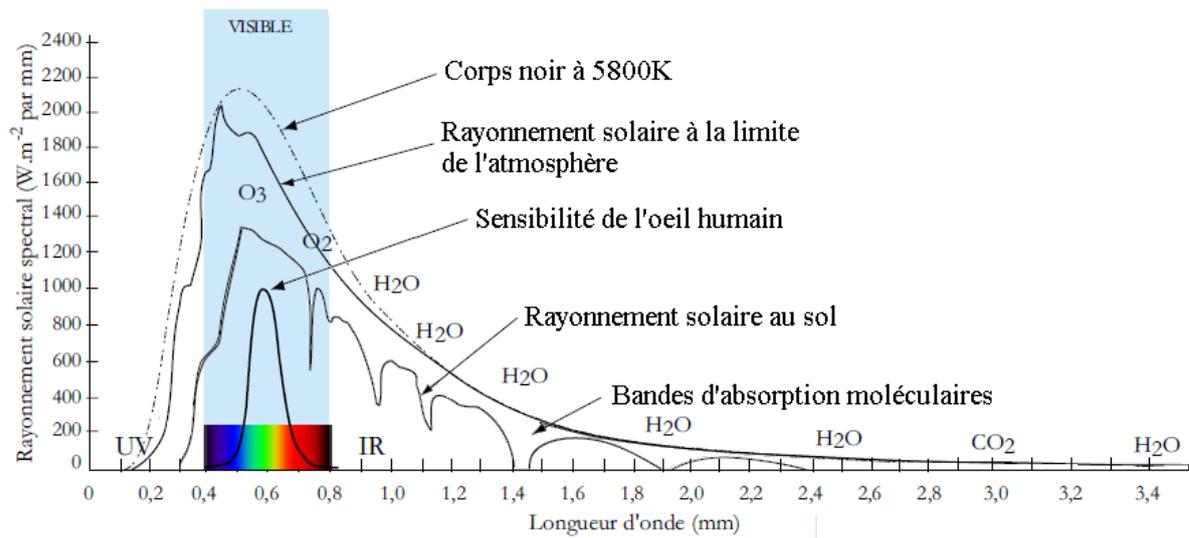


FIGURE I.10 – *Composition spectrale du rayonnement solaire*

solaire dans l'atmosphère, les luminances du ciel peuvent aussi devenir une source d'éblouissement surtout dans la zone circumsolaire.

Le soleil, principale source naturelle de chaleur et de lumière et donc une cause très importante d'inconfort. Cependant, ce grand potentiel énergétique peut aussi, s'il est bien utilisé, devenir un atout indéniable pour la diminution des consommations d'énergie dans un bâtiment. Pour cela, il est nécessaire de transmettre et de distribuer cette énergie dans le bâtiment en évitant de dégrader le confort des occupants. C'est l'objectif des systèmes occultants (stores vénitiens, brises-soleil, persiennes, marquises...) qui permettent de moduler le flux naturel pénétrant dans une pièce. Malheureusement, il n'existe pas encore de systèmes perfectionnés pour les contrôler dans un objectif de confort.

Résumé Les indicateurs de confort présentés dans ce chapitre permettent de quantifier la sensation de bien-être chez l'occupant. En thermique, les indices les plus courants sont la température opérative et la charge thermique de Fanger. La température opérative correspond à une température ressentie qui prend en considération la température de l'air et les températures radiatives. Le modèle de Fanger définit le confort comme le point d'équilibre entre l'homme et l'ambiance thermique qui dépend de données physiologiques comme la vêtue et l'activité. En optique, les indicateurs les plus courants sont l'éclairement moyen et les indices d'éblouissement. L'éclairement moyen correspond à une quantité de lumière reçue sur un plan et dépend de la capacité de la pièce à faire pénétrer de la lumière naturelle. Les indices d'éblouissement sont des formules empiriques qui nécessitent de connaître le champ de vision des occupants. De plus, dans notre démarche orientée vers la gestion et le pilotage du confort, il semble important de caractériser pour quelles raisons une ambiance devient inconfortable. En effet, la connaissance des sources d'inconfort est une information très intéressante pour implémenter des algorithmes de contrôle efficaces capables de contrer l'apparition d'inconfort. En optique comme en thermique, nous avons vu que l'inconfort apparaît lorsque l'occupant est soumis à des écarts énergétiques spatiaux ou temporels importants. Ces écarts se traduisent en optique par des contrastes de luminance dans le champ de vision et en thermique par des variations de température dans la pièce. De cette étude nous retiendrons que les indicateurs de confort optique sont la quantité de lumière, sa distribution, sa qualité et l'éblouissement solaire. Pour le confort thermique nous retiendrons la température de l'air et la température radiative. Nous allons chercher dans la suite de ce mémoire à contrôler ces critères de manière globale en utilisant des actionneurs adaptés pour le confort.

I.3 Architecture de contrôle du bâtiment

Les bâtiments sont équipés de nombreux actionneurs qui permettent d'assurer le confort des occupants. Par système de contrôle du bâtiment, nous entendons le pilotage de l'ensemble de ses équipements de confort pour répondre aux besoins de confort thermique et optique et en cherchant à minimiser la consommation énergétique totale du bâtiment. L'objectif de ce chapitre est de définir l'architecture de ce système de contrôle. Pour cela, nous énoncerons dans un premier temps les grandes problématiques du contrôle du bâtiment et nous définirons la forme générale du système de contrôle. Nous verrons que cette architecture peut s'avérer très complexe à cause de la grande diversité des actionneurs. Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc choisi d'étudier un bâtiment représentatif du parc immobilier actuel et équipé d'actionneurs très courants.

I.3.1 Le contrôle du bâtiment

La performance d'un système de contrôle du bâtiment se juge à sa capacité à générer une ambiance confortable tout en minimisant les consommations énergétiques des actionneurs. Pour présenter les difficultés liées à son développement, nous avons isolé trois grandes problématiques :

Premièrement, les **phénomènes physiques** en présence sont difficiles à appréhender. Les interactions sont très importantes et l'évolution naturelle de l'environnement extérieur perturbe fortement l'équilibre à l'intérieur du bâtiment. Pour être performant, le contrôleur doit par conséquent s'appuyer sur des modèles de commande représentatifs pour prendre en compte l'impact de l'environnement sur le bâtiment.

Deuxièmement, les **équipements de confort** sont des actionneurs complexes (souvent non-linéaires) qui ont des impacts multi-physiques. Prenons l'exemple du store vénitien (que l'on étudiera en profondeur par la suite) : en occultant une partie de la fenêtre avec ses lamelles, le store vénitien module le flux lumineux naturel mais aussi le flux radiatif solaire. L'impact du store est à la fois optique et thermique. Pour être performant, le contrôleur doit donc considérer avec justesse les contributions des différents équipements de confort.

Troisièmement, les **utilisateurs** n'ont pas tous les mêmes attentes vis à vis du système de contrôle. Par exemple, un occupant d'une pièce pense en priorité à son confort personnel alors qu'un propriétaire d'un logement pense avant tout aux consommations énergétiques. Il y a, par conséquent, plusieurs niveaux d'intérêt pour le contrôle. Ce

raisonnement est aussi valable dans l'enceinte d'une pièce, car les différents occupants d'une pièce n'ont pas toujours la même exigence de confort. De plus, les utilisateurs ont une certaine connaissance du comportement du bâtiment et de ses actionneurs. Pour être accepté, le contrôle doit donc prendre en compte les exigences des différents utilisateurs et doit laisser une marge de manœuvre importante pour faciliter son acceptabilité.

De nombreuses études ont montré qu'il était possible de satisfaire l'occupant tout en réalisant des contrôleurs assez performants, comme les travaux de Kolokotsa sur le contrôle de la qualité de l'air [Kolokotsa *et al.*, 2009] et les études de Guillemin sur le contrôle de la lumière naturelle [Guillemin et Morel, 2001]. Depuis quelques années, de nouvelles technologies de commande sont mises en avant comme la logique floue [Anthierens *et al.*, 2008], les réseaux de neurones ou les algorithmes génétiques [Guillemin, 2003] qui permettent une meilleure adaptation aux besoins des occupants. Cependant, les performances et les sensibilités de ces systèmes de contrôle n'ont pas encore été clairement analysées. De plus, ces travaux ont été abordés dans des contextes très spécifiques et n'ont pas permis de définir une architecture de contrôle adaptée à tout type de bâtiment. Pour cette raison, nous allons maintenant présenter une architecture de contrôle assez générique, basée sur les différents systèmes identifiés lors de l'étude systémique du bâtiment. Plus tard, nous appliquerons cette architecture à un bâtiment classique qui nous servira de base d'étude pour l'expérimentation du contrôle.

I.3.2 L'architecture de contrôle

Comme nous l'avons vu lors de l'étude systémique, il y a deux systèmes imbriqués : le système bâtiment qui est composé de plusieurs systèmes logements. Les logements sont organisés en pièces qui assurent la fonction de vivabilité. Pour chacun de ces systèmes, il existe au moins un centre de contrôle.

Le système de contrôle du bâtiment (voir Figure I.11) interagit avec de nombreux utilisateurs : les plus nombreux sont les occupants (au niveau PIÈCE) qui agissent directement sur les actionneurs présents dans les pièces pour répondre à leurs besoins de confort. Au dessus, il y a les propriétaires et les locataires (au niveau LOGEMENT) qui visualisent les consommations énergétiques de leur logement, qui agissent sur les actionneurs partagés des différentes pièces et qui ont la possibilité de contraindre le fonctionnement de tous les actionneurs du logement. Enfin, il y a les gestionnaires et les exploitants (au niveau BATIMENT) qui ont les mêmes besoins que les propriétaires des logements mais avec une vision plus globale sur le bâtiment. Il y a donc clairement trois niveaux d'action.

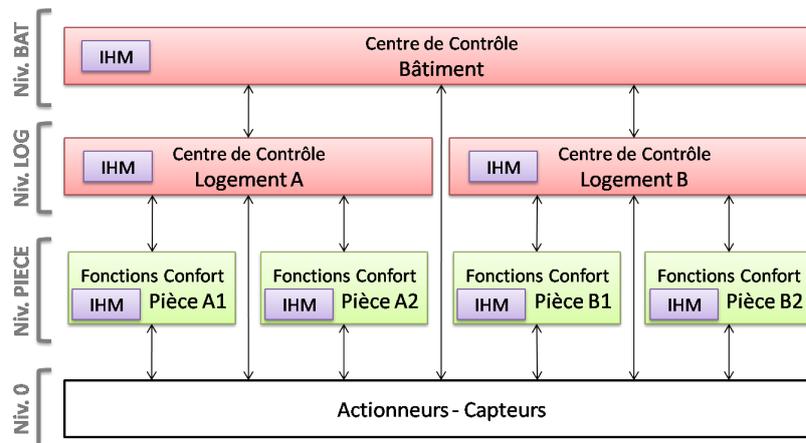


FIGURE I.11 – Architecture fonctionnelle du contrôle d'un bâtiment

Il est important de rappeler que dans notre démarche d'ingénierie système, la raison d'être du bâtiment est uniquement de procurer le confort à ses habitants. Or cette mission est portée par les fonctions de confort dans chaque pièce. La mission des centres de contrôle se limite à de la supervision dans un objectif global de réduction des consommations énergétiques des actionneurs.

Les centres de contrôle Bâtiment et Logement Ils représentent une supervision des fonctions de confort Pièce. Leurs missions sont :

1. La gestion et le pilotage des équipements partagés du bâtiment ou du logement (chaudière de chauffage central, VMC, générateur électrique de secours. . .). Tous ces équipements nécessitent d'être contrôlés mais peuvent déjà être équipés d'une régulation interne. Par conséquent, la gestion des équipements partagés signifie simplement s'assurer de leur bon fonctionnement et de paramétrer leur régulation pour satisfaire certaines contraintes énergétiques de consommation.
2. La gestion de la consommation énergétique totale du bâtiment, des logements, des pièces et de tous les équipements partagés. L'objectif est d'identifier les pertes d'énergie en comparant par exemple la somme des consommations des logements et des équipements partagés avec les données d'un compteur à l'entrée du bâtiment.
3. La supervision des logements ou des pièces en définissant des objectifs de confort spécifiques. Ces objectifs seront des références de fonctionnement pour la régulation du confort dans les logements. Typiquement, ces objectifs permettront au bâtiment de demander à certains logements de favoriser le confort thermique plutôt que le confort optique ou de n'utiliser que les apports énergétiques naturels.

Les fonctions de confort Pièce Elles correspondent aux contrôles de tous les équipements présents dans les pièces pour assurer le confort souhaité par les occupants. Leurs missions sont :

1. Le contrôle coordonné des équipements présents dans la pièce, en concordance avec les besoins des occupants et les objectifs définis par leur superviseur Logement.
2. La gestion de la consommation énergétique de la pièce, en privilégiant au mieux les apports énergétiques gratuits.

Le système de contrôle est donc en interaction avec des utilisateurs situés à trois niveaux d'intérêt différents (la pièce, le logement et le bâtiment). Pour être performant, le système de contrôle doit être correctement organisé pour répondre aux différentes exigences des utilisateurs. Cela peut s'avérer très complexe car les besoins sont souvent antagonistes. Nous proposons donc une architecture de contrôle assez générique (voir Figure I.12) qui met en lumière les trois niveaux d'action où seule l'échelle de représentation change.

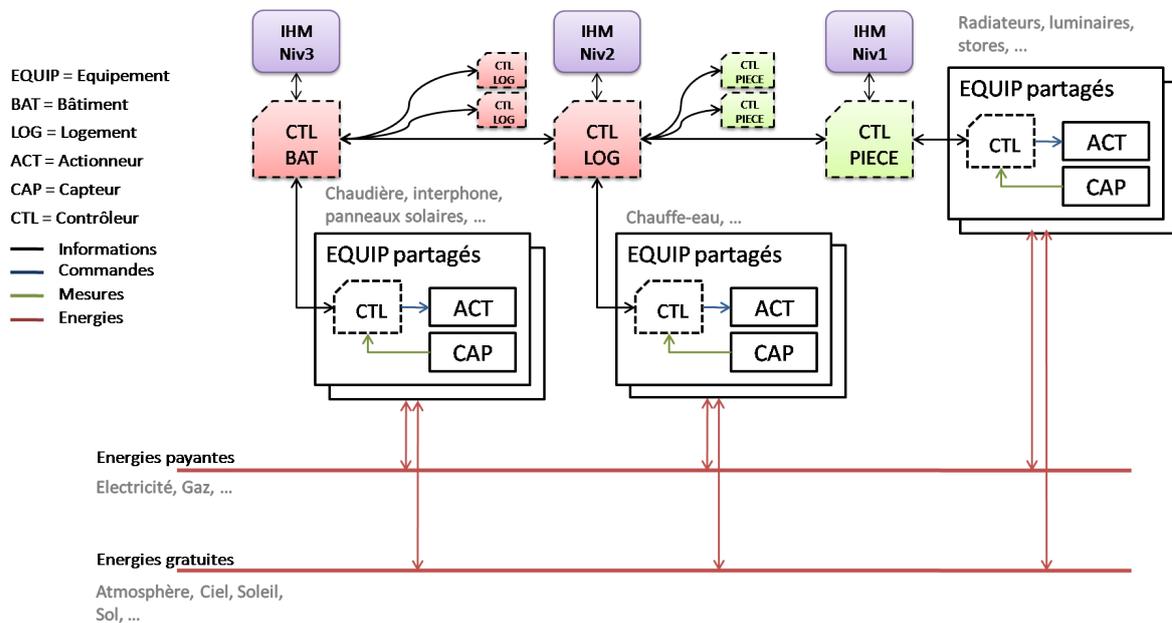


FIGURE I.12 – Vue globale de l'architecture du système de contrôle du bâtiment

Pour définir avec plus de détails l'architecture système que nous allons implémenter, il est primordial de choisir le type de bâtiment que nous souhaitons étudier. En effet, l'architecture et la complexité du système de contrôle dépendra naturellement du type du bâtiment étudié, de ses propriétés physiques et de ses équipements de confort.

I.3.3 Le bâtiment d'étude

Pour les besoins de notre étude, nous souhaitons tester l'architecture de contrôle sur un bâtiment classique. Notre objectif est de concevoir un simulateur de contrôle simple et accessible pour pouvoir, a posteriori, continuer son développement et permettre à Sherpa Engineering de construire sur cette base son offre d'ingénierie bâtiment. Pour concevoir une première version du simulateur, nous avons choisi de nous intéresser à un bâtiment représentatif du parc immobilier actuel.

Le bâtiment Le bâtiment que nous allons étudier est inspiré de l'immeuble du laboratoire AMPERE (voir Figure I.13) situé sur le campus de l'INSA Lyon à Villeurbanne. Ce grand bâtiment a la forme d'un parallélépipède rectangle et héberge en grande majorité des bureaux et des salles de réunion. Pour simplifier l'architecture de contrôle, nous considérerons que le bâtiment ne comporte qu'un seul logement, ainsi on peut réduire l'organisation du contrôle à un centre de contrôle niveau bâtiment et à des fonctions de confort pour les pièces.

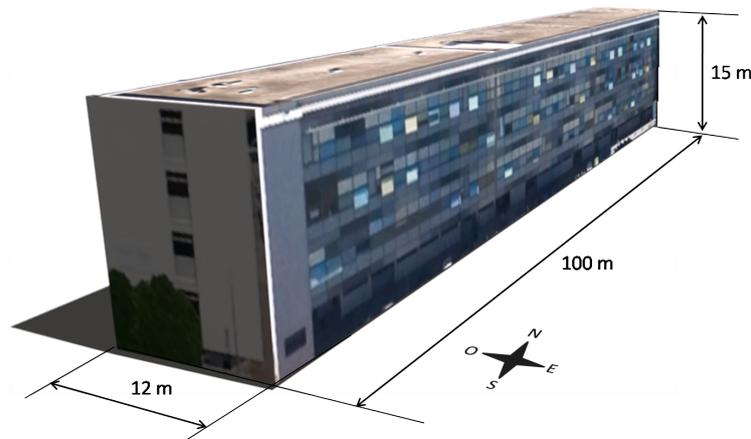


FIGURE I.13 – Illustration du bâtiment d'étude inspiré du bâtiment du laboratoire AMPERE

La pièce Au sein de ce bâtiment, nous souhaitons plus particulièrement nous intéresser à l'effet du contrôle dans une pièce. La pièce que nous avons choisi d'étudier est un bureau (voir Figure I.14) donnant sur les façades Sud ou Nord du bâtiment d'étude. La pièce a la forme d'un parallélépipède rectangle à base carrée de 5 mètres de côté, la hauteur de plafond est de 3 mètres. La pièce possède 2 ouvrants carrés de 2 mètres de côté, soit une surface vitrée totale de 8 mètres carrés.



FIGURE I.14 – Illustration de la pièce d'étude

Les équipements Pour que le contrôle ait une raison d'être, il faut instrumenter le bâtiment avec des équipements de confort. La définition de ces équipements va énormément influencer l'architecture de contrôle du bâtiment. Nous avons choisi d'intégrer au bâtiment plusieurs équipements très courants : un chauffage central, des stores vénitiens intérieurs et des luminaires plafonniers (voir Figure I.14) :

- Le chauffage central permet de chauffer toutes les pièces du bâtiment à partir d'un seul générateur de chaleur. La production de chaleur est réalisée par une chaudière qui transforme une énergie primaire en chaleur portée par un fluide caloporteur. Ce fluide caloporteur circule ensuite dans un circuit de tuyauteries qui alimente des radiateurs présents dans chaque pièce. Dans notre architecture de contrôle, la chaudière correspond donc à un équipement partagé au niveau du bâtiment qui fournit une énergie (sous la forme d'un fluide chaud) aux radiateurs qui sont des équipements contrôlés au niveau des pièces. Pour les besoins de nos simulations, nous utiliserons un modèle de chauffage central qui permet la réversibilité afin de devenir un générateur de froid en été.
- Les stores vénitiens intérieurs sont des équipements qui s'installent à l'intérieur sur les fenêtres pour moduler le flux passant. Le store vénitien est donc un équipement multiphysique car il a un impact à la fois thermique et optique. Les deux stores vénitiens présents dans la pièce sont pilotables indépendamment.
- Un luminaire plafonnier permet de générer un flux lumineux artificiel grâce à une ou plusieurs ampoules. Tous les luminaires d'une pièce sont liés à la même commande.

Actionneur	Niveau d'action	Quantité	Remarque
Chaudière	BÂTIMENT	1	Producteur d'eau chaude/froide pour le circuit de chauffage
Radiateurs à eau	PIÈCE	1	Effecteurs thermiques équipés d'une vanne thermostatique
Stores vénitiens intérieurs	PIÈCE	2	Systèmes occultants multiphysiques pilotés indépendamment
Luminaire	PIÈCE	4	Sources artificielles de lumière en pilotage unique

TABLE I.3 – Équipements de confort présents dans le bâtiment d'étude

Le contrôle L'objectif du contrôle du bâtiment est de coordonner le pilotage de tous ces équipements (voir Table I.3) pour réduire leurs consommations énergétiques, et ceci en assurant le niveau de confort souhaité par les occupants. Pour réduire les consommations énergétiques, l'attention se portera principalement sur les actionneurs énergivores, c'est-à-dire la chaudière et les luminaires.

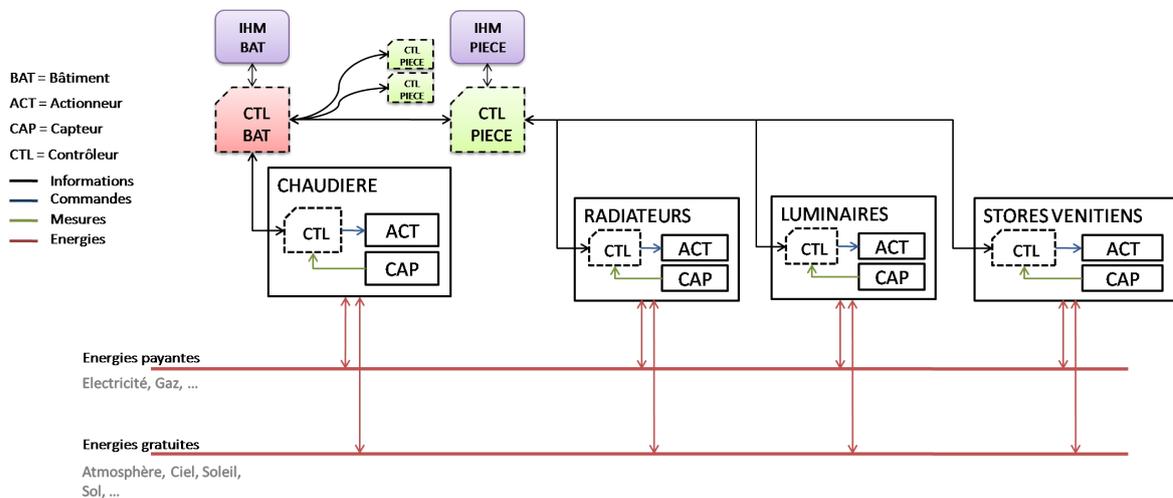


FIGURE I.15 – Vue globale de l'architecture de contrôle du bâtiment d'étude

En regard de l'architecture du système (voir Figure I.15), nous allons implémenter deux contrôles, l'un à l'échelle du bâtiment et l'autre à l'échelle de la pièce. Au niveau bâtiment, les variables à commander sont :

- La température moyenne de l'air dans le bâtiment ;
- La consommation du chauffage central.

Dans la pièce, la notion de confort est plus importante. Pour cette raison, les grandeurs à commander sont :

- La température opérative moyenne dans la pièce ;
- La quantité et la répartition de la lumière dans la pièce ;
- La consommation des luminaires, les stores vénitiens et du radiateur.

Les conditions environnementales Villeurbanne est une commune limitrophe de Lyon. Le climat y est tempéré avec une influence maritime de la mer Méditerranée. La température moyenne varie en hiver entre 1°C et 6°C et en été entre 16°C et 26°C (voir Figure I.16). La durée moyenne d'ensoleillement est d'environ 2100 h/an et le potentiel énergétique solaire moyen tourne autour de 1400 kWh/m²/an (source [ADEME, 2012]).

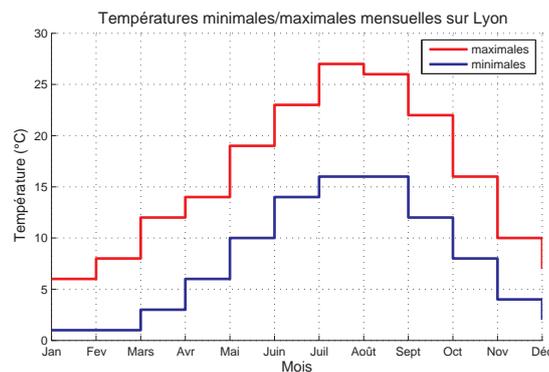


FIGURE I.16 – *Températures moyennes à Lyon*

Résumé L'architecture de contrôle présentée dans ce chapitre repose sur trois niveaux : le bâtiment, les logements et les pièces. Cette architecture est issue d'une décomposition du contrôle en fonction de l'échelle d'intérêt des utilisateurs. Le bâtiment est donc équipé d'un nombre important de contrôleurs comprenant : un contrôleur du bâtiment pour piloter les actionneurs partagés du bâtiment et pour superviser les différents logements, un contrôleur pour chaque logement pour piloter les actionneurs partagés du logement et pour superviser les pièces, et un contrôleur dans chaque pièce pour assurer la fonction de confort qui est la raison d'être du bâtiment. Pour expérimenter ce contrôle, nous avons choisi d'étudier un cas concret au travers d'un bâtiment illustrant le parc immobilier actuel. Le bâtiment d'étude est situé dans la périphérie de Lyon et est équipé d'un chauffage central, de stores vénitiens intérieurs et de luminaires plafonniers. Au sein de ce bâtiment, nous nous intéresserons en particulier à l'impact du contrôle sur une pièce de bureau. Les deux prochaines parties ont pour objectif d'implémenter le contrôle de ce bâtiment dans le cadre d'un simulateur logiciel. La partie suivante présentera le modèle physique du bâtiment d'étude sur lequel s'appuiera la synthèse des commandes et qui permettra ensuite de les évaluer. Le contrôle des actionneurs de confort sera abordé dans la troisième partie de ce mémoire.

Conclusion

Dans la première partie de cette thèse, nous avons abordé de manière générale les problématiques liées au confort et au contrôle dans les bâtiments.

Nous avons mis en avant la complexité de la modélisation du bâtiment. En effet, le bâtiment est un système en constante évolution qui est soumis aux variations climatiques et qui doit répondre à de multiples exigences. En occultant les diverses missions sociétales, nous nous sommes concentrés sur la mission principale qui consiste au maintien d'une atmosphère confortable.

Ainsi, nous nous sommes intéressés au confort et nous avons décrit les multiples grandeurs d'ambiance impactant la sensation de bien-être chez l'occupant. Nous avons mis en avant deux critères qui semblent offrir un intérêt certain pour le contrôle. Ces critères sont la température opérative et l'éclairage moyen.

En identifiant les acteurs du contrôle d'un bâtiment, nous avons mis en avant une architecture innovante basée sur la décomposition du bâtiment en plusieurs niveaux de contrôle. Nous avons présenté une architecture de commande hiérarchisée, composée de contrôleurs pilotant les équipements partagés à l'échelle du bâtiment, des logements et des pièces.

Notre contribution dans ce chapitre se situe dans la démarche de conception de l'architecture de contrôle basée sur une décomposition systémique du bâtiment.

Chapitre II

La simulation du bâtiment

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons détaillé le référentiel de modélisation du bâtiment et nous l'avons défini comme porteur d'une mission de vivabilité, correspondant au maintien d'une atmosphère confortable et saine dans tout l'espace du bâtiment. L'étude s'est ensuite orientée vers la caractérisation des critères de vivabilité : le confort optique et thermique et les sources d'inconfort. Enfin, nous avons présenté une architecture novatrice de contrôle des équipements de confort du bâtiment. Les deux prochains chapitres du mémoire vont permettre d'implémenter cette architecture de contrôle avant de l'expérimenter en simulation.

Plusieurs problèmes se sont posés lorsque nous avons souhaité développer et tester un contrôle global des actionneurs de confort. Tout d'abord, pour des raisons de coût et de temps, nous n'avons pas pu instrumenter réellement un bâtiment. Outre cela, il faudrait plusieurs années pour expérimenter des stratégies de contrôle car les conditions climatiques qui dictent l'évolution thermique et optique du bâtiment sont très lentes. Ces problèmes nous ont donc poussé à nous orienter vers une simulation du bâtiment et de ses actionneurs pour prédire son comportement et ainsi alimenter le contrôle. En utilisant les outils offerts par les mathématiques, la physique et l'informatique, nous avons donc développé des modèles numériques qui tentent de prédire le comportement du bâtiment soumis à différentes sources d'énergie. Le deuxième chapitre de ce mémoire présente notre approche pour la simulation du comportement thermique et optique du bâtiment.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons une étude rapide des différentes méthodes de simulation thermique et optique classiquement utilisées pour prédire le comportement d'un bâtiment. Ensuite, nous ferons un choix parmi ces techniques afin de définir une architecture de modélisation orientée contrôle. Dans la deuxième partie, nous décrirons les actionneurs de confort et la modélisation de leurs apports optiques et thermiques sur le bâtiment ainsi que leurs consommations énergétiques. Ensuite, dans la troisième partie, nous nous pencherons sur la physique du bâtiment et nous exposerons le modèle optique et thermique que nous avons retenu à l'échelle du bâtiment et au niveau des pièces. Enfin, nous validerons dans la dernière partie la cohérence des modèles développés en observant des résultats de simulation sur une année.

II.1 Simulation thermique et optique du bâtiment

Lors des phases d'étude d'un bâtiment, les architectes réalisent des simulations thermiques et optiques afin d'évaluer la qualité des ambiances qu'ils conçoivent et de dimensionner les actionneurs de confort aux besoins des occupants. Pour ce faire, ils utilisent des logiciels de simulation et des outils de prédétermination qui permettent d'estimer l'évolution des grandeurs physiques d'un système en se reposant sur des modèles mathématiques et physiques, et résolubles le plus souvent à l'aide de méthodes numériques. La qualité d'un outil de simulation se juge à la justesse (quantification) et à la finesse (discrétisation) de ses résultats. Pour notre étude, nous cherchons à concevoir un modèle de bâtiment afin d'expérimenter diverses stratégies de contrôle. Cet objectif de commande est très différent de celui des architectes, cependant les méthodes numériques de prédétermination restent les mêmes. Il apparaît par conséquent nécessaire d'étudier les différentes approches de modélisation afin de construire notre modèle sur des méthodes éprouvées. L'objectif n'est pas de faire une description exhaustive de ces méthodes, mais plutôt d'introduire leur principe. Cette étude nous permettra de mettre en lumière les méthodes les plus adaptées à un contexte de commande. En conclusion, nous énoncerons les principaux fondements du modèle orienté contrôle que nous allons développer.

II.1.1 Les méthodes de modélisation thermique

La modélisation thermique d'un bâtiment vise à prédire les transferts de masse et de chaleur à l'intérieur des bâtiments. Après un court rappel des quatre modes qui régissent les transferts de chaleur (la conduction, la convection, le rayonnement et le transfert de masse), nous présenterons les principales méthodes utilisées pour la modélisation thermique des bâtiments.

La **conduction** est le principe de propagation de la chaleur par proximité moléculaire entre deux corps. Elle n'est possible que dans les solides. L'énergie est transférée par contact entre les deux corps. Le flux thermique échangé entre deux matériaux à température respective T_1 et T_2 en contact sur une surface S de conductivité thermique λ et d'épaisseur e s'exprime par :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{\lambda S}{e} (T_1 - T_2)$$

Dans un bâtiment, la conduction concerne les ponts thermiques et les parois.

La **convection** est le principe de propagation de la chaleur par proximité moléculaire entre deux corps dont l'un est un fluide. L'échange est intensifié par le mouvement

du fluide. La convection peut être naturelle ou forcée et est une fonction du niveau de turbulence de l'écoulement. Pour un écoulement à une température T_2 autour d'une structure à une température T_1 de surface S et de coefficient convectif h , l'expression du flux de chaleur en convection est la suivante :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = hS(T_1 - T_2)$$

Dans un bâtiment, des phénomènes de convection se produisent entre l'air et les structures (parois, vitrages...).

Le **rayonnement** est le principe de propagation de la chaleur par ondes électromagnétiques. Le rayonnement peut se propager dans le vide sans présence de matière. Le rayonnement, émis par un corps à une température T_1 et absorbé par un autre corps à une température T_2 , dépend du coefficient d'absorption monochromatique α_2 , du facteur de forme entre les deux corps $\mathcal{F}_{1 \rightarrow 2}$ et de la constante de Stefan-Boltzmann σ ($5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Le flux transmis s'écrit :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \alpha\sigma\mathcal{F}_{1 \rightarrow 2}(T_1^4 - T_2^4)$$

Dans un bâtiment, le rayonnement solaire absorbé par les façades et les rayonnements des parois sont des phénomènes primordiaux.

Le **transfert de masse** est le phénomène de propagation de chaleur par mouvement des masses d'air. Pour un échange entre deux gaz de masse volumique ρ , respectivement aux températures T_1 et T_2 et avec un débit d'échange de q . Le flux transmis à pression constante s'écrit :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = q\rho(T_1 - T_2)$$

Dans un bâtiment, la ventilation, le renouvellement d'air et tout les échanges d'air avec l'extérieur sont des échanges thermiques par transfert de masse.

Ces modes de transfert de chaleur sont à la base de toutes les modélisations thermiques. De façon générale, ces modes de transfert de chaleur coexistent. Prenons l'exemple des façades d'un bâtiment, elles sont soumises à de nombreux flux thermiques : la conduction avec les parois intérieures du bâtiment, la convection avec l'air intérieur et l'air extérieur, le rayonnement solaire... Pour concevoir un modèle de bâtiment, il faut donc prendre en compte tous ces échanges pour représenter au mieux l'évolution thermique des différents composants. Dans la littérature, il existe deux grandes approches complémentaires pour aborder la modélisation thermique d'un bâtiment : l'approche nodale et l'approche zonale qui diffèrent par leur niveau de discrétisation.

La modélisation nodale L'approche nodale (ou multizone) se base sur la décomposition du bâtiment en plusieurs noeuds thermiques. Un noeud caractérisant un volume

de matériau. Les grandeurs physiques en chaque noeud sont supposées homogènes en température et en pression. Un modèle nodal se base sur les bilans d'énergie à chaque noeud en prenant en compte les différents types d'échange de chaleur. Initialement, l'intérêt de cette approche se portait sur la modélisation des températures aux noeuds car l'objectif était d'étudier les charges et les performances des systèmes de chauffage. Plus tard, dans les années 1980, les modèles ont intégré les transferts de masse provoqués par la ventilation et les gradients de température. Tout d'abord de manière simplifiée en tenant compte des infiltrations d'air dans le bâtiment, puis en couplant les transferts de masse aux transferts de chaleur. Les transferts de masse permettent de formuler les circulations d'air qui ont lieu au travers des ouvertures (portes, fenêtres, fissures...). Le principal inconvénient de l'approche nodale est qu'elle est basée sur l'hypothèse d'homogénéité parfaite aux noeuds. Il est donc impossible d'observer des gradients thermiques à l'intérieur d'un noeud. Or le processus de mélange dans l'air (ou de conduction dans les matériaux) peut s'avérer assez long par rapport au pas de calcul. Cela peut générer une erreur importante particulièrement dans le cas d'échanges ponctuels.

La modélisation zonale L'approche zonale vise à contrecarrer les erreurs engendrées par l'approche nodale en adoptant un découpage des noeuds d'air en différentes zones. L'objectif est de permettre d'observer la stratification thermique de l'air dans un local car son impact sur le confort est important. Dans l'approche zonale, la pièce est divisée en un certain nombre de volumes d'air dans lesquels la température et la masse volumique sont supposées homogènes, alors que la pression varie de façon hydrostatique. Les équations de conservation de la masse et de l'énergie sont appliquées à chaque cellule où le mélange gazeux est traité comme un gaz parfait.

D'autres méthodes de modélisation existent comme les techniques CFD (Computational Fluid Dynamics) qui permettent de prédire les écoulements fluides de l'air dans les bâtiments. En pratique, la CFD se focalise plus sur les écoulements et se base sur les équations de Navier-Stokes avec différents modèles de turbulence. Elle est très utilisée pour l'étude de la dispersion des polluants dans les bâtiments.

Il existe de nombreux logiciels dédiés à l'étude des performances thermiques des bâtiments et au dimensionnement des équipements de confort. En exemple, voici deux logiciels de simulation thermique très utilisés dans la recherche et l'industrie :

- le logiciel TRNSYS développé par le SEL (Solar Energy Laboratory) de l'université du Wisconsin-Madison [[TRNSYS, 2011](#)];
- le librairie SIMBAD pour MATLAB/Simulink développé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) [[SIMBAD, 2011](#)].

Pour expérimenter une stratégie de commande, il est nécessaire de s'appuyer sur un modèle de simulation rapide et d'adapter sa précision à celle du contrôle. Pour définir la précision requise, il faut s'intéresser à la composition du système. Dans notre contexte d'étude, nous ne considérons pas d'actionneurs à ventilation forcée (de type radiateurs soufflants, climatisations...), nous supposons donc que l'air du bâtiment est à pression constante et nous ne modélisons que les échanges de chaleur entre les différents noeuds. Un maillage fin du bâtiment est donc à proscrire et une approche nodale est plus adaptée à notre problématique.

II.1.2 Les méthodes de modélisation optique

Les modèles optiques offrent des méthodes de prédétermination de l'état lumineux des bâtiments. Les architectes utilisent couramment des maquettes (réelles ou virtuelles) pour concevoir des ambiances lumineuses de qualité. Ces modèles réduits permettent d'observer le comportement optique d'une pièce soumise à différents éclairages et ainsi de construire un modèle optique de pièce.

Les modèles macroscopiques Des formules approximatives permettent de déterminer l'éclairement dans une pièce à partir de paramètres très restreints tels que les coefficients de réflexion des parois, les dimensions de la pièce, la taille et la position des fenêtres... Ces paramètres sont les éléments clés qui permettent d'estimer la capacité d'une pièce à faire pénétrer de la lumière naturelle. L'exemple type de ces modèles est le FLJ (Facteur de Lumière du Jour) développé par la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) qui définit le rapport entre l'éclairement horizontal à l'intérieur d'une pièce et l'éclairement horizontal extérieur en condition de ciel couvert. Ces outils de calcul simplifiés sont pratiques pour une détermination approchée de l'éclairement mais ne sont pas conseillés pour la simulation fine de l'ambiance lumineuse d'une pièce complexe [Tregenza, 1980]. De plus, ils ne prennent pas en compte l'impact des systèmes occultants mobiles comme les stores vénitiens.

Les modèles numériques de rendu optique La modélisation numérique de la lumière est en forte expansion depuis les années 1960. La simulation logicielle s'attache à retracer le parcours de la lumière dans un espace. Elle n'est donc pas limitée à la modélisation de l'éclairement dans une pièce mais peut aussi reproduire les luminances observées par un occupant quelque soit sa position. Elle est utilisée par exemple pour faire du rendu optique dans les jeux vidéo. On peut distinguer deux grandes catégories de méthodes de calcul : la radiosité et le lancer de rayons (voir Figure II.1).

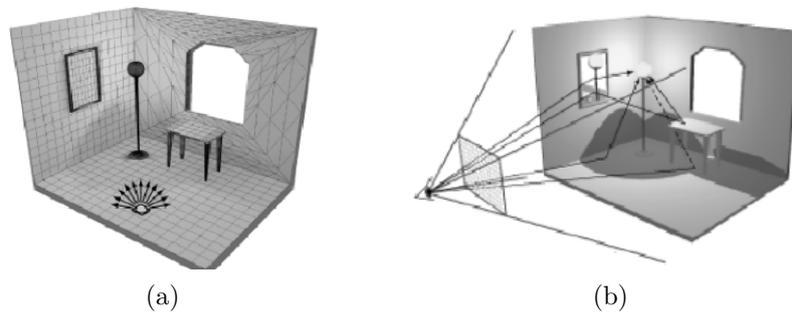


FIGURE II.1 – Principe des calculs par radiosité (a) et par lancer de rayons (b)

La **radiosité** traite les échanges radiatifs entre des facettes. Les facettes sont choisies en discrétisant les différentes surfaces de la pièce. L'algorithme de radiosité établit les bilans des rayonnements émis et réfléchis pour chaque facette. La simulation par radiosité permet de calculer l'ambiance lumineuse sans tenir compte du point de vue, contrairement à la simulation par lancer de rayons. La technique du **lancer de rayons** consiste à projeter la lumière dans le sens inverse, c'est-à-dire de l'oeil jusqu'à la source lumineuse en tenant compte des possibles réflexions sur les surfaces. Le lancer de rayons nécessite par conséquent de définir le point de vue de l'observateur de la scène. En comparaison, la radiosité est très performante pour les réflexions diffuses et génère un modèle 3D d'éclairage alors que le lancer de rayons génère une image de la scène observée et permet une meilleure prise en compte des réflexions spéculaires (voir Figure II.2).

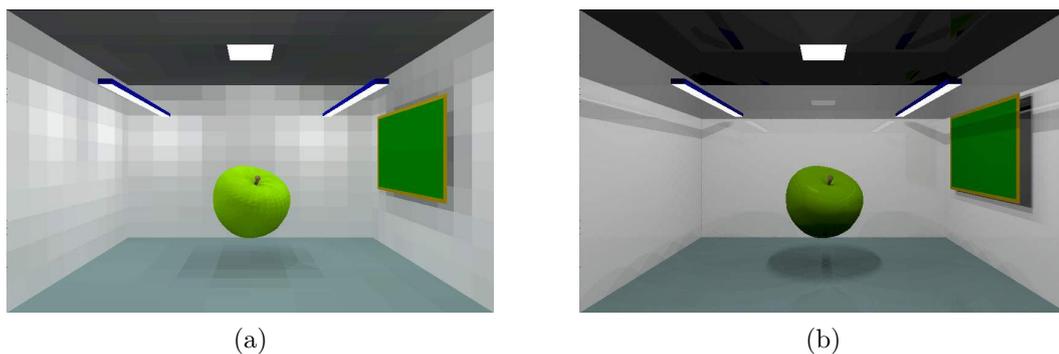


FIGURE II.2 – Comparaison d'un rendu par radiosité (a) et par lancer de rayons (b)

Un grand nombre d'implémentations de ces méthodes ont été réalisées [Carroll, 1999]. Nous pouvons citer par exemple deux logiciels de simulation de la lumière couramment utilisés pour la conception de bâtiments :

- le logiciel open-source RADIANCE développé par le LBL (Lawrence Berkeley National Laboratory) de l'université de Californie [Radiance, 2011; Ward, 1994];
- le logiciel gratuit DIALUX développé par l'entreprise DIAL [DIALux, 2011].

Les simulations logicielles offrent des outils très précis pour prédéterminer l'état lumineux d'une pièce mais possèdent des inconvénients importants pour notre objectif de commande. En effet, ils seraient difficiles à employer car ils nécessitent d'une part des capacités de calcul élevées et d'autre part de renseigner avec précision la géométrie de la pièce et du mobilier. Il faut également définir les caractéristiques optiques de chaque matériau. De plus, les modèles numériques ne décomposent pas les apports de chaque source sur l'éclairement dans la pièce ce qui est assez gênant pour une intégration dans un contexte de commande. Pour ces raisons, il ne semble pas adapté d'utiliser ces approches numériques. Nous nous orientons plutôt vers les modèles mathématiques plus simples mais notre travail se concentrera par contre sur la prise en considération de l'impact des actionneurs occultants passifs comme les stores vénitiens.

II.1.3 Les méthodes de modélisation de l'apport solaire

Pour simuler correctement l'évolution thermique et optique d'un bâtiment, il est nécessaire d'avoir accès à des informations sur l'environnement extérieur. Ces informations peuvent provenir de mesures ou être simulées grâce à un modèle. Un modèle d'environnement extérieur vise à simuler le potentiel lumineux et énergétique naturellement accessible par le bâtiment.

L'apport solaire hors atmosphère Comme nous l'avons vu lors de l'étude du confort, le soleil est la source principale de lumière et de chaleur. Son apport optique et thermique au sol fluctue en fonction de la composition de l'atmosphère terrestre. Cependant, hors atmosphère, le flux solaire normal peut être supposé constant. En réalité, le flux solaire extraterrestre varie en fonction de la distance Terre-Soleil. La CIE préconise le calcul du flux énergétique E_{esno} et lumineux E_{vsno} normal hors atmosphère en fonction du jour Julien J :

$$E_{esno} = E_{esc} \left[1 + 0,0334 \cdot \cos \left(\frac{360(J - 2,7202)}{365,25} \right) \right]$$

$$E_{vsno} = E_{vsc} \left[1 + 0,0334 \cdot \cos \left(\frac{360(J - 2,7202)}{365,25} \right) \right]$$

Avec :

- $E_{esc} = 1367 \text{ W/m}^2$, la constante solaire énergétique ;
- $E_{vsc} = 133800 \text{ Lux}$, la constante solaire lumineuse.

Le flux solaire normal hors atmosphère suit une courbe sinusoïdale de période annuelle. L'éclairement énergétique varie de $\pm 3,34\%$ autour de E_{esc} , de même l'éclairement lumineux oscille autour de $E_{vsc} \pm 3,34\%$.

L'influence de l'atmosphère Le flux solaire pénétrant dans l'atmosphère subit des modifications spectrales et directionnelles. La composition moléculaire de l'atmosphère provoque des phénomènes d'absorption et de diffusion du flux solaire dans le ciel. Vu du sol, l'apport énergétique et lumineux global provenant du ciel et divisible en deux composantes : un apport direct dû aux rayonnements solaires non déviés et un apport diffus dû à l'atmosphère. Les principaux éléments qui impactent la pénétration du flux solaire dans l'atmosphère sont :

- l'air sec composé d'azote (N_2 , 78%), d'oxygène (O_2 , 21%), d'argon (Ar, 1%), de dioxyde de carbone (CO_2 , 0,03%) et d'ozone (O_3 , $10^{-6}\%$);
- la vapeur d'eau provenant de l'évaporation à la surface de la terre;
- les aérosols composés de toutes les particules chimiques en suspension dans l'air (pollens, poussières, particules de soufre...).

Chacun de ces composants contribue à l'absorption et à la diffusion du flux solaire d'une manière qui lui est propre [Chain, 2004].

Les différents modèles d'atmosphère ont montré que le phénomène d'**absorption atmosphérique** apparaît uniquement sur certaines longueurs d'onde très spécifiques. Par ailleurs, l'absorption atmosphérique dépend principalement de la quantité d'air traversée par le rayon, c'est-à-dire de l'inclinaison du soleil. Plus la masse d'air traversée est grande, plus le flux direct est atténué.

De plus, selon le modèle de diffusion de Rayleigh, le niveau de **diffusion atmosphérique** est d'autant plus fort que la longueur d'onde est faible. C'est pour cette raison que le ciel nous apparaît bleu. Le niveau de diffusion est donc très élevé pour les ondes infrarouges et faible pour les ultraviolets. En outre, la diffusion dépend évidemment de la masse d'air traversée.

Naturellement, la **nébulosité** est un autre paramètre très important qui influe sur le potentiel énergétique et lumineux. Les nuages sont des amas d'eau qui ont un impact très fort sur la diffusion du rayon solaire. De plus, ils sont soumis aux vents et aux courants thermiques, et ont une dynamique très rapide par rapport à l'évolution naturelle journalière. En ce sens, pour un automaticien, les nuages sont perçus comme des perturbations (à dynamique rapide) d'un système à dynamique naturellement plus lente qui est celle du soleil.

Les modèles de ciel La diffusion du flux solaire dans l'atmosphère génère une source de lumière diffuse très importante. Les modèles de ciel ont pour objectif de caractériser les apports lumineux de cette source diffuse en étudiant la répartition de ses luminances. Plus précisément, l'étude se porte sur le rapport des luminances du ciel sur celles au zénith. Le modèle le plus utilisé est le modèle de répartition spatiale de la lumière du jour proposé par la CIE [CIE, 2003] qui est issu du modèle « tout temps » de Perez

[Perez *et al.*, 1993].

L'objectif du modèle est donc de calculer le rapport entre la luminance d'un point de la voûte céleste $L(P)$ et la luminance au zénith L_Z (voir Figure II.3) :

$$\frac{L(P)}{L_Z} = \frac{f(\chi)\phi(z)}{f(z_s)\phi(0)}$$

Avec :

- χ la distance angulaire ($^\circ$) entre le soleil et le point considéré ;
- z et z_s l'angle zénithal ($^\circ$) du point considéré et du soleil.

Les paramètres ajustables du modèle sont la clarté et la luminosité du ciel qui permettent de calculer les indicatrices de diffusion f et de gradation ϕ à partir de cinq coefficients notés a , b , c , d et e .

$$f(\chi) = 1 + c \cdot \left[\exp(d \cdot \chi) - \exp\left(\frac{d \cdot \pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2(\chi)$$

$$\phi(z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos(z)}\right)$$

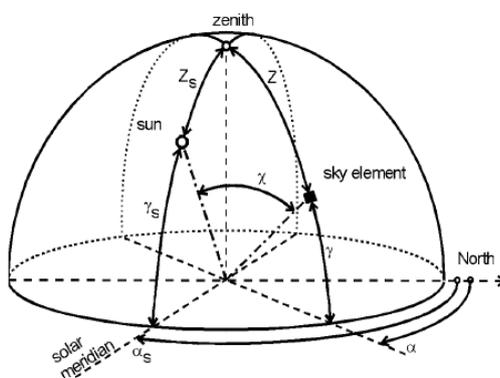


FIGURE II.3 – Référentiel angulaire de la voûte céleste

Nous ne développons pas plus la mise en équation de ce modèle de luminance du ciel car il en existe de très nombreuses descriptions [Darula et Kittler, 2002]. Grâce à ce modèle, la CIE a défini une typologie de ciel. Cette typologie se base sur une quantification des cinq coefficients pour caractériser quinze types de ciel de référence couvrant diverses conditions climatiques classiques, du ciel couvert au ciel clair (voir Table II.1).

Même si les phénomènes impactant les apports énergétiques et lumineux du soleil sont aujourd'hui bien connues, ces techniques sont difficilement exploitables dans un contexte de commande. En effet, les perturbations nuageuses ont un impact très fort et leur prise en compte ne peut pas se limiter à une simple variable aléatoire. Pour

Type	Caractérisation	a	b	c	d	e
1	Ciel CIE Standard Overcast Sky. Forte gradation de la luminance vers le zénith. Uniformité azimuthale.	4,00	-0,70	0,00	-1,00	0,00
2	Ciel couvert. Forte gradation de la luminance vers le zénith. Luminosité légèrement supérieure vers le soleil.	4,00	-0,70	2,00	-1,50	0,15
3	Ciel couvert. Gradation zénithale modérée. Uniformité azimuthale.	1,10	-0,80	0,00	-1,00	0,00
4	Ciel couvert. Gradation zénithale modérée. Gradation légère vers le soleil.	1,10	-0,80	2,00	-1,50	0,15
5	Ciel couvert. Uniformité totale.	0,00	-1,00	0,00	-1,00	0,00
6	Ciel partiellement nuageux. Gradation zénithale nulle. Gradation légère vers le soleil.	0,00	-1,00	2,00	-1,50	0,15
7	Ciel partiellement nuageux. Gradation zénithale nulle. Zone circumsolaire plus lumineuse.	0,00	-1,00	5,00	-2,50	0,30
8	Ciel partiellement nuageux. Gradation zénithale nulle. Couronne solaire distincte.	0,00	-1,00	10,0	-3,00	0,45
9	Ciel partiellement nuageux. Soleil totalement masqué.	-1,00	-0,55	2,00	-1,50	0,15
10	Ciel partiellement nuageux. Zone circumsolaire plus lumineuse.	-1,00	-0,55	5,00	-2,50	0,30
11	Ciel bleu laiteux. Couronne solaire distincte.	-1,00	-0,55	10,0	-3,00	0,45
12	Ciel CIE Standard Clear Sky. Ciel bleu sans nuage et faiblement pollué.	-1,00	-0,32	10,0	-3,00	0,45
13	Ciel CIE Standard Clear Sky. Ciel bleu sans nuage et fortement pollué.	-1,00	-0,32	16,0	-3,00	0,30
14	Ciel sans nuage. Large couronne solaire.	-1,00	-0,15	16,0	-3,00	0,30
15	Ciel bleu laiteux et sans nuage. Large couronne solaire.	-1,00	-0,15	24,0	-2,80	0,15

TABLE II.1 – Types de ciel définis par la CIE

notre contexte de commande, nous nous orientons par conséquent vers l'exploitation de mesures réelles afin de considérer les perturbations de manière plus réaliste. Nous utiliserons les données de la station IDMP de l'ENTPE [Dumortier, 2011] dont le contenu sera détaillé dans la dernière partie de ce chapitre.

II.1.4 Les spécifications du modèle de simulation

Grâce à l'étude des différentes méthodes de modélisation, nous allons maintenant pouvoir construire un modèle de simulation du comportement optique et thermique du bâtiment. Ce modèle est basé sur des modèles physiques adaptés à notre contexte de commande. Il repose sur une modélisation des équipements de confort, une modélisation du bâtiment et enfin une modélisation de l'environnement extérieur (voir Figure II.4).

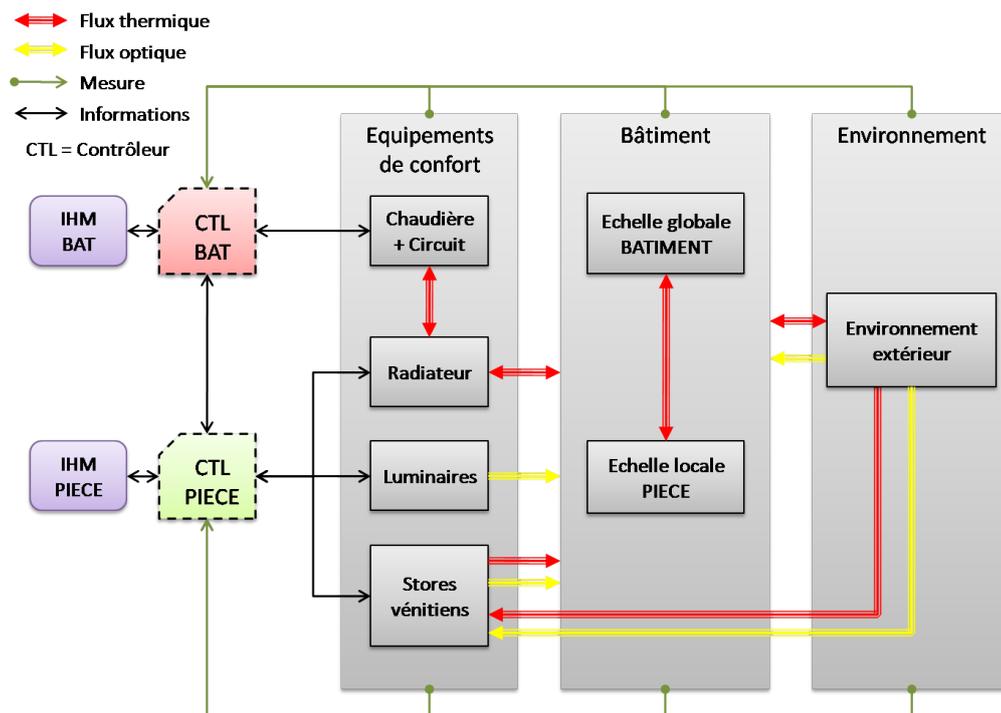


FIGURE II.4 – Organisation du simulateur du bâtiment

Avant d'aborder ce modèle global, il est important de clarifier nos exigences concernant ces modèles. Nous avons identifié trois exigences fortes :

Alimenter le contrôle L'essence même du modèle est d'obtenir une prédiction sur l'effet du contrôle. C'est-à-dire de reconstruire les données des capteurs nécessaires aux lois de commande. Par conséquent, toute variation de commande doit engendrer une modification de l'état des actionneurs de confort et de l'état du bâtiment. Les apports thermiques et optiques de chaque actionneur doivent donc être correctement modélisés et pris en compte pour simuler avec précision l'évolution du bâtiment.

Cependant, le temps de calcul nécessaire à la simulation de ce modèle ne doit pas être prohibitif pour une étude de la commande. Il faut donc modéliser avec justesse c'est-à-dire savoir identifier les interactions fortes et faibles, et ainsi ne considérer que les plus fortes (et négliger les plus faibles). Le niveau de détail doit

être suffisant pour mettre en valeur l'impact des actionneurs que nous souhaitons piloter.

S'intégrer dans l'architecture de contrôle Le contrôle est caractérisé par différents niveaux d'action, du contrôle des équipements partagés du bâtiment au pilotage des équipements des pièces. Pour s'intégrer dans notre architecture de commande, le simulateur doit donc estimer l'évolution de grandeurs physiques à l'échelle du bâtiment et aussi à l'échelle des pièces. Pour appréhender ce problème d'échelle, l'approche généralement retenue est de modéliser finement toutes les pièces du bâtiment. Ainsi, le comportement global du bâtiment s'obtient en observant le comportement moyen de toutes les pièces simulées. Cette approche de simulation très fine est très répandue mais n'est pas adaptée à notre étude car elle nécessite des moyens et des temps de calcul importants.

Notre approche s'oriente plutôt vers la décomposition des modèles en fonction de l'échelle. Ainsi, nous cherchons à développer deux modèles : le premier est un modèle de bâtiment pour déterminer le comportement moyen (ou global) de l'ensemble du bâtiment. Le deuxième est un modèle de pièce pour étudier individuellement (ou localement) l'évolution d'une pièce d'intérêt présente dans le bâtiment. Ces deux modèles seront bien sûr en interaction de manière à considérer la pièce comme intégrée au sein du bâtiment. De ce fait, notre objectif est de décomposer le système physique en fonction de ses dynamiques spatiales et temporelles. Le bâtiment correspondant aux dynamiques faibles et la pièce aux dynamiques plus élevées.

Prendre en compte les consommations énergétiques La diminution des consommations énergétiques est une grande ambition du bâtiment intelligent. Par conséquent, la simulation doit considérer toutes les énergies, gratuites et payantes, qui impactent l'évolution thermique et optique du bâtiment.

Pour les énergies payantes, nous développerons des modèles de consommation pour chaque actionneur de confort. Cela nous permettra de visualiser l'influence des stratégies de contrôle sur la consommation totale du bâtiment en énergie finale. Pour les énergies gratuites, nous intégrerons l'apport énergétique du soleil et du ciel. Cependant nous utiliserons des données mesurées afin de mieux considérer les perturbations naturelles du climat.

II.1.5 L'implémentation logicielle

Pour répondre aux exigences sus-citées, l'implémentation du logiciel de simulation du bâtiment automatisé devra être conçue en respectant l'approche système que nous avons présentée dans la première partie de ce mémoire. Nous emploierons donc une décomposition structurelle et fonctionnelle des systèmes favorisant la généricité du code, et les différents domaines physiques (optique, thermique, énergétique...) seront dissociés sans pour autant négliger leurs couplages. Par ailleurs, nous souhaitons réaliser cette implémentation dans un logiciel très utilisé pour favoriser son utilisation dans d'autres projets. La flexibilité du simulateur sera aussi accrue par la création de bibliothèques de modèles paramétrables facilement.

Notre implémentation s'est donc naturellement tournée vers l'utilisation d'une plateforme de développement multi-physique et dynamique utilisant une interface graphique pour relier différents blocs de modélisation par des liaisons informatives ; par exemple les logiciels LabVIEW, MATLAB-Simulink ou Scilab-XCos. Nous avons choisi d'utiliser MATLAB-Simulink [Mathworks, 2012] pour sa simplicité d'utilisation, la richesse de ses bibliothèques et sa grande communauté d'utilisateurs dans le domaine de l'automatique. D'un point de vue théorique, nous avons travaillé en utilisant une approche Bond Graph car elle est très utilisée dans l'étude des systèmes multi-physiques.

Résumé Parmi les différentes méthodes de modélisation abordées dans ce chapitre, nous avons choisi d'utiliser les plus adaptées à notre contexte de commande couplées des confort optiques et thermiques. Pour la thermique du bâtiment, nous allons implémenter un modèle nodal qui permettra de représenter la température à chaque noeud. Pour la partie optique, nous allons développer un modèle algébrique simple basé sur les flux lumineux dans la pièce. Concernant l'environnement extérieur, nous allons utiliser des données mesurées pour avoir une représentation la plus réaliste possible des dynamiques naturelles et des perturbations liées à la nébulosité. Maintenant que nous avons fait ces choix, nous allons dans la suite de ce chapitre exposer en détail la conception de ces modèles en nous intéressant en premier lieu aux actionneurs présents dans le bâtiment.

II.2 Modélisation des équipements de confort

Pour la conception du modèle de bâtiment, nous allons dans un premier temps nous intéresser à l'impact optique et thermique des équipements de confort. Rappelons que le bâtiment d'étude est équipé de trois équipements pilotés : le chauffage central, les stores vénitiens intérieurs et les luminaires. Pour chacun d'eux, nous décrirons le fonctionnement et les grandeurs pilotées puis nous présenterons une modélisation thermique et optique des apports énergétiques.

II.2.1 Le chauffage central

Dans un système de chauffage central à eau chaude, la chaleur est produite par une chaudière qui transforme l'énergie primaire en énergie thermique pour chauffer l'eau du circuit de distribution qui achemine le fluide aux émetteurs de chaleur que sont les radiateurs. Un chauffage central est une source d'énergie artificielle qui fournit une charge thermique à l'air dans l'ensemble du bâtiment.

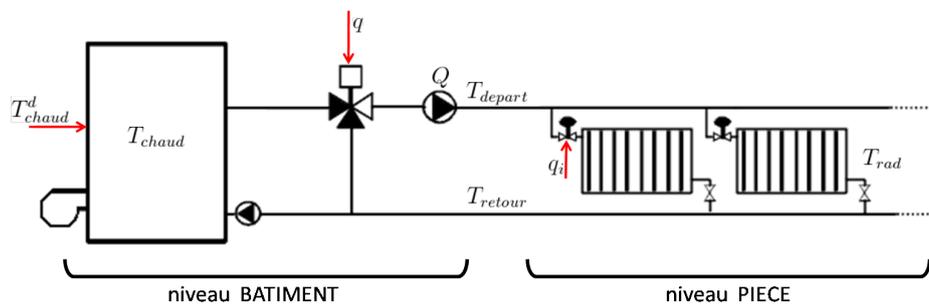


FIGURE II.5 – Principe de fonctionnement du chauffage central

Les grandeurs pilotées Les utilisateurs interagissent à deux niveaux sur le chauffage central (voir Figure II.5) : Au niveau bâtiment, l'action consiste à paramétrer la température de chaudière T_{chaud} et le débit q d'une vanne trois voies de manière à fournir l'énergie suffisante dans le circuit de distribution pour maintenir l'air du bâtiment à une température confortable. C'est la régulation centrale. Au niveau des pièces, l'action est réalisée par les occupants sur le débit q_i d'une vanne thermostatique qui équipe chaque radiateur. Cette action locale permet de contrôler localement la température de l'air dans chaque pièce du bâtiment. C'est la régulation terminale. Le chauffage central est ce que nous appelons un équipement multi-niveaux.

La modélisation thermique Le chauffage central est un équipement bien connu des automaticiens et sa modélisation a fait l'objet de nombreuses études. Pour concevoir le modèle présenté ci-dessous, nous nous sommes intéressés aux travaux de doctorat de Fraisse sur le contrôle par régulateur flou [Fraisse, 1997] et de Eynard sur l'optimisation du fonctionnement de différents types de chaufferies [Eynard, 2010]. Ces travaux très détaillés offrent une vision claire du fonctionnement d'un système de chauffage central et de ses méthodes de modélisation. Cependant, ces travaux sont appliqués à des cas réels assez spécifiques (respectivement une école à Villeurbanne et un réseau de chaleur de quartier à La Rochelle). Nous orientons plutôt notre approche vers une modélisation assez générale de manière à présenter simplement les phénomènes physiques en présence sans rentrer dans des spécificités propres aux différentes technologies de chaudières.

La chaudière est un générateur de chaleur qui a une inertie importante. Elle fournit de l'eau chauffée à une température T_{chaud} donnée. Nous l'avons modélisé simplement sous la forme d'un système du premier ordre de gain unitaire avec une constante de temps de chauffe noté τ_{chaud} :

$$T_{chaud} = \frac{1}{1 + \tau_{chaud} s} T_{chaud}^d$$

Le circuit de distribution est un circuit fermé, le fluide caloporteur tourne en boucle dans les radiateurs à un débit Q imposé par un circulateur (pompe à débit fixe). Une vanne trois voies permet de faire rentrer de l'eau de la chaudière dans le circuit de distribution à un débit d'entrée q . Sa dynamique est considérée comme instantanée. La température de l'eau au départ dans le réseau s'écrit :

$$T_{depart} = \left(\frac{q}{Q}\right) T_{chaud} + \left(1 - \frac{q}{Q}\right) T_{retour}$$

Le circuit de distribution alimente les radiateurs installés en parallèle et répartis dans tout le bâtiment. La température moyenne du fluide dans les radiateurs T_{rad} peut s'écrire :

$$T_{rad} = \frac{T_{depart} + T_{retour}}{2}$$

La surface des radiateurs est en contact avec l'air du bâtiment à température T_{air} . Il se produit donc un échange convectif entre les deux milieux. En regardant globalement l'ensemble des radiateurs comme un unique échangeur avec un coefficient de transfert thermique K_{rad} , l'apport thermique à l'air s'écrit :

$$\Phi_{rad} = K_{rad}(T_{rad} - T_{air})$$

Nous retenons cette expression comme l'apport global du circuit de chauffe à l'air intérieur du bâtiment.

Cette chaleur fournie à l'air du bâtiment est perdue par le fluide caloporteur qui voit sa température baisser. Cette perte de flux Φ_{perte} peut s'exprimer comme un échange avec un flux entrant dans le radiateur à T_{depart} et un flux sortant à T_{retour} :

$$\begin{aligned}\Phi_{perte} &= -\Phi_{rad} \\ &= \sum_i (q_i) \rho C_p (T_{retour} - T_{depart}) \\ &= Q \rho C_p (T_{retour} - T_{depart})\end{aligned}$$

Il faut remarquer ici l'hypothèse que l'action terminale sur le débit q_i d'un radiateur ne perturbe pas l'apport thermique total du chauffage central. En pratique, le réseau de distribution est un circuit fermé où les radiateurs sont installés en parallèle. Si le débit de fluide dans un des radiateurs est réduit, alors il augmente automatiquement dans les autres radiateurs. Cette hypothèse reste acceptable tant que la pression du fluide n'est pas trop importante et que les radiateurs ne sont pas tous fermés. La température de retour s'écrit alors simplement :

$$T_{retour} = T_{depart} - \frac{\Phi_{rad}}{Q \rho C_p}$$

La chaleur utile P_{chaud}^{utile} que doit apporter la chaudière doit permettre de chauffer le volume d'eau qu'elle contient. De plus, lorsque la vanne trois voies injecte un volume d'eau de la chaudière dans le circuit de distribution, le même volume d'eau retourne dans la chaudière mais à la température de retour afin de ne pas augmenter la pression dans le réseau. En supposant que les pertes dues à l'enveloppe de la chaudière sont nulles, la puissance utile peut s'exprimer ainsi :

$$P_{chaud}^{utile} = V_{chaud} \rho C_p \frac{dT_{chaud}}{dt} + q \rho C_p (T_{chaud} - T_{retour})$$

Le premier terme correspond à l'énergie calorifique nécessaire pour amener l'eau de la chaudière à sa consigne. Le deuxième terme représente l'énergie calorifique nécessaire pour chauffer l'eau injectée dans la chaudière par le circuit de distribution. Enfin, la puissance en énergie primaire consommée par la chaudière P_{chaud}^{conso} s'exprime en fonction de l'énergie calorifique dépensée et de son rendement η_{chaud} :

$$P_{chaud}^{conso} = \eta_{chaud} P_{chaud}^{utile}$$

Nous retenons cette formulation comme la consommation énergétique totale de la chaudière.

La validation numérique Après avoir implémenté le modèle de chauffage central, nous avons réalisé une validation dans un cas d'étude simple dans lequel nous souhaitons observer les températures dans le circuit de chauffage lors de l'allumage du chauffage

central. Comme condition aux limites, la température de l'air dans le bâtiment est supposée fixe à 20°C malgré l'apport thermique des radiateurs. Les paramètres de simulation sont :

- $\tau_{chaud} = 30 \text{ min}$;
- $\eta_{chaud} = 0,6$;
- $V_{chaud} = 100 \text{ L}$;
- $Q = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $K_{rad} = 20 \text{ W/K}$.

La consigne de température de chaudière est définie à 50°C tout au long de la simulation. Lorsque la chaudière atteint sa consigne, nous ouvrons la vanne trois voies pour injecter de l'eau chaude dans le circuit de distribution puis elle est refermée par à-coups (voir Figure II.6).

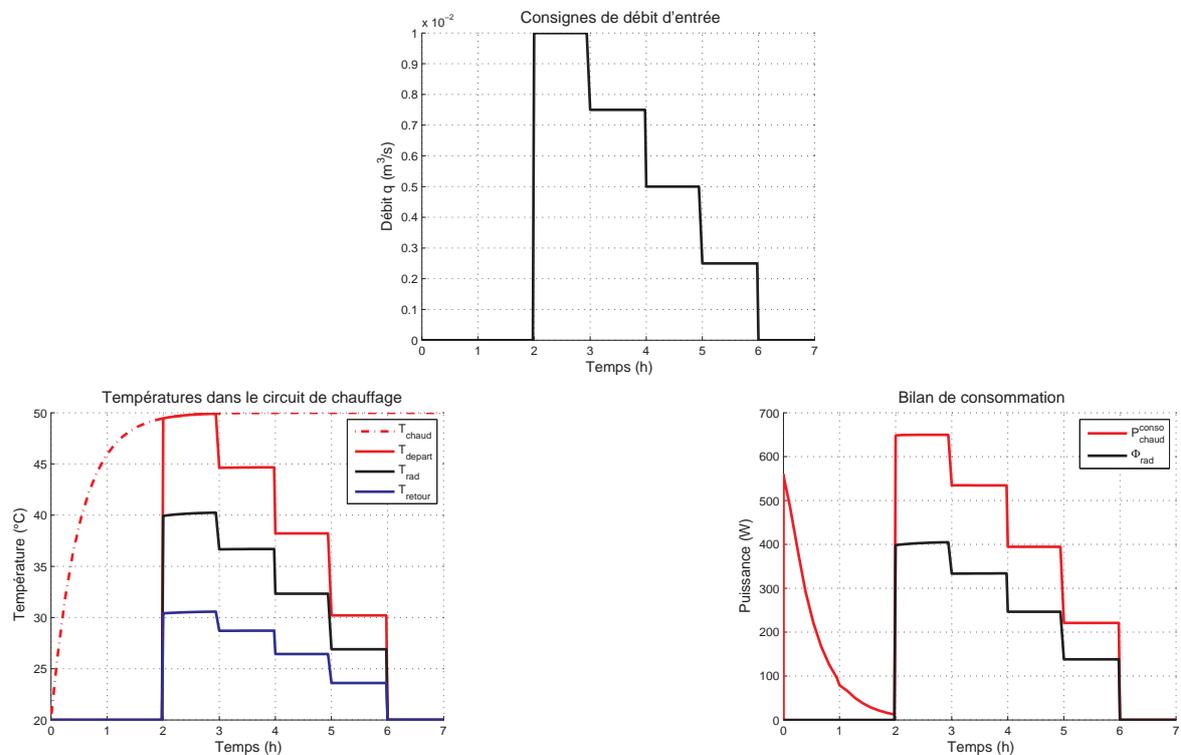


FIGURE II.6 – Températures et puissances du chauffage central

Les résultats de cette simulation mettent en évidence plusieurs remarques :

- Lorsque le débit de la vanne trois voies est nul, la température dans le circuit de distribution reste égale à la température de l'air et la puissance de chauffe est nulle.
- Sur les deux premières heures, la chaudière monte en température sans que l'eau ne soit injectée dans le circuit de distribution. La consommation est uniquement liée au chauffage du volume d'eau présent dans la chaudière. Elle tend vers zéro lorsque la chaudière atteint sa température de consigne. Par la suite, l'eau est

injectée dans le circuit. La consommation remonte puisque la chaudière doit réchauffer l'eau de retour du circuit de distribution.

- D'un point de vue dynamique, nous observons bien que l'inertie de la chaudière est modélisée sous la forme d'un premier ordre. Par contre, l'inertie des radiateurs et le temps de propagation du fluide dans le circuit de chauffe sont négligés.

Par extension, ce modèle est aussi bien adapté aux sources chaudes qu'aux sources froides. Ainsi, dans nos travaux, la chaudière peut devenir une source froide afin de refroidir l'air du bâtiment à l'image d'une pompe à chaleur. Nous utiliserons cette propriété de notre modèle afin de développer dans le chapitre suivant nos stratégies de chauffage en hiver et de refroidissement en été.

II.2.2 Les stores vénitiens intérieurs

Un store vénitien est un système occultant composé de lamelles métalliques horizontales et orientables. Ses dimensions sont liées aux dimensions de la fenêtre qu'il équipe. Un système d'enroulement entraîné par un moteur permet de faire varier la longueur de descente et l'angle des lamelles. Comme tout système occultant, un store vénitien permet de moduler le flux naturel traversant une fenêtre, il est par conséquent soumis à la lumière du jour et au rayonnement solaire. C'est un système occultant très utilisé car il est très adapté au confort [Dubois *et al.*, 2007].

Les grandeurs pilotées Les occupants interagissent avec les stores vénitiens dans la pièce pour répondre à leurs besoins de confort. Leurs actions sont généralement motivées par un manque ou un excès de lumière naturelle ou par l'apparition d'un éblouissement. À l'heure actuelle, les stores vénitiens commercialisés sont pilotés directement en rotation de l'arbre moteur. Les stores manuels sont actionnés par une manivelle et les stores électriques par un moteur alimenté en tout ou rien. Cependant, nous considérons pour faciliter la modélisation que les deux stores vénitiens de la pièce sont pilotés en pourcentage de descente d et en angle des lamelles θ . Lorsque nous aborderons la régulation des actionneurs, nous proposerons une méthode simple pour réaliser ce type de commande.

La modélisation optique L'impact du store vénitien sur la pénétration des luminances de l'environnement extérieur dans la pièce est un sujet très difficile à aborder. Ainsi, nous avons trouvé de nombreuses et diverses approches dans la littérature. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux méthodes de calcul présentes dans

les normes [EN 13363-1:2003, 2003] qui s'avèrent très approximatives et inadaptées pour notre étude. Ensuite, notre intérêt s'est porté sur les modèles géométriques simples appliqués à l'éclairage diffus [Campbell et Whittle, 1997; Leclercq, 2009] mais aussi à l'éclairage direct [McGuire, 2005]. Ces méthodes basées sur l'étude de la position des lamelles par rapport aux flux lumineux semblent être un bon point de départ pour mettre en place une modélisation simple et représentative. Enfin, nous avons étudié les modèles obtenus par simulation numérique de type lancer de rayons [Andersen *et al.*, 2005] qui permettent de générer les BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function), cependant ces données sont difficilement exploitables car très spécifiques au store simulé.

Pour concevoir un modèle optique de store vénitien, nous avons opté pour l'approche géométrique. Ces modèles n'étant pas clairement formulés dans la littérature, nous avons choisi de reposer le problème et les équations en regroupant les différentes contributions. Classiquement, le store est soumis à la lumière du jour qui peut se représenter comme la somme d'un flux diffus E_{dif} provenant de toutes les directions et d'un flux direct E_{dir} provenant du soleil. Nous gardons cette décomposition et nous cherchons à mettre en équation le modèle sous la forme d'une transmittance directe et d'une transmittance diffuse. Cette approche simple possède l'avantage d'être paramétrable et donc rend possible l'utilisation de différentes géométries de stores et différents matériaux de lamelles.

Pour mettre en équation la transmittance diffuse et directe du store vénitien, nous avons choisi de mettre en place des indicatrices d'occultation. Les fonctions d'occultation occ_{dif} et occ_{dir} représentent les proportions du flux lumineux incident diffus et direct passant par la fenêtre et qui sont occultés par les lamelles (voir Figure II.7). Nous les avons définies à partir de projections géométriques simples, elles dépendent donc de l'épaisseur des lamelles E , de la largeur des lamelles L et de la distance entre deux lamelles voisines D .

Dans des conditions d'éclairage diffus, la proportion du flux occulté dépend de l'angle des lamelles :

$$occ_{dif}(\theta) = 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{L}{D - E} \right) \cos(\theta)$$

Pour le flux direct, qui est orienté, la proportion occultée dépend en plus de l'altitude du soleil :

$$occ_{dir}(\theta, \gamma_s) = \min \left(\frac{|L \sin(\theta + \gamma_s)| + E \cos(\theta + \gamma_s)}{D \cos(\gamma_s)}, 1 \right)$$

Ces indicatrices d'occultation vont nous être utiles pour formaliser la transmittance

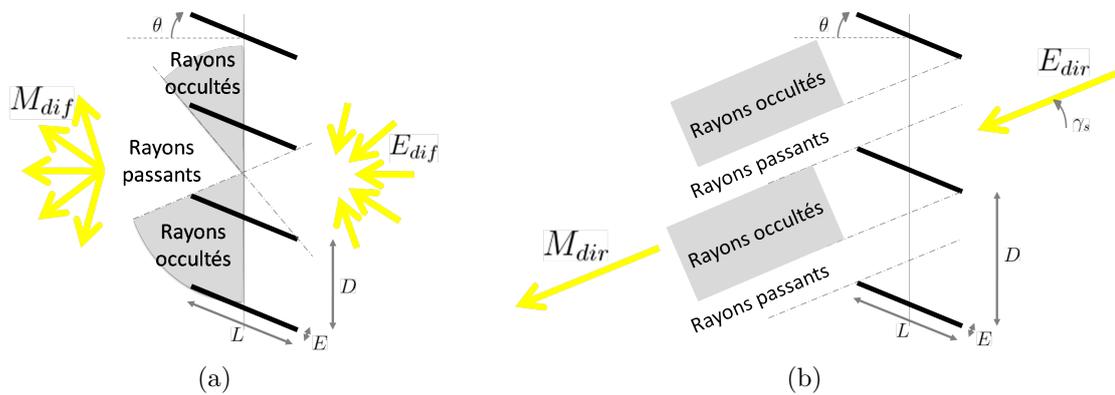


FIGURE II.7 – Indicatrices d'occultation optique du store vénitien en diffus (a) et en direct (b)

du store. Les émittances diffuses M_{dif} et directes M_{dir} du store vénitien sont composées de deux flux :

1. les rayons non occultés qui passent entre les lamelles. Ils sont totalement transmis dans la pièce ;
2. les rayons occultés par les lamelles. Une partie de ces rayons sont transmis dans la pièce. Cette partie transmise sera définie par un coefficient de transmission optique des lamelles pour le diffus τ_{dif} et pour le direct τ_{dir} .

De plus, nous prenons en compte le niveau de descente d du store vénitien comme faisant varier linéairement l'impact des lamelles. Ainsi nous pouvons écrire :

$$M_{dif} = E_{dif} [1 - d.(1 - \tau_{dif}).occ_{dif}(\theta)]$$

$$M_{dir} = E_{dir} [1 - d.(1 - \tau_{dir}).occ_{dir}(\theta, \gamma_s)]$$

Pour la suite, nous retenons la formulation de la transmittance optique diffuse du store vénitien :

$$T_{o_{dif}}^{sv} = \frac{M_{dif}}{E_{dif}} = 1 - d.(1 - \tau_{dif}).occ_{dif}(\theta)$$

Et sa transmittance optique directe :

$$T_{o_{dir}}^{sv} = \frac{M_{dir}}{E_{dir}} = 1 - d.(1 - \tau_{dir}).occ_{dir}(\theta, \gamma_s)$$

La validation numérique Pour visualiser l'impact optique du store vénitien, il nous semble important d'étudier l'évolution des indicatrices d'occultation en fonction de l'angle des lamelles (voir Figure II.8). Les paramètres du store sont :

- $L = 5 \text{ cm}$;
- $D = 4 \text{ cm}$;
- $E = 2 \text{ mm}$;
- $\tau_{dif} = 0,3$;
- $\tau_{dir} = 0,2$.

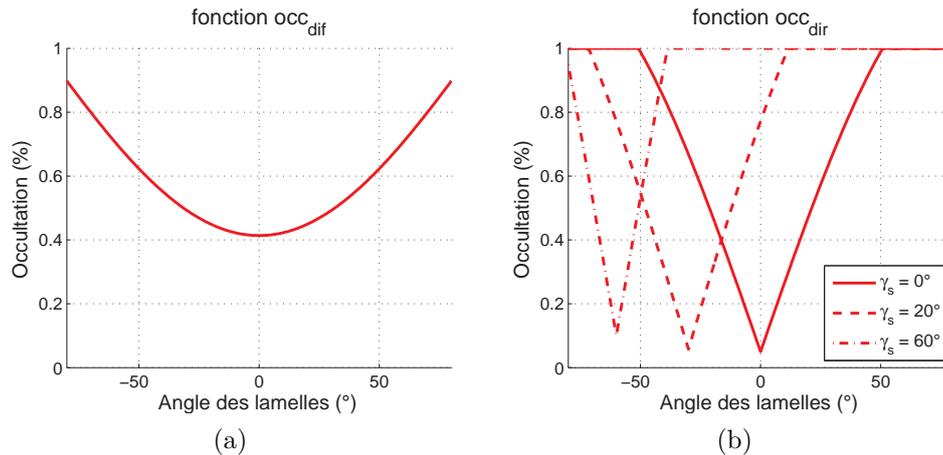


FIGURE II.8 – Indicatrices d'occultation en diffus (a) et en direct (b)

Ces tracés mettent en évidence plusieurs propriétés importantes :

- Pour le diffus, au minimum 40% du flux diffus est occulté lorsque les lamelles sont ouvertes ($\theta = 0^\circ$) et 90% du flux est occulté quand les lamelles sont fermées ($\theta = \pm 80^\circ$) ;
- Pour le direct, le flux occulté est minimum quand les lamelles sont à $\theta = -\gamma_s$, où γ_s est l'altitude du soleil ;
- Alors qu'en diffus il est impossible d'occulter complètement le flux, le flux direct peut, quant à lui, être occulté totalement. Nous remarquons aussi que plus le soleil est haut dans le ciel, plus le domaine d'occultation totale est grand. Cette considération est très importante pour notre objectif car l'occultation du rayon solaire est nécessaire pour éviter les phénomènes d'éblouissement.

Dans le but d'aller plus loin dans la compréhension du modèle optique, nous proposons de visualiser la transmittance optique du store vénitien en fonction de son état (d, θ) (voir Figure II.9). Comme nous intégrons ici la descente du store, nous avons choisi une représentation sous la forme d'une surface 3D ou le plan horizontal représente l'état mécanique du store vénitien. L'altitude de la surface correspond au niveau de transmittance du store.

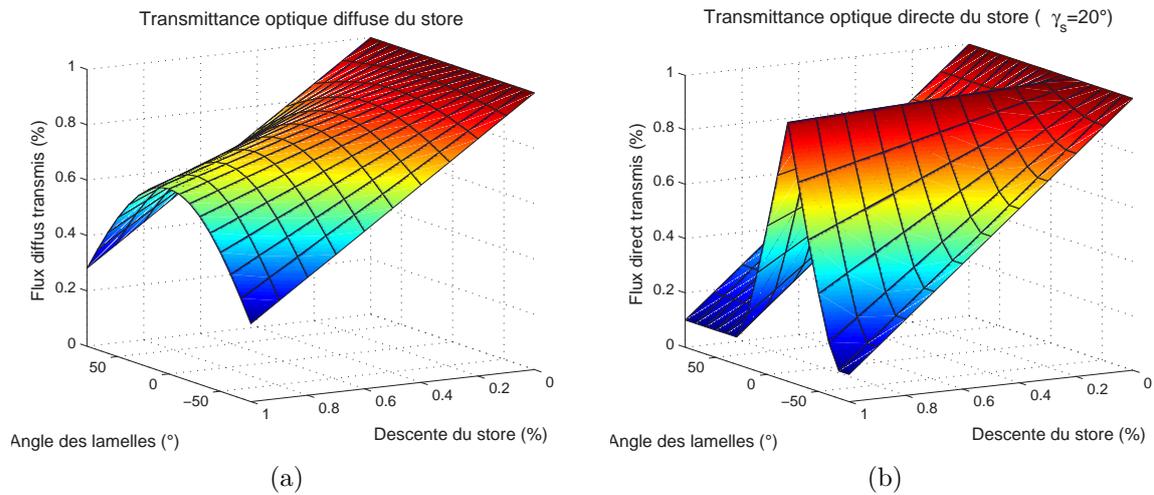


FIGURE II.9 – Transmittances optiques diffuse (a) et directe (b) du store vénitien

La modélisation thermique La modélisation thermique d'un store vénitien est tout aussi complexe que sa modélisation optique. Nous avons pu trouver dans la littérature des modèles intéressants qui sont pour la plupart basés sur le calcul des échanges radiatifs entre les lamelles. Par exemple celui implémenté dans le logiciel de simulation dynamique CODYBA [Roux *et al.*, 2005]. Des simulations très fines ont été réalisées [Kotey et Wright, 2006; Lomanowski et Wright, 2007] avec différents types de stores vénitiens (intérieurs, extérieurs et intégrés dans un double vitrage) et plusieurs couleurs de lamelles. Cette technique donne de bons résultats même s'il reste difficile de les confronter à des mesures réelles. De plus, cette approche est assez contraignante car elle nécessite de décomposer chaque lamelle en trois noeuds thermiques pour calculer les facteurs de forme et les bilans radiatifs. Nous allons donc plutôt chercher à simplifier cette méthode en émettant plusieurs hypothèses.

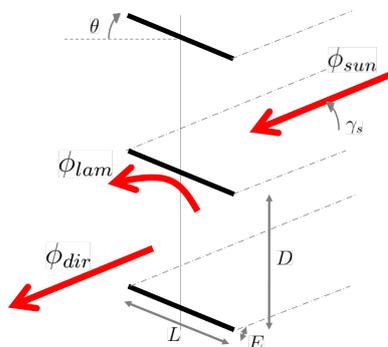


FIGURE II.10 – Modélisation thermique du store vénitien

Comme pour le modèle optique, le rayonnement énergétique solaire peut être occulté par les lamelles (voir Figure II.10). Si le rayon passe entre les lamelles, il continue sa

progression et crée dans la pièce une zone insolée. Ce flux énergétique solaire pénétrant dans la pièce ϕ_{dir} peut s'exprimer facilement en utilisant la fonction d'occultation directe occ_{dir} :

$$\Phi_{dir} = \Phi_{sun} [1 - d.occ_{dir}(\theta, \gamma_s)]$$

Par contre, si le rayon percute une lamelle, il est absorbé en partie par cette lamelle qui s'échauffe. En considérant que les lamelles sont fines, nous pouvons les assimiler à des éléments de capacité thermique nulle. C'est à dire que le flux radiatif qu'elles absorbent est directement diffusé par convection dans l'air du bâtiment. Les lamelles jouent alors le rôle de dissipateur. Le flux ϕ_{lam} dissipé par les lamelles vers l'air environnant peut s'exprimer en fonction du coefficient d'absorption solaire des lamelles α_{lam} :

$$\Phi_{lam} = \Phi_{sun} . \alpha_{lam} . d.occ_{dir}(\theta, \gamma_s)$$

Pour la suite, nous retenons la formulation de la transmittance thermique diffuse du store vénitien :

$$Tt_{dif}^{sv} = \frac{\Phi_{lam}}{\Phi_{sun}} = \alpha_{lam} . d.occ_{dir}(\theta, \gamma_s)$$

Et sa transmittance thermique directe :

$$Tt_{dir}^{sv} = \frac{\Phi_{dir}}{\Phi_{sun}} = 1 - Tt_{dif}^{sv}$$

Assimiler les lamelles à un dissipateur de chaleur met en évidence l'importance de la position du store au niveau de la fenêtre. Il existe trois types de stores vénitiens : les stores intérieurs, les stores extérieurs et les stores intégrés dans les doubles vitrages. La différence entre ces types de store est liée au milieu dans lequel les lamelles diffusent le flux énergétique solaire qu'elles absorbent. Avec un store extérieur, les lamelles diffusent dans l'air extérieur et n'impacte pas l'équilibre thermique de l'air de la pièce. Avec un store intégré, les lamelles diffusent dans la lame d'air comprise entre les deux vitrages de la fenêtre ce qui permet de chauffer les vitrages de manière à influencer sur leur température radiative. Avec un store intérieur, la diffusion se fait directement dans l'air de la pièce. Le store intérieur a donc un intérêt thermique très intéressant car il occulte une partie du flux solaire pour chauffer directement l'air intérieur. La partie non occultée créera une zone insolée qui chauffera la structure du bâtiment. Ainsi le store vénitien intérieur permet de répartir le flux solaire passant par la fenêtre entre l'air du bâtiment et la structure du bâtiment.

II.2.3 Les luminaires

Un luminaire permet d'assurer l'éclairage de la pièce. Il est composé d'un élément actif (la lampe) qui, lorsqu'elle est alimentée, produit un flux lumineux et d'un système optique souvent à miroir pour filtrer et distribuer ce flux lumineux.

Les grandeurs pilotées Chaque luminaire répond à un besoin spécifique. Dans notre cas, nous utilisons des plafonniers afin d'éclairer la pièce de façon homogène. Ces luminaires sont pilotés par un interrupteur unique que les occupants activent lorsque la lumière du jour n'est plus suffisante pour assurer leur confort visuel.

La modélisation optique Pour caractériser un luminaire, il faut définir ses propriétés électriques (alimentation) et ses propriétés photométriques (type de lampe, répartition du flux émis par la lampe).

Pour le modèle de consommation, nous prenons comme référence un ballast électronique dont le facteur de puissance est très proche de 1. La consommation du luminaire P_{lum}^{conso} correspond donc à la puissance nominale du luminaire P_{lum} lorsqu'il est allumé.

$$P_{lum}^{conso} = \begin{cases} P_{lum} & \text{si allumé} \\ 0 & \text{si éteint} \end{cases}$$

D'un point de vue photométrique, les constructeurs mesurent généralement la courbe polaire photométrique du luminaire. C'est à dire la distribution de l'intensité lumineuse en fonction de l'angle d'émission. Pour notre cas, nous avons choisi de modéliser des luminaires parfaitement diffusants. Le flux diffus ϕ_{dif} du luminaire s'exprime directement à partir de son rendement lumineux η_{lum} .

$$\phi_{dif} = \eta_{lum} P_{lum}^{conso}$$

Par ailleurs, une lampe allumée est source de chaleur. Cependant la chaleur dégagée est très variable en fonction de l'âge et de la technologie utilisée. Pour simplifier les modèles, nous négligerons l'apport thermique des lampes et nous le prendrons en compte sous la forme d'une perturbation thermique incluse dans la charge interne.

Validation numérique Prenons un luminaire avec quatre tubes fluorescents de puissance nominale 50 W et de rendement lumineux 80 lm/W. Lorsque celui-ci est allumé,

sa consommation énergétique est de 200 W et le flux lumineux résultant est de 16000 lm .

Résumé La modélisation des équipements de confort a permis d'exprimer mathématiquement les contributions optiques et thermiques du chauffage central, des stores vénitiens et des luminaires. Nous avons aussi formalisé les consommations énergétiques de la chaudière et des luminaires. Pour la conception du modèle de simulation du bâtiment, nous allons dans la partie suivante nous intéresser à la modélisation des échanges thermiques et optiques dans l'ensemble du bâtiment et dans les pièces.

II.3 Modélisation du bâtiment

La modélisation du bâtiment étudié doit nous permettre de simuler l'évolution des différentes grandeurs dans le bâtiment et dans une de ses pièces en fonction de différentes lois de commande. Nous allons dans cette partie concevoir le modèle physique du bâtiment en y intégrant l'impact thermique et optique de tous ses actionneurs et de l'environnement.

Dans notre cas, les contrôleurs sont répartis sur deux niveaux et répondent à différents besoins :

1. le contrôleur niveau bâtiment répond au besoin global de chauffage de l'ensemble du bâtiment en pilotant la température de la chaudière et le débit de la vanne trois voies du chauffage central ;
2. le contrôleur niveau pièce répond au besoin local de confort thermique et optique dans chaque pièce et pilote les radiateurs, les luminaires et les stores vénitiens.

Pour simuler ces besoins, il est nécessaire de modéliser l'évolution de plusieurs grandeurs physiques. Tout d'abord, nous nous intéresserons à la thermique et à l'estimation des températures dans le bâtiment et dans les pièces. Ensuite, nous nous pencherons sur les grandeurs optiques.

Le bâtiment étudié est pourvu de plusieurs actionneurs thermiques : la chaudière, les radiateurs sur le circuit de chauffe et les stores vénitiens. Tous ces actionneurs fournissent des flux de chaleur mais leurs impacts se ressentent à différents niveaux. Par exemple, la chaudière touche globalement l'ensemble du bâtiment grâce au circuit de distribution alors qu'un radiateur et les stores vénitiens influent plus localement sur la température dans la pièce. Ainsi la résolution spatiale est un élément clé de notre modélisation.

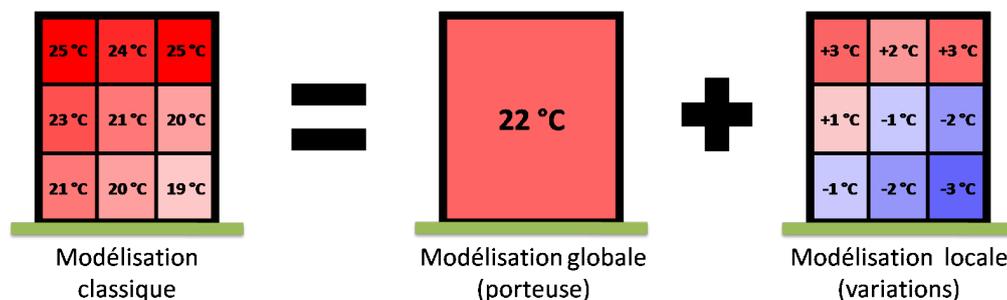


FIGURE II.11 – Principe de modélisation thermique par décomposition fréquentielle

Contrairement aux démarches classiques qui consistent à modéliser finement l'ensemble du bâtiment pour ensuite moyenner afin de connaître son comportement global, nous proposons ici une méthode de modélisation simplifiée. Notre approche se base sur une méthode de modélisation nodale dans l'objectif de pouvoir décomposer les transferts thermiques à une échelle globale (bâtiment) et à une échelle locale (pièce) (voir Figure II.11). Comme la vitesse de variation de la température d'un matériau est liée à sa capacité thermique et donc à sa masse, le bâtiment aura une inertie thermique beaucoup plus grande que celle de la pièce. La décomposition fréquentielle aura donc tendance à séparer la composante thermique basse fréquence issue du modèle global, et la composante haute fréquence issue du modèle local.

Une des exigences de la simulation thermique est de pouvoir accéder à l'état de la pièce d'intérêt sans avoir à modéliser les autres pièces du bâtiment. Or les modèles classiques se basent sur les transferts de chaleur de proche en proche c'est à dire d'une pièce aux pièces voisines. Pour résoudre ce problème, nous faisons l'hypothèse que les pièces voisines de la pièce étudiée suivent l'évolution moyenne du bâtiment. De plus, nous supposons que le volume de la pièce est assez petit par rapport au bâtiment pour que ses variations locales n'influencent pas les variations lentes du bâtiment. Ainsi nous pouvons assimiler la pièce à une structure indépendante, soumise à l'évolution moyenne et lente du bâtiment, mais aussi capable d'évoluer localement et rapidement grâce à ses propres sources d'énergie (ouvrants, radiateurs...). Sous ces hypothèses, les modèles globaux et locaux sont découplés. Cependant, le modèle global fournit les conditions aux limites du modèle local (voir Figure II.12).

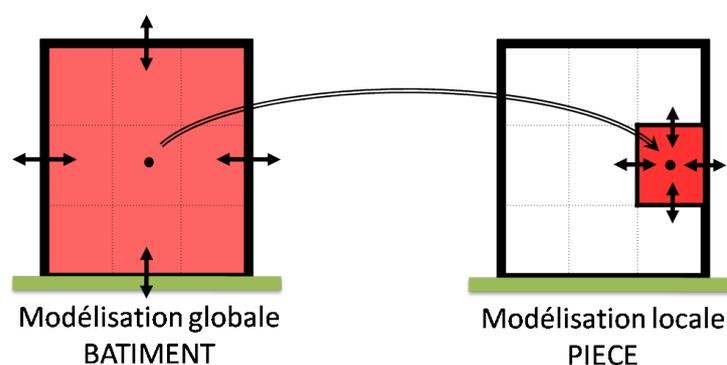


FIGURE II.12 – *Principe de modélisation thermique utilisé*

En optique, les actionneurs (stores vénitiens et luminaires) ont un impact localisé dans la pièce. Comme il n'y a pas d'actionneur optique partagés dans le bâtiment, il n'est pas utile de modéliser l'état optique du bâtiment. Par conséquent, nous ne modélisons que l'état lumineux de la pièce étudiée. Par ailleurs, contrairement à la thermique, les phénomènes optiques sont instantanés, nous utilisons donc un modèle algébrique.

Il est évident que nos choix de modélisation ont été dictés par le choix et la connaissance des actionneurs qui seront pilotés dans le bâtiment. En effet, pour une simulation poussée du bâtiment, d'autres phénomènes doivent être pris en compte : l'aéraulique, la qualité de l'air, l'acoustique. . . Dans notre démarche, nous avons fait l'hypothèse que les actionneurs n'influençaient pas d'autres grandeurs que la température et l'éclairage. Pour des raisons de réalisme, nous modélisons tout de même l'impact de systèmes aérauliques comme la ventilation sur la thermique du bâtiment, mais sans chercher à les piloter.

Dans ce chapitre, nous présentons en détails les modèles thermiques et optiques que nous avons développés. En premier lieu, nous explicitons le modèle thermique global du bâtiment. Ensuite nous nous intéressons aux modèles thermiques et optiques locaux applicables à une pièce.

II.3.1 La modélisation du comportement thermique global

Le bâtiment est en relation permanente avec l'environnement extérieur. Les échanges de puissance thermique entre ces deux systèmes sont très importants. Les variations de la température extérieure et du flux radiatif solaire peuvent être vues comme des perturbations qui viennent impacter l'équilibre thermique du bâtiment. Pour mettre en valeur les transferts de chaleur aux interfaces, nous avons choisi de différencier le contenu intérieur du bâtiment et son enveloppe. L'intérieur du bâtiment est composé d'air en mouvement et de parois qui délimitent les pièces. À la manière d'une peau, l'enveloppe du bâtiment constitue la frontière entre l'espace intérieur et l'environnement extérieur. De multiples échanges de chaleur sont à prendre en considération pour réaliser une modélisation juste du comportement thermique d'un bâtiment (voir Figure II.13). Par convention, nous classons ces échanges en apports (rayonnement solaire absorbé, sources internes. . .) et en pertes (transmission par l'enveloppe et la ventilation, transmission au sol. . .).

II.3.1.1 La définition du modèle

Le modèle thermique global a pour mission de prédire le comportement thermique moyen de l'ensemble du bâtiment. Nous limitons au maximum le nombre de nœud pour chaque composant. Ainsi, la température de l'air est regroupé en un nœud unique. Il en est de même pour la structure intérieure du bâtiment. Nous décomposons l'enveloppe en fonction de son orientation pour pouvoir représenter l'influence de l'ensoleillement. Comme il y a de nombreux vitrages sur l'enveloppe, nous séparons l'évolution thermique

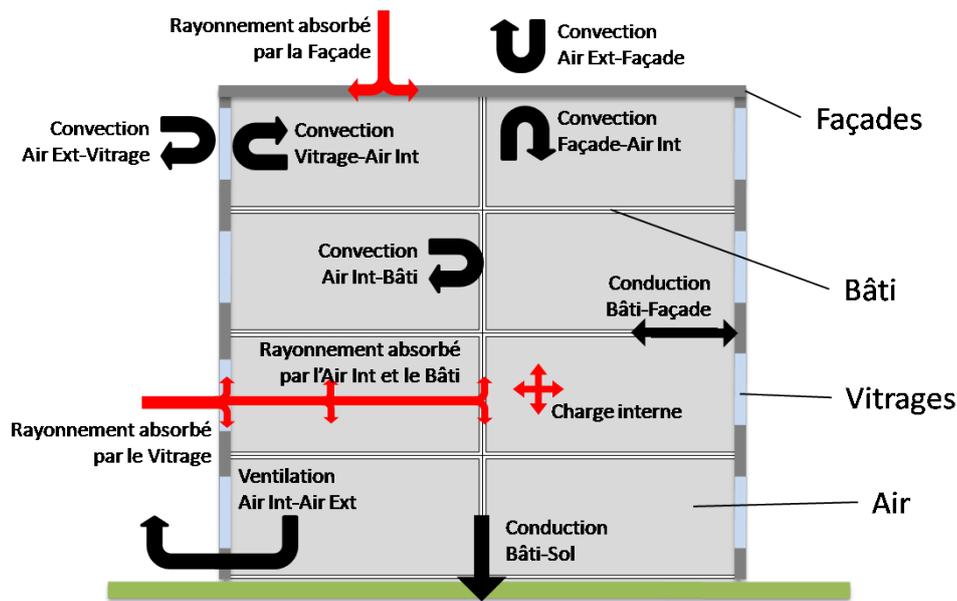


FIGURE II.13 – Apports (en rouge) et pertes (en noir) thermiques dans les bâtiments

des vitrages de celle de la façade. Les nœuds de température sont donc au nombre de onze, nous les notons avec une barre pour bien mettre en évidence qu'ils représentent des grandeurs globales donc moyennes :

- \overline{T}_a , la température moyenne (°C) de l'air intérieur (1 nœud) ;
- \overline{T}_b , la température moyenne (°C) du bâti (1 nœud) ;
- \overline{T}_f , les températures moyennes (°C) des façades (5 nœuds : les quatre façades verticales hors vitrages et le toit) ;
- \overline{T}_v , les températures moyennes (°C) des vitrages (4 nœuds : les vitrages des quatre façades verticales).

Les conditions aux limites sont les données thermiques de l'environnement extérieur, au voisinage du bâtiment. C'est à dire la température de l'air extérieur et la température du sol. Nous les notons :

- T_e , la température (°C) de l'air extérieur ;
- T_g , la température (°C) du sol ;

Les différents nœuds du modèle reçoivent aussi des apports énergétiques radiatifs solaires. En considérant la position du soleil dans la voûte céleste, certains nœuds de façades et de vitrages sont insolés. De plus, une partie du flux solaire passant à travers les vitrages est transmise à l'air et au bâti. Ces flux énergétiques solaires sont notés :

- Φ_a , le flux radiatif (W) absorbé par l'air intérieur ;
- Φ_b , le flux radiatif (W) absorbé par le bâti ;

- Φ_f , le flux radiatif (W) absorbé par les façades ;
- Φ_v , le flux radiatif (W) absorbé par les vitrages.

Par ailleurs, l'air du bâtiment est soumis à une charge thermique qui correspond au chauffage et à d'autres sources que nous assimilons à des perturbations (chaleur dégagée par les occupants, les équipements électriques. . .).

- Φ_{ch} , le flux (W) émis par différents éléments à l'intérieur du bâtiment.

Pour concevoir le modèle thermique, nous avons souhaité utiliser un outil de modélisation pluridisciplinaire et nous sommes donc orientés vers les Bond Graphs [Paynter, 1961]. L'approche Bond Graph permet de décrire des échanges d'énergie dans un système physique. L'énergie y est représentée par un effort et un flux dont le produit est homogène à une puissance. En thermique, les efforts sont des températures et les flux sont des flux entropiques. Nous utiliserons donc ici le pseudo-Bond Graph, extension de la représentation dans le cas particulier de la thermique, qui permet de manipuler directement le débit de chaleur plutôt que le débit d'entropie. La représentation Bond Graph du modèle thermique global permet de matérialiser les différents nœuds thermiques et leurs interactions.

Les représentations graphiques Bond Graph que nous présentons ci-après se composent :

- d'éléments actifs (sources d'effort notées **Se** et sources de flux notées **Sf**) qui fournissent de la puissance au système et qui peuvent être modulées (elles se notent alors **MSe** et **MSf**) ;
- d'éléments passifs (stockages notés **C** et dissipateurs notés **R**) qui reçoivent la puissance ;
- et d'éléments de jonction matérialisant des bilans de puissance à effort commun (notés **0**) ou à flux commun (notés **1**), et des conversions idéales d'énergie d'un domaine à un autre comme les transformateurs (notés **TF**).

II.3.1.2 Les équations de bilan

La structure du modèle thermique se base sur l'écriture des bilans de puissance en chaque nœud. La loi de conservation de l'énergie permet de calculer la température de chaque nœud à partir des différents flux de chaleur échangés.

$$C \frac{dT}{dt} = \sum_{voisins} \Phi$$

Avec C la capacité thermique (J/K) du nœud étudié, T sa température ($^{\circ}\text{C}$) et Φ les échanges thermiques (W). Ces échanges peuvent être convectifs, conductifs, radiatifs ou liés à des transferts de masse. Nous allons maintenant appliquer ce principe aux différents types de nœuds. Nous nous appliquerons à détailler correctement les contributions du flux radiatif solaire envers les différents nœuds du modèle (voir Figure II.14).

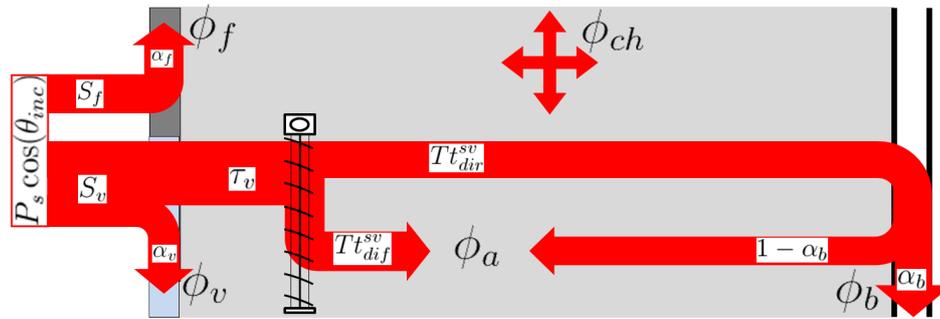


FIGURE II.14 – Répartition du flux radiatif solaire dans le bâtiment

Les vitrages Dans notre approche globale, nous avons regroupé toutes les fenêtres d'une même façade en un seul nœud de vitrage. Il y a donc 4 nœuds de vitrages (Nord, Sud, Est et Ouest) pour le bâtiment étudié. Le bilan de puissance appliqué aux vitrages de l'enveloppe s'exprime en tenant compte de l'échange convectif entre l'air extérieur et le vitrage (1), l'échange convectif entre l'air intérieur et le vitrage (2) et le flux solaire incident absorbé par le vitrage (3).

$$C_v \frac{d\bar{T}_v}{dt} = \underbrace{K_{ve}(T_e - \bar{T}_v)}_{(1)} + \underbrace{K_{va}(\bar{T}_a - \bar{T}_v)}_{(2)} + \underbrace{\Phi_v}_{(3)}$$

Le flux solaire absorbé par les vitrages s'exprime par :

$$\Phi_v = S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \alpha_v$$

Avec :

- C_v la capacité thermique (J/K) du vitrage ;
- K_{ve} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air extérieur - vitrage" ;
- K_{va} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air intérieur - vitrage" ;
- S_v la surface (m^2) de vitrage ;
- P_s la puissance (W/m^2) solaire normale au rayon ;
- θ_{inc} l'angle (rad) d'incidence du flux énergétique solaire sur le vitrage ;
- α_v le coefficient d'absorption du flux énergétique solaire par le vitrage.

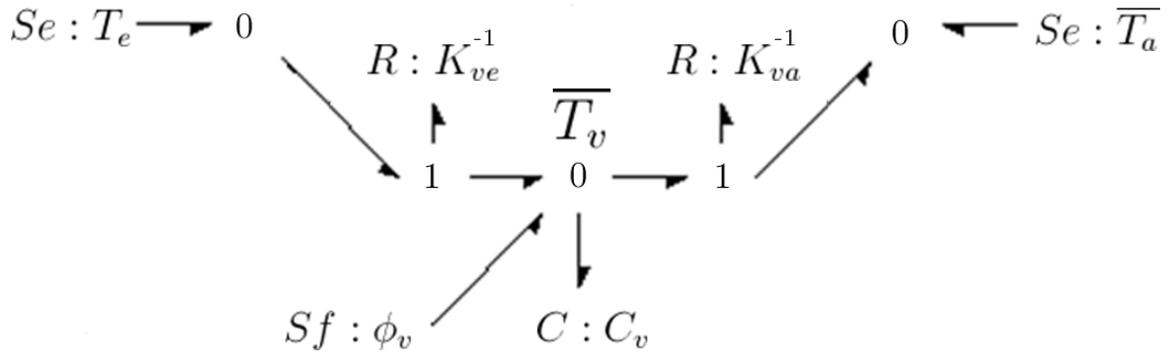


FIGURE II.15 – Représentation Bond Graph d'un vitrage

La conductance thermique K est aussi couramment appelée le coefficient conducto-convectif. En outre, pour déterminer le flux énergétique solaire reçu par un vitrage, il est nécessaire de savoir calculer l'incidence du rayon solaire sur un plan. La fonction χ définie dans le modèle de distribution spatial des luminances du ciel de la CIE [CIE, 2003] permet de calculer cet angle d'incidence grâce à l'azimuth et l'altitude de la normale au plan étudié (α , γ) et du soleil (α_s , γ_s). Nous pouvons calculer θ_{inc} par :

$$\theta_{inc} = \arccos(\sin(\gamma_s) \cdot \sin(\gamma) + \cos(\gamma_s) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(|\alpha_s - \alpha|))$$

Evidemment, si l'angle d'incidence est supérieur à $\pi/2$, le flux solaire incident est nul.

Les façades Les parois extérieures sont considérées de la même manière que les vitrages. Il y a un nœud pour chaque orientation. Pour le bâtiment étudié, il y a donc 5 nœuds de façades (Nord, Sud, Est, Ouest et Toit). L'équilibre thermique appliqué aux façades s'exprime en tenant compte de l'échange convectif entre l'air extérieur et la façade (1), l'échange convectif entre l'air intérieur et la façade (2), l'échange conductif entre le bâti et la façade (3) et le flux solaire absorbé par la façade (4).

$$C_f \frac{d\bar{T}_f}{dt} = \underbrace{K_{fe}(T_e - \bar{T}_f)}_{(1)} + \underbrace{K_{fa}(\bar{T}_a - \bar{T}_f)}_{(2)} + \underbrace{K_{fb}(\bar{T}_b - \bar{T}_f)}_{(3)} + \underbrace{\Phi_f}_{(4)}$$

Le flux solaire absorbé par les façades s'exprime par :

$$\Phi_f = S_f P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \alpha_f$$

Avec :

– C_f la capacité thermique (J/K) de la façade ;

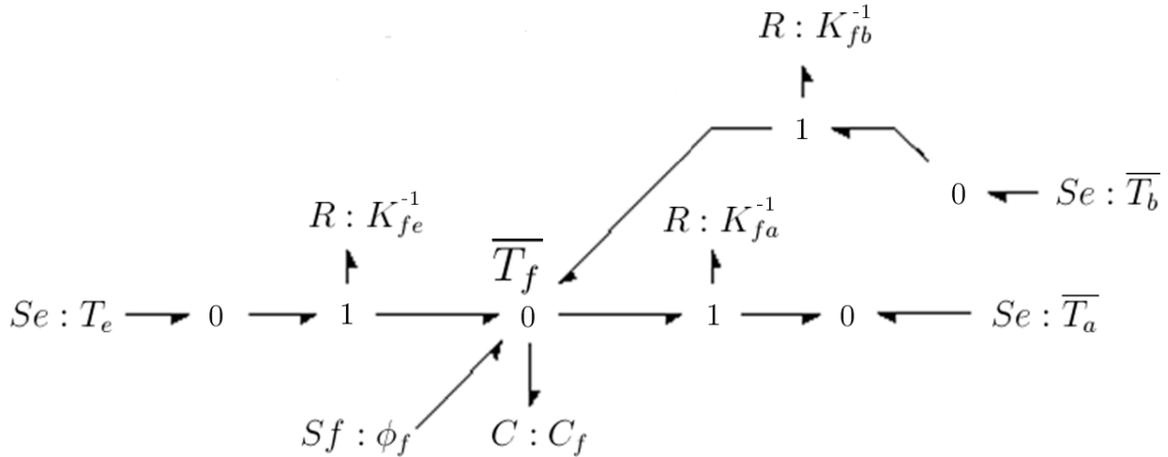


FIGURE II.16 – Représentation Bond Graph d'une façade

- K_{fe} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air extérieur - façade";
- K_{fa} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air intérieur - façade";
- K_{fb} la conductance thermique (W/K) de l'échange conductif "bâti - façade";
- S_f la surface (m^2) de la façade;
- P_s la puissance (W/m^2) solaire normale au rayon;
- θ_{inc} l'angle (rad) d'incidence du flux énergétique solaire sur la façade;
- α_f le coefficient d'absorption du flux énergétique solaire par la façade.

Le bâti Le bâti est modélisé avec un nœud unique intégrant toutes les parois intérieures du bâtiment. Le bâti est en relation avec l'air du bâtiment et avec le sol. Le bilan thermique à ce nœud s'exprime en tenant compte de l'échange convectif entre le bâti et l'air intérieur (1), l'échange conductif entre le bâti et le sol (2), l'échange conductif entre le bâti et les façades (3) et les flux énergétiques solaires traversant les vitrages et les stores vénitiens pour insoler le bâti et être absorbés (4).

$$C_b \frac{d\bar{T}_b}{dt} = \underbrace{K_{ab}(\bar{T}_a - \bar{T}_b)}_{(1)} + \underbrace{K_{bg}(T_g - \bar{T}_b)}_{(2)} + \underbrace{\sum_{\substack{5 \text{ nœuds de} \\ \text{façade}}} K_{fb}(\bar{T}_f - \bar{T}_b)}_{(3)} + \underbrace{\Phi_b}_{(4)}$$

Le flux solaire absorbé par le bâti correspond aux flux solaires transmis par les quatre nœuds de vitrages et passant à travers les stores vénitiens, soit :

$$\Phi_b = \sum_{\substack{4 \text{ nœuds de} \\ \text{vitrage}}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot \bar{T}_{dir}^{sv} \cdot \alpha_b$$

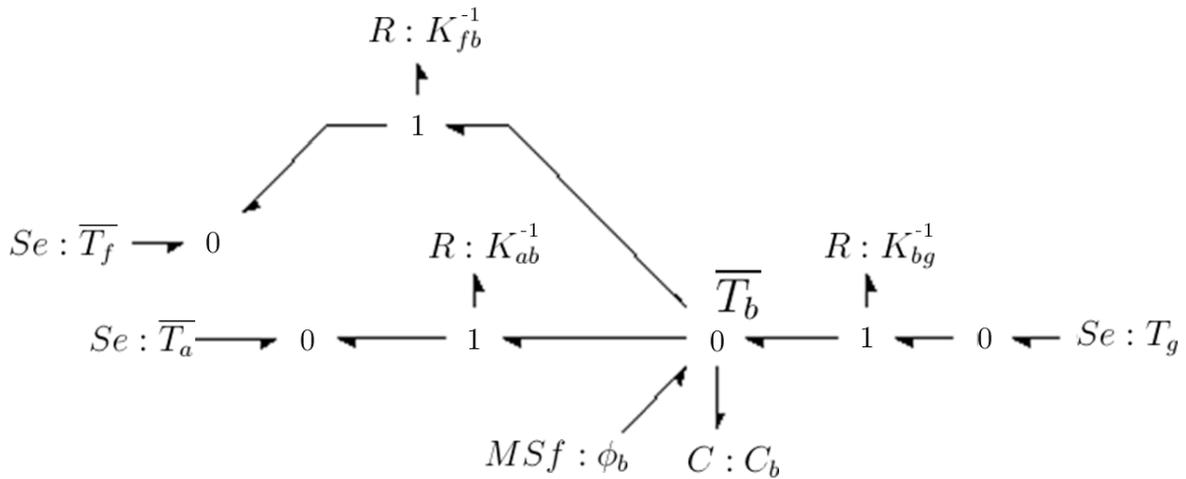


FIGURE II.17 – Représentation Bond Graph du bâti

Avec :

- C_b la capacité thermique (J/K) du bâti ;
- K_{ab} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "bâti - air intérieur" ;
- K_{bg} la conductance thermique (W/K) de l'échange conductif "bâti - sol" ;
- K_{fb} la conductance thermique (W/K) de l'échange conductif "bâti - façade" ;
- S_v la surface (m^2) des vitrages ;
- P_s la puissance (W/m^2) solaire normale au rayon ;
- θ_{inc} l'angle (rad) d'incidence du flux énergétique solaire sur les vitrages ;
- τ_v le coefficient de transmission du flux énergétique solaire par le vitrage ;
- $\overline{Tt_{dir}^{sv}}$ la transmittance thermique directe du store vénitien ;
- α_b le coefficient d'absorption du flux énergétique solaire par le bâti.

Remarque : Pour calculer le flux solaire passant à travers les stores vénitiens, nous avons utilisé la transmittance thermique directe définie précédemment. Cependant, ici un nœud de vitrage correspond à l'ensemble des vitrages d'une même façade donc à plusieurs fenêtres et stores qui sont actionnés individuellement. La transmittance utilisée ici correspond donc à une transmittance moyenne qui pourrait être calculée en connaissance de la position des lamelles de tous les stores.

L'air intérieur Le nœud d'air intérieur représente la température moyenne de l'air dans tout le bâtiment. Le bilan de puissance s'établit en tenant compte de l'échange convectif entre les façades et l'air intérieur (1), l'échange convectif entre les vitrages et l'air intérieur (2), l'échange d'air par ventilation entre l'extérieur et l'intérieur (3), l'échange convectif entre le bâti et l'air intérieur (4), les flux thermiques passant à travers les vitrages, absorbés par les lamelles des stores vénitiens puis diffusés dans

l'air intérieur auxquels s'additionnent les flux thermiques réfléchis par le bâti (5) et fournis par les sources internes (6).

$$C_a \frac{d\bar{T}_a}{dt} = \underbrace{\sum_{5 \text{ nœuds de façade}} K_{fa}(\bar{T}_f - \bar{T}_a)}_{(1)} + \underbrace{\sum_{4 \text{ nœuds de vitrage}} K_{va}(\bar{T}_v - \bar{T}_a)}_{(2)} + \underbrace{K_{ae}(T_e - \bar{T}_a)}_{(3)} + \underbrace{K_{ab}(\bar{T}_b - \bar{T}_a)}_{(4)} + \underbrace{\Phi_a}_{(5)} + \underbrace{\Phi_{ch}}_{(6)}$$

Le flux énergétique absorbé par l'air intérieur correspond au flux solaire transmis par les vitrages et absorbé par les lamelles des stores vénitiens :

$$\begin{aligned} \Phi_a &= \sum_{4 \text{ nœuds de vitrage}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot \left(\overline{T_{dif}^{sv}} + \overline{T_{dir}^{sv}} \cdot (1 - \alpha_b) \right) \\ &= \sum_{4 \text{ nœuds de vitrage}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot \left(\overline{T_{dif}^{sv}} + (1 - \overline{T_{dif}^{sv}}) \cdot (1 - \alpha_b) \right) \\ &= \sum_{4 \text{ nœuds de vitrage}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot \left(1 - \alpha_b (1 - \overline{T_{dif}^{sv}}) \right) \end{aligned}$$

La charge thermique apportée à l'air correspond à l'apport des radiateurs et à une perturbation que nous associons à diverses sources présentes dans le bâtiment :

$$\Phi_{ch} = \Phi_{rad} + \Phi_{perturbations}$$

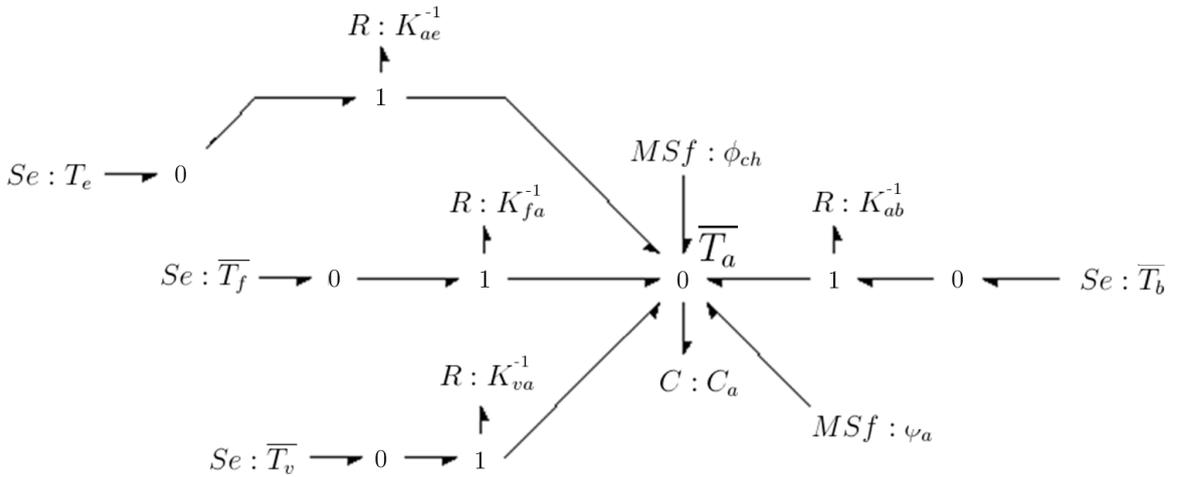


FIGURE II.18 – Représentation Bond Graph de l'air intérieur

Avec :

- C_a la capacité thermique (J/K) de l'air dans le bâtiment ;

- K_{fa} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air intérieur - façade";
- K_{va} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air intérieur - vitrage";
- K_{ae} la conductance thermique (W/K) associée au transfert d'air par ventilation "air intérieur - air extérieur";
- K_{ab} la conductance thermique (W/K) de l'échange conductif "bâti - air intérieur";
- S_v la surface (m^2) des vitrages;
- P_s la puissance (W/m^2) solaire normale aux rayons;
- θ_{inc} l'angle (rad) d'incidence du flux énergétique solaire sur les vitrages;
- τ_v le coefficient de transmission du flux énergétique solaire par le vitrage;
- \overline{T}_{dif}^{sv} la transmittance thermique diffuse du store vénitien;
- \overline{T}_{dir}^{sv} la transmittance thermique directe du store vénitien;
- α_b le coefficient d'absorption du flux énergétique solaire par le bâti.

En regroupant les différents nœuds, nous donnons ci-dessous une représentation Bond Graph complète du modèle thermique du bâtiment (voir Figure II.19). Nous y observons la forte imbrication des échanges énergétiques.

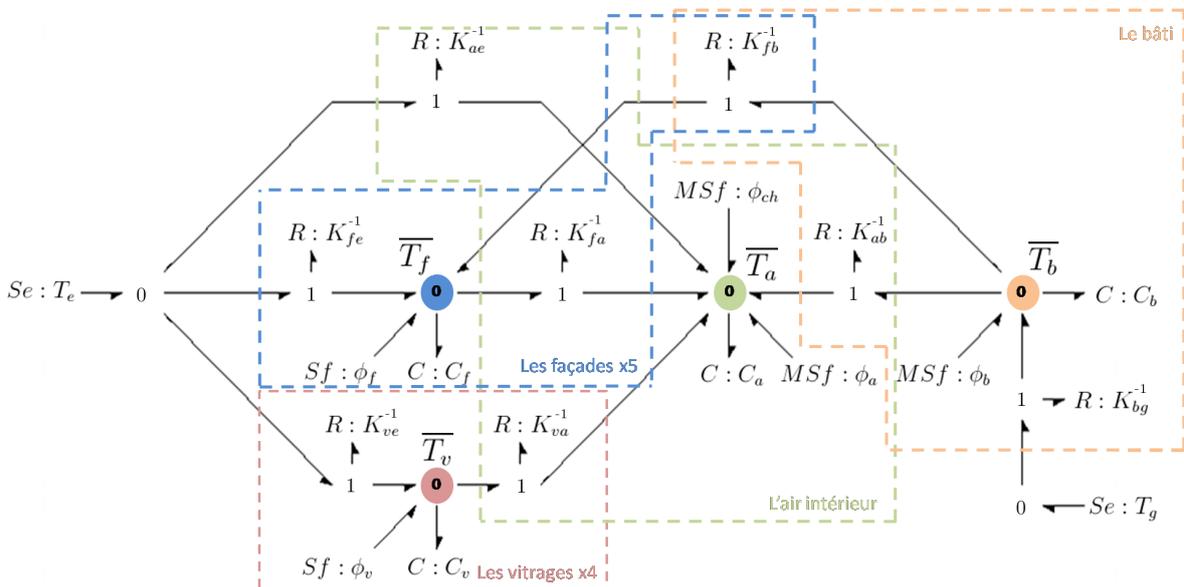


FIGURE II.19 – Représentation Bond Graph du modèle thermique global

II.3.1.3 Les paramètres du modèle

Nous présentons ici les coefficients du modèle pour le bâtiment étudié. Le premier tableau (voir Table II.2) définit les paramètres des nœuds de vitrage et de façade. Le deuxième tableau recense les valeurs de capacité thermique retenues pour les différents nœuds (voir Table II.3). Le troisième tableau contient les coefficients de conductance thermique associés aux transferts conducto-convectifs entre les nœuds du modèle (voir Table II.4). Enfin, le dernier tableau présente le calcul de la conductance thermique associée à la ventilation (voir Table II.5). Elle est définie pour un taux de renouvellement d'air de 25% par heure. Les coefficients conducto-convectifs décrivant les échanges de chaleur entre les différents nœuds sont tirés de [Hernot et Porcher, 1997].

	Noeud thermique	Azimuth (°) de la normale	Altitude (°) de la normale	Surface (m ²)	Coeff transmission solaire	Coeff absorption solaire
Toit	Façade	0	90	1500	0	0,5
Enveloppe Nord	Façade	0	0	90	0	0,5
	Vitrage	0	0	60	0,8	0,1
Enveloppe Sud	Façade	180	0	90	0	0,5
	Vitrage	180	0	60	0,8	0,1
Enveloppe Est	Façade	90	0	600	0	0,5
	Vitrage	90	0	400	0,8	0,1
Enveloppe Ouest	Façade	270	0	600	0	0,5
	Vitrage	270	0	400	0,8	0,1

TABLE II.2 – Caractéristiques des contacts du bâtiment avec l'environnement extérieur

	Noeud thermique	Volume V (m ³)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Capacité thermique massique C _p (J/kg/K)	Capacité thermique C = VρC _p (J/K)
Intérieur	Bâti	2825	2200	880	C _b = 5,47.10 ⁹
	Air	11301	1,2	1005	C _a = 1,36.10 ⁷
Toit	Façade	450	2200	880	C _{fT} = 8,71.10 ⁸
Enveloppe Nord	Façade	27	2200	880	C _{fN} = 5,22.10 ⁷
	Vitrage	0,6	2530	720	C _{vN} = 1,09.10 ⁶
Enveloppe Sud	Façade	27	2200	880	C _{fS} = 5,22.10 ⁷
	Vitrage	0,6	2530	720	C _{vS} = 1,09.10 ⁶
Enveloppe Est	Façade	180	2200	880	C _{fE} = 3,48.10 ⁸
	Vitrage	4	2530	720	C _{vE} = 7,28.10 ⁶
Enveloppe Ouest	Façade	180	2200	880	C _{fO} = 3,48.10 ⁸
	Vitrage	4	2530	720	C _{vO} = 7,28.10 ⁶

TABLE II.3 – Capacités thermiques des différents noeuds du modèle thermique global

Noeuds thermiques	Surface S (m^2)	Coefficient conducto-convectif U ($W/m^2/K$)	Conductance thermique $K = US$ (W/K)
Bâti \Leftrightarrow Sol	1500	0,27	$K_{bg} = 405$
Bâti \Leftrightarrow Toit	300	0,92	$K_{fbT} = 276$
Bâti \Leftrightarrow Façade Nord	18	0,92	$K_{fbN} = 16,56$
Bâti \Leftrightarrow Façade Sud	18	0,92	$K_{fbS} = 16,56$
Bâti \Leftrightarrow Façade Est	120	0,92	$K_{fbE} = 110,4$
Bâti \Leftrightarrow Façade Ouest	120	0,92	$K_{fbO} = 110,4$
Air intérieur \Leftrightarrow Bâti	7250	0,25	$K_{ab} = 1812,5$
Air intérieur \Leftrightarrow Toit	1350	0,36	$K_{faT} = 486$
Air intérieur \Leftrightarrow Façade Nord	81	0,36	$K_{faN} = 29,16$
Air intérieur \Leftrightarrow Façade Sud	81	0,36	$K_{faS} = 29,16$
Air intérieur \Leftrightarrow Façade Est	540	0,36	$K_{faE} = 194,4$
Air intérieur \Leftrightarrow Façade Ouest	540	0,36	$K_{faO} = 194,4$
Air intérieur \Leftrightarrow Vitrages Nord	60	2,1	$K_{vaN} = 126$
Air intérieur \Leftrightarrow Vitrages Sud	60	2,1	$K_{vaS} = 126$
Air intérieur \Leftrightarrow Vitrages Est	400	2,1	$K_{vaE} = 840$
Air intérieur \Leftrightarrow Vitrages Ouest	400	2,1	$K_{vaO} = 840$
Toit \Leftrightarrow Air extérieur	1500	3,6	$K_{feT} = 5400$
Façade Nord \Leftrightarrow Air extérieur	90	3,6	$K_{feN} = 324$
Façade Sud \Leftrightarrow Air extérieur	90	3,6	$K_{feS} = 324$
Façade Est \Leftrightarrow Air extérieur	600	3,6	$K_{feE} = 2160$
Façade Ouest \Leftrightarrow Air extérieur	600	3,6	$K_{feO} = 2160$
Vitrages Nord \Leftrightarrow Air extérieur	60	21	$K_{veN} = 1260$
Vitrages Sud \Leftrightarrow Air extérieur	60	21	$K_{veS} = 1260$
Vitrages Est \Leftrightarrow Air extérieur	400	21	$K_{veE} = 8400$
Vitrages Ouest \Leftrightarrow Air extérieur	400	21	$K_{veO} = 8400$

TABLE II.4 – Conductances thermiques entre les différents noeuds du modèle thermique global

Noeuds thermiques	Débit q (m^3/s)	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Capacité thermique massique C_p ($J/kg/K$)	Conductance thermique $K = q\rho C_p$ (W/K)
Air intérieur \Leftrightarrow Air extérieur	0,8	1,2	1005	$K_{ae} = 964,8$

TABLE II.5 – Conductance thermique des pertes par ventilation

II.3.2 La modélisation du comportement thermique local

La modélisation thermique locale s'intéresse à la représentation des températures dans la pièce d'intérêt. Comme le bâtiment, les pièces subissent l'impact thermique de l'environnement extérieur. Mais les pièces ont des volumes beaucoup plus restreints ce qui leur confère une inertie thermique nettement plus faible. La température dans une pièce évolue donc plus rapidement que la température moyenne dans le bâtiment. Cependant, les pièces sont aussi soumises à l'inertie thermique du bâtiment à cause de la circulation de l'air et de l'échange thermique avec les parois intérieures et les façades.

Nous faisons ici l'hypothèse que la pièce est une petite partie du bâtiment. Elle est soumise aux variations lentes du bâtiment mais dispose de plusieurs actionneurs (un radiateur et deux stores vénitiens) modulant les sources de chaleur. En pratique, cette hypothèse nous permet d'énoncer que les données de température issues du modèle global correspondent aux conditions limites du modèle local. Ainsi, nous supposons que les actionneurs n'influencent pas les températures des façades et des vitrages qui sont aussi considérés comme des conditions aux limites. Comme pour le modèle global, nous intégrons dans le modèle plusieurs échanges thermiques classiques (voir Figure II.20). Nous considérons que l'air de la pièce se mélange avec l'air du bâtiment par ventilation interne et que les parois de la pièce échangent avec les parois du bâtiment par conduction.

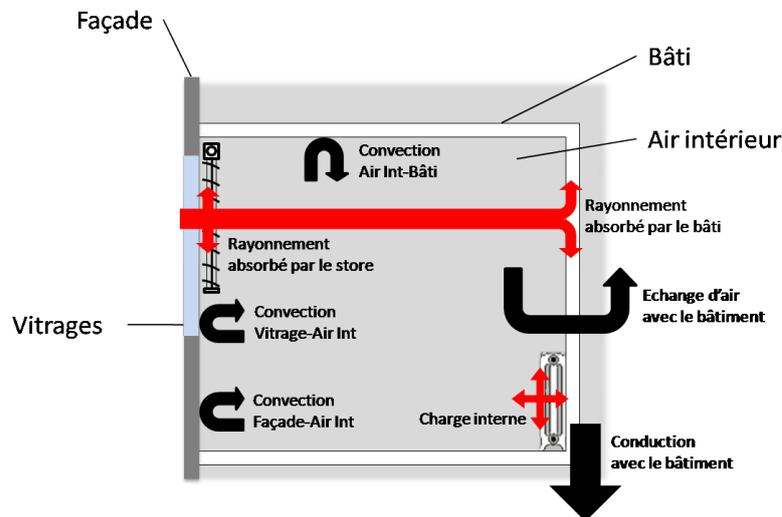


FIGURE II.20 – Apports (en rouge) et pertes (en noir) thermiques dans les pièces

II.3.2.1 La définition du modèle

Le modèle thermique local a pour mission de prédéterminer le comportement thermique d'une pièce en connaissance du comportement thermique moyen du bâtiment. Comme précédemment, nous cherchons à modéliser simplement les échanges thermiques. Par conséquent, nous regroupons la totalité de l'air en un nœud et de même pour les parois intérieures de la pièce. Il n'y a que deux nœuds de température dans ce modèle. Nous les notons :

- T_a , la température (°C) de l'air dans la pièce (1 nœud) ;
- T_b , la température (°C) des parois intérieures de la pièce (1 nœud) ;

Les conditions aux limites sont les données thermiques globales du bâtiment c'est-à-dire la température moyenne des façades, des vitrages, du bâti et de l'air. La pièce étudiée est mono-façade, nous aurons donc une seule température de façade. Mais la pièce a deux ouvrants sur cette façade, nous utilisons donc deux températures de vitrages identiques. Nous gardons ici les notations du modèle global car les conditions aux limites sont directement issues de ce modèle :

- \overline{T}_a , la température moyenne (°C) de l'air intérieur ;
- \overline{T}_b , la température moyenne (°C) du bâti ;
- \overline{T}_f , la température moyenne (°C) de la façade en contact avec l'air de la pièce (1 nœud) ;
- \overline{T}_v , les températures moyennes (°C) des vitrages en contact avec l'air de la pièce (2 nœuds).

Le flux solaire pénétrant dans la pièce impacte l'air et le bâti de la pièce. Par ailleurs, l'air de la pièce est soumis à une charge thermique qui correspond au chauffage et aux perturbations. Ces flux entropiques sont notés :

- Φ_a , le flux radiatif (W) absorbé par l'air intérieur ;
- Φ_b , le flux radiatif (W) absorbé par le bâti ;
- Φ_{ch} , le flux (W) émis par différents systèmes (dont le radiateur) à l'air de la pièce.

II.3.2.2 Les équations de bilan

Comme précédemment, les bilans de puissance sont mis en équation par la loi de conservation de l'énergie.

Les parois intérieures Au niveau pièce, les parois intérieures ne sont pas définies comme des conditions aux limites. Ce choix est motivé par la commande car les stores vénitiens ont un impact important sur l'insolation dans la pièce. Ainsi, les parois ont la capacité de monter rapidement en température suite à une insolation. La température des parois dans la pièce est calculée en tenant compte de l'échange convectif avec l'air intérieur (1), de l'échange par conduction entre les parois de la pièce et le bâti du bâtiment (2) et des flux énergétiques solaires passant à travers les vitrages et les stores vénitiens pour enfin être absorbés par les parois (3).

$$C_b \frac{dT_b}{dt} = \underbrace{K_{ab}(T_a - T_b)}_{(1)} + \underbrace{K_{bb}(\bar{T}_b - T_b)}_{(2)} + \underbrace{\Phi_b}_{(3)}$$

Le flux solaire absorbé par le bâti s'exprime :

$$\Phi_b = \sum_{2 \text{ vitrages}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot T t_{dir}^{sv} \cdot \alpha_b$$

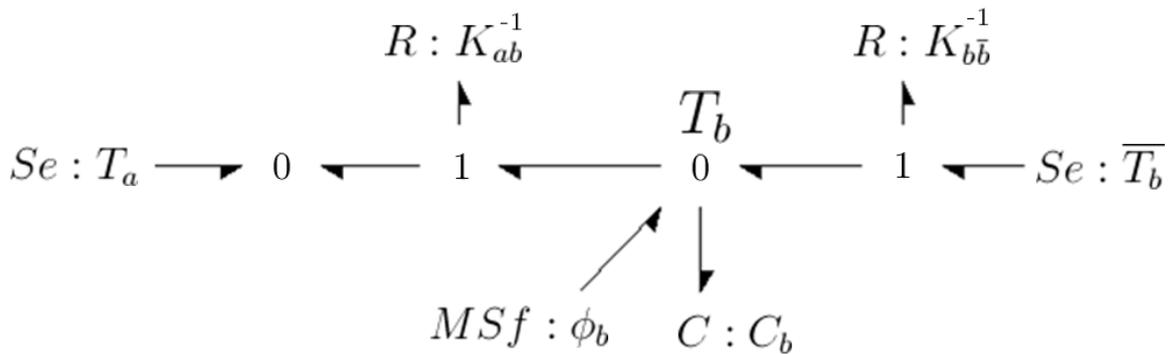


FIGURE II.21 – Représentation Bond Graph des parois intérieures

Avec :

- C_b la capacité thermique (J/K) du bâti ;
- K_{ab} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "bâti - air intérieur" ;
- K_{bb} la conductance thermique (W/K) de l'échange conductif "bâti local - bâti global" ;
- S_v la surface (m^2) des vitrages ;
- P_s la puissance (W/m^2) solaire normale au rayon ;
- θ_{inc} l'angle (rad) d'incidence du flux énergétique solaire sur les vitrages ;
- τ_v le coefficient de transmission du flux énergétique solaire par le vitrage ;
- $T t_{dir}^{sv}$ la transmittance thermique directe du store vénitien associé au vitrage ;
- α_b le coefficient d'absorption du flux énergétique solaire par le bâti.

L'air intérieur L'air dans la pièce est défini par un nœud. L'équation est similaire à celle du niveau bâtiment sauf que nous ne tenons pas compte de la ventilation mais nous intégrons la circulation de l'air entre la pièce et le bâtiment. L'équilibre thermique appliqué à l'air dans la pièce s'exprime en tenant compte de l'échange convectif entre les façades et l'air intérieur (1), l'échange convectif entre les vitrages et l'air intérieur (2), l'échange d'air par circulation entre la pièce et le reste du bâtiment (3), l'échange convectif entre le bâti et l'air intérieur (4), les flux thermiques passant à travers les vitrages, absorbés par les lamelles des stores vénitiens puis diffusés dans l'air intérieur auquel s'additionne le flux thermique réfléchi par le bâti (5) et fourni par les sources internes (6).

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = \underbrace{K_{fa}(\bar{T}_f - T_a)}_{(1)} + \underbrace{\sum_{2 \text{ vitrages}} K_{va}(\bar{T}_v - T_a)}_{(2)} + \underbrace{K_{a\bar{a}}(\bar{T}_a - T_a)}_{(3)} + \underbrace{K_{ab}(T_b - T_a)}_{(4)} + \underbrace{\Phi_a}_{(5)} + \underbrace{\Phi_{ch}}_{(6)}$$

Le flux solaire transmis par les lamelles des stores vénitiens à l'air intérieur s'exprime :

$$\begin{aligned} \Phi_a &= \sum_{2 \text{ vitrages}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot (T_{dif}^{sv} + T_{dir}^{sv} \cdot (1 - \alpha_b)) \\ &= \sum_{2 \text{ vitrages}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot (T_{dif}^{sv} + (1 - T_{dif}^{sv}) \cdot (1 - \alpha_b)) \\ &= \sum_{2 \text{ vitrages}} S_v P_s \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot (1 - \alpha_b (1 - T_{dif}^{sv})) \end{aligned}$$

Et la charge interne tient compte des apports du radiateur et des perturbations :

$$\Phi_{ch} = \Phi_{rad} + \Phi_{pert}$$

Avec :

- C_a la capacité thermique (J/K) de l'air dans la pièce ;
- K_{fa} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air intérieur - façade" ;
- K_{va} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "air intérieur - vitrage" ;
- $K_{a\bar{a}}$ la conductance thermique (W/K) associée au transfert d'air par ventilation "air local - air global" ;
- K_{ab} la conductance thermique (W/K) de l'échange convectif "bâti - air intérieur" ;
- S_v la surface (m^2) des vitrages ;
- P_s la puissance (W/m^2) solaire normale au rayon ;
- θ_{inc} l'angle (rad) d'incidence du flux énergétique solaire sur les vitrages ;
- τ_v le coefficient de transmission du flux énergétique solaire par le vitrage ;

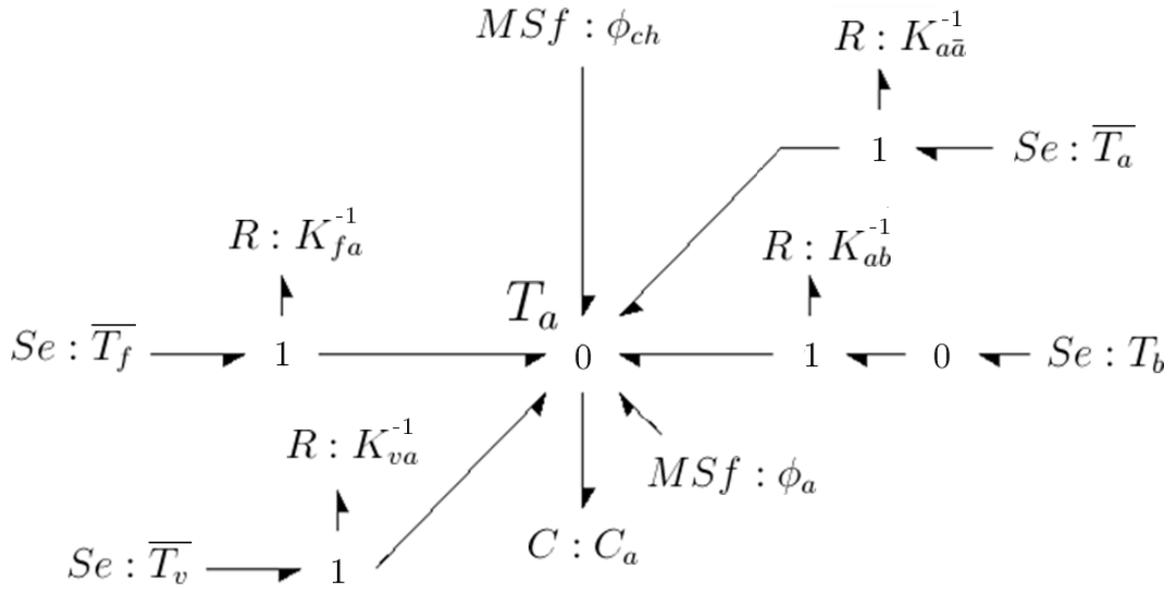


FIGURE II.22 – Représentation Bond Graph de l'air intérieur

- T_{dif}^{sv} la transmittance thermique diffuse du store vénitien associé au vitrage.
- T_{dir}^{sv} la transmittance thermique directe du store vénitien associé au vitrage ;
- α_b le coefficient d'absorption du flux énergétique solaire par le bâti.

La représentation Bond Graph complète du modèle local (voir Figure II.23) met en évidence de nombreuses similitudes avec le modèle global. De plus, nous observons que les températures des vitrages et des façades sont des conditions aux limites dont les valeurs sont définies par le modèle global bâtiment. Cela correspond à faire l'hypothèse que tous les vitrages d'une même façade sont à la même température. Nous ne prenons donc pas en considération les phénomènes de masque solaire engendrés par l'environnement et qui créent des gradients de température sur les façades.

II.3.2.3 Les paramètres du modèle

Nous présentons ici les coefficients du modèle pour la pièce étudiée. Le premier tableau définit les paramètres des deux vitrages (voir Table II.6). Le deuxième tableau recense les valeurs de capacité thermique retenues pour les différents nœuds (voir Table II.7). Le troisième tableau contient les coefficients de conductance thermique associés aux transferts conducto-convectifs entre les nœuds du modèle (voir Table II.8). Enfin, le dernier tableau présente le calcul de la conductance thermique associée à la transmission d'air entre la pièce et le reste du bâtiment (voir Table II.9). Elle est définie pour un

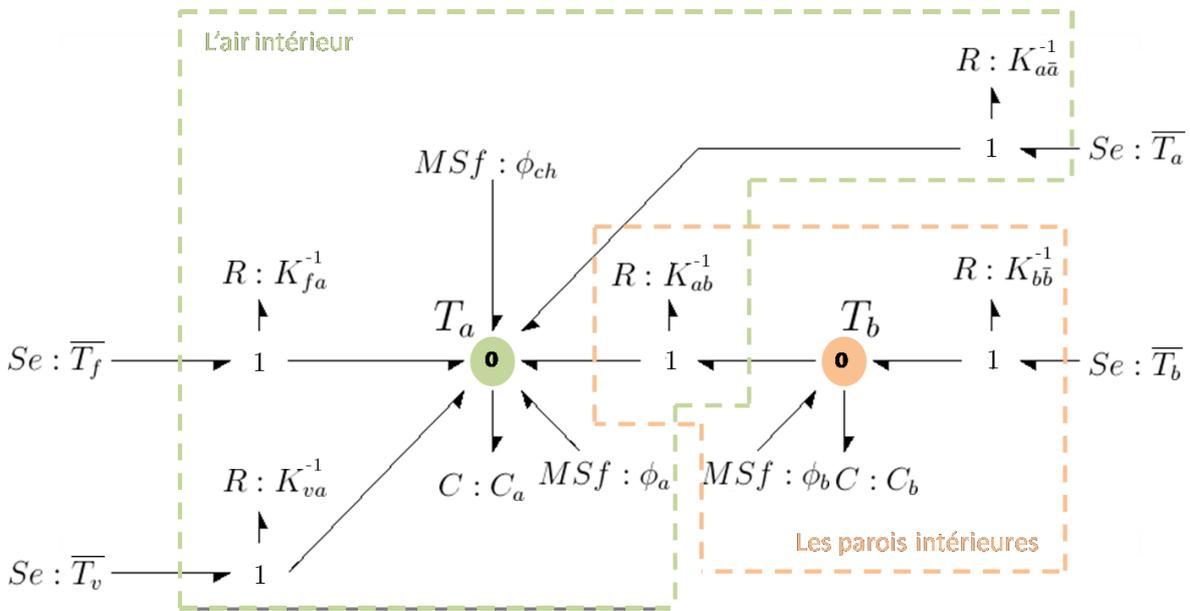


FIGURE II.23 – Approche Bond Graph du modèle thermique local

taux de circulation d'air de 20% par heure.

Noeud thermique	Azimuth (°) de la normale	Altitude (°) de la normale	Surface (m ²)	Coeff transmission solaire	Coeff absorption solaire
Vitrage 1	180	0	4	0,8	0,1
Vitrage 2	180	0	4	0,8	0,1

TABLE II.6 – Caractéristiques des contacts de la pièce avec l'environnement extérieur

Noeud thermique	Volume V (m ³)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Capacité thermique massique C_p (J/kg/K)	Capacité thermique $C = V\rho C_p$ (J/K)
Bâti	6	2200	880	$C_b = 1,16 \cdot 10^7$
Air	75	1,2	1005	$C_a = 9,04 \cdot 10^4$

TABLE II.7 – Capacités thermiques des différents noeuds du modèle thermique local

Noeuds thermiques	Surface S (m^2)	Coefficient conducto-convectif U ($W/m^2/K$)	Conductance thermique $K = US$ (W/K)
Bâti \Leftrightarrow Bâti global	118	0,92	$K_{b\bar{b}} = 108,79$
Air \Leftrightarrow Bâti	95	0,25	$K_{ab} = 23,75$
Air \Leftrightarrow Façade Sud	7	0,36	$K_{fa} = 2,52$
Air \Leftrightarrow Vitrages 1	4	2,1	$K_{va1} = 8,4$
Air \Leftrightarrow Vitrages 2	4	2,1	$K_{va2} = 8,4$

TABLE II.8 – *Conductances thermiques entre les différents noeuds du modèle thermique local*

Noeuds thermiques	Débit q (m^3/s)	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Capacité thermique massique C_p ($J/kg/K$)	Conductance thermique $K = q\rho C_p$ (W/K)
Air \Leftrightarrow Air global	0.004	1,2	1005	$K_{a\bar{a}} = 4,82$

TABLE II.9 – *Conductance thermique des pertes par transmission d'air*

II.3.3 La modélisation du comportement optique local

En optique, il n'y a pas d'actionneurs partagés dans le bâtiment. La modélisation de la lumière n'a de sens qu'au niveau de la pièce et vise à retranscrire mathématiquement l'ambiance lumineuse. Notre approche de modélisation optique repose sur le calcul algébrique des flux lumineux entrant dans la pièce.

Plutôt que de modéliser finement pour faire du rendu optique, nous nous orientons vers la caractérisation de l'ambiance en ayant pour principales informations la position et l'intensité des sources de flux lumineux. Toute pièce est équipée de deux types de sources lumineuses : certaines sont artificielles comme les luminaires plafonniers dont l'intensité dépend de leur consommation, d'autres sont des sources lumineuses naturelles comme les ouvrants avec les stores vénitiens dont l'intensité dépend naturellement du potentiel lumineux extérieur. Pour modéliser les flux lumineux, nous prendrons en considération plusieurs apports lumineux (voir Figure II.24). Nous travaillons sous l'hypothèse que chacune de ces sources peut être assimilée à une source apportant une lumière diffuse à la pièce.

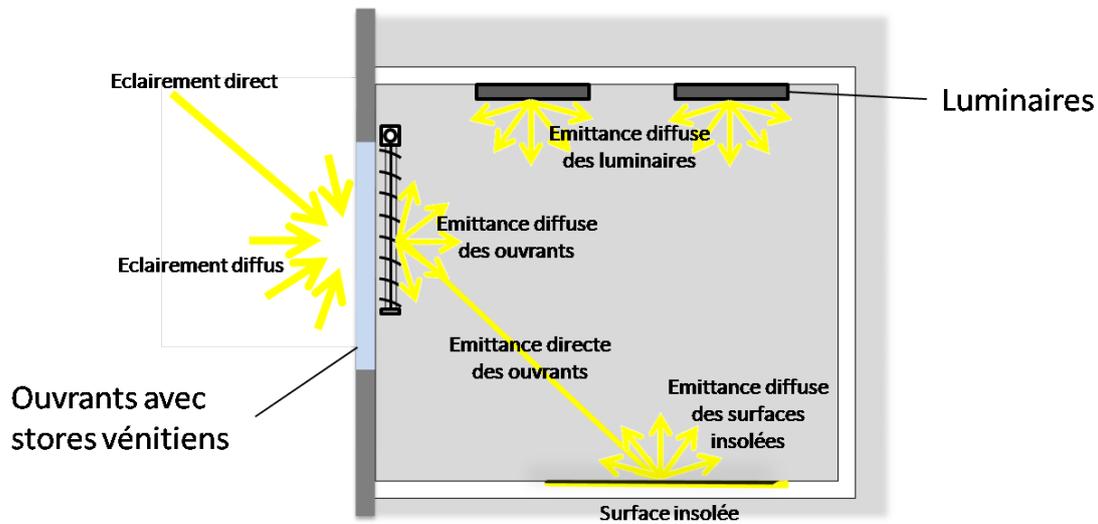


FIGURE II.24 – Apports optiques dans les pièces

II.3.3.1 La définition du modèle

L'ambiance lumineuse se traduit par plusieurs critères que nous avons retenus comme étant la quantité, la répartition et la qualité de lumière dans la pièce. Nous proposons ici uniquement une modélisation de la quantité de lumière. Généralement, le flux lumineux s'exprime sous la forme d'un éclairage lumineux reçu sur une surface. Ce flux dépend naturellement de la localisation du point de mesure, et la répartition de l'éclairage dans la pièce dépend principalement de la géométrie de la pièce et de son mobilier. Pour s'affranchir de tous ces paramètres, notre objectif est de modéliser la quantité de lumière émise par les sources. En faisant l'hypothèse que toutes les surfaces de la pièce sont diffusantes, nous pourrions ramener cette qualité de lumière émise à un éclairage moyen dans la pièce.

La quantité de lumière est assimilée à la somme des flux lumineux diffus émis par les sources naturelles et artificielles présentes dans la pièce. Ce flux total est divisé par la surface des parois pour être homogène à un éclairage. La quantité de lumière est donc exprimée par un éclairage moyen dans la pièce :

$$E = \frac{1}{S} \sum_{\text{sources}} \phi_{dif}$$

Avec :

- E l'éclairage moyen (lux) dans la pièce ;
- S la surface (m^2) de paroi dans la pièce ;
- ϕ_{dif} les flux lumineux (lm) diffus émis par les sources.

En appliquant ce modèle à la pièce étudiée, nous pouvons exprimer les contributions de chaque source sur l'éclairage moyen dans la pièce : Pour les luminaires, l'expression est déjà connue car nous l'avons exprimée dans la partie précédente :

$$\phi_{dif}^{lum} = \eta_{lum} P_{lum}^{conso}$$

Avec :

- η_{lum} , le rendement lumineux du luminaire ;
- P_{lum}^{conso} la consommation énergétique (W) du luminaire.

Pour les stores vénitiens, il y a deux phénomènes à prendre en compte. Tout d'abord, les lamelles transmettent une partie du flux diffus passant à travers le vitrage (1). D'autre part, une partie du flux direct extérieur passe entre les lamelles pour insoler l'intérieur de la pièce. En supposant que l'intérieur de la pièce soit totalement diffusant, cette surface insolée peut être considérée comme une source diffuse qui contribue aussi à l'éclairage moyen (2). L'apport diffus total du store vénitien s'exprime alors :

$$\phi_{dif}^{sv} = \underbrace{E_{dif} \cdot \tau_v \cdot S_v \cdot T o_{dif}^{sv}}_{(1)} + \underbrace{E_{dir} \cdot \cos(\theta_{inc}) \cdot \tau_v \cdot S_v \cdot T o_{dir}^{sv} \cdot r_b}_{(2)}$$

Avec :

- E_{dif} l'éclairage lumineux (lux) diffus extérieur reçu par la façade ;
- E_{dir} l'éclairage lumineux (lux) direct extérieur normal aux rayons ;
- τ_v le coefficient de transmission optique du vitrage ;
- S_v la surface (m^2) du vitrage ;
- $T o_{dif}^{sv}$ la transmittance diffuse du store vénitien ;
- $T o_{dir}^{sv}$ la transmittance directe du store vénitien ;
- θ_{inc} l'angle d'incidence (rad) du flux direct extérieur sur le vitrage ;
- r_b le coefficient de réflexion sur la zone insolée.

Le modèle présenté ici tire son principal intérêt du fait qu'il estime l'ambiance lumineuse à partir de critères simples et facilement mesurables. De plus, contrairement à d'autres modèles du même type qui sont référencés sur la disponibilité en éclairage extérieur, nous proposons ici un calcul à partir du flux lumineux émis par les différentes sources présentes dans la pièce. Ainsi, ce modèle distingue l'actionneur et l'ambiance lumineuse ce qui permet une intégration plus aisée d'autres types d'occultants.

Cependant, cette modélisation de l'ambiance lumineuse est très approximative car elle est basée sur l'hypothèse que les sources sont parfaitement diffusantes. Or nous savons bien que la distribution des intensités lumineuses émis par un store ne revêt pas un caractère diffus à cause des multiples réflexions sur les lamelles. Cependant, les

calculs fins des réflexions optiques sont d'une telle complexité qu'ils s'avèrent inadaptés à nos objectifs de commande.

II.3.3.2 Les paramètres du modèle

Les paramètres que nous avons utilisés pour simuler la pièce d'étudiée sont regroupés dans le tableau suivant (voir Table II.10).

Paramètres	Valeurs
Rendement lumineux des luminaires	80 lm/W
Surface des fenêtres	4 m^2
Coefficient de transmission optique des fenêtres	0,7
Surface des parois	110 m^2
Coefficient de réflexion des parois	0,7

TABLE II.10 – *Caractéristiques de la pièce pour le modèle optique*

Résumé Pour conclure, nous nous devons d'insister sur la spécificité des modèles développés. Ces modèles sont pensés et réalisés pour la commande. Ainsi le modèle thermique est décomposé en un modèle global et un modèle local représentant respectivement le bâtiment et la pièce. Ce découplage du problème est directement issu de l'architecture de contrôle à deux niveaux d'action. En optique, nous nous sommes limité à un modèle local car le contrôle de la lumière est réalisé uniquement dans la pièce. Pour finaliser notre démarche de modélisation, il reste à valider le modèle. Pour ce faire, nous allons maintenant visualiser le comportement du bâtiment modélisé en réponse à des données climatiques réelles.

II.4 Résultats de simulation

Pour analyser le simulateur thermique et optique du bâtiment, nous allons dans cette partie observer son comportement général. Nous avons soumis le simulateur de bâtiment à des données climatiques mesurées à Lyon sur l'ensemble de l'année 2009. Après une rapide présentation du contenu de ces données météorologiques, nous démontrerons la cohérence de notre modèle en observant le comportement du bâtiment. Cette analyse par visualisation de l'état simulé du bâtiment a été réalisée sur deux échelles de temps : d'abord sur l'année entière puis en zoomant sur quatre journées typiques (d'hiver et d'été, nuageuses et ensoleillées).

II.4.1 Les mesures de l'environnement extérieur

Les données sur l'environnement extérieur que nous utilisons pour nos simulations sont issues de la station météorologique située à l'ENTPE¹ à Vaulx-en-Velin. Cette station fait partie du réseau IDMP (International Daylight Measurement Programme) qui comprend 47 autres stations réparties dans le monde entier et qui ont pour mission de mesurer la lumière naturelle et la puissance solaire en haute résolution. Ces mesures sont une ressource d'informations climatiques très importante pour les architectes, les chercheurs et les ingénieurs travaillant sur l'utilisation des apports énergétiques et lumineux naturels.

La station de l'ENTPE est située à moins de dix kilomètres du laboratoire AM-PERE et fournit donc une bonne mesure du climat auquel est soumis le bâtiment étudié. Les paramètres mesurés sont la quantité de lumière naturelle et de rayonnement solaire provenant de la voûte céleste et du soleil. Ces mesures sont sauvegardées chaque minute depuis le mois de Septembre 1993. De plus, ces données sont très faciles d'accès car disponibles directement sur le serveur de la station [Dumortier, 2011]. La station de mesure est composée de multiples capteurs pour analyser l'ensemble des composantes du rayonnement énergétique et lumineux solaire. Les données que nous exploitons pour nos simulations sont la température extérieure, la puissance énergétique solaire et l'éclairage lumineux (voir Table II.11).

Parmi les dix-neuf années de données accessibles, nous avons sélectionné l'année 2009 pour la bonne qualité de ses acquisitions. De plus, cette année a été marquée par plusieurs événements météorologiques : une vague de froid du 3 au 11 janvier, de fortes chaleurs du 15 au 20 août et une autre vague de froid du 15 au 20 décembre. Ces données sont utiles pour observer l'impact du contrôle au fil des saisons ainsi que pour

1. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin Cedex

Données	Mesures	Capteurs
Dbt	Température sèche	Vaisala HMP45AC
Ees	Eclairement énergétique direct normal	Kipp&Zonen CH-1 et EKO STR-22
Ehg	Eclairement lumineux horizontal global	LMT BAP 30 FCT
Evgn	Eclairement lumineux vertical global Nord	LMT BAP 30 FCT
Evgs	Eclairement lumineux vertical global Sud	LMT BAP 30 FCT
Evge	Eclairement lumineux vertical global Est	LMT BAP 30 FCT
Evgw	Eclairement lumineux vertical global Ouest	LMT BAP 30 FCT

TABLE II.11 – Mesures et capteurs de la station IDMP de Vaulx-en-Velin

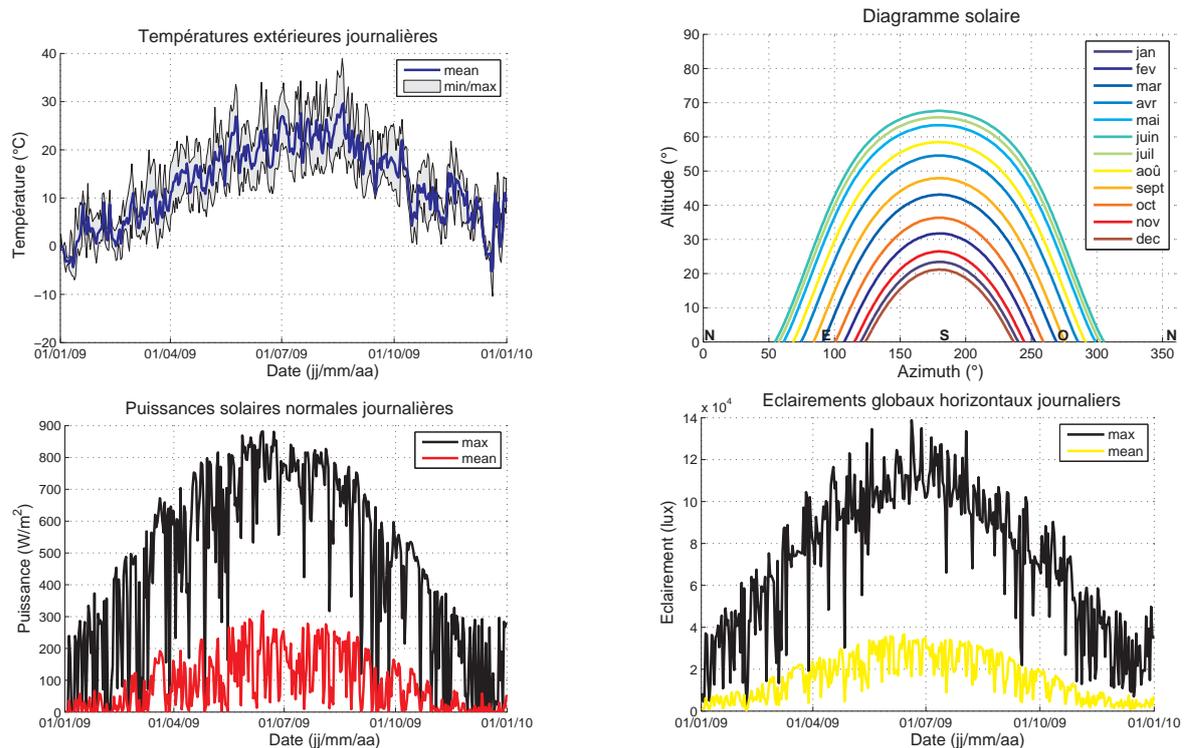
accéder à des résultats de consommations énergétiques annuelles. Afin de présenter ces données climatiques, nous proposons des statistiques sur les valeurs moyennes et extrêmes de température, de puissance solaire horizontale et de puissance lumineuse horizontale (voir Figure II.25). Plusieurs remarques découlent de ces statistiques :

- Sur l'évolution des puissances solaires, nous observons de fortes baisses répétées qui sont liées à la nébulosité. Certains jours, la puissance solaire maximale est quasi-nulle ce qui traduit des journées entières où le soleil est totalement voilé. La puissance énergétique solaire est donc un bon indicateur de la présence ou non de rayons solaires directs.
- Sur l'évolution de l'éclairement global horizontal, nous observons aussi de fortes baisses répétées (souvent corrélées avec les baisses de puissance solaire) mais la puissance lumineuse journalière n'est jamais nulle. En effet, il reste toujours la composante diffuse provenant de la voûte céleste même lorsque le soleil est voilé.
- En intégrant la puissance solaire sur l'année, nous retenons que l'énergie solaire totale reçue en 2009 par une surface normale aux rayons est d'environ 750 kWh/m^2 , et l'énergie lumineuse sur une surface horizontale est proche de 138 MLuxh^2 .

En outre, pour parfaire l'expérimentation du contrôle, il nous a semblé nécessaire d'étudier l'évolution du bâtiment à une échelle beaucoup plus fine et plus concrète. Même si l'étude annuelle permet d'avoir une vision claire des consommations et s'avère nécessaire pour comparer l'efficacité énergétique de différents contrôles, il semble aussi important d'étudier le fonctionnement des actionneurs au cours d'une journée pour se faire une idée de la cohérence du contrôle vis-à-vis du confort des occupants. Comme le climat peut considérablement changer d'une journée sur l'autre, nous définissons quatre cas de référence :

Cas 1 : Hiver ciel couvert Journée d'hiver à forte nébulosité. La puissance solaire

2. Méga Lux-heure, par analogie nous utilisons une unité assimilable à des Wh/m^2 ($\text{Lux} \equiv \text{Lumen/m}^2 \equiv \text{W/m}^2$)

FIGURE II.25 – *Statistiques climatiques de Vaulx-en-Velin en 2009*

(énergétique et lumineuse) est très faible et les températures sont basses ;

Cas 2 : Hiver ciel clair Journée d’hiver ensoleillée. La puissance solaire est élevée et les températures sont basses ;

Cas 3 : Été ciel couvert Journée d’été à forte nébulosité. La puissance solaire est très faible et les températures sont hautes ;

Cas 4 : Été ciel clair Journée d’été ensoleillée. La puissance solaire est élevée et les températures sont hautes.

En observant les données de l’année 2009, nous avons sélectionné quatre journées proches de ces cas. Ces journées sont respectivement le 18 janvier, le 29 janvier, le 11 août et le 2 septembre. L’évolution des températures et des apports solaires au cours de ces journées est présentée ci-après (voir Table II.12).

Pour la thermique, la station de mesure nous fournit toutes les données nécessaires (température extérieure et puissance radiative solaire). Par contre, en optique, la station ne mesure pas l’éclairement direct provenant de l’astre solaire mais uniquement des données d’éclairement global. Nous avons donc développé un prétraitement capable de séparer les composantes diffuses et directes de l’éclairement global. L’éclairement global E_g correspond à une mesure réalisée par un luxmètre. Nous savons qu’il peut s’exprimer sous la forme suivante :

$$E_g = E_{dif} + E_{dir} \cdot \cos(\theta_{inc})$$

	Températures	Eclairages énergétiques et lumineux
Cas 1 : Hiver nuageux	<p>Températures extérieures (18/01/2009)</p>	<p>Apports solaires (18/01/2009)</p>
Cas 2 : Hiver soleil	<p>Températures extérieures (29/01/2009)</p>	<p>Apports solaires (29/01/2009)</p>
Cas 3 : Été nuageux	<p>Températures extérieures (02/09/2009)</p>	<p>Apports solaires (02/09/2009)</p>
Cas 4 : Été soleil	<p>Températures extérieures (11/08/2009)</p>	<p>Apports solaires (11/08/2009)</p>

TABLE II.12 – Données climatiques des 4 journées de référence

Comme la puissance énergétique solaire E_{es} (aussi noté P_s dans nos modèles) est un bon indicateur de la présence de rayons solaires directs, nous utiliserons le rapport des constantes solaires hors atmosphère (E_{vsc} et E_{esc} que nous avons présentées lors de l'étude des modèles de ciel) pour estimer l'éclairement direct au sol :

$$\widehat{E}_{dir} = \frac{E_{vsc}}{E_{esc}} \cdot E_{es}$$

Ensuite nous pouvons de manière simple reconstruire le diffus à partir du global mesuré et du direct estimé.

$$\widehat{E}_{dif} = E_g - \widehat{E}_{dir} \cdot \cos(\theta_{inc})$$

II.4.2 Le comportement du bâtiment

Pour analyser le simulateur de bâtiment que nous avons développé, nous allons maintenant le soumettre au climat de l'année 2009 en utilisant les données de la station IDMP de Vaulx-en-Velin. L'objectif est de confirmer que l'évolution des températures et des éclairagements dans le bâtiment est valable, c'est-à-dire que le modèle est cohérent avec notre expérience et notre vécu dans le bâtiment. Evidemment, toutes les données que nous présentons ici sont issues de la simulation du bâtiment. Par conséquent, elles ne représentent pas une mesure mais une estimation. L'objectif est clairement de montrer la cohérence de ces estimations.

Comme nous n'avons pas encore abordé le contrôle des équipements de confort, nous ne considérons pas leur impact sur l'état du bâtiment. Cela signifie que nous allons simuler le bâtiment passif, sans aucun apport énergétique artificiel permettant d'alimenter la chaudière et les luminaires. La puissance thermique apportée par les radiateurs à l'air est donc nulle et les luminaires sont éteints. De plus, nous n'ajoutons pas de perturbations (liées à l'occupation et aux diverses sources de chaleurs). La charge interne du bâtiment est donc nulle. Cependant, nous étudions tout de même l'effet de la position des stores vénitiens intérieurs sur l'état optique et thermique du bâtiment car ce sont des actionneurs qui n'exploitent pas vraiment une source d'énergie artificielle (hormis pour leur motorisation) mais qui modulent les apports naturels de l'environnement extérieur.

En outre, il est nécessaire de préciser un point important lié aux simulations thermiques du bâtiment. En effet, comme les structures du bâtiment sont soumises à des inerties thermiques lentes, le régime transitoire du bâtiment peut être long si les conditions initiales des températures des noeuds ne sont pas correctement fixées. Pour déterminer ces conditions initiales, nous avons réalisé une simulation préalable sur les trois derniers mois de l'année 2008 pour que le bâtiment atteigne un régime établi. Les

températures obtenues à la fin de cette simulation ont été définies comme conditions initiales pour les simulations sur l'année 2009. Pour l'optique, il n'y a pas de problème de régime transitoire car le modèle est algébrique.

II.4.2.1 Analyse du comportement thermique

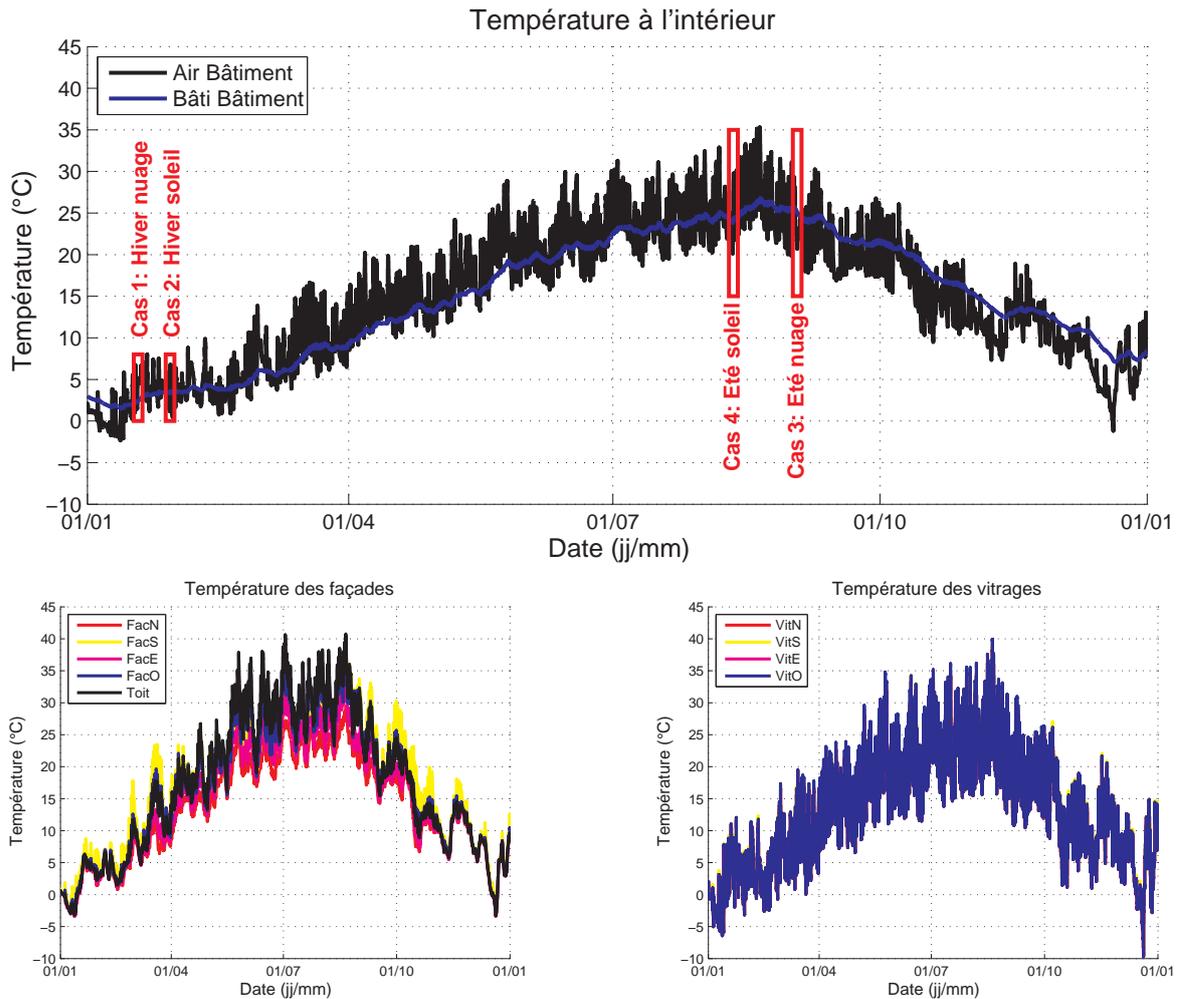


FIGURE II.26 – Températures des noeuds du modèle de bâtiment en 2009

En premier lieu, nous allons vérifier la cohérence des températures au fil des saisons. Nous considérons que tous les stores vénitiens sont entièrement relevés. Les résultats de simulation permettent d'observer l'évolution des températures des noeuds thermiques tout au long de l'année (voir Figure II.26). Ces valeurs de température semblent tout à fait vraisemblables. En effet, nous constatons bien la présence des deux composantes fréquentielles : la variation lente de période annuelle et les variations rapides de période journalière. Par ailleurs, nous notons que les vitrages sont quasiment à la température extérieure et que les variations journalières des températures des façades sont plus

grandes en été qu'en hiver car le flux énergétique solaire y est plus intense. Les signaux de température des différents noeuds semblent donc cohérents à l'échelle annuelle.

Pour observer plus précisément les écarts de température, il faut observer la composante fréquentielle journalière car c'est à cette échelle de temps que les différences d'inertie apparaissent clairement. En témoignent les différences d'amplitudes entre l'air intérieur ($\approx 25 \pm 7^\circ\text{C}$ en été) et le bâti ($\approx 23 \pm 1^\circ\text{C}$ en été).

Pour mettre en valeur plus précisément les sensibilités thermiques des noeuds, nous allons maintenant nous focaliser sur nos quatre journées de référence. Observons tout d'abord les deux journées d'hiver. L'évolution des températures intérieures et des puissances thermiques échangées avec l'air (voir Table II.13) nous amène à faire plusieurs remarques indicatrices de la cohérence des résultats :

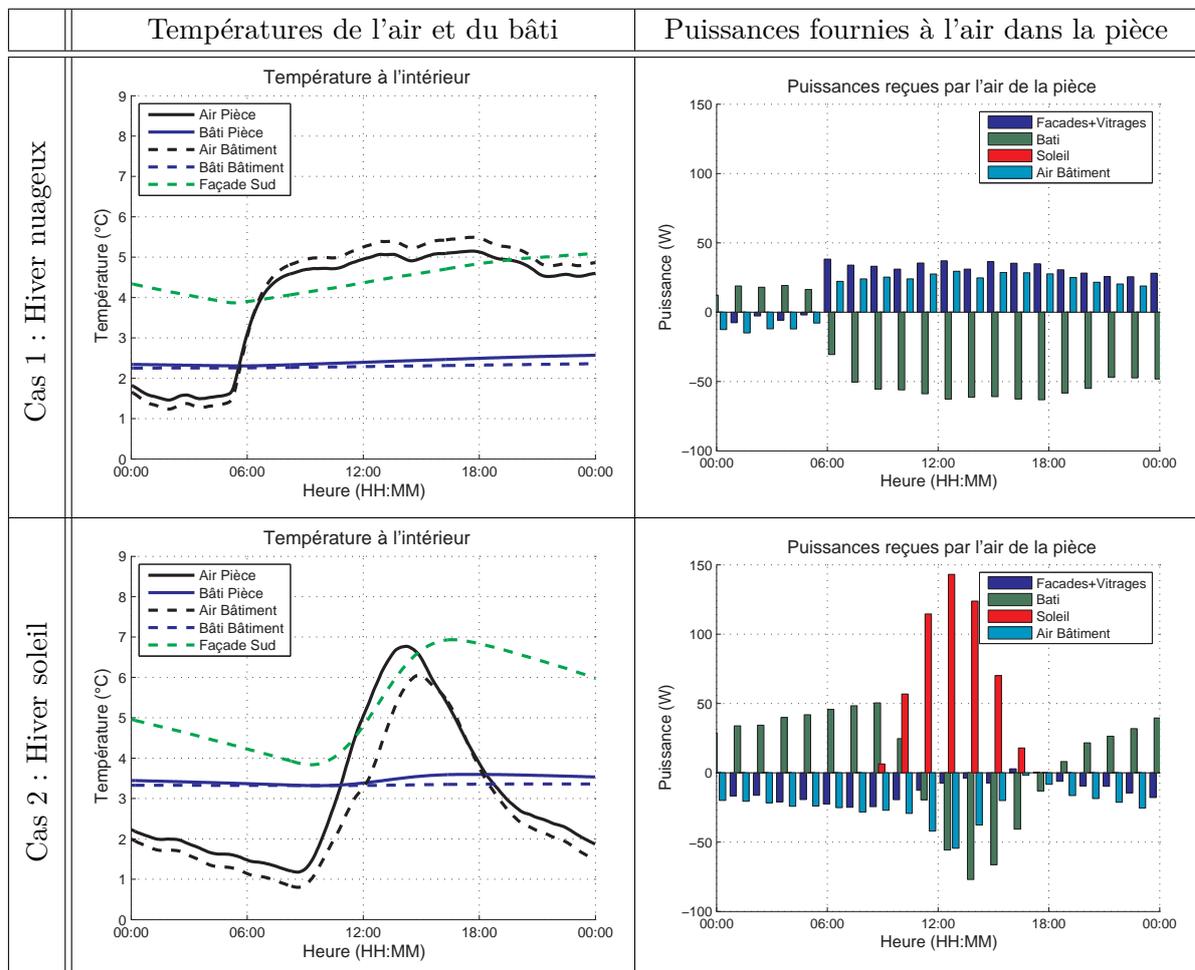


TABLE II.13 – Températures dans la pièce et puissances échangées en hiver

- Dans le premier cas, le ciel est très nuageux et l'apport énergétique solaire est nul. Par conséquent, les échanges de chaleur sont uniquement associés aux pertes

vers l'extérieur. Les températures du bâti et de l'air dans la pièce suivent les variations moyennes du bâtiment ; qui elles-mêmes suivent les variations de la température extérieure. Nous observons tout à fait logiquement que les principales sources d'échanges avec l'air extérieur sont les vitrages et la ventilation à travers la circulation d'air dans le bâtiment.

- Dans le deuxième cas, le ciel est clair et le bâtiment est soumis au flux solaire radiatif. Nous observons clairement son impact sur l'air du bâtiment et de la pièce. Comme la pièce est orientée au Sud, l'air augmente en température plus rapidement que la moyenne du bâtiment. De la même manière, le bâti de la pièce augmente en température plus rapidement que celui du bâtiment car sa capacité thermique est plus faible.

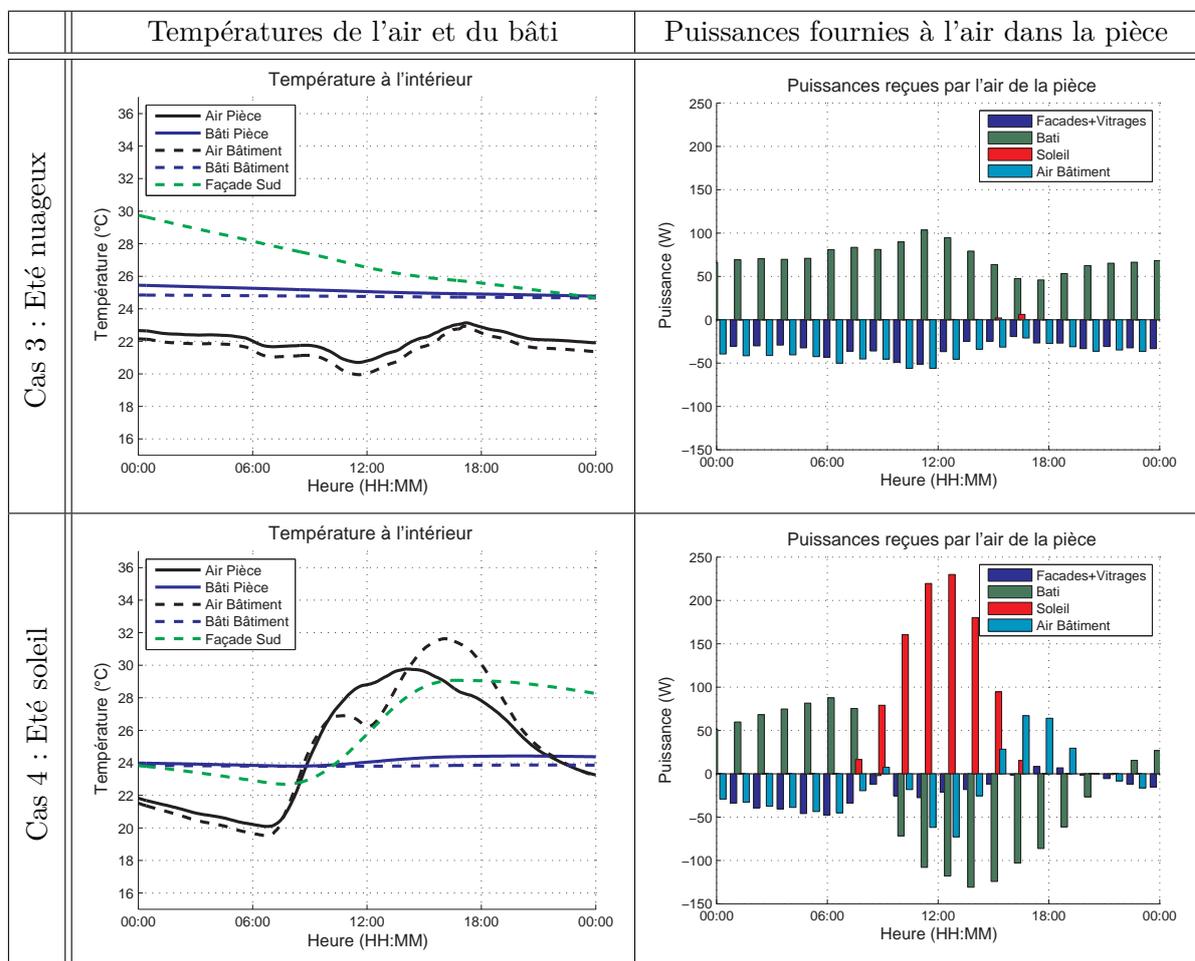


TABLE II.14 – Températures dans la pièce et puissances échangées en été

Nous nous intéressons maintenant aux températures et au bilan de puissance sur les deux journées d'été (voir Table II.14). Nous observons globalement les mêmes échanges mais quelques différences confirment la validité du modèle thermique :

- Dans le troisième cas, le soleil est voilé. Le bâtiment et la pièce sont à la même température et réagissent comme dans le premier cas, c'est-à-dire en suivant les variations de la température extérieure. Nous observons ici un cas très intéressant car le bâti, ayant stocké de la chaleur les jours précédents, fournit toute la journée de la chaleur à l'air du bâtiment et de la pièce.
- Dans le quatrième cas, le ciel est clair. Le bâtiment est soumis au flux solaire radiatif qui chauffe différemment l'air du bâtiment et de la pièce. Nous observons deux pics de température de l'air qui sont tout à fait justifiés. En effet, le bâtiment a beaucoup plus de surface vitrée sur les façades Est et Ouest. Le flux solaire entrant est par conséquent plus élevé en début et en fin de journée. A contrario, la pièce étant orientée plein Sud, il est normal qu'elle ne subisse qu'un pic de température (lorsque le soleil est à son zénith). De plus, nous observons aussi une légère élévation de la température du bâti dans la pièce, comme dans le deuxième cas.

Pour modéliser les stores vénitiens, nous les avons assimilés à des diffuseurs de flux radiatif. L'impact des stores sur les températures intérieures est par conséquent non nul si et seulement si le flux solaire pénètre par les ouvrants. Pour visualiser cet impact, nous avons réalisé une deuxième simulation annuelle en considérant que tous les stores vénitiens du bâtiment étaient complètement fermés (descendus avec les lamelles en butée) de manière à occulter le rayon solaire. Nous proposons ici une comparaison des états thermiques du bâtiment et de la pièce lors de la quatrième journée de référence (voir Table II.15). L'unique changement entre les deux simulations est la position des stores.

Nous observons une augmentation significative de la température moyenne de l'air lorsque les stores sont fermés. Cependant cette augmentation est plus faible à l'échelle globale ($\approx 1^\circ\text{C}$) qu'au niveau local ($\approx 3^\circ\text{C}$) car la pièce est plus sensible à l'insolation de part son orientation. La fermeture des stores permet donc de chauffer plus rapidement l'air intérieur. Cependant, lorsqu'un store occulter le flux solaire, le bâti n'est plus insolé et ne reçoit plus d'apports thermiques solaires. En définitive, les stores vénitiens permettent de répartir l'apport énergétique solaire entre l'air et le bâti. Cette action peut s'avérer très utile dans un objectif de commande car cela permet de choisir si l'on souhaite chauffer une structure à faible inertie (l'air intérieur) ou une structure à forte inertie (le bâti). Cela peut s'apparenter à un choix de transfert de l'énergie solaire dans l'air ou de stockage dans le bâti.

Au vue de ces résultats de simulation, le modèle thermique de bâtiment que nous avons développé semble tout à fait cohérent avec notre connaissance du bâtiment. Cependant, il faut bien garder à l'esprit que cette modélisation simplifiée par décomposition des phénomènes globaux et locaux est basée sur des hypothèses assez restrictives

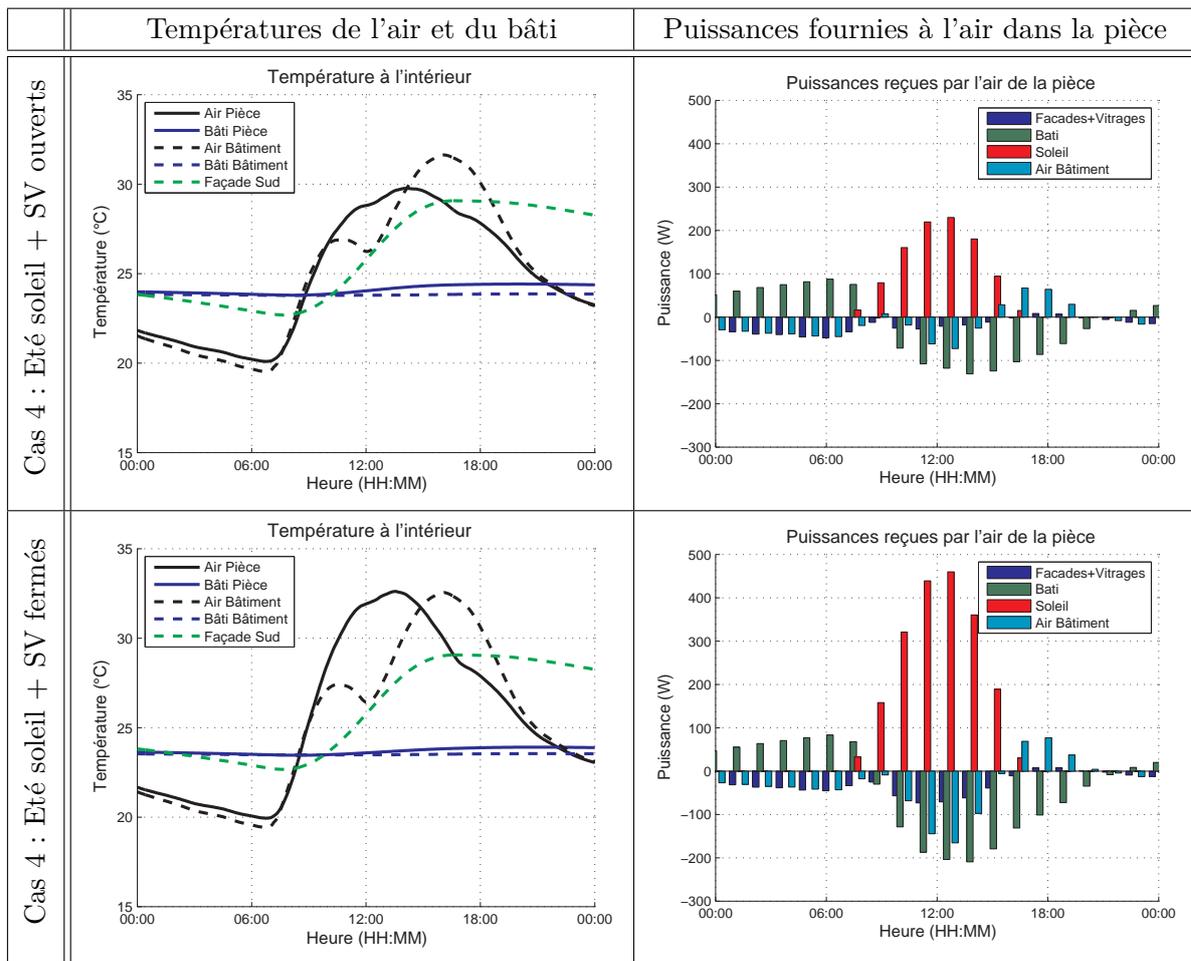


TABLE II.15 – Impact des stores vénitiens intérieurs sur la thermique en été

(pièce très petite par rapport au bâtiment, homogénéité des noeuds. . .) qui limitent son domaine d'utilisation. Mais pour notre objectif d'expérimentation du contrôle par la simulation, ce modèle thermique est très adapté car il offre une estimation réaliste du bâtiment en prenant en considération les actionneurs. De plus, comparé aux modèles thermiques classiques, il nécessite une puissance et un temps de calcul assez faible et est facilement paramétrable.

II.4.2.2 Analyse du comportement optique

Pour valider le comportement optique, nous allons observer la quantité de lumière dans la pièce. Le modèle optique que nous avons développé estime la quantité de lumière sous la forme d'une donnée d'éclairement moyen en considérant les flux lumineux émis par les différentes sources. Comme pour la thermique, nous simulons ici le bâtiment passif, c'est-à-dire sans luminaires. Les seules sources de lumière sont donc les deux

ouvrants équipés des stores vénitiens qui modulent l'éclairage lumineux reçu par la façade Sud du bâtiment.

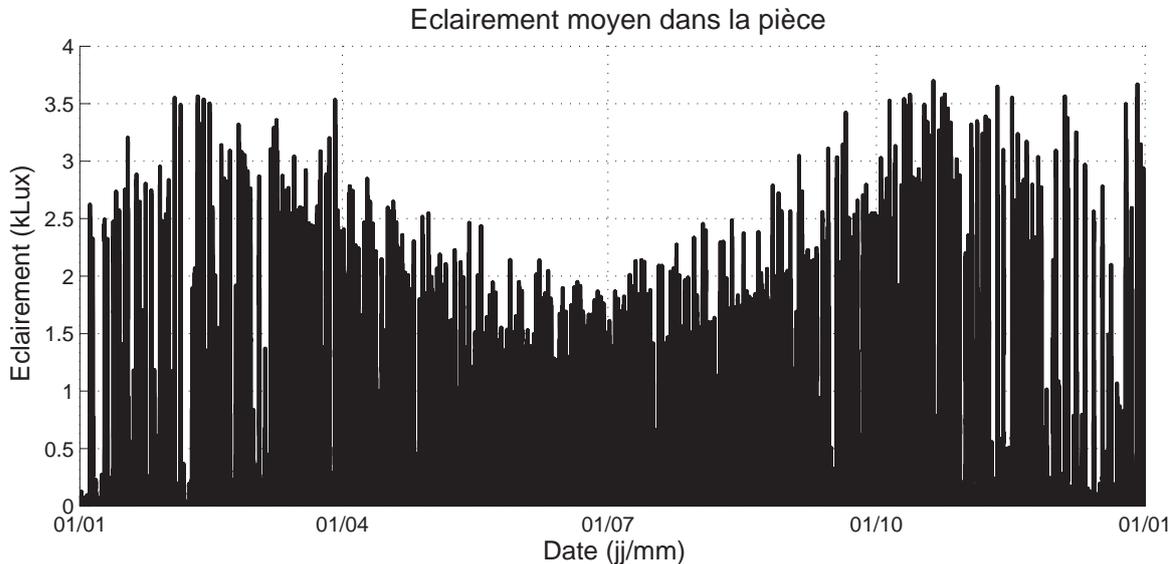


FIGURE II.27 – *Eclairages dans la pièce en 2009*

Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'évolution de l'éclairage dans la pièce tout au long de l'année 2009 (voir Figure II.27). Ces données représentent la quantité maximale de l'éclairage dans la pièce car la simulation a été réalisée avec les deux stores totalement remontés. Nous constatons en premier lieu de nombreuses et fortes baisses en hiver (surtout en fin d'année) qui sont liées à la nébulosité. De plus, nous constatons que le potentiel lumineux est plus élevé en hiver qu'en été. Cela est dû au parcours du soleil dans la voûte céleste. Le soleil étant plus bas en hiver qu'en été, l'éclairage reçu par la façade Sud est plus grand en hiver.

Dans un deuxième temps, nous réduisons l'échelle d'observation pour étudier l'évolution de l'éclairage pendant les quatre journées de référence (voir Table II.16). Nous cherchons dans ces courbes à mettre en évidence les éclairages accessibles. Le domaine de définition de l'éclairage est compris entre un éclairage minimum et un éclairage maximum correspondant respectivement à une situation avec les stores fermés et une autre avec les stores ouverts. Les éclairages accessibles représentent tous les états lumineux atteignables en changeant la position des deux stores vénitiens.

- Dans le premier et le troisième cas, le ciel est nuageux et le flux lumineux direct est nul. L'éclairage dans la pièce semble suivre les variations de l'éclairage extérieur qui est très perturbé par les nébulosités.
- Dans les deux autres cas, le ciel est clair et le flux lumineux direct est important. Nous observons clairement que la variation d'éclairage dans la pièce est dictée par la trajectoire du soleil. Ainsi, en hiver, comme le soleil impacte la façade toute

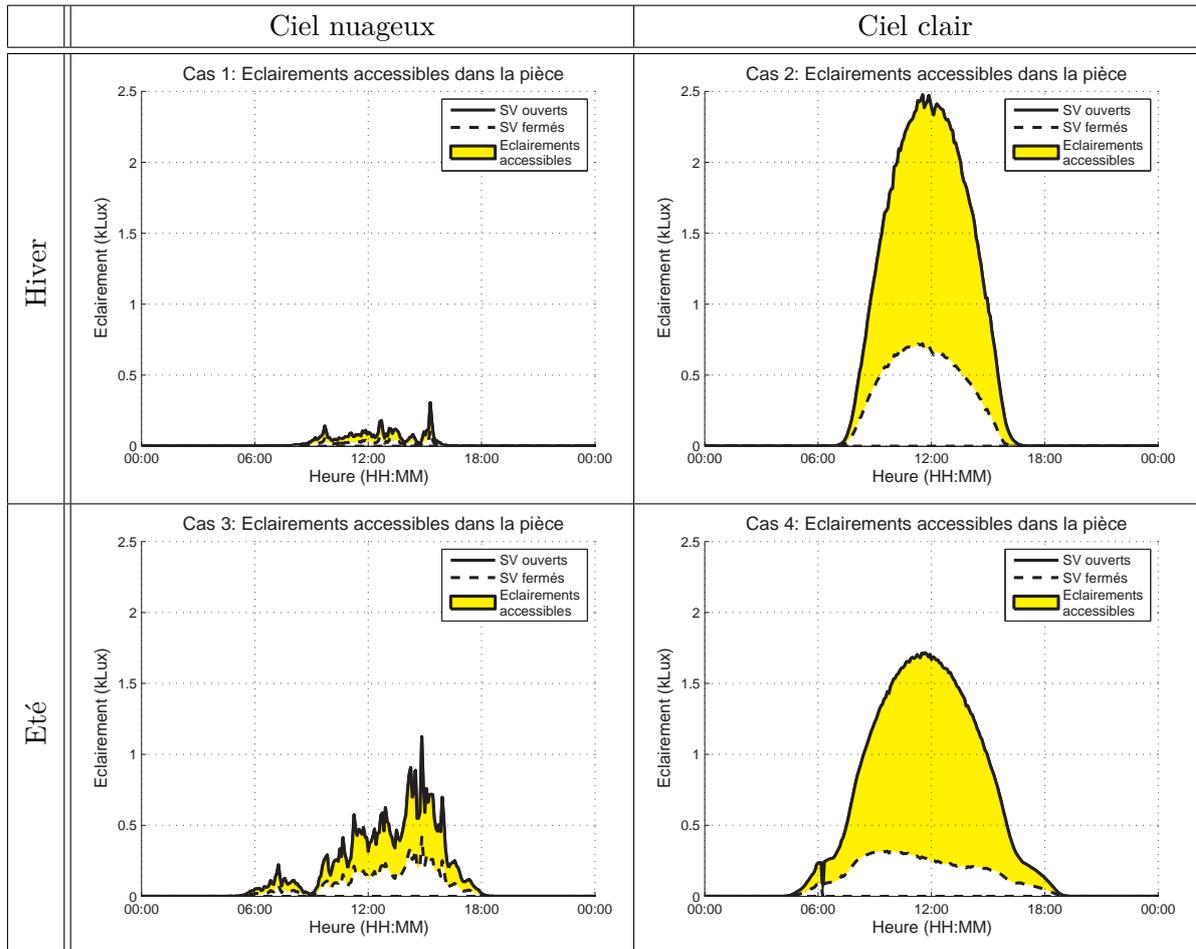


TABLE II.16 – Impact des stores vénitiens sur l'éclairément dans la pièce

la journée, nous observons une courbe régulière d'éclairément. En été, il apparaît deux changements de courbure le matin et le soir. Cela est encore dû à la course du soleil qui se lève et se couche plus au Nord en été.

- De manière générale, les stores vénitiens ont un impact important sur l'état lumineux de la pièce. En moyenne, la fermeture totale des stores (c'est à dire stores baissés et lamelles fermées) engendre une diminution de l'éclairément entre 65% et 80% en fonction de la présence ou non de flux direct.

Ces résultats de simulation montrent clairement la cohérence de l'estimation de la quantité de lumière dans la pièce. En effet, les valeurs d'éclairément moyen sont tout à fait réalistes et leurs évolutions journalières et annuelles concordent avec les phénomènes naturels. Notre modélisation optique locale semble donc être acceptable même si elle repose sur les hypothèses larges de diffusion des sources et des parois intérieures.

Résumé La validation du modèle de bâtiment en tant que système passif est très instructive car elle permet d'identifier le besoin intrinsèque du bâtiment en terme de chauffage et d'éclairage. Les résultats de simulation sont très encourageants et mettent en valeur la cohérence du modèle mais aussi ses faiblesses liées aux hypothèses de modélisation. Dans la suite de ce mémoire, nous continuerons à utiliser les données de la station IDMP pour expérimenter le contrôle global des actionneurs.

Conclusion

Le développement d'un simulateur de bâtiment pour expérimenter des stratégies de contrôle nécessite d'étudier les différentes sources d'énergies en présence. Pour cette raison, nous avons modélisé l'impact énergétique des différents équipements de confort et de l'environnement extérieur sur le bâtiment. De plus, l'architecture du simulateur a été construite pour répondre à nos objectifs de commande et a été appliquée au bâtiment étudié.

En thermique, nous avons décrit l'impact du chauffage central et des stores vénitiens sur l'équilibre thermique du bâtiment et de la pièce. La chaleur est évidemment apportée par les radiateurs mais aussi par les stores vénitiens qui ont une contribution importante sur l'échauffement de l'air intérieur. En effet, les lamelles d'un store vénitien peuvent être assimilées à des diffuseurs solaires lorsqu'elles sont insolées. Par ailleurs, nous avons mis en équation l'équilibre thermique du bâtiment en intégrant ses différentes inerties et ses échanges conducto-convectifs. Pour répondre à notre contrôle multi-niveaux, les modèles thermiques du bâtiment et de la pièce ont été découplés.

En optique, nous avons modélisé les apports des stores vénitiens et des luminaires sur la quantité de lumière dans la pièce. Les luminaires ont été décrits comme des sources de lumière diffuses consommatrices d'énergies et les stores vénitiens comme des effecteurs modulant la lumière du jour provenant du soleil et de la voute céleste. L'éclairement moyen dans la pièce a été modélisé en connaissance des flux lumineux diffus et direct émis par les sources optiques de la pièce.

L'observation de l'évolution des températures et des éclairagements dans le bâtiment passif (sans actionneurs) a permis de valider la cohérence des modèles. Ces validations ont été réalisées en simulation avec des mesures du potentiel lumineux et thermique extérieur effectuées par la station IDMP située à Vaulx-en-Velin.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser au contrôle des équipements de confort. Le simulateur du bâtiment sera donc très utile pour expérimenter les différentes stratégies de contrôle que nous allons implémenter.

Chapitre III

Le contrôle du bâtiment

Introduction

Aujourd'hui, la commande des systèmes et l'automatisation des fonctions de manière générale sont très présentes dans les bâtiments. Ce sont des solutions concrètes et efficaces pour répondre aux besoins de réduction des consommations énergétiques mais aussi aux besoins de confort des occupants. Bien sûr, ces deux exigences sont naturellement contradictoires sur plusieurs points. Ainsi, pour le premier, le critère d'évaluation est bien concret (le coût énergétique qu'il est nécessaire de minimiser) ; pour le second, les critères sont souvent très subjectifs (la sensation de bien-être qu'il ne faut pas dégrader). Cette contradiction évidente entre réduction de la consommation et amélioration du confort montre bien toute la complexité du problème. Nous allons nous y intéresser dans ce troisième chapitre en proposant des méthodes de contrôles adaptées et en nous appuyant sur l'architecture de contrôle et sur le modèle de simulation que nous avons définis précédemment.

Notre objectif est de proposer une méthode de synthèse des lois de commande adaptée aux problématiques que sont la vivabilité et l'énergie. Nous détaillerons pour cela les principes appliqués à chaque élément du bâtiment qui embarque une part de contrôle. Nous commencerons par présenter la commande locale de chacun des actionneurs présents dans le bâtiment de référence. Ensuite, nous nous pencherons sur les deux échelles que nous avons définies : le bâtiment et la pièce. Pour le bâtiment, notre étude se concentrera pour l'essentiel sur la régulation du système de chauffage central au niveau de laquelle nous mettrons l'accent sur les critères énergétiques. Au niveau de la pièce, notre étude se focalisera davantage sur la régulation de l'ambiance optique et thermique en définissant un contrôle optimal des radiateurs, des luminaires et des stores vénitiens vis-à-vis de critères énergétiques et de confort.

III.1 Spécification du contrôle du bâtiment

Le contrôle du bâtiment est un problème très complexe à aborder compte tenu du nombre de systèmes potentiellement pilotables ou non agissant sur les grandeurs caractéristiques (température, hygrométrie, éclairement...) et de la variété des interactions entre les sous-systèmes du bâtiment. Pour cette raison, nous allons construire notre démarche en commençant par identifier les points durs qui expriment cette complexité. Ensuite, nous proposerons une démarche de conception de la commande en détaillant un cahier des charges qui spécifiera les grandeurs pilotées, les performances dynamiques, les objectifs de confort, les contraintes de consommation et les méthodes de validation.

III.1.1 Les problématiques

L'objectif de l'architecture de commande que nous allons développer dans ce chapitre est de faire coopérer les différents actionneurs du bâtiment pour répondre à une mission commune de confort optique et thermique tout en minimisant globalement la consommation énergétique. Un tel système est naturellement difficile à appréhender pour plusieurs raisons :

Les missions sont antagonistes : Vouloir garantir avec précision le niveau de confort souhaité par les occupants peut nécessiter une consommation d'énergie plus élevée. L'objectif est donc de trouver le meilleur compromis confort/énergie en favorisant l'utilisation des apports énergétiques gratuits comme les apports solaires.

Le confort est subjectif : C'est une grandeur perçue et évaluée par les occupants. Elle est par conséquent subjective. Son objectivation nécessite de prendre en compte la sensibilité humaine. Ainsi, nous pensons qu'assurer le confort ne signifie aucunement réaliser un suivi parfait de la consigne mais plutôt rester dans une zone de tolérance autour de cette consigne. C'est d'ailleurs en autorisant des variations dans cette zone de tolérance que des gains énergétiques seront possibles.

Les phénomènes sont couplés : Le soleil étant la principale source naturelle d'énergie optique et thermique, les perturbations climatiques (la composition atmosphérique, les nuages...) ont un impact couplé sur le potentiel optique et thermique perceptible au sol. Pour mettre en valeur ce couplage, nous avons spécifiquement choisi d'utiliser un store vénitien car c'est un effecteur occultant qui influence ces deux domaines physiques.

Les dynamiques sont différentes : En thermique, les échanges de chaleur sont des phénomènes très lents alors qu'en optique les phénomènes sont instantanés.

Le système n'est pas toujours correctement actionné : Le nombre d'actionneurs doit être en adéquation avec les grandeurs pilotées et l'efficacité du contrôle dépendra fortement des caractéristiques des équipements de confort. Le potentiel énergétique des actionneurs étant borné, les ambiances atteignables dans la pièce seront par conséquent très restreintes.

En gardant à l'esprit ces différentes contraintes de contrôle, nous allons maintenant construire notre réflexion pour spécifier l'architecture de commande adaptée aux exigences des utilisateurs du bâtiment. L'enjeu est de caractériser avec justesse les grandeurs d'ambiance qui jouent un rôle prépondérant dans le confort ainsi que les moyens de mesure et de commande que nous utiliserons.

III.1.2 Le cahier des charges

Nous cherchons ici à détailler les spécifications du contrôle du bâtiment dont l'architecture a été détaillée à la fin du premier chapitre de ce mémoire (voir Figure III.1).

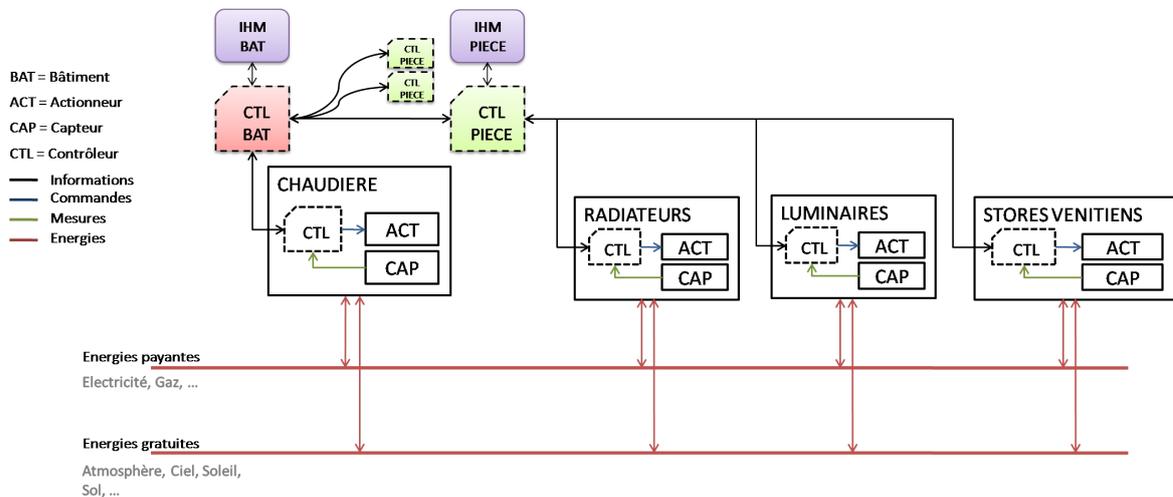


FIGURE III.1 – Vue globale de l'architecture de contrôle du bâtiment d'étude

Pour rappel, nous avons structuré le contrôle en deux niveaux : les contrôleurs haut-niveaux sont les contrôleurs du bâtiment et des pièces. Ils ont des missions de gestion du confort et des consommations énergétiques. De plus, ils sont en relation afin de pouvoir ajuster leurs objectifs dans une approche collaborative. Les contrôleurs bas-niveaux sont les contrôleurs associés aux actionneurs. Ils doivent permettre de piloter avec fiabilité les états mécaniques ou les transferts énergétiques. Ils sont en relation avec le contrôleur haut-niveau correspondant à leur échelle d'action, soit le bâtiment,

soit la pièce. A l'heure actuelle, les bâtiments sont très souvent équipés uniquement de contrôleurs bas-niveaux, l'apport de nos travaux de recherche se situe donc dans la spécification des contrôleurs haut-niveaux qui coordonnent les actionneurs des pièces et du bâtiment. Cependant, nous aborderons succinctement l'étude des contrôleurs bas-niveaux pour nos besoins de simulation.

III.1.2.1 Le contrôle niveau bâtiment

Le contrôleur niveau bâtiment s'intéresse au bâtiment dans son ensemble. La génération de ses consignes est réalisée par les gestionnaires du bâtiment. Il commande les équipements partagés (la chaudière et le circuit de chauffe) pour fournir l'énergie nécessaire au maintien du confort dans tout le bâtiment.

Nous avons trouvé dans la littérature de nombreuses techniques de commande appliquées à un chauffage central. Les contrôles les plus répandus reposent sur une régulation PID basée sur l'erreur de température moyenne de l'air. Plus spécifiquement, nous avons étudié les commandes s'appuyant sur la logique floue [Kolokotsa *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2003] qui agrègent les mesures de la température intérieure et de la température extérieure. L'utilisation de la logique floue permet, sous condition de correctement définir les règles d'inférence, d'exprimer de manière simple la notion de confort thermique. Pour les mêmes raisons, les réseaux de neurones artificiels semblent aussi une bonne voie d'amélioration du contrôle [Moon *et al.*, 2009]. La logique floue comme les réseaux de neurones sont des domaines assez présents dans la recherche en automatique car ils apportent une approche originale du contrôle. Cependant, ils s'exportent très difficilement dans l'industrie ce qui constitue un inconvénient majeur.

Les systèmes multi-agents [Abrás, 2009; Abrás *et al.*, 2010; Jamont *et al.*, 2011] constituent une approche différente de celle de la commande centralisée ou hiérarchique. Avec ces techniques de développement plus récentes, chaque équipement est perçu comme un agent qui contribue au besoin global du bâtiment en connaissance de son propre potentiel. De plus, les agents sont capables de communiquer avec leurs voisins pour s'informer et adapter leurs états. De cette manière, ils se considèrent comme une communauté d'actionneurs. Le potentiel de cette approche reste encore à prouver car la majorité des études se limitent à des simulations logicielles. De plus, la détermination des critères d'organisation et d'interaction sont difficiles à définir notamment dans les systèmes multi-sources.

Compte tenu du caractère très lent des transferts thermiques et des gains potentiels liés à l'anticipation des perturbations et des changements de consigne, la commande prédictive nous semble une approche naturellement bien adaptée. La commande pré-

dictive est étudiée depuis de nombreuses années et particulièrement son application à la thermique du bâtiment [Dumur *et al.*, 1997; Freire *et al.*, 2005]. Elle permet de prendre en compte les évolutions futures du climat pour optimiser le contrôle sur un horizon temporel. Ainsi, l'anticipation permet d'ajuster la commande pour éviter des dépassements de consigne et d'en réduire les variations très consommatrices d'un point de vue énergétique.

Pour notre travail, nous avons donc choisi de développer une commande prédictive du chauffage central. Dans la littérature, les commandes prédictives développées s'appuient essentiellement sur l'anticipation (la prédiction) de l'évolution du climat à travers les changements de température extérieure. Nous proposerons une amélioration en considérant aussi l'impact du flux radiatif solaire sur les grandeurs thermiques caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment. Nous comparerons ce contrôleur prédictif à un contrôleur plus classique, le PID.

III.1.2.2 Le contrôle niveau pièce

Dans la pièce, la génération des consignes est réalisée par les occupants. Ceux-ci sont sensibles à l'ambiance optique et thermique de la pièce qu'ils perçoivent comme confortable ou non. Comme nous savons que la détermination du confort dépend de nombreux paramètres difficilement mesurables comme l'activité et la sensibilité, nous pensons qu'il est préférable de laisser l'occupant définir l'ambiance qu'il juge confortable. Ainsi, l'occupant contrôle l'état énergétique de la pièce grâce à différentes grandeurs d'ambiance qui contribuent à son confort. L'occupant doit donc être capable de définir l'ambiance en adéquation avec son besoin. Le principal problème est alors de définir des critères d'ambiance adaptés.

Nous parlons ici de contrôler les grandeurs d'ambiance et non le confort des occupants. Dans notre idée, le terme d'ambiance correspond à l'état général de la pièce, alors que le confort correspond à l'état sensitif des occupants. Par cette distinction, nous souhaitons mettre en évidence le fait que l'occupant est seul maître de son confort. Le contrôleur n'a donc pas besoin d'intégrer une connaissance théorique du confort. L'objectif du contrôleur de pièce est simplement de maintenir une consigne d'ambiance dans la pièce.

Nous allons maintenant détailler l'approche que nous utiliserons pour contrôler l'ambiance thermique et optique dans une pièce.

Le contrôle de l'ambiance thermique : Le confort thermique a différentes représentations mathématiques (voir Partie I.2.1) : la température opérative, la charge de Fanger. . . Ces critères de confort dépendent des échanges thermiques entre le corps humain et son environnement et par conséquent de la position de l'occupant dans la pièce. En décomposant ces modèles de confort, nous observons qu'en plus des critères physiologiques, plusieurs grandeurs d'ambiance entrent en jeu :

- la température de l'air de la pièce ;
- la température des parois de la pièce ;
- l'humidité relative dans la pièce.

De ce fait, le contrôle de l'ambiance thermique devrait permettre de réguler ces trois grandeurs. Cependant, dans notre cas, les actions possibles se limitent au contrôle de la puissance des radiateurs ce qui impacte uniquement la température de l'air de la pièce. Cependant, cela n'empêche pas de prendre en compte les températures des parois et des vitrages pour ajuster la température de l'air désirée. Nous avons donc choisi de **piloter la température opérative** dans la région centrale de la pièce.

Le contrôle de l'ambiance optique : Le confort optique est lié aux luminances dans le champ de vision de l'occupant et par conséquent à sa position et à son orientation dans l'espace de la pièce. Trois principales grandeurs d'ambiance ont un impact important sur le confort visuel :

- la quantité de lumière dans la pièce ;
- la distribution de la lumière dans l'espace de la pièce ;
- la qualité de la lumière dans la pièce (température du rayonnement).

Ces trois grandeurs auxquelles chacun peut penser intuitivement semblent toutefois assez complexes à piloter car elles sont très difficilement mesurables directement. En effet, les mesures sont généralement peu fiables car perturbées par la présence des occupants. Plusieurs travaux se sont intéressés à ce problème. Certains articles proposent par exemple l'utilisation de maillage de luxmètres pour estimer et contrôler la répartition des éclairagements dans les pièces [Dubois, 2001; Mahdavi *et al.*, 2005]. L'avènement des capteurs optiques (CCD et CMOS) a permis la conception de capteurs de confort virtuels tels que le confimètre visuel [Guillemin, 2001], le capteur flou [Anthierens *et al.*, 2008; Leclercq, 2009] et le capteur couplé au logiciel Radiance [Wienold et Christoffersen, 2006]. Les images issues de ces capteurs sont très riches en information mais malheureusement (comme toute mesure) elles ne représentent qu'une mesure localisée de l'ambiance et sont très perturbées par les occupants qui circulent librement dans la pièce. Nous ne pouvons donc pas nous appuyer sur de tels capteurs pour construire un contrôle performant de l'ambiance lumineuse.

La solution que nous proposons consistera donc à reporter la mesure en amont et d'utiliser un modèle physique pour reconstruire l'ambiance lumineuse. L'objectif est de déplacer le capteur vers une mesure fiable (c'est à dire moins perturbée) d'une grandeur

ayant un impact important sur l'ambiance lumineuse. Notre choix s'est naturellement porté vers la mesure du potentiel lumineux extérieur car c'est la seule source de lumière variable.

Par ailleurs, en plus de ces trois grandeurs d'ambiance, il faut aussi s'intéresser aux phénomènes localisés qui peuvent être la source d'une gêne importante. C'est le cas des singularités de l'éclairage, comme par exemple les zones insolées qui provoquent des forts contrastes et génèrent des éblouissements. Il semble donc important de contrer ces phénomènes en assurant si besoin un rejet complet des rayons solaires directs pénétrant dans la pièce.

Pour l'exemple utilisé en simulation, nous devons concevoir une commande de l'ambiance lumineuse qui gère deux stores vénitiens et des luminaires. Ce contrôleur devra **rejeter les éblouissements dûs aux rayons solaires directs** tout en permettant de **moduler la quantité et la répartition de la lumière** dans la pièce. Contrairement à la problématique thermique, l'optique a un temps de réponse instantané. Le système étant sur-actionné (plus d'entrées de commande que de grandeurs à piloter), nous nous sommes orientés vers une commande algébrique calculée par optimisation numérique. De plus, comme les grandeurs d'ambiance ne sont pas mesurables, le contrôle s'appuyera sur une mesure de l'éclairage extérieur et sur une reconstruction de cette grandeur s'appuyant sur la modélisation du comportement optique de la pièce et de ses actionneurs.

Résumé Le contrôle du bâtiment tire sa complexité de multiples problématiques (antagonisme confort/consommation, subjectivité du confort, couplages des actionneurs, dynamiques...). Pour spécifier les lois de commande que nous allons implémenter, nous sommes partis d'un découplage entre le contrôle global du bâtiment et le contrôle local au niveau des pièces. Au niveau bâtiment, le contrôle choisi consiste à réguler la température moyenne de l'air à l'aide du chauffage central. Au niveau des pièces, nous contrôlerons le confort thermique exprimé sous forme de température opérative et le confort optique sous forme de quantité et de répartition de la lumière.

III.2 Régulation des équipements de confort

En premier lieu, nous commençons par mettre en place la commande locale des équipements de confort, c'est-à-dire les lois de commande permettant d'asservir l'état des actionneurs pour des consignes générées par les contrôleurs de haut niveau. L'objectif est de faire en sorte que les équipements soient autonomes, c'est-à-dire que la boucle de commande soit indépendante d'informations issues de systèmes extérieurs. Ainsi, uniquement des problématiques de génération de consigne seront reportées dans les contrôleurs de haut niveau sans avoir à se préoccuper de la qualité du suivi au niveau des actionneurs.

III.2.1 Le chauffage central et les radiateurs

La régulation du chauffage central consiste à fournir la chaleur nécessaire au bâtiment pour assurer une température confortable de manière la plus économique possible. Pour cela, le système de chauffage central est équipé de deux actionneurs pilotés : une chaudière et une vanne trois voies. D'une part, la commande de la chaudière consiste à assurer la régulation de la température de l'eau à une température donnée. D'autre part, la commande de la vanne trois voies agit sur le débit d'eau provenant de la chaudière et injecté dans le circuit de chauffage afin de maintenir le potentiel de chauffe.

La chaudière La chaudière représente le générateur de chaleur. C'est le principal consommateur d'énergie payante pour le chauffage du bâtiment. La régulation de la chaudière est assurée à l'aide d'un thermostat situé sur la sortie d'eau. Ce thermostat mesure directement la température de l'eau au départ de la chaudière et permet d'avoir un retour sur l'état du système. Ainsi la régulation est souvent réalisée simplement par un contrôleur tout ou rien pilotant le brûleur.

Dans notre modélisation du chauffage central exposée dans le chapitre précédent, la chaudière est déjà assimilée à un système parfaitement asservi. Son suivi de consigne correspond à un premier ordre de gain unitaire et de temps de réponse assez long.

La vanne trois voies La vanne trois voies permet d'injecter de la chaleur dans le circuit de distribution. Elle est généralement pilotée par un moteur qui permet de moduler le débit d'entrée d'eau chaude. L'actionnement rapide de la vanne permet d'asservir finement la température dans le circuit de distribution.

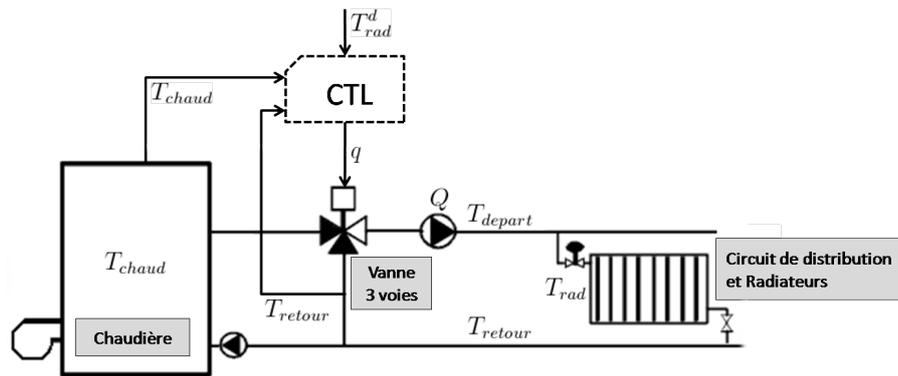


FIGURE III.2 – Schéma bloc de contrôle de la vanne trois voies

L'objectif de la commande de la vanne est de réguler la température moyenne des radiateurs. Comme dans la modélisation du circuit de distribution, nous avons négligé le temps de propagation dans les conduites et nous avons implémenté une régulation algébrique. Cette régulation nécessite d'avoir une mesure de la température de l'eau en sortie de chaudière et de la température de l'eau de retour du circuit de distribution (voir Figure III.2). En gardant l'hypothèse que la température des radiateurs est la moyenne entre la température de départ et la température de retour, nous pouvons exprimer la température de départ désirée du fluide caloporteur sous la forme suivante :

$$T_{rad}^d = \frac{T_{depart}^d + T_{retour}}{2}$$

$$T_{depart}^d = 2T_{rad}^d - T_{retour}$$

La commande de débit de la vanne trois voies s'exprime alors :

$$q = Q \cdot \frac{T_{depart}^d - T_{retour}}{T_{chaud} - T_{retour}}$$

$$= 2Q \cdot \frac{T_{rad}^d - T_{retour}}{T_{chaud} - T_{retour}}$$

Avec :

- q , la consigne de débit d'injection d'eau chaudière (m^3/s) de la vanne trois voies ;
- Q , le débit (m^3/s) imposé par le circulateur dans le circuit de distribution ;
- T_{chaud} , la température ($^{\circ}C$) mesurée de l'eau fournie par la chaudière ;
- T_{retour} , la température ($^{\circ}C$) mesurée de l'eau de retour du circuit de distribution ;
- T_{rad}^d , la consigne de température moyenne ($^{\circ}C$) des radiateurs.

Les radiateurs Situés dans les pièces, les radiateurs sont raccordés au circuit de distribution. La puissance du radiateur est ajustée grâce à une vanne permettant de réduire le débit d'eau circulant dans le radiateur. Généralement, nous utilisons des vannes

manuelles qui sont de simples robinets. Pour réduire les consommations énergétiques, il existe aussi des vannes thermostatiques, c'est-à-dire capables d'adapter automatiquement (par dilatation et contraction d'une sonde thermosensible) le débit d'eau en fonction de la température de l'air autour de la vanne. Il existe aussi des systèmes plus complexes dans lesquels les vannes sont reliés à des sondes d'ambiance.

Pour rester dans les spécifications de notre architecture de contrôle, nous considérons que le radiateur de la pièce est équipé d'une vanne thermostatique pilotée. Ainsi, nous souhaitons modéliser des actionneurs régulés sans utiliser de connaissances (modèles ou mesures) sur l'ambiance thermique de la pièce.

III.2.2 Les stores vénitiens

La commande d'un store vénitien consiste à piloter un moteur afin de contrôler la hauteur déployée du store et l'angle des lamelles. Cet asservissement peut s'avérer très difficile car ces deux grandeurs sont mécaniquement couplées. En effet, le fil qui permet le mouvement de descente et de montée du store et l'échelle qui permet d'incliner les lamelles sont tous les deux enroulés autour du même axe, entraîné par le moteur. Ainsi toute variation de descente provoque un changement d'angle des lamelles, et réciproquement dans les limites des butées associées à chaque mouvement. Il y a donc deux grandeurs à asservir à partir d'une seule commande. Nous sommes dans le cas d'un système sous-actionné.

Parmi les multiples publications traitant des stores vénitiens, aucune ne s'intéresse spécifiquement à l'asservissement de la mécanique du store. En majorité, elles considèrent les stores comme parfaitement asservis. Or il n'existe pas encore de tels produits chez les principaux constructeurs. Les rares études scientifiques qui abordent ce problème se limitent à des stores vénitiens entièrement descendus où l'asservissement est réalisé uniquement sur l'angle des lamelles [Leclercq, 2009; Mukherjee *et al.*, 2010]. Cela simplifie le problème mais restreint énormément le potentiel d'action du store. Par conséquent, il nous a semblé très important de détailler notre approche originale pour l'asservissement des deux degrés de liberté du store vénitien [Arnal *et al.*, 2011b]. Notre objectif est de développer un contrôle précis de ces deux états.

L'algorithme de contrôle agit sur le moteur afin que le store réponde avec précision à des consignes événementielles de descente et d'angle des lamelles. Dans notre approche, la commande est réalisée en boucle fermée et nécessite la mise en place d'un codeur incrémental pour mesurer la rotation de l'arbre moteur. Cette mesure alimente un modèle mécanique afin d'estimer l'état du store (voir Figure III.3).

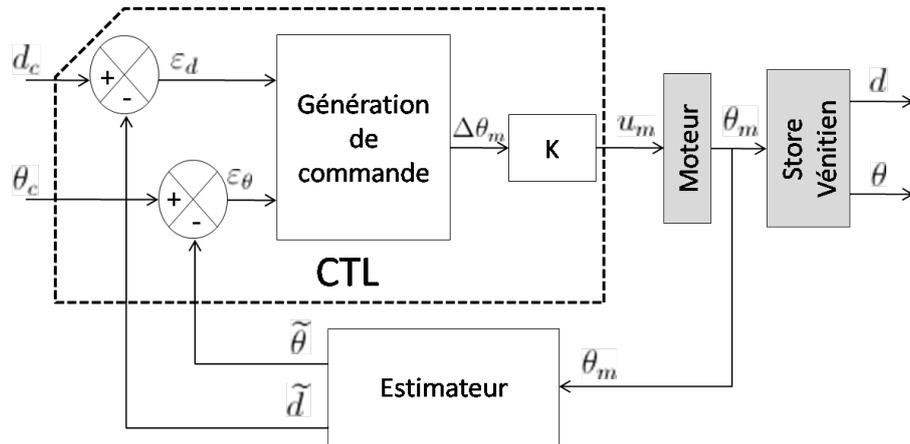


FIGURE III.3 – Schéma bloc de contrôle d'un store vénitien

L'estimateur La reconstruction de l'état du store (\tilde{d} , $\tilde{\theta}$) est effectuée par un estimateur dont le fonctionnement est incrémental. Elle nécessite par conséquent d'être référencée par rapport à la position initiale du store ce qui impose une recalibration régulière du zéro (par exemple une remontée complète du store). Néanmoins, la formulation utilisée intègre certains paramètres mécaniques mesurables (voir Figure III.4). Ainsi les variations de déploiement du store $\Delta\tilde{d}$ et d'angle des lamelles $\Delta\tilde{\theta}$ s'écrivent en fonction de la variation d'angle de l'arbre moteur $\Delta\theta_m$:

$$\Delta\tilde{d} = \frac{2\pi R_d}{360} \cdot \Delta\theta_m$$

$$\Delta\tilde{\theta} = -\frac{2R_l}{L} \cdot \Delta\theta_m$$

Avec :

- \tilde{d} , la descente estimée (m) du store vénitien ;
- $\tilde{\theta}$, l'angle estimé (°) des lamelles du store vénitien ;
- R_d , le rayon (m) de l'enroulement du fil de descente ;
- R_l , le rayon (m) de l'enroulement de l'échelle des lamelles ;
- L , la largeur (m) des lamelles ;
- θ_m , l'angle de rotation mesuré (°) du moteur.

Ces formules d'estimation ne sont valables que sur un interval borné, il y a donc naturellement une saturation sur les variables de descente et d'angle :

$$d_{min} \leq \tilde{d} \leq d_{max}$$

$$\theta_{min} \leq \tilde{\theta} \leq \theta_{max}$$

Les bornes d_{min} et d_{max} correspondent au niveau de descente du store lorsqu'il est respectivement entièrement remonté ($d_{min} = 0$) et entièrement descendu ($d_{max} = 1$).

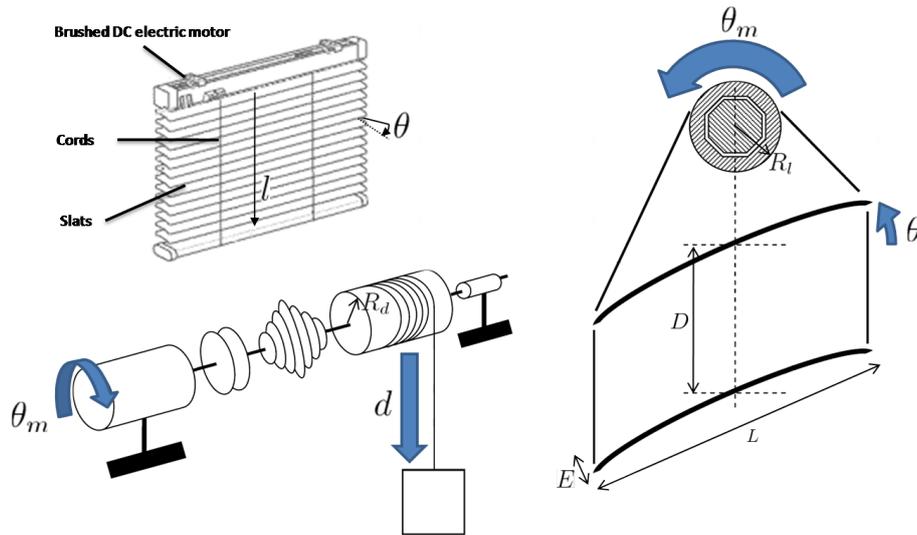


FIGURE III.4 – Schéma mécanique d'un store vénitien

Les bornes θ_{min} et θ_{max} correspondent aux butées basses ($\theta_{min} = -70^\circ$) et hautes ($\theta_{max} = 70^\circ$) des lamelles.

La commande La loi de commande calcule l'erreur de rotation moteur $\Delta\theta_m$ à partir de l'erreur sur l'état du store ($\varepsilon_d, \varepsilon_\theta$). En réponse à une nouvelle consigne, la commande est réalisée en trois phases :

1. La première étape est de descendre/monter le store jusqu'à la hauteur de déploiement souhaitée. La commande de rotation moteur est donc représentée par l'erreur de descente.
2. Une fois que le store a atteint cette consigne de hauteur, la commande de rotation moteur bascule sur l'erreur d'angle des lamelles. Ainsi, on déplace l'angle des lamelles à l'angle souhaité.
3. Dès que la consigne d'angle des lamelles est atteinte, le store est à la position souhaitée. La commande passe à l'état inactif et la consigne de rotation moteur est nulle, en attente d'une nouvelle consigne pour recommencer le cycle.

Cette commande peut être qualifiée d'hybride car elle est composée d'une séquence de trois actions : inactivité, asservissement de la hauteur du store et asservissement de l'angle des lamelles. Les conditions de passage entre les phases sont présentées sur le diagramme d'état de la commande (voir Figure III.5). Pour prendre en compte un contrôle uniquement de l'angle des lamelles, nous avons intégré dans le diagramme d'état un passage direct à la phase d'asservissement de l'angle lorsque que la consigne de hauteur ne varie pas.

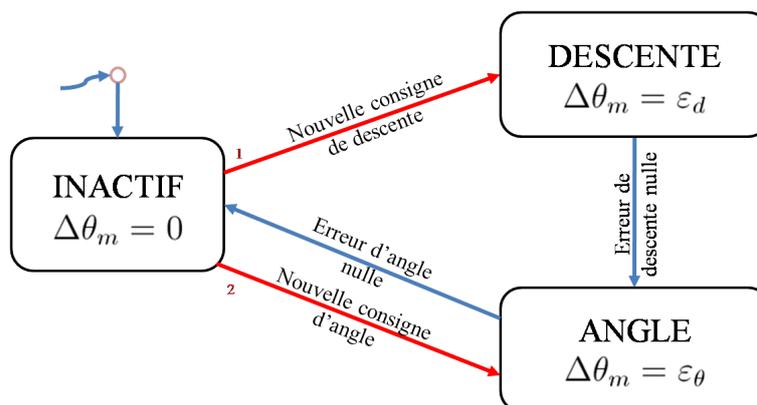


FIGURE III.5 – Diagramme d'état de la commande d'un store vénitien

Dans chaque cas, le correcteur est de type proportionnel auquel est ajouté un offset pour compenser le frein moteur. Le gain du correcteur est différent selon l'étape de commande.

Expérimentation Afin de tester cet asservissement, nous avons réalisé dans un premier temps des simulations, ensuite nous l'avons expérimenté sur un store vénitien réel.

Lors des simulations, nous avons utilisé le modèle de motoréducteur de store dont l'identification est détaillée dans la thèse de Maximilien Leclercq [Leclercq, 2009]. Ce modèle intègre les paramètres du moteur (résistance, constantes de vitesse et de couple, frottements visqueux et inertie). Il permet de modéliser la rotation de l'axe à partir de la tension aux bornes du motoréducteur. Les paramètres du stores sont :

- $R_p = 1,6 \text{ cm}$;
- $R_l = 0,9 \text{ cm}$;
- $L = 5 \text{ cm}$;
- $d_{min} = 0,08 \text{ m}$;
- $d_{max} = 1,5 \text{ m}$;
- $\theta_{min} = -80^\circ$;
- $\theta_{max} = 80^\circ$.

Les résultats de simulation montrent le suivi de consigne du store vénitien (voir Figure III.6). La trajectoire de consigne comporte deux étapes : premièrement, le store est totalement remonté et l'utilisateur impose une consigne de descente et d'angle des lamelles ($d_c = 58\text{cm}$ et $\theta_c = -30^\circ$ à $t = 2 \text{ s}$). Une fois que le store est en position, l'utilisateur change deux fois la consigne d'angle des lamelles ($\theta_c = 45^\circ$ à $t = 30 \text{ s}$ puis $\theta_c = -45^\circ$ à $t = 40 \text{ s}$).

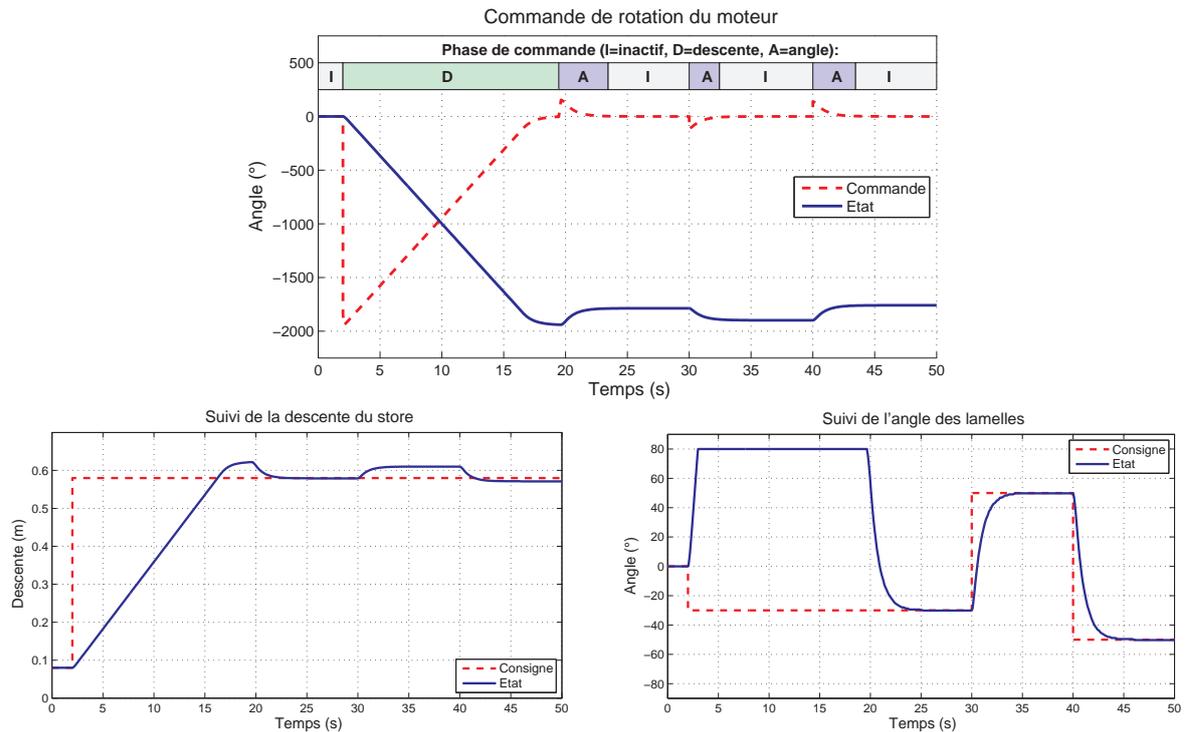


FIGURE III.6 – Suivi de position du store vénitien

Lors de la première partie de la trajectoire de consigne, la commande passe par les trois phases explicitées précédemment pour asservir la descente et l'angle des lamelles. Nous pouvons remarquer la saturation en vitesse du moteur à 3,35 rad/s lors des phases transitoires. De plus, nous observons que les lamelles sont bloquées en butée haute pendant la durée de la descente (de 2 s à 20 s). Une fois que la descente est terminée, la commande passe en phase d'asservissement de l'angle pour ramener les lamelles à la consigne (de 20 s à 22 s). Nous observons également un dépassement sur le suivi au cours de la descente. Ce dépassement est normal et correspond à une optimisation de notre algorithme de commande. En effet, pour atteindre la consigne avec précision, nous avons pré-compensé les effets de l'asservissement de l'angle lors de la phase de descente.

La deuxième partie de la trajectoire de consigne correspond à deux changements successifs de l'angle des lamelles, sans modifier la consigne de descente. Dans ce cas, nous observons clairement que la commande passe directement en phase d'asservissement des lamelles sans que la phase de descente ne soit exécutée. De plus, nous observons le couplage entre les deux grandeurs car le changement d'angle entraîne une variation de la descente allant jusqu'à 3 cm.

Cependant, les bons résultats obtenus en simulation sont à relativiser car la précision de la commande dépend directement de la précision du modèle de reconstruc-

tion (estimateur) des états mécaniques. Pour réellement expérimenter le contrôle, nous avons choisi d’approfondir le problème en instrumentant un store motorisé dont le pilotage (pour le produit sorti d’usine) se limite à une alimentation en tout ou rien du moteur. Nous avons donc fixé un codeur incrémental sur l’axe de rotation du moteur. L’algorithme de contrôle a été compilé à l’aide de la toolbox xPC Target de MATLAB afin d’être exécuté en temps réel sur un ordinateur équipé d’une carte d’acquisition NI PCI-6024E. L’intérêt principal de xPC Target est l’intégration automatique d’une API (interface de programmation) qui permet d’agir sur l’algorithme par requête TCP/IP. Ainsi tous les ordinateurs du réseau sont capables d’interagir avec le store, par exemple en envoyant une trame pour changer la valeur de la consigne ou pour récupérer la position actuelle du store.

Les différentes expériences que nous avons pu réaliser sur ce store vénitien ont montré un suivi de consigne correct en descente mais assez faussé sur l’asservissement de l’angle des lamelles. Après une identification plus poussée du modèle de l’estimateur, nous avons pu réduire ces erreurs. Par exemple, sur 20 changements de position successifs, l’erreur de descente est restée inférieure à 2 cm ce qui est tout à fait acceptable. Par ailleurs, l’erreur d’angle s’est avérée inférieure à 10° . Nous pouvons imputer ces erreurs à la mécanique du store (jeux et frottements, glissement des fils à l’enroulement) que nous n’avons pas pu améliorer. Il apparaît également d’autres phénomènes non modélisés tels que la torsion de l’arbre moteur. En améliorant la cinématique du store, nous pouvons affirmer que les performances de la commande seraient bien meilleures.

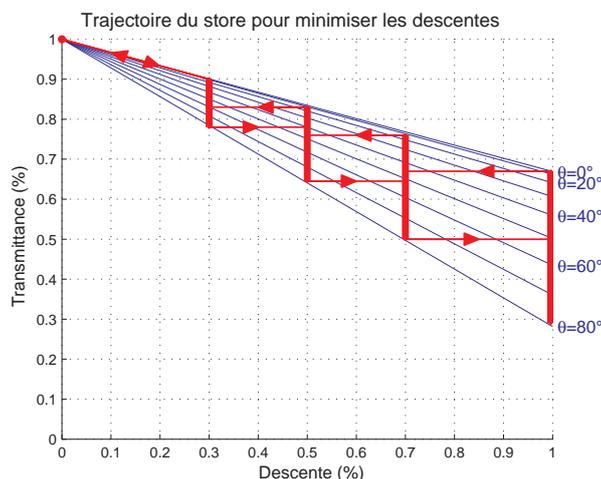


FIGURE III.7 – Quantification de la position du store vénitien

Pour terminer sur l’asservissement du store vénitien, nous souhaitons mettre en évidence un problème important lié à la cinématique du store et impactant le confort optique dans la pièce. En effet, nous venons d’observer qu’une modification de la descente du store implique irrémédiablement une fermeture complète des lamelles. Cette fermeture engendre une baisse importante du flux lumineux passant entre les lamelles

et peut s'avérer très gênant pour l'occupant. Ainsi, pour assurer le confort visuel, il est préférable de réduire au maximum la fréquence des mouvements de déploiement du store vénitien. Par exemple en réalisant une quantification adaptée de la descente du store (voir Figure III.7).

III.2.3 Les luminaires

Au niveau pièce, le contrôle des luminaires est réalisé en commandant leur tension d'alimentation. Avec les progrès récents sur les ballasts et les alimentations des luminaires fluorescents, nous avons choisi d'implémenter une commande en boucle ouverte (voir Figure III.8).



FIGURE III.8 – Schéma bloc de contrôle des luminaires

Avec :

- ϕ_{dif}^d , le flux lumineux (lm) de consigne ;
- u , la tension (V) d'alimentation ;
- P_{lum} , la puissance (W) aux bornes de l'ampoule ;
- ϕ_{dif} , le flux lumineux (lm) émit par le luminaire.

La consigne est générée à l'aide d'une cartographie des émittances en fonction de la tension d'alimentation (voir Figure III.9). Cette donnée est souvent fournie par les constructeurs. Ainsi, à chaque valeur de consigne de flux lumineux est associée une commande de tension.

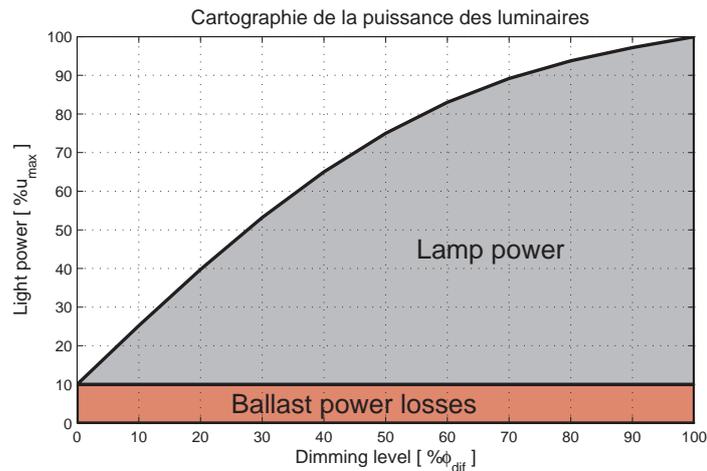


FIGURE III.9 – Cartographie des apports lumineux d'un luminaire

Résumé L'asservissement des actionneurs présents dans le bâtiment a été décrit dans chapitre. Cette commande bas-niveau a été implémentée afin de pouvoir considérer chaque actionneur comme un système de gain unitaire qui répond à une consigne de haut-niveau. Ainsi, la consigne du chauffage central correspond à une température de chaudière et à une température d'air désirée ; les stores vénitiens sont contrôlés par un signal de descente et d'orientation des lamelles ; et les luminaires sont pilotés par un signal de flux lumineux désiré.

III.3 Contrôle des besoins thermiques niveau bâtiment

Dans notre démarche de conception d'un contrôleur de bâtiment et de pièce, nous cherchons à développer des lois de commande efficaces, c'est à dire capables de faire coopérer différents actionneurs pour assurer le confort avec un minimum de consommation énergétique. Nous nous intéressons dans ce chapitre au contrôleur niveau bâtiment.

A l'échelle du bâtiment, la mission du contrôle est de piloter les actionneurs partagés pour répondre aux besoins énergétiques de l'ensemble du bâtiment. Dans notre cas, ce contrôle est limité à la thermique car le chauffage central est le seul équipement piloté. Nous devons donc construire un contrôle capable de répondre avec justesse au besoin thermique du bâtiment. La grandeur physique que nous avons retenue comme représentative de l'état thermique du bâtiment est la température moyenne de l'air dans l'ensemble du bâtiment.

III.3.1 La synthèse d'un modèle de commande

Pour construire le modèle de commande, nous allons partir du modèle de simulation que nous avons défini dans le chapitre précédent. Ce modèle est basé sur onze équations thermiques associées aux noeuds de calcul que représentent l'air dans le bâtiment (\overline{T}_a), les parois internes du bâtiment (\overline{T}_b), les cinq façades (\overline{T}_f^N , \overline{T}_f^S , \overline{T}_f^E , \overline{T}_f^O et \overline{T}_f^T) et les quatre vitrages sur les façades verticales (\overline{T}_v^N , \overline{T}_v^S , \overline{T}_v^E et \overline{T}_v^O). D'après l'étude des échanges thermiques, le modèle thermique global du bâtiment est décrit par le système d'équation suivant (nous garderons les mêmes notations qu'au chapitre précédent). Les grandeurs typographiées en gras sont les grandeurs pilotables du système.

A partir de ce système d'équation, nous allons chercher à synthétiser un modèle de commande. Pour cela, nous étudierons les dynamiques du système et les différents couplages ce qui nécessite de définir la représentation d'état du système.

$$\left\{ \begin{array}{l}
C_a \frac{d\bar{T}_a}{dt} = \sum_i [K_{fa}^i (\bar{T}_f^i - \bar{T}_a)] + \sum_j [K_{va}^j (\bar{T}_v^j - \bar{T}_a)] + K_{ae} (T_e - \bar{T}_a) \\
\quad + K_{ab} (\bar{T}_b - \bar{T}_a) + \sum_j [S_v^j P_s^j \cdot \tau_v \cdot (1 - \alpha_b (1 - \mathbf{T}t_{dif}^{svj}))] \\
\quad + \Phi_{rad} \\
C_b \frac{d\bar{T}_b}{dt} = K_{ab} (\bar{T}_a - \bar{T}_b) + K_{bg} (T_g - \bar{T}_b) + \sum_i [K_{fb}^i (\bar{T}_f^i - \bar{T}_b)] \\
\quad + \sum_j [S_v^j P_s^j \cdot \tau_v \cdot \mathbf{T}t_{dir}^{svj} \cdot \alpha_b] \\
C_f^N \frac{d\bar{T}_f^N}{dt} = K_{fe}^N (T_e - \bar{T}_f^N) + K_{fa}^N (\bar{T}_a - \bar{T}_f^N) + K_{fb}^N (\bar{T}_b - \bar{T}_f^N) \\
\quad + S_f^N P_s^N \cdot \alpha_f \\
C_f^S \frac{d\bar{T}_f^S}{dt} = K_{fe}^S (T_e - \bar{T}_f^S) + K_{fa}^S (\bar{T}_a - \bar{T}_f^S) + K_{fb}^S (\bar{T}_b - \bar{T}_f^S) \\
\quad + S_f^S P_s^S \cdot \alpha_f \\
C_f^E \frac{d\bar{T}_f^E}{dt} = K_{fe}^E (T_e - \bar{T}_f^E) + K_{fa}^E (\bar{T}_a - \bar{T}_f^E) + K_{fb}^E (\bar{T}_b - \bar{T}_f^E) \\
\quad + S_f^E P_s^E \cdot \alpha_f \\
C_f^O \frac{d\bar{T}_f^O}{dt} = K_{fe}^O (T_e - \bar{T}_f^O) + K_{fa}^O (\bar{T}_a - \bar{T}_f^O) + K_{fb}^O (\bar{T}_b - \bar{T}_f^O) \\
\quad + S_f^O P_s^O \cdot \alpha_f \\
C_f^T \frac{d\bar{T}_f^T}{dt} = K_{fe}^T (T_e - \bar{T}_f^T) + K_{fa}^T (\bar{T}_a - \bar{T}_f^T) + K_{fb}^T (\bar{T}_b - \bar{T}_f^T) \\
\quad + S_f^T P_s^T \cdot \alpha_f \\
C_v^N \frac{d\bar{T}_v^N}{dt} = K_{ve}^N (T_e - \bar{T}_v^N) + K_{va}^N (\bar{T}_a - \bar{T}_v^N) + S_v^N P_s^N \cdot \alpha_v \\
C_v^S \frac{d\bar{T}_v^S}{dt} = K_{ve}^S (T_e - \bar{T}_v^S) + K_{va}^S (\bar{T}_a - \bar{T}_v^S) + S_v^S P_s^S \cdot \alpha_v \\
C_v^E \frac{d\bar{T}_v^E}{dt} = K_{ve}^E (T_e - \bar{T}_v^E) + K_{va}^E (\bar{T}_a - \bar{T}_v^E) + S_v^E P_s^E \cdot \alpha_v \\
C_v^O \frac{d\bar{T}_v^O}{dt} = K_{ve}^O (T_e - \bar{T}_v^O) + K_{va}^O (\bar{T}_a - \bar{T}_v^O) + S_v^O P_s^O \cdot \alpha_v
\end{array} \right.$$

Pour exprimer analytiquement ce système sous une représentation d'état, nous devons définir les variables d'état, d'entrée et de sortie. Les variables d'état (notées X) sont les températures des onzes noeuds thermiques. La variable de sortie (notée Y) correspond à la température de l'air. Les entrées peuvent être distinguées en grandeurs perturbatrices et en grandeurs commandables. Les perturbations (notées W) sont la température de l'air extérieur, la température du sol ainsi que les densités de puissance solaire reçues sur chaque façade. Les commandes (notées U) sont les transmittances des stores vénitiens et la puissance apportée par le circuit de radiateurs à l'air du bâtiment (mises en gras ci-dessus).

$$X = \begin{pmatrix} \overline{T_a} \\ \overline{T_b} \\ \overline{T_f^N} \\ \overline{T_f^S} \\ \overline{T_f^E} \\ \overline{T_f^O} \\ \overline{T_f^T} \\ \overline{T_v^N} \\ \overline{T_v^S} \\ \overline{T_v^E} \\ \overline{T_v^O} \end{pmatrix}, \quad Y = (\overline{T_a}), \quad W = \begin{pmatrix} T_e \\ T_g \\ P_s^N \\ P_s^S \\ P_s^E \\ P_s^O \\ P_s^T \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} \overline{T_{dif}^{sv^N}} \\ \overline{T_{dif}^{sv^S}} \\ \overline{T_{dif}^{sv^E}} \\ \overline{T_{dif}^{sv^O}} \\ \overline{T_{dir}^{sv^N}} \\ \overline{T_{dir}^{sv^S}} \\ \overline{T_{dir}^{sv^E}} \\ \overline{T_{dir}^{sv^O}} \\ \Phi_{rad} \end{pmatrix}$$

En observant en détail le système d'équation de dimension onze, nous remarquons que les termes faisant intervenir les stores vénitiens ($\overline{T_{dif}^{sv^j}}$ et $\overline{T_{dir}^{sv^j}}$) sont fonction de la densité de puissance solaire reçue sur les façade (P_s^j). Ainsi, l'impact de la commande des stores dépend de l'apport solaire qui est une perturbation. Par conséquent, le système d'équation présente une non-linéarité et sa forme d'état ne peut pas s'exprimer uniquement sous forme matricielle. La représentation d'état prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + \underline{b}(W, U) \\ Y &= CX \end{aligned}$$

Avec :

- X , le vecteur des variables d'état ;
- Y , le vecteur des sorties ;
- W , le vecteur des perturbations ;
- U , le vecteur des commandes ;
- A , la matrice de dynamique ;
- \underline{b} , la fonction des entrées ;
- C , la matrice d'observation.

Jusque là, notre approche est restée assez générale en intégrant l'impact de tous les actionneurs thermiques du bâtiment (stores vénitiens et radiateurs). Nous allons maintenant nous recentrer sur les spécifications du contrôle bâtiment en ne considérant qu'une seule grandeur de commande : la charge thermique des radiateurs (Φ_{rad}). En effet, le contrôleur du bâtiment aspire à commander uniquement le chauffage central. Ainsi, les transmittances des stores vénitiens doivent être considérées comme des paramètres connus et supposés constants lors du calcul de la commande. Cette simplification permet de se ramener à un système linéaire à temps invariant (LTI) et la

fonction de commande (\underline{b}) peut se décomposer sous la forme de deux matrices (B_w et B_u) :

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + B_w W + B_u U \\ Y &= CX\end{aligned}$$

Avec $U = (\Phi_{rad})$

Pour faciliter la synthèse de commande, nous souhaitons dans un premier temps réduire les dimensions du modèle du système. Nous allons donc exprimer la forme du système pour identifier des sous blocs pouvant être réduits. Voici la forme du système :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \left(\begin{array}{c|cccccc|cccc} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} & a_{1,5} & a_{1,6} & a_{1,7} & a_{1,8} & a_{1,9} & a_{1,10} & a_{1,11} \\ \hline a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} & a_{2,6} & a_{2,7} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{4,1} & a_{4,2} & 0 & a_{4,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{5,1} & a_{5,2} & 0 & 0 & a_{5,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{6,1} & a_{6,2} & 0 & 0 & 0 & a_{6,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{7,1} & a_{7,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{7,7} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{8,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{8,8} & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_{9,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{9,9} & 0 & 0 \\ \hline a_{10,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{10,10} & 0 \\ \hline a_{11,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11,11} \end{array} \right) X \\ + & \left(\begin{array}{c|cccccc|} b_{1,1} & 0 & b_{1,3} & b_{1,4} & b_{1,5} & b_{1,6} & b_{1,7} \\ \hline 0 & b_{2,2} & b_{2,3} & b_{2,4} & b_{2,5} & b_{2,6} & b_{2,7} \\ \hline b_{3,1} & 0 & b_{3,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline b_{4,1} & 0 & 0 & b_{4,4} & 0 & 0 & 0 \\ \hline b_{5,1} & 0 & 0 & 0 & b_{5,5} & 0 & 0 \\ \hline b_{6,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{6,6} & 0 \\ \hline b_{7,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{7,7} \\ \hline b_{8,1} & 0 & b_{8,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline b_{9,1} & 0 & 0 & b_{9,4} & 0 & 0 & 0 \\ \hline b_{10,1} & 0 & 0 & 0 & b_{10,5} & 0 & 0 \\ \hline b_{11,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{11,6} & 0 \end{array} \right) W + \left(\begin{array}{c} b_{1,8} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right) U \\ Y &= \left(1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right) X\end{aligned}$$

Dans ce système, nous remarquons deux sous-blocs diagonaux dans la matrice de dynamique, l'un correspond aux façades et l'autre aux vitrages. Pour simplifier ce modèle, nous proposons donc de regrouper les différentes façades et les différents vitrages pour se ramener à un système de dimension 4. Cela correspond à ne garder qu'une seule

température moyenne pour toutes les façades et de même pour les vitrages. D'un point de vue physique, cette réduction permet de se ramener à une température équivalente sur toute l'enveloppe et nécessite une pondération par les surfaces. Mathématiquement, nous appliquons le changement de variable suivant sur le vecteur d'état.

$$X = \begin{pmatrix} \overline{T_a} \\ \overline{T_b} \\ \overline{T_f^N} \\ \vdots \\ \overline{T_f^T} \\ \overline{T_v^N} \\ \vdots \\ \overline{T_v^S} \end{pmatrix} \Rightarrow X = \begin{pmatrix} \overline{T_a} \\ \overline{T_b} \\ \frac{\sum_i (S_f^i \overline{T_f^i})}{\sum_i S_f^i} \\ \frac{\sum_j (S_v^j \overline{T_v^j})}{\sum_j S_v^j} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \forall i = N, S, E, O, T \\ \forall j = N, S, E, O \end{array}$$

En considérant ces nouvelles variables d'état, l'expression du système est simplifiée et nous pouvons la présenter dans son intégralité. Nous noterons dans la suite $(a_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq 4 \\ 1 \leq j \leq 4}}$ et $(b_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq 4 \\ 1 \leq j \leq 8}}$ les coefficients de ces nouvelles matrices A et B .

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \begin{pmatrix} \frac{-K_{fa} + K_{va} + K_{ae} + K_{ab}}{C_a} & \frac{K_{ab}}{C_a} & \frac{K_{fa}}{C_a} & \frac{K_{va}}{C_a} \\ \frac{K_{ab}}{C_b} & \frac{-K_{ab} + K_{bg} + K_{fb}}{C_b} & \frac{K_{fb}}{C_b} & 0 \\ \frac{K_{fa}}{C_f} & \frac{K_{fb}}{C_f} & \frac{-K_{fe} + K_{fa} + K_{fb}}{C_f} & 0 \\ \frac{K_{va}}{C_v} & 0 & 0 & \frac{-K_{ve} + K_{va}}{C_v} \end{pmatrix} X \\ &+ \begin{pmatrix} \frac{K_{ae}}{C_a} & 0 & \frac{S_v^N \cdot \tau_v \cdot \alpha_a^N}{C_a} & \frac{S_v^S \cdot \tau_v \cdot \alpha_a^S}{C_a} & \frac{S_v^E \cdot \tau_v \cdot \alpha_a^E}{C_a} & \frac{S_v^O \cdot \tau_v \cdot \alpha_a^O}{C_a} & 0 \\ 0 & \frac{K_{bg}}{C_b} & \frac{S_v^N \cdot \tau_v \cdot \alpha_b^N}{C_b} & \frac{S_v^S \cdot \tau_v \cdot \alpha_b^S}{C_b} & \frac{S_v^E \cdot \tau_v \cdot \alpha_b^E}{C_b} & \frac{S_v^O \cdot \tau_v \cdot \alpha_b^O}{C_b} & 0 \\ \frac{K_{fe}}{C_f} & 0 & \frac{S_f^N \alpha_f}{C_f} & \frac{S_f^S \alpha_f}{C_f} & \frac{S_f^E \alpha_f}{C_f} & \frac{S_f^O \alpha_f}{C_f} & \frac{S_f^T \alpha_f}{C_f} \\ \frac{K_{ve}}{C_v} & 0 & \frac{S_v^N \alpha_f}{C_v} & \frac{S_v^S \alpha_f}{C_v} & \frac{S_v^E \alpha_f}{C_v} & \frac{S_v^O \alpha_f}{C_v} & 0 \end{pmatrix} W + \begin{pmatrix} \frac{1}{C_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} U \\ Y &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} X \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \alpha_a^i &= 1 - \alpha_b \left(1 - \overline{T_{dir}^{sv^i}} \right) \quad \forall i \in N, S, E, O \\ \alpha_b^i &= \overline{T_{dir}^{sv^i}} \cdot \alpha_b \quad \forall i \in N, S, E, O \\ K_{fa} &= K_{fa}^N + K_{fa}^S + K_{fa}^E + K_{fa}^O + K_{fa}^T \\ K_{fb} &= K_{fb}^N + K_{fb}^S + K_{fb}^E + K_{fb}^O + K_{fb}^T \\ C_f &= C_f^N + C_f^S + C_f^E + C_f^O + C_f^T \\ K_{va} &= K_{va}^N + K_{va}^S + K_{va}^E + K_{va}^O \\ C_v &= C_v^N + C_v^S + C_v^E + C_v^O \\ K_{fe} &= K_{fe}^N + K_{fe}^S + K_{fe}^E + K_{fe}^O + K_{fe}^T \\ K_{ve} &= K_{ve}^N + K_{ve}^S + K_{ve}^E + K_{ve}^O \end{aligned}$$

Grâce à ce système de dimension réduite, nous pouvons plus facilement étudier les différents couplages entre les variables d'état. Le calcul des termes de la matrice d'état permet de calculer les valeurs propres du système (voir Figure III.10). Nous obtenons quatre valeurs propres négatives, le système est donc asymptotiquement stable. De plus, ces valeurs propres mettent en évidence trois dynamiques différentes allant de moins d'une demi-heure à plus d'un mois.

$$A = \begin{pmatrix} -4,12e-4 & 1,32e-4 & 6,84.10^{-5} & 1,41e-4 \\ 3,31.10^{-7} & -5,02.10^{-7} & 9,68.10^{-8} & 0 \\ 5,57.10^{-7} & 3,16.10^{-7} & -7,07.10^{-6} & 0 \\ 1,15283e-4 & 0 & 0 & -1,26812e-3 \end{pmatrix}$$

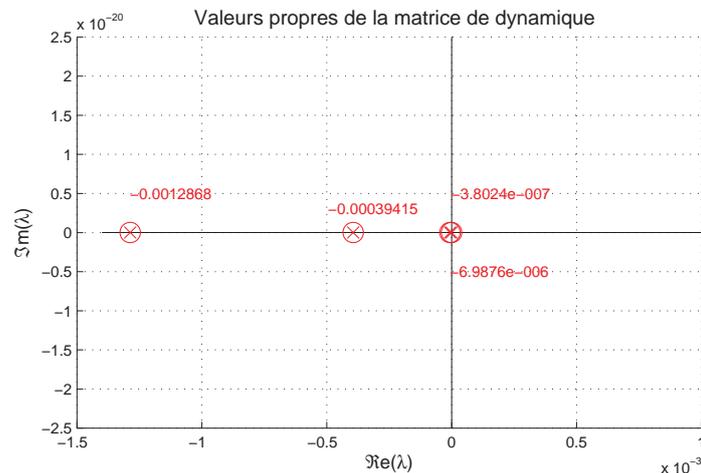


FIGURE III.10 – Valeurs propres de la matrice de dynamique

Cependant, ce système d'ordre quatre, même s'il est déjà bien réduit, reste difficile à résoudre analytiquement. Pour le réduire encore un peu, nous allons travailler sur les termes de couplage en normalisant chaque ligne de la matrice de dynamique par rapport aux valeurs diagonales.

$$\begin{pmatrix} 1 & -0.32 & -0.165914 & -0.34 \\ -0.66 & 1 & -0.19 & -0 \\ \boxed{-0.08} & \boxed{-0.04} & 1 & -0 \\ \boxed{-0.09} & -0 & -0 & 1 \end{pmatrix}$$

Comme nos variables d'état sont des températures, les coefficients de couplage sont comparables et nous pouvons directement visualiser dans cette matrice leurs contributions respectives. Ainsi, nous observons clairement que l'intérieur du bâtiment (air et

bâti) a une influence très faible sur son enveloppe (façades et vitrages). Ces contributions peuvent donc être négligées. Ainsi les températures de l'enveloppe sont des variables exogènes qui s'expriment uniquement en fonction des perturbations :

$$\begin{aligned} s\overline{T}_f(s) &= a_{33}\overline{T}_f(s) + b_{31}T_e(s) + b_{33}P_s^N(s) + b_{34}P_s^S(s) + b_{35}P_s^E(s) + b_{36}P_s^O(s) + b_{37}P_s^T(s) \\ \overline{T}_f(s) &= \frac{1}{s - a_{33}} \left(b_{31}T_e(s) + b_{33}P_s^N(s) + b_{34}P_s^S(s) + b_{35}P_s^E(s) + b_{36}P_s^O(s) + b_{37}P_s^T(s) \right) \end{aligned}$$

et de même :

$$\begin{aligned} s\overline{T}_v(s) &= a_{44}\overline{T}_v(s) + b_{41}T_e(s) + b_{43}P_s^N(s) + b_{44}P_s^S(s) + b_{44}P_s^E(s) + b_{45}P_s^O(s) \\ \overline{T}_v(s) &= \frac{1}{s - a_{44}} \left(b_{41}T_e(s) + b_{43}P_s^N(s) + b_{44}P_s^S(s) + b_{45}P_s^E(s) + b_{46}P_s^O(s) \right) \end{aligned}$$

Encore un fois, nous pouvons reformuler le système réduit en intégrant la température des façades (\overline{T}_f) et celle des vitrages (\overline{T}_v) dans le vecteur des variables d'entrée :

$$\begin{aligned} \dot{X}' &= A'X' + B'U' \\ \underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\overline{T}}_a \\ \dot{\overline{T}}_b \end{pmatrix}}_{\dot{X}'} &= \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}}_{A'X'} \underbrace{\begin{pmatrix} \overline{T}_a \\ \overline{T}_b \end{pmatrix}}_{X'} + \underbrace{\begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{18} & a_{13} & a_{14} \\ b_{21} & \cdots & b_{28} & a_{23} & 0 \end{pmatrix}}_{B'U'} \underbrace{\begin{pmatrix} T_e \\ \vdots \\ \Phi_{rad} \\ \overline{T}_f \\ \overline{T}_v \end{pmatrix}}_{U'} \end{aligned}$$

Le système étant maintenant d'ordre 2, nous pouvons facilement exprimer sa fonction de transfert. De manière très générale, en passant notre modèle réduit dans la transformée de Laplace, sa représentation d'état s'exprime :

$$\begin{aligned} sX'(s) &= A'X'(s) + B'U'(s) \\ X'(s) &= (sI - A')^{-1}B'U'(s) \end{aligned}$$

Alors sa fonction de transfert peut s'exprimer simplement :

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{Y'(s)}{U'(s)} \\ &= C'(sI - A')^{-1}B' \end{aligned}$$

Et la matrice inverse :

$$H(s) = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 \end{pmatrix} . B'$$

Avec :

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{s - a_{22}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} \\ &\approx \frac{1}{s - a_{11}} \end{aligned}$$

$$k_2 = \frac{-a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}}$$

$$\approx \frac{-a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22})}$$

Nous observons donc deux pôles en annulant le dénominateur. Ces pôles sont proches des pôles identifiés par diagonalisation du système d'ordre 4 ce qui conforte nos résultats :

$$s^2 - (a_{11} + a_{22})s + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0$$

$$\begin{cases} P_1 = -4, 12.10^{-4} \rightarrow \tau_1 \approx 40\text{min } 27\text{sec} \\ P_2 = -3, 95.10^{-7} \rightarrow \tau_2 \approx 29\text{j } 7\text{h } 14\text{min } 5\text{sec} \end{cases}$$

Pour finir, nous proposons de formuler complètement l'expression de la sortie en fonction des entrées :

$$\begin{aligned} \overline{T_a}(s) &= \frac{b_{11}}{s - a_{11}}T_e(s) + \frac{-b_{22}a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22})}T_g(s) \\ &+ \left(\frac{b_{13}}{s - a_{11}} - \frac{b_{23}a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22})} \right) P_s^N(s) + \left(\frac{b_{14}}{s - a_{11}} - \frac{b_{24}a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22})} \right) P_s^S(s) \\ &+ \left(\frac{b_{15}}{s - a_{11}} - \frac{b_{25}a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22})} \right) P_s^E(s) + \left(\frac{b_{16}}{s - a_{11}} - \frac{b_{26}a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22})} \right) P_s^O(s) \\ &+ \frac{b_{18}}{s - a_{11}}\phi_{rad}(s) + \left(\frac{a_{13}}{s - a_{11}} - \frac{a_{23}a_{12}}{(s - a_{11})(s - a_{22})} \right) T_f(s) + \frac{a_{14}}{s - a_{11}}T_v(s) \end{aligned}$$

Nous n'avons plus qu'à remplacer les expressions de la température des façades et des vitrages en fonction des entrées. De cette manière, le modèle de commande s'écrit :

$$\begin{aligned} \overline{T_a}(s) &= \frac{1}{s - a_{11}} \left[H_e(s)T_e(s) + H_g(s)T_g(s) + H_s^N(s)P_s^N(s) + H_s^S(s)P_s^S(s) \right. \\ &\quad \left. + H_s^E(s)P_s^E(s) + H_s^O(s)P_s^O(s) + H_s^T(s)P_s^T(s) + H_r(s)\Phi_{rad}(s) \right] \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 H_e(s) &= b_{11} + b_{31} \left(\frac{1}{s - a_{33}} \right) \left(a_{13} - \frac{a_{23}a_{12}}{s - a_{22}} \right) + b_{41} \frac{a_{14}}{s - a_{44}} \\
 H_g(s) &= b_{22} \frac{-a_{12}}{s - a_{22}} \\
 H_s^N(s) &= b_{13} - b_{23} \frac{a_{12}}{s - a_{22}} + b_{33} \left(\frac{1}{s - a_{33}} \right) \left(a_{13} - \frac{a_{23}a_{12}}{s - a_{22}} \right) + b_{43} \frac{a_{14}}{s - a_{44}} \\
 H_s^S(s) &= b_{14} - b_{24} \frac{a_{12}}{s - a_{22}} + b_{34} \left(\frac{1}{s - a_{33}} \right) \left(a_{13} - \frac{a_{23}a_{12}}{s - a_{22}} \right) + b_{44} \frac{a_{14}}{s - a_{44}} \\
 H_s^E(s) &= b_{15} - b_{25} \frac{a_{12}}{s - a_{22}} + b_{35} \left(\frac{1}{s - a_{33}} \right) \left(a_{13} - \frac{a_{23}a_{12}}{s - a_{22}} \right) + b_{45} \frac{a_{14}}{s - a_{44}} \\
 H_s^O(s) &= b_{16} - b_{26} \frac{a_{12}}{s - a_{22}} + b_{36} \left(\frac{1}{s - a_{33}} \right) \left(a_{13} - \frac{a_{23}a_{12}}{s - a_{22}} \right) + b_{46} \frac{a_{14}}{s - a_{44}} \\
 H_s^T(s) &= b_{37} \left(\frac{1}{s - a_{33}} \right) \left(a_{13} - \frac{a_{23}a_{12}}{s - a_{22}} \right) \\
 H_r(s) &= b_{18}
 \end{aligned}$$

Au regard de ces propriétés dynamiques du système, nous allons développer deux types de commande. La première est la commande PID, c'est la plus utilisée de nos jours pour contrôler les actionneurs thermique. La seconde est une commande prédictive qui se base sur une anticipation de l'évolution du système et des perturbations pour optimiser son utilisation.

III.3.2 La commande proportionnelle intégrale

A un instant donné, les besoins thermiques du bâtiment peuvent s'exprimer simplement à partir de l'erreur entre la température moyenne de l'air dans le bâtiment et une température de consigne. Cette erreur peut directement alimenter une commande. C'est le cas typique de la régulation PID.

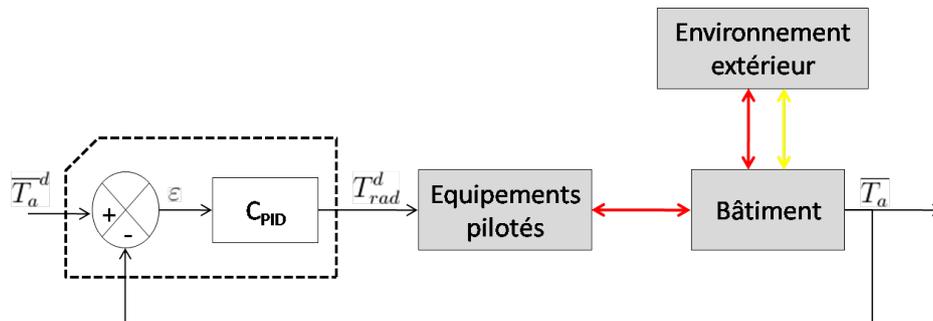


FIGURE III.11 – Schéma bloc de commande par PID du chauffage central

Le contrôle par PID permet d’ajuster les sorties du procédé (le bâtiment soumis à son environnement extérieur) en fonction du signal d’erreur (voir Figure III.11). La commande correspond à la température moyenne des radiateurs.

Dans le domaine de Laplace, la fonction de transfert d’un correcteur PID s’écrit :

$$\begin{aligned}
 C_{PID}(s) &= \frac{T_{air}(s)}{\varepsilon(s)} \\
 &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s
 \end{aligned}$$

Il existe plusieurs méthodes pour définir les trois coefficients (K_p , K_i et K_d) du contrôleur PID. La première technique consiste à réaliser une modélisation du procédé afin d’en déduire la fonction de transfert en boucle fermée. Cela permet ensuite de déduire les valeurs à attribuer aux coefficients pour obtenir une réponse qui satisfait les exigences (temps de réponse, dépassement, erreur statique...). Les autres techniques sont expérimentales. La méthode classique consiste à régler dans un premier temps le gain proportionnel jusqu’à ce que la sortie de la boucle oscille. Puis à régler le gain intégral jusqu’à ce que les oscillations cessent et enfin le gain dérivé pour que la réponse en boucle fermée soit assez rapide. Il existe de nombreuses autres méthodes expérimentales, la plus utilisée est la méthode de Ziegler-Nichols [Ziegler et Nichols, 1993] qui permet de calculer les gains intégral et dérivé à partir du gain proportionnel en limite d’oscillation.

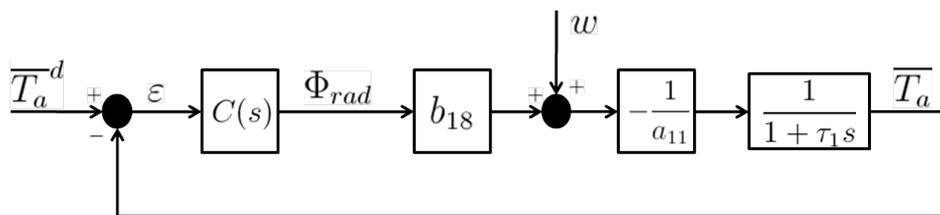


FIGURE III.12 – Régulation par PID du chauffage central

Comme nous connaissons le comportement dynamique du système (voir Figure III.12), nous calibrerons le correcteur PID en calculant sa fonction de transfert en boucle fermée. Pour cela, il faut d’abord exprimer la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$\bar{T}_a(s) = -\frac{b_{18}}{a_{11}} \frac{1}{1 + \tau_1 s} \Phi_{rad} - \frac{1}{a_{11}} \frac{1}{1 + \tau_1 s} w$$

En boucle fermée, nous souhaitons ajouter un correcteur PI pour commander la puissance du radiateur en fonction de l’erreur de température. Nous nous limitons ici à un correcteur PI pour éviter les possibles dépassements engendrés par le terme dérivé.

En effet, le terme dérivé aurait généré des sollicitations excessives de l'actionneur liées aux bruits de mesure. La commande se calcule alors ainsi :

$$\Phi_{rad} = C(s) (\overline{T}_a^d - \overline{T}_a) \quad \text{avec } C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

La combinaison de cette équation avec la fonction de transfert en boucle ouverte permet de calculer la fonction de transfert en boucle fermée :

$$\begin{aligned} \overline{T}_a \left[1 + \frac{b_{18}}{a_{11}} \frac{1}{1 + \tau_1 s} C(s) \right] &= -\frac{b_{18}}{a_{11}} \frac{1}{1 + \tau_1 s} C(s) \overline{T}_a^d - \frac{1}{a_{11}} \frac{1}{1 + \tau_1 s} w \\ \overline{T}_a \left[\frac{a_{11} \tau_1}{b_{18} K_i} s^2 + \left(\frac{K_p}{K_i} + \frac{a_{11}}{b_{18} K_i} \right) s + 1 \right] &= -\left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) \overline{T}_a^d - \frac{s}{b_{18} K_i} w \end{aligned}$$

En comparant cette mise en forme de la fonction de transfert en boucle fermée avec la forme canonique d'un système du second ordre, nous pouvons extraire l'expression de la pulsation propre ω_0 et de l'amortissement ξ du système bouclé :

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{a_{11} \tau_1}{b_{18} K_i}} \\ \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a_{11} \tau_1}{b_{18} K_i}} \left(\frac{K_p}{K_i} + \frac{a_{11}}{b_{18} K_i} \right) \end{cases}$$

Ces deux expressions permettent de dimensionner les gains du PI pour qu'il réponde aux exigences de contrôle. A noter que nous n'avons pas considéré ici la dynamique des perturbations. En effet, dans la formulation du modèle de commande nous avons vu que les perturbations (température extérieure et puissance solaire) avaient des dynamiques bien connues. Le modèle de perturbation est très proche d'un système du second ordre et la présence du double intégrateur dans la fonction de transfert en boucle fermée suffit à dire que les perturbations seront bien rejetées.

Le PID est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie car il permet d'asservir avec précision tout système linéaire en bénéficiant d'un paramétrage simple. Il possède cependant un inconvénient majeur inhérent à sa structure de commande. En effet, la commande PID fonctionne sur le principe qu'une erreur mesurée implique une action sur la commande en faisant totalement abstraction des connaissances sur le procédé.

Dans notre cas, le procédé est un bâtiment qui est un système caractérisé par une forte inertie thermique. Il est soumis à de nombreuses perturbations thermiques (température extérieure, flux radiatif solaire, occupation...) dont les impacts sur la

température intérieure sont importants et souvent observables avec un certain retard. Même si une commande PID est tout à fait envisageable pour le contrôle d'un chauffage central, elle s'avère peu justifiable au regard des consommations énergétiques car elle n'exploite pas la connaissance des perturbations -c'est à dire les sources naturelles de chaleur- pour minimiser les consommations énergétiques des actionneurs. Pour cette raison, nous avons choisi d'implémenter un deuxième contrôleur basé sur une commande prédictive.

III.3.3 La commande prédictive

Comme la commande PI, la commande prédictive se base sur des mesures du procédé. Cependant, elle intègre en plus dans son fonctionnement un modèle de connaissance qui lui permet de prédire le comportement du procédé afin d'optimiser le signal de commande sur un horizon temporel.

Pour positionner la commande prédictive, il faut revenir aux deux philosophies classiques du contrôle. D'un côté, il y a les commandes par mesures, type retour de sortie (PID, . . .), basée sur l'abstraction de toute connaissance du procédé. Elle correspond à un contrôle en boucle fermée obtenu en combinant les informations des capteurs. D'un autre côté, il y a les commandes par inversion de modèle, basée sur une connaissance la plus parfaite possible du procédé. Elle se traduit par un contrôle en boucle ouverte obtenu par inversion du modèle du procédé. Alors que le premier type de commande permet d'assurer un certain niveau de robustesse, elles ne permettent pas d'exploiter au mieux toutes les caractéristiques physiques du système. C'est le contraire pour les commandes par inversion.

La commande prédictive se situe entre ces deux stratégies extrêmes en faisant un compromis entre les modèles et les mesures. En effet, elle correspond à un contrôle en boucle fermée mais réalise une prédiction de son action en utilisant un modèle du procédé.

Les techniques de commande prédictive (notée MPC pour Model Predictive Control) s'intègrent parfaitement pour les systèmes à dynamique relativement lente. Ceci est principalement lié au calcul de la commande qui nécessite la résolution d'un problème d'optimisation limitant la période d'échantillonnage en fonction des capacités de calcul. La commande prédictive est applicable à de très nombreux procédés et sa compréhension fait appel à de bonnes connaissances en commande optimale, en commande multivariable et bien sûr en algorithmie. Cependant, son principe est assez accessible car les idées fondatrices du concept de la MPC sont très proches du raisonnement humain. Les principaux inconvénients de la commande prédictive sont le temps de calcul et la

nécessité d'un modèle interne dont la précision impacte directement la qualité du suivi. Les divers algorithmes, inclus dans la famille des MPC, diffèrent principalement par l'expression du modèle interne utilisé pour représenter le procédé et les perturbations, la fonction de coût à optimiser et la prise en compte des contraintes.

Historiquement, c'est dans les années 1970 que la technique MPC fût développée pour des applications industrielles et notamment dans le domaine de la chimie. En Europe, les travaux fondateurs sont ceux de Richalet et al. qui dressent le problème de la commande prédictive basée sur un modèle PFC (pour Predictive Functional Command) [Richalet *et al.*, 1978, 2005]. Depuis, diverses méthodes sont apparues grâce à l'apport de la communauté de la commande adaptative comme l'EPSAC (pour Extended Prediction Self Adaptive Control) et la GPC (pour Generalized Predictive Control) définie par Clarke et al. [Clarke *et al.*, 1987]. Cette dernière reste à ce jour la plus utilisée. Aujourd'hui, l'intérêt pour la commande prédictive ne cesse de grandir car elle offre une solution adaptée aux problématiques énergétiques actuelles. Pour cette raison, nous la retrouvons régulièrement dans les études sur les BEMS (Building Energy Management System) et sur les SMART-GRID (réseaux intelligents de distribution d'électricité) [Loveday *et al.*, 1992; Kolokotsa *et al.*, 2009]. Dans notre contexte, nous l'utiliserons pour améliorer le contrôle d'un chauffage central et répondre efficacement aux besoins thermiques du bâtiment.

Dans le cadre du contrôle d'un chauffage central, les avantages de la prédiction sont évidents. En effet, nous savons tous par expérience qu'une action sur la température des radiateurs modifie, après un certain temps, la température de l'air dans le bâtiment. Connaissant l'inertie du bâtiment et l'impact de l'environnement extérieur, nous savons aussi qu'il est nécessaire d'anticiper le besoin de chauffage pour ne pas risquer un dépassement de consigne synonyme d'excès de consommation énergétique. La commande prédictive va nous permettre d'exploiter cette connaissance.

Avant de synthétiser le contrôleur prédictif, nous nous sommes intéressés aux différentes contributions scientifiques alliant contrôle prédictif et confort thermique [Morosan *et al.*, 2010]. Nous nous sommes donc penchés sur le contrôle des HVAC (pour Heating, Ventilation and Air Conditioning) [Freire *et al.*, 2008]. Nous avons aussi étudié les travaux spécifiques aux systèmes de chauffage de type chauffage central [Balan *et al.*, 2009] et aux planchers chauffants [Prívará *et al.*, 2011]. Dans toutes ces études, les résultats montrent une amélioration de confort tout en diminuant les consommations énergétiques. Les points d'accord entre toutes les publications que nous avons étudiées sont l'intérêt fort de la commande prédictive et la mise en équation de cette commande, sous la forme d'une fonction coût correspondant à l'écart de température entre le prédit et le désiré.

De manière générale, les contrôleurs prédictifs appliqués à l'énergie dans les bâti-

ments reposent toujours sur trois éléments [Oldewurtel *et al.*, 2010] :

1. un modèle de prédiction qui permet d'estimer les futures tendances des perturbations climatiques sur un horizon de prédiction ;
2. un modèle interne qui permet d'estimer l'évolution future du bâtiment sur l'horizon de prédiction ;
3. un calculateur qui permet d'optimiser la commande sur l'horizon de prédiction.

Nous allons détailler ces trois éléments et les appliquer à la régulation de la température intérieure dans un bâtiment (voir Figure III.13). Dans notre cas, nous ne considérons qu'un seul actionneur qui est le chauffage central. Nous sommes donc dans un cas simple de commande prédictive mono-variable, la grandeur réglée est la consigne de température moyenne des radiateurs (T_{rad}^d) et la grandeur régulée est la température moyenne de l'air dans le bâtiment (\bar{T}_a).

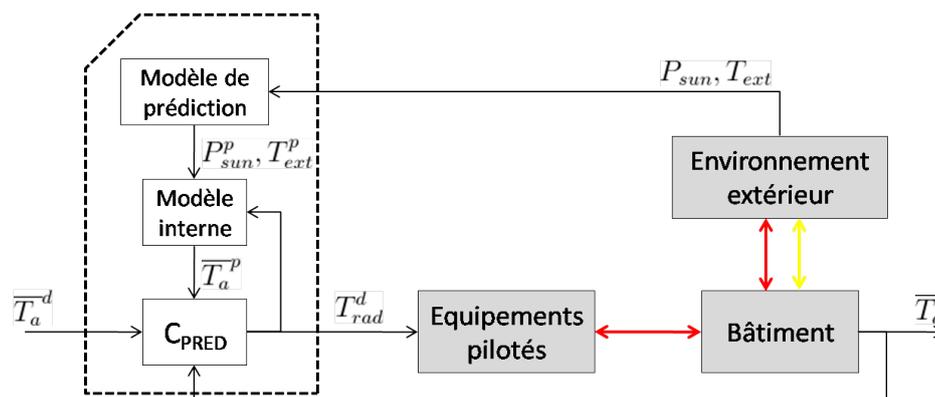


FIGURE III.13 – Schéma bloc de commande prédictive du chauffage central

Le modèle de prédiction Il permet de calculer les tendances des perturbations qui impactent le procédé. Une bonne estimation des perturbations futures est très importante pour que le contrôle prédictif soit efficace [Cooperman *et al.*, 2010]. Pour cette raison des techniques spécifiques visent à prendre en compte l'incertitude de la prédiction pour améliorer la robustesse du contrôle.

Pour un bâtiment, les deux principales perturbations que nous avons retenues sont la température extérieure et le flux énergétique solaire. Les modèles de prédiction correspondent donc à des modèles météorologiques locaux. A l'heure actuelle de nombreuses agences fournissent des estimations météorologiques à courts termes et ces informations sont très souvent disponibles sur internet. Pour nos simulations, nous n'utilisons pas directement de modèle de prédiction car nous exploitons les acquisitions d'une station météorologique. De ce fait, nous avons déjà à disposition des données annuelles.

Nous nous contentons d'y injecter une composante aléatoire pour représenter l'erreur de prédiction inhérente à tout modèle de climat.

Le modèle interne Le modèle interne doit permettre d'exprimer la grandeur réglée en sortie du procédé à partir de la grandeur de commande et des perturbations. La détermination du modèle interne peut être réalisée par une approche physique (modèle de connaissance ou *boîte blanche*) ou par une approche purement mathématique (modèle de représentation ou *boîte noire*). Dans l'approche purement mathématique, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage (systèmes adaptatifs, apprentissage par renforcement, réseaux de neurones, algorithmie génétique. . .) est nécessaire pour construire le modèle interne à partir d'une large série de mesures. Dans l'approche physique, le modèle interne est directement issu de la modélisation physique du procédé ce qui nécessite de comprendre les interactions du système. Comme jusqu'ici nous avons adopté une logique de système portée par la modélisation physique, nous resterons dans cette voie pour construire le modèle interne.

Grâce à l'étude dynamique du système, nous avons choisi une représentation des échanges en fonction des deux perturbations principales et bien sûr de la commande, à l'image des modèles très simplifiés énoncés dans la RT2005 [[Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement, 2006](#)]. Nous négligeons donc l'impact de la température de sol et nous supposons ici que la température moyenne de l'air à l'intérieur du bâtiment est uniquement soumise à une déperdition vers l'extérieur, à une charge par les radiateurs et à une charge due à l'ensolleillement. L'expression du modèle interne est donc la suivante :

$$\overline{T}_a(s) = H_e(s).T_{ext}(s) + H_r(s).T_{rad}(s) + H_s(s).P_s(s)$$

Ce choix de modèle est évidemment dicté par l'étude précédente sur la dynamique du système qui fournit une information importante sur les formes des trois fonctions de transfert. En outre, nous avons regroupé par simple commodité les densités de puissances solaires reçues par les cinq façades en exprimant directement la densité de puissance solaire totale reçue par l'enveloppe du bâtiment.

$$P_s(s) = \sum_i (S_f^i + S_v^i) P_s^i(s) \quad \forall i \in N, S, E, O, T$$

Avec :

- \overline{T}_a la température moyenne (°C) de l'air dans le bâtiment ;
- T_{ext} la température (°C) extérieure ;
- T_{rad} la température (°C) des radiateurs ;
- P_s la puissance solaire totale (W) reçue par l'enveloppe du bâtiment ;

- P_s^i la densité de puissance solaire (W/m^2) recue par les façades et les vitrages ;
- S_f^i la surface (m^2) des façades ;
- S_v^i la surface (m^2) des vitrages ;

Pour déterminer les expressions de ces trois fonctions de transfert, nous avons réalisé des sollicitations classiques : un échelon de température extérieure, un échelon de température des radiateurs et un créneau de puissance radiative solaire. Nous allons observer la réponse du bâtiment à ces sollicitations. Les réponses observées nous permettront d'identifier les paramètres du modèle afin d'obtenir une prédiction du comportement thermique du bâtiment valable sur un certain horizon de prédiction.

La première sollicitation testée correspond à un **échelon de température extérieure**. Initialement, tous les noeuds du modèle bâtiment (décrit dans le chapitre précédent) ainsi que les températures extérieures sont fixées à 15°C . Le flux radiatif solaire est nul et le chauffage central est désactivé. La simulation est réalisée sur onze heures. A la fin de la première heure, la température extérieure passe brutalement à 25°C . Nous observons la réponse de la température de l'air intérieur ainsi que les puissances échangées entre l'air et ces volumes voisins (voir Figure III.14). La température de l'air intérieur réagit comme un système du premier ordre avec une constante de temps de 54 minutes. Il semble important de noter la forte influence de la ventilation et des vitrages qui représentent les principales sources d'échanges de chaleur avec l'extérieur.

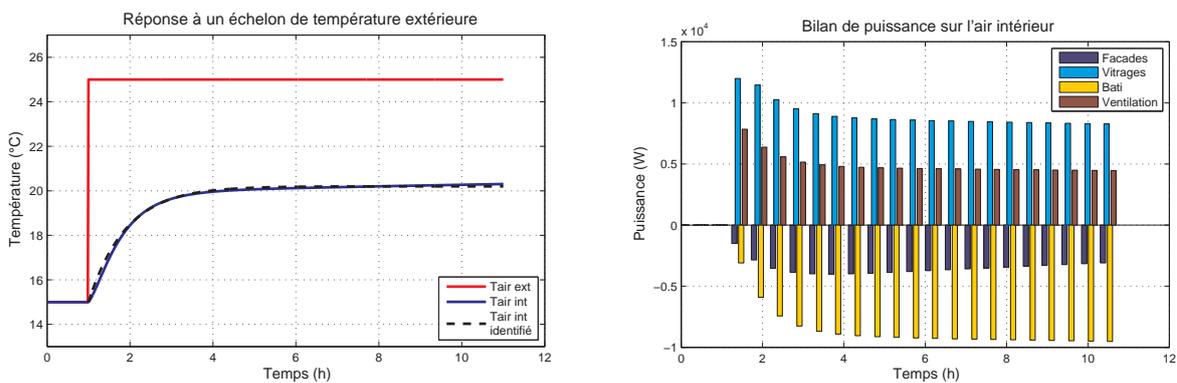


FIGURE III.14 – Réaction de l'air intérieur suite à une augmentation brutale de la température extérieure

Nous observons aussi la présence d'une deuxième dynamique beaucoup plus lente car la valeur finale de la réponse n'est pas atteinte. Comme le modèle interne doit permettre de faire une prédiction à court-terme, nous nous limiterons à une modélisation sous la forme d'un premier ordre avec le gain $K_e = 0,52$ et une constante de temps

$\tau_e = 3240s$. Naturellement, cette dynamique est très proche de la dynamique rapide que nous avons identifiée en réduisant le modèle de simulation.

$$H_e(s) = \frac{K_e}{1 + \tau_e \cdot s}$$

Pour la deuxième sollicitation, nous nous intéressons à l'impact d'un **échelon de température des radiateurs** sur l'air intérieur. Initialement, tous les noeuds du bâtiment et les températures extérieures sont fixées à 15°C. La puissance solaire est nulle. A la fin de la première heure, une puissance convective est apportée à l'air intérieur en fixant un échelon sur la température des radiateurs qui passent de 15°C à 40°C. La réponse de la température de l'air intérieur est très proche de celui d'un système du premier ordre avec une constante de temps de 22 minutes et un gain statique de 0,53 (voir Figure III.15).

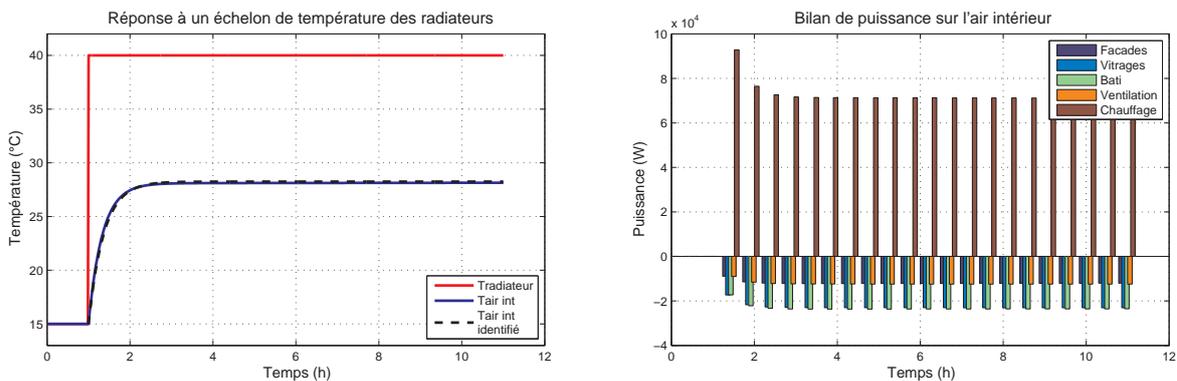


FIGURE III.15 – Réaction de l'air intérieur suite à une augmentation brutale de la température des radiateurs

Ici la valeur finale est bien atteinte mais la dynamique observée est plus de deux fois plus rapide que les dynamiques identifiées lors de la réduction du modèle. Cela est dû au fait que nous observons ici la température du radiateur et non sa puissance fournie à l'air intérieur. Pour cette raison, une deuxième dynamique entre en jeu qui implique le coefficient conducto-convectif des radiateurs. Ici nous retenons un modèle du premier ordre avec un gain $K_r = 0,53$ et une constante de temps $\tau_r = 1320s$.

$$H_r(s) = \frac{K_r}{1 + \tau_r \cdot s}$$

La troisième et dernière sollicitation sur laquelle nous nous sommes penchés correspond à un **créneau de flux radiatif solaire reçu par l'enveloppe du bâtiment**. Comme précédemment, tous les noeuds du bâtiment et les températures extérieures

sont fixées initialement à 15°C. Le système de chauffage est éteint. Pour calculer la puissance solaire reçue par le bâtiment, il est nécessaire de connaître le facteur de forme du bâtiment, c'est à dire la surface de l'enveloppe qui est insolée. Cette surface dépend bien évidemment de la position du soleil dans la voûte céleste mais peut se calculer facilement (voir Figure III.16).

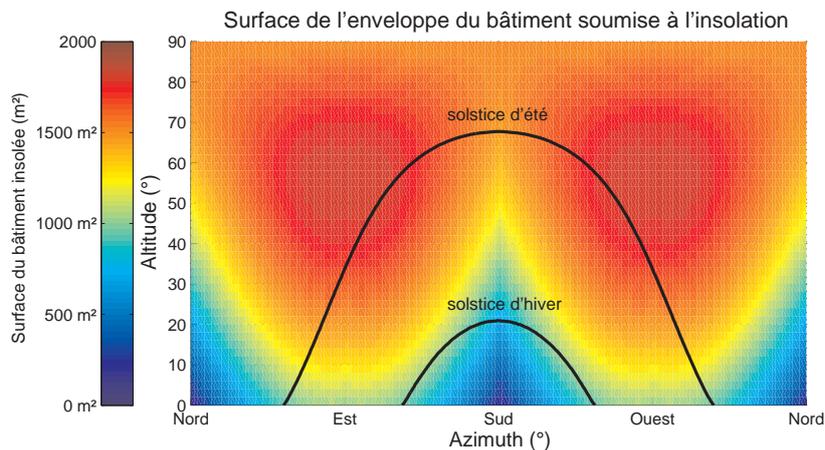


FIGURE III.16 – Surface d'enveloppe insolée en fonction de la position du soleil

Pour les besoins de la simulation, la puissance solaire normale est initialement nulle et monte brusquement à 500 W/m^2 pendant sept heures. La position du soleil est fixée à un azimuth de 160° et à une altitude de 40° pendant cette période. Cette position a été choisie pour représenter un cas classique d'ensolleillement en fin de matinée au mois de Mars. L'enveloppe du bâtiment est insolée sur une surface d'environ 1335 m^2 et reçoit une puissance solaire d'approximativement 670 kW .

Nous observons sur les courbes de réponse (voir Figure III.17) une augmentation de la température à l'intérieur du bâtiment de plus d'un degré lorsque les stores vénitiens sont baissés et d'un demi degré lorsqu'ils sont remontés. Ici la complexité l'identification est visible car la fonction de transfert dépend de la position des stores vénitiens et surtout de l'orientation du soleil. Le système semble réagir comme la somme d'un intégrateur et d'un premier ordre face à la puissance énergétique solaire. Plus précisément, nous observons que la réponse correspond à un intégrateur lorsque les stores sont baissés car ils dissipent le flux solaire directement dans l'air. Lorsque les stores sont levés, une partie du flux solaire est absorbée par les parois intérieures ce qui fait apparaître un premier ordre. Le gain de l'intégrateur est donc identifié à partir de la courbe avec les stores levés à un gain $K_{s1} = 5,21 \cdot 10^{-8}$. Le premier ordre est identifié en soustrayant les deux simulations ce qui conduit à un gain $K_{s2} = 9,63 \cdot 10^{-4}$ et une constante de temps $\tau_s = 3180s$

$$H_s(s) = \frac{K_{s1}}{s} + \frac{K_{s2}}{1 + \tau_s \cdot s}$$

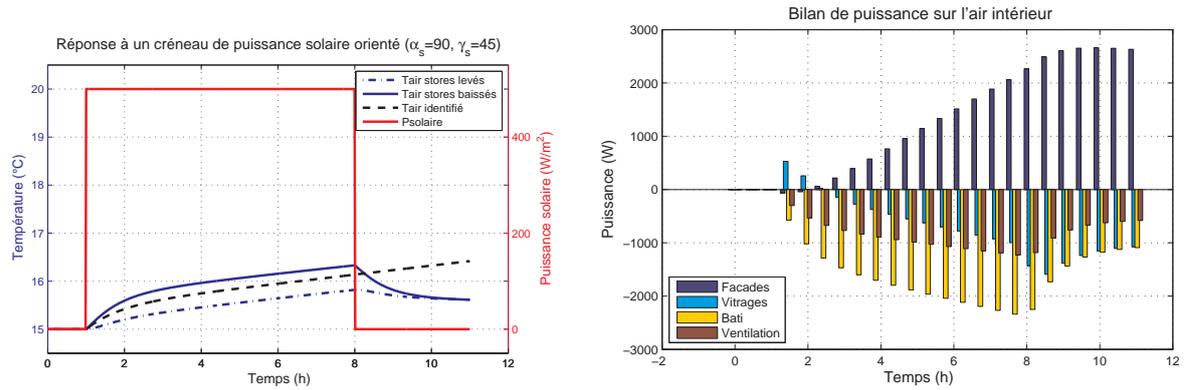


FIGURE III.17 – Réaction de l'air intérieur suite à un créneau de puissance radiative solaire

Comme tout modèle, le modèle interne que nous avons identifié n'est pas parfait. Sa prédiction de l'effet de la commande est donc faussée mais le biais reste assez faible sur l'échelle de l'horizon de prédiction. Pour s'en assurer nous avons réalisé une comparaison sur une journée entière (voir Figure III.18) qui met en valeur une erreur moyenne inférieure à $0,16^{\circ}\text{C}$.

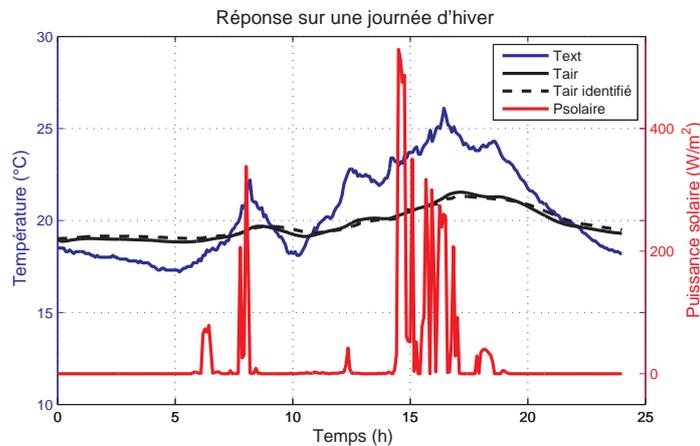


FIGURE III.18 – Comparaison entre modèle de simulation et modèle de commande sur une journée entière

Nous allons maintenant utiliser ce modèle interne dans un calculateur pour prédire le comportement thermique à court terme de l'air du bâtiment.

Le calculateur Le calculateur estime la valeur optimale de commande pour que la sortie du procédé suive le comportement de référence. Cette trajectoire correspond à l'évolution que nous souhaitons voir suivie par la sortie du procédé. Ainsi, grâce au

comportement de référence et au modèle interne, la commande peut être calculée sur l'ensemble de l'horizon de prédiction.

Pour aborder de manière assez simple le calcul de la commande prédictive, nous allons considérer une consigne fixe sur la température des radiateurs. Comme dans le cas de la commande auto-adaptative prédictive étendue (le EPSAC pour Extended Prediction Self Adaptive Control) [Keyser et Cauwenberghe, 1981], la signal de commande futur est calculé de manière à rester constant sur tout l'horizon de prédiction. Le problème se ramène à déterminer l'échelon de commande à appliquer pour que le procédé rejoigne la consigne dans un temps donné. La trajectoire de référence se traduit donc par un comportement de type premier ordre avec un point de coïncidence (noté P_c) généralement associé au temps de réponse en boucle fermée (noté $trbf$).

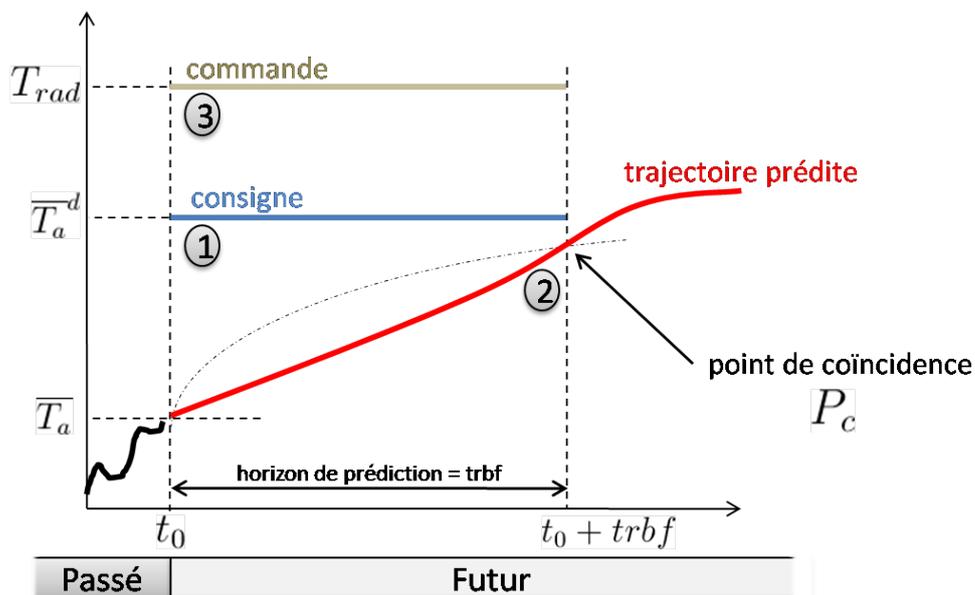


FIGURE III.19 – Modélisation du procédé et point de coïncidence

L'objectif est de calculer la commande pour que le comportement prédit rejoigne le point de coïncidence (voir Figure III.19). Pour comprendre plus précisément le fonctionnement du calculateur prédictif, nous allons détailler les étapes de calcul de la commande. A chaque pas d'échantillonnage :

1. En connaissance de l'état présent de sortie du procédé ($\overline{T}_a(t_0)$) et de la consigne à l'horizon de prédiction ($\overline{T}_a^d(t_0 + h)$), le contrôleur calcule le point de coïncidence représentant le temps de réponse en boucle fermée souhaité.
2. Ensuite le modèle interne du procédé est utilisé pour anticiper son comportement entre l'instant présent (t_0) et le point de référence ($t_0 + trbf$). Cette anticipation nécessite en entrée les estimations des perturbations et des consignes futures

sur cette même période. Ces données d'entrée sont fournies par le modèle de prédiction.

3. Enfin, le calcul de la commande optimale est réalisé par minimisation de l'écart du comportement prédit autour du point de coïncidence. Le résultat de cette minimisation permet d'obtenir un incrément de commande qu'il faut appliquer au procédé. En pratique, cet incrément de commande n'est pas appliqué pendant tout l'horizon de prédiction car ce calcul prédictif est exécuté à un pas d'échantillonnage qui peut être plus faible.

Par ailleurs, la boucle de régulation permet au calculateur de réaligner le modèle interne. Cela signifie que la prédiction de l'évolution du procédé est toujours réalisée à partir du passé mesuré et non du passé modélisé. Le modèle interne est donc recalé à chaque pas de temps. Cette action permet de corriger les erreurs de prédiction du modèle et apporte de la robustesse à la commande.

Nous allons maintenant décrire les méthodes de calcul permettant d'optimiser la commande de température de radiateur sur l'horizon de prédiction. Dans le domaine temporel, la modèle interne implémenté dans la commande prédictive s'écrit :

$$\begin{aligned}\overline{T}_a(t + dt) &= \overline{T}_a(t) + [T_{ext}(t + dt) - \overline{T}_a(t)] \cdot K_e \cdot (1 - e^{-\frac{dt}{\tau_e}}) \\ &+ [T_{rad}(t + dt) - \overline{T}_a(t)] \cdot K_r \cdot (1 - e^{-\frac{dt}{\tau_r}}) \\ &+ P_s(t + dt) \cdot K_{s1} + [P_s(t + dt) - \overline{T}_a(t)] \cdot K_{s2} \cdot (1 - e^{-\frac{dt}{\tau_s}})\end{aligned}$$

En considérant la dynamique du système, nous avons défini la référence comme une réponse du premier ordre avec un temps de réponse en boucle fermée donné. La trajectoire de référence s'écrit :

$$\forall t \in [t_0, t_0 + trbf], \quad \overline{T}_a^{ref}(t) = \overline{T}_a(t_0) + [\overline{T}_a^d(t_0 + trbf) - \overline{T}_a(t_0)] \cdot (1 - e^{-\frac{3}{trbf}(t-t_0)})$$

Et le point de coïncidence s'exprime :

$$P_c = \overline{T}_a^{ref}(t_0 + trbf) = \overline{T}_a(t_0) + 0,95 [\overline{T}_a^d(t_0 + trbf) - \overline{T}_a(t_0)]$$

A chaque calcul de la commande, le calculateur cherche l'incrément de température des radiateurs à appliquer sur tout l'horizon de prédiction pour que la température de l'air rejoigne le point de coïncidence. Cela correspond à déterminer :

$$\begin{aligned}\forall t \in [t_0, t_0 + trbf], \quad \exists \quad \Delta T_{rad} &= T_{rad}(t) - T_{rad}(t_0) \\ \text{tel que} \quad \Delta \overline{T}_a &= \overline{T}_a^{ref}(t_0 + trbf) - \overline{T}_a(t_0)\end{aligned}$$

Pour déterminer l'incrément de commande ΔT_{rad} , nous simulons à chaque pas de commande le comportement du système à l'aide du modèle interne. Du fait de la linéarité du modèle interne, il suffit simplement d'étudier la réponse libre et la réponse forcée du système soumis aux variations connues de la température extérieure et de la puissance solaire :

- La réponse libre correspond à l'évolution de la grandeur réglée lorsque la température des radiateurs reste fixe sur l'horizon de prédiction.

$$\text{Réponse libre : } \Delta T_{rad} = 0^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad \Delta \bar{T}_a^{SL}$$

- La réponse forcée unitaire correspond à l'évolution de la grandeur réglée lorsque la température des radiateurs augmente d'une unité sur l'horizon de prédiction.

$$\text{Réponse forcée unitaire : } \Delta T_{rad} = 1^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad \Delta \bar{T}_a^{SFU}$$

Ces deux sorties permettent d'exprimer directement la commande optimale à appliquer au système pour qu'il rejoigne le point de coïncidence :

$$\Delta T_{rad} = \frac{\Delta \bar{T}_a - \Delta \bar{T}_a^{SL}}{\Delta \bar{T}_a^{SFU} - \Delta \bar{T}_a^{SL}}$$

Pour visualiser le fonctionnement du contrôleur prédictif, nous allons étudier la prédiction du système lors d'un calcul de commande. Pour calculer la commande de température des radiateurs, le modèle de prédiction fournit au calculateur une prédiction des températures extérieures et de la densité de puissance solaire normale aux rayons. Prenons l'exemple du début de journée, juste avant que le soleil ne se lève (voir Figure III.20). La prédiction informe le calculateur que le soleil va se lever dans 35 minutes et que la température va diminuer jusqu'à 4°C avant de remonter au lever du jour.

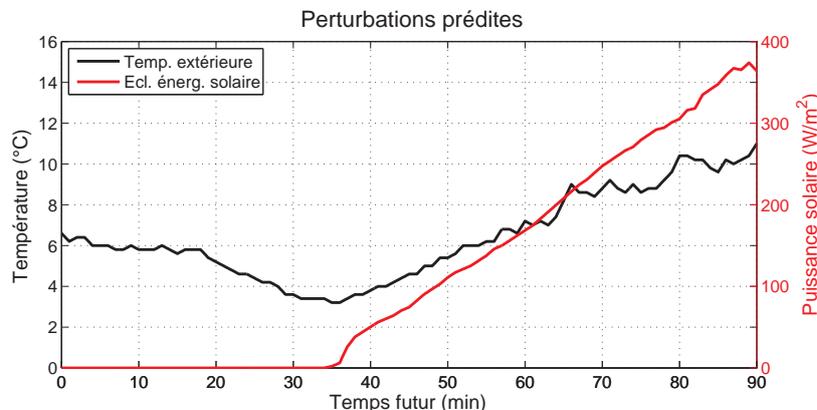


FIGURE III.20 – Prédiction de la température extérieure et de la puissance solaire

A cet instant précis, pour générer un signal de commande, le calculateur va réaliser plusieurs simulations internes (voir Figure III.21). Premièrement, il va exploiter le modèle interne pour simuler la sortie lâchée du processus (courbes en noir) obtenue en laissant la commande à son état actuel. Ensuite il va faire de même pour la sortie unitaire (courbes en magenta) en augmentant d'un degré la commande de température des radiateurs. Enfin, grâce à ces deux simulations, il pourra calculer la commande optimale qui permettra au processus de suivre la sortie optimale afin de rencontrer la trajectoire de référence au point de coïncidence.

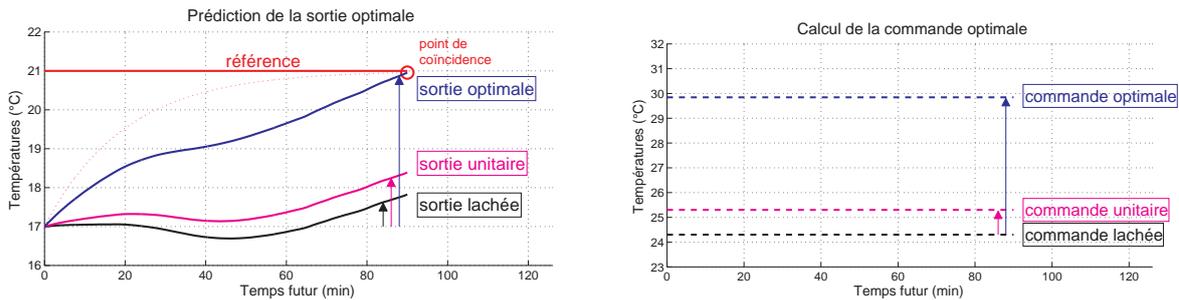


FIGURE III.21 – Exemple de calcul de la commande prédictive du chauffage central

Evidemment, l'horizon de prédiction correspond à une donnée très importante dans la mise en œuvre d'une commande prédictive. Il est souvent difficile de justifier le choix de cet horizon. Dans la commande que nous avons implémentée, l'horizon de prédiction correspond au temps de réponse en boucle fermée souhaité. La mission principale du système est de s'adapter aux perturbations pour réguler la température intérieure. Ces perturbations (température extérieure et puissance solaire) ont des dynamiques très changeantes : certaines sont très lentes (cycle de vie, dynamique jour/nuit) et d'autres sont très rapides (nuages). Par conséquent nous avons choisi de considérer un temps de réponse entre trente minutes et une heure et demi.

En outre, comme nous utilisons des données de perturbation mesurées issues de la station IDMP de Vaulx-en-Velin, nos recherches ne se sont pas orientées vers les différentes méthodes de prédiction du climat puisque de nombreux travaux sont accessibles dans ce domaine, notamment des méthodes très intéressantes sur les décompositions en ondelettes [Bashir et El-Hawary, 2000], sur les réseaux de neurones [Maqsood *et al.*, 2004], sur la logique floue [Riordan et Hansen, 2002] et bien d'autres...

Pour aller plus loin, nous aurions pu intégrer une boucle d'optimisation au cœur de la commande du chauffage central. C'est d'ailleurs par la présence d'une fonction d'optimisation (ou fonction coût, notée J) que la commande prédictive généralisée (GPC) se définit. Dans son expression classique, la mise en équation d'un problème de commande prédictive du chauffage pourrait s'exprimer simplement comme une minimisation de

l'écart de température et de la consommation sur tout l'horizon de prédiction :

$$J = \int_{t_0}^{t_0+h} (|\overline{T}_a^d(t) - \overline{T}_a(t)| + P_{conso}) dt$$

La résolution de ce problème d'optimisation permet alors de calculer un vecteur de commande à appliquer pour que le procédé suive la trajectoire de référence (voir Figure III.22).

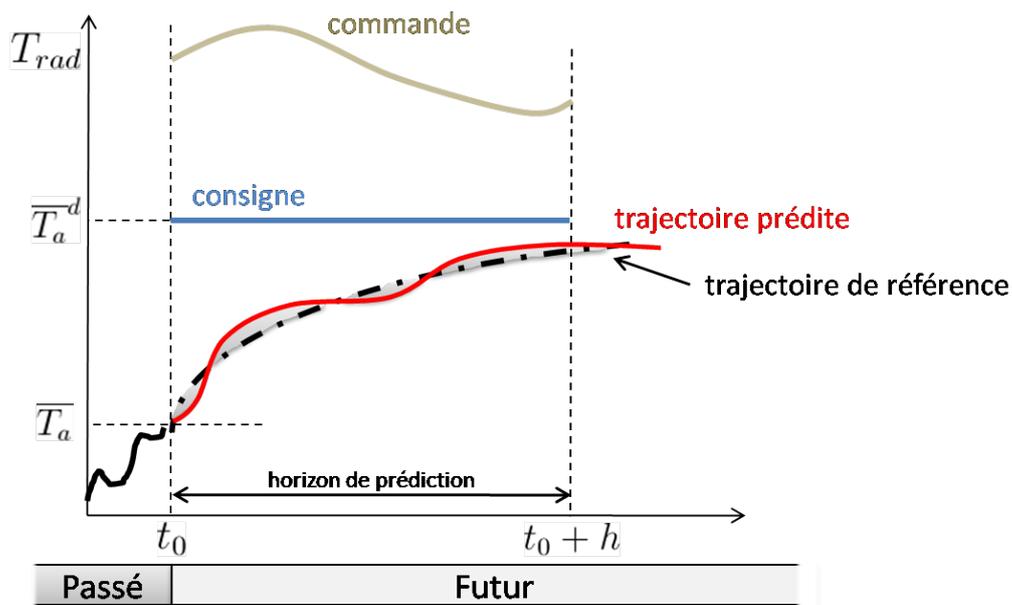


FIGURE III.22 – Modélisation du procédé et trajectoire de référence

Pour conclure, il faut retenir que la commande prédictive offre l'avantage de prendre en compte l'évolution future de la température de l'air dans le bâtiment pour ajuster la puissance thermique que doit fournir le système de chauffage central. Cela ouvre des perspectives en terme d'économie d'énergie car la commande prédictive permet d'anticiper une future insolation de l'enveloppe ou une future variation de la température extérieure. De plus, elle offre aussi un intérêt important en terme de confort en anticipant les besoins des occupants.

Résumé Pour asservir la température d'air dans le bâtiment, nous avons fait le choix d'aborder deux types de commande du chauffage central. La première est une commande classique basée sur un régulateur proportionnel intégral. La deuxième est une commande prédictive qui tient compte de l'évolution future de la température extérieure et de la puissance solaire incidente. La mise en équation de ces commandes a été réalisée à partir de la synthèse d'un modèle de commande. Cette synthèse a permis de mettre en valeur les différentes dynamiques du modèle de bâtiment.

III.4 Contrôle de l'ambiance niveau pièce

A l'échelle de chaque pièce, la mission du contrôle est de faire coopérer tout les actionneurs pour assurer une atmosphère optique et thermique confortable. Comme au niveau bâtiment, le contrôle doit permettre de déterminer la solution optimale en terme de confort et de consommation énergétique. Cependant la notion de confort est nettement plus complexe à appréhender, en particulier dans une pièce où l'occupant est directement en contact avec les actionneurs. Dans notre cas, les actionneurs de la pièce sont un radiateur, deux stores vénitiens et les luminaires. Pour notre étude, nous allons implémenter deux types de contrôle. Le premier est une régulation simple de la température sans prise en compte de la lumière. Ce type de commande correspond à une configuration régulièrement rencontrée dans les bâtiments anciens où chaque radiateur est équipé d'une vanne thermostatique. Ensuite, nous allons détailler un contrôle plus abouti où des critères d'optimisation permettent de réaliser un contrôle coopératif de l'ensemble des actionneurs pour répondre à des objectifs de confort optique et thermique renseignés par les occupants.

III.4.1 La commande proportionnelle par thermostat d'ambiance

Dans ce premier type de commande, nous considérons que l'ambiance optique n'est pas contrôlée. Le contrôle se réduit strictement à la régulation de la température moyenne de l'air dans la pièce. Ce type de loi de commande est très utilisé dans les bâtiments actuels et correspond à une régulation par thermostat d'ambiance.

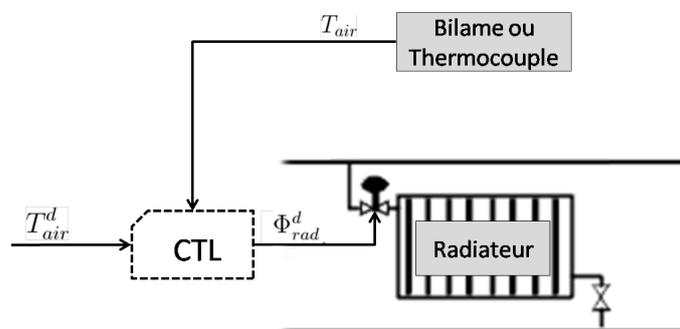


FIGURE III.23 – Schéma bloc de commande du radiateur par thermostat d'ambiance

Un thermostat d'ambiance permet de réguler la température moyenne de l'air d'une

pièce en agissant sur le débit de fluide caloporteur passant dans les radiateurs (voir Figure III.23). L'état thermique régulé est ici associé à la température de l'air, mesuré à l'aide d'un thermocouple ou d'un bilame.

Pour simuler cette régulation, nous avons réalisé une commande proportionnelle. La puissance de consigne équivalente du radiateur se calcule de la manière suivante :

$$\Phi_{rad}^d(t) = K_p \cdot (T_{air}^d(t) - T_{air}(t))$$

L'expression de l'échange thermique entre le radiateur et l'air de la pièce permet alors d'exprimer la température de radiateur désirée ainsi :

$$\begin{aligned} \Phi_{rad}(t) &= K_{rad} \cdot (T_{rad}^d(t) - T_{air}(t)) \\ T_{rad}^d(t) &= \frac{\Phi_{rad}(t)}{K_{rad}} + T_{air}(t) \\ T_{rad}^d(t) &= \frac{K_p}{K_{rad}} T_{air}^d(t) + \left(1 - \frac{K_p}{K_{rad}}\right) T_{air}(t) \\ T_{rad}^d(t) &= T_{air}(t) + \frac{K_p}{K_{rad}} (T_{air}^d(t) - T_{air}(t)) \end{aligned}$$

Bien sûr, il faut aussi tenir compte des contraintes de fonctionnement du radiateur. Comme par exemple sa température qui est nécessairement comprise entre la température de l'air et celle du fluide caloporteur.

III.4.2 La commande globale par optimisation numérique

Dans cette deuxième approche de la commande d'une pièce, nous allons considérer la thermique et l'optique. Le contrôle de la pièce doit permettre de réguler l'ambiance thermique et lumineuse de la pièce pour répondre aux besoins des occupants. Nous avons choisi de définir l'ambiance thermique par la température opérative moyenne et l'ambiance lumineuse par la quantité et la répartition de la lumière. Ces trois grandeurs sont ajustables et les occupants peuvent les modifier selon leurs propres exigences de confort.

Pour structurer le contrôle, il faut dans un premier temps vérifier si ces grandeurs d'ambiance sont mesurables. Il faut ici rappeler que l'ambiance est une notion d'état énergétique de la pièce, contrairement au confort qui est une notion de ressenti chez occupant. L'ambiance est donc la même dans toute la pièce alors que le confort dépend de la position de l'occupant, de sa sensibilité et de nombreux autres facteurs physiologiques.

La mesure d'une grandeur physique est toujours ponctuelle. Elle n'est donc valable qu'en lieu et place du capteur. Cependant la faible variabilité de certaines grandeurs permet d'affirmer sans trop d'erreur qu'une mesure ponctuelle peut représenter l'état moyen de la pièce. En effet, nous pouvons très bien concevoir d'utiliser un thermocouple correctement positionné (afin d'éviter l'influence des masses d'air) pour mesurer la température moyenne de l'air dans la pièce, et ainsi réaliser un contrôle de la température en boucle fermée. Par contre, cela s'avère plus délicat en optique. En effet, la répartition de la lumière est souvent très hétérogène dans une pièce car l'intensité dépend de la distance à la source lumineuse. De plus, les capteurs optiques mesurent les luminances et sont donc très perturbés par les ombrages (occupants, objets...). Ainsi, se baser sur la mesure de l'ambiance lumineuse avec un capteur dans une pièce habitée s'avère très risqué pour l'acceptabilité du système. Pour cette raison, nous avons choisi de contrôler l'ambiance lumineuse en boucle ouverte. Nous réaliserons cependant une mesure de l'éclairage extérieur et nous utiliserons un modèle simplifié pour représenter la quantité et la distribution de la lumière dans la pièce.

Le contrôle de l'ambiance dans la pièce est donc réalisé en boucle fermée pour la thermique et en boucle ouverte pour l'optique (voir Figure III.24). Les grandeurs réglées sont la température opérative moyenne T_o , la quantité de lumière que nous assimilons à un éclairage moyen E_m et la distribution de la lumière que nous assimilons à la position \vec{XE} d'une source équivalente. Ces grandeurs permettent de générer les consignes des trois actionneurs pilotés, c'est-à-dire la puissance fournie par le radiateur Φ_{rad} , la position des deux stores vénitien $(d, \theta)_{sv}$ et le flux lumineux des luminaires ϕ_{lum} .

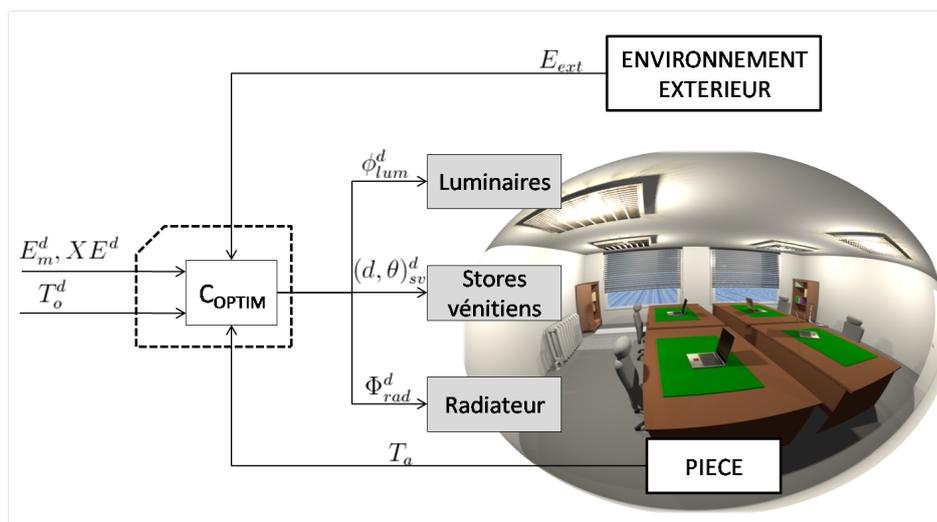


FIGURE III.24 – Schéma bloc de contrôle de l'ambiance dans une pièce

Pour résoudre ce problème d'allocation de commande, nous allons nous appuyer sur l'optimisation. La commande par optimisation numérique vise à déterminer le vecteur

de commande optimale u^* qui minimise une fonction $f(x, u)$ dite fonction objectif ou fonction coût. Cette minimisation est réalisée sur le domaine de définition de la commande représenté par les contraintes $g(x, u)$. Dans notre cas, nous ne retiendrons que des contraintes relatives aux saturations des commandes des actionneurs. Le problème s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \mathbf{P} : \quad & f(x, u^*) = \min_u f(x, u) \\ & g(u) \leq 0 \end{aligned}$$

Il existe différentes approches pour résoudre un problème d'optimisation. Lorsque la fonction objectif $f(x, u)$ est une combinaison linéaire de la variable de décision x , nous parlons de programmation linéaire. Le cas linéaire est simple à étudier et se résout facilement par l'algorithme du Simplex développé par George Dantzig [Dantzig, 1951]. Si la fonction objectif est quadratique nous parlons alors de programmation quadratique.

Dans leur fonctionnement, les méthodes d'optimisation efficaces réalisent une amélioration itérative d'un candidat u pour l'amener à l'optimum. Pour cela, elles cherchent dans le voisinage du candidat courant un nouveau candidat plus proche de l'optimalité. La façon de s'orienter vers l'optimum global dépend beaucoup des méthodes de programmation. La majorité des méthodes utilise la valeur du candidat courant, les dérivées premières et secondes de la fonction objectif ainsi que les valeurs des contraintes. Certaines méthodes stockent l'information des itérations précédentes pour ajuster la trajectoire vers l'optimum, tandis que d'autres se basent uniquement sur le pas courant.

Cependant, beaucoup de ces techniques assurent seulement la convergence vers un optimum local qui dépend très souvent du candidat initialement choisi. Pour accéder à l'optimum global, il est nécessaire de connaître le comportement global de la fonction objectif, soit en évaluant $f(x, u)$ dans un domaine important ce qui devient consommateur de temps de calcul, soit en étudiant les propriétés de la fonction objectif pour assurer qu'un minimum local est aussi un minimum global, c'est le cas lorsque la fonction objectif est convexe.

Les variables de commande Dans le cas de notre pièce, les variables de décision représentent les consignes d'état mécanique des deux stores vénitiens, la consigne du radiateur et la consigne d'état lumineux des luminaires. Le vecteur de commande s'écrit alors :

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} d_{sv1} & \theta_{sv1} & d_{sv2} & \theta_{sv2} & \Phi_{rad} & \phi_{lum} \end{bmatrix}$$

Avec :

- d_{sv1} , la descente normalisée du store vénitien de gauche ;
- θ_{sv1} , l'angle (°) des lamelles du store vénitien de gauche ;
- d_{sv2} , la descente normalisée du store vénitien de droite ;
- θ_{sv2} , l'angle (°) des lamelles du store vénitien de droite ;
- Φ_{rad} , l'apport thermique (W) des radiateurs ;
- ϕ_{lum} , l'apport optique (lm) des luminaires.

L'objectif est de déterminer le vecteur de commande optimal du point de vue du confort et des consommations énergétiques. Pour obtenir cette commande optimale, il faut dans un premier temps définir les contraintes associées à chacune de ces commandes.

Les contraintes Les contraintes correspondent aux limitations physiques des actionneurs. Elles représentent le domaine de définition des grandeurs de commande. Pour les stores vénitiens, la proportion de descente est obligatoirement comprise en 0 (store remonté) et 1 (store descendu). L'angle des lamelles varie entre 0° (store ouvert) et l'angle de butée haute θ_{max} (store fermé). La puissance thermique du radiateur est bornée ainsi que la puissance lumineuse. Notons que ces bornes dépendent d'entrées non pilotées au niveau de la pièce : la température de chaudière et la puissance solaire.

$$\begin{aligned}
 0 &\leq d_{sv1} \leq 1 \\
 0 &\leq \theta_{sv1} \leq \theta_{max} \\
 0 &\leq d_{sv2} \leq 1 \\
 0 &\leq \theta_{sv2} \leq \theta_{max} \\
 0 &\leq \Phi_{rad} \leq \Phi_{max} \\
 0 &\leq \phi_{lum} \leq \phi_{max}
 \end{aligned}$$

Outre ces contraintes issues des propriétés des actionneurs, d'autres contraintes peuvent être ajoutées pour répondre à des objectifs forts que le système doit assurer à tout prix. Il faut cependant s'assurer que les contraintes ne soient pas antagonistes et que l'espace des solutions est non vide. Une contrainte intéressante pour améliorer le confort est le banissement total des rayons solaires directs pénétrant dans la pièce [Arnal *et al.*, 2011a] qui peut se traduire par une réduction du domaine de position des stores vénitiens (voir Figure III.25). Cette contrainte revient à fixer (lorsque le soleil pénètre dans la pièce) une descente complète des stores vénitiens et une limitation sur l'angle minimal des lamelles en correspondance avec l'orientation de l'astre solaire :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{sv_i} = 1 \\ \gamma_s + \arcsin\left(\frac{E}{L \cos(\gamma_s)}\right) \leq \theta_{sv_i} \leq \theta_{max} \end{array} \right.$$

Avec :

- γ_s , l'altitude ($^\circ$) du rayon solaire direct incident sur la fenêtre ;
- E , l'épaisseur (m) des lamelles du store vénitien ;
- L , la largeur (m) des lamelles du store vénitien.

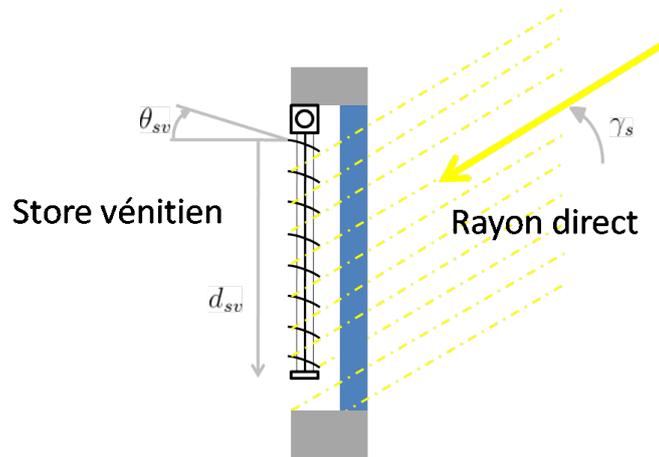


FIGURE III.25 – Occultation complète du rayon solaire par un store vénitien

Naturellement, plus il y a de contraintes, plus l'espace des solutions atteignables est réduit ce qui restreint le domaine de recherche de la solution optimale. Il est donc préférable de ne pas trop accumuler de contraintes pour ne pas trop réduire l'espace de recherche de l'optimum.

La fonction objectif Le contrôle doit répondre à plusieurs objectifs : assurer le confort thermique, assurer le confort visuel et diminuer la consommation d'énergie payante. Il est clair que ces missions peuvent être antagonistes et l'existence d'une solution assurant simultanément l'optimalité thermique, optique et énergétique est très peu probable. La solution optimale devra plutôt correspondre à un meilleur compromis entre confort et consommation.

Pour mettre en équation ce compromis, nous pouvons agréger ces objectifs multiples pour nous ramener à un problème mono-objectif. Nous exprimons donc la fonction objectif sous la forme d'une combinaison linéaire des trois missions de contrôle :

$$f(\vec{u}) = \alpha_{th} f_{th}(\vec{u}) + \alpha_{opt} f_{opt}(\vec{u}) + \alpha_{\acute{e}ner} f_{\acute{e}ner}(\vec{u})$$

Bien sûr, nous garderons à l'esprit que ces trois sous-fonctions objectifs devront être normalisées afin d'être comparables. Nous allons maintenant les détailler.

III.4.2.1 L'objectif de confort thermique

La mission de confort thermique vise à assurer la température opérative moyenne souhaitée par les occupants. La température opérative étant fonction du facteur de forme entre l'occupant et les parois qui l'entourent, nous devons plutôt parler de température opérative moyenne équivalente modélisée au centre de la pièce. Nous nous affranchissons ainsi de la position des occupants. Nous cherchons donc à minimiser la fonction d'objectif thermique qui s'écrit :

$$f_{th} = \left| \frac{T_o(\vec{u}) - T_o^d}{T_o^d} \right|$$

Avec :

- T_o^d , la température opérative moyenne de consigne ;
- T_o , la température opérative moyenne dans la pièce.

La température opérative moyenne est modélisée en fonction de la température de l'air dans la pièce et de la température radiante moyenne c'est-à-dire la température radiative des structures (façades, vitrages et bâtis). Nous utilisons la simplification classique des facteurs de forme pour approximer la température radiante moyenne au centre de la pièce [Roux, 1999] :

$$\begin{aligned} T_o &= \frac{1}{2} (T_m^r + T_a) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{S_f T_f^r + S_v T_v^r + S_b T_b^r}{S_f + S_v + S_b} + T_a \right) \end{aligned}$$

Avec :

- T_m^r , la température (°C) radiante moyenne ;
- T_a , la température (°C) de l'air dans la pièce ;
- T_f^r, T_v^r, T_b^r les températures (°C) radiatives de la façade, des vitrages et du bâti ;
- S_f, S_v, S_b les surfaces (m²) de la façade, des vitrages et du bâti ;

Au sein de cette formulation, nous considérons que les commandes ont un impact à différents niveaux :

- La température de l'air intérieur T_a est impactée par les stores vénitiens qui occultent le rayon solaire et par le radiateur qui fournit une puissance de chauffe ;
- La température radiative des vitrages T_v^r est impactée par les stores vénitiens qui occultent les rayonnements énergétiques émis par les vitrages.

D'une part, la température radiative provenant des vitrages change selon la position des stores vénitiens. Le store a été modélisé comme un diffuseur parfait du flux solaire dans la pièce, de cette manière la température des lamelles correspond à la température de l'air qui l'entoure. Ainsi, la température radiative de l'ensemble vitrage et store vénitien peut varier entre la température de l'air (si le store est fermé) et la température du vitrage (si le store est ouvert). Cette température radiative peut donc être pilotée par les stores vénitiens et s'exprime de la façon suivante :

$$\begin{aligned} T_v^r &= \beta_{sv} T_a + (1 - \beta_{sv}) T_v \\ &= \beta_{sv} (T_a - T_v) + T_v \end{aligned}$$

où le facteur β_{sv} représente un coefficient global d'occultation normal du vitrage par le store, fonction des paramètres mécaniques du store vénitien :

$$\beta_{sv} = d_{sv} \cdot \min \left(\frac{|L \sin(\theta_{sv})| + E \cos(\theta_{sv})}{D}, 1 \right)$$

avec D la distance entre les lamelles.

D'autre part, l'évolution de la température de l'air est régie par un bilan thermique qui dépend de la capacité thermique de l'air dans la pièce et des différents apports ou pertes de chaleurs. Pour notre vision commande, nous limitons la modélisation de ces échanges à l'apport du radiateur, l'apport du flux solaire dissipé par les stores vénitiens et la perte vers l'extérieur. Ce bilan thermique s'exprime ainsi :

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = \Phi_{rad} + \Phi_{stores} + \Phi_{pertes}$$

Avec :

- C_a , la capacité thermique (W/K) de l'air de la pièce ;
- T_a , la température de l'air (°C) de la pièce ;
- Φ_{rad} , la puissance (W) apportée par le radiateur ;
- Φ_{stores} , la puissance (W) solaire dissipée par les stores vénitiens ;
- Φ_{pertes} , la puissance (W) perdue vers l'extérieur.

La puissance fournie par le radiateur est une grandeur de commande, nous n'avons donc pas besoin de la décomposer. Par contre, il est nécessaire de décomposer l'apport solaire absorbé par les stores en fonction de leurs positions :

$$\Phi_{stores} = P_s \cos(\theta_{inc}) S_v \tau_v \cdot \Gamma_{sv}$$

Avec Γ_{sv} un facteur correspondant à un coefficient d'occultation dépendant de la position du store et de l'altitude du soleil :

$$\Gamma_{sv} = d_{sv} \cdot \min \left(\frac{|L \sin(\theta_{sv} + \gamma_s)| + E \cos(\theta_{sv} + \gamma_s)}{D \cos(\gamma_s)}, 1 \right)$$

Pour exprimer les pertes de chaleur de la pièce, nous modéliserons simplement une puissance perdue à travers l'enveloppe et les vitrages. C'est donc l'écart entre la température intérieure et la température extérieure qui gouverne les pertes :

$$\Phi_{pertes} = K_{ae}(T_{ext} - T_a)$$

En régime établi, l'équilibre thermique s'écrit donc :

$$\Phi_{rad} + P_s \cos(\theta_{inc}) S_v \tau_v \cdot \Gamma_{sv} + K_{ae}(T_{ext} - T_a) = 0$$

Ce qui permet d'exprimer la température de l'air dans la pièce de la manière suivante :

$$T_a = \frac{1}{K_{ae}} (\Phi_{rad} + P_s \cos(\theta_{inc}) S_v \tau_v \cdot \Gamma_{sv}) + T_{ext}$$

En regroupant les modèles de commande de la température radiative moyenne et de la température de l'air, la température opérative devient :

$$\begin{aligned} T_o &= \frac{1}{2} \left(\frac{S_f T_f^r + S_v T_v^r + S_b T_b^r}{S_f + S_v + S_b} + T_a \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{S_f T_f^r + S_v (\beta_{sv} (T_a - T_v) + T_v) + S_b T_b^r}{S_f + S_v + S_b} + \frac{1}{K_{ae}} (\Phi_{rad} + P_s \cos(\theta_{inc}) S_v \tau_v \cdot \Gamma_{sv}) + T_{ext} \right) \end{aligned}$$

Bien évidemment, lorsque la puissance solaire reçue par les vitrages est nulle, le formule se réduit à :

$$T_o = \frac{1}{2} \left(\frac{S_f T_f^r + S_v (\beta_{sv} (T_a - T_v) + T_v) + S_b T_b^r}{S_f + S_v + S_b} + \frac{\Phi_{rad}}{K_{ae}} + T_{ext} \right)$$

Nous remarquons ici que les stores vénitiens jouent tout de même un rôle lorsqu'il n'y a pas de soleil car ils protègent les occupants de la température radiative des vitrages.

Visualisation Pour se rendre compte de l'impact de ce modèle d'ambiance sur le contrôle des actionneurs, nous allons représenter l'espace des solutions atteignables dans le cas d'une journée d'hiver. Ce que nous appelons espace des solutions correspond à une représentation graphique du domaine d'ambiances futures réalisables à un instant donné. Pour l'obtenir, nous calculons les températures opératives moyennes qui pourraient être atteintes pour toutes les commandes des actionneurs. L'optimisation de la fonction d'objectif thermique consiste à trouver l'optimum inclus dans ce domaine d'ambiance atteignable.

Dans un premier temps, nous allons considérer qu'il n'y a pas de rayonnement solaire direct passant à travers les vitrages. La simulation se déroule en hiver, la température extérieure est basse (10°C), les vitrages ainsi que la façade sont froids (respectivement 12°C et 15°C). À l'intérieur, la température des parois est fixée à 18°C et celle de l'air à 21°C . La puissance solaire passant à travers les ouvrants est nulle. Sur la représentation des ambiances atteignables (voir Figure III.26), nous observons clairement l'impact fort de la commande du radiateur (axe des x) sur les ambiances thermiques atteignables (axe des y). De plus, la commande des stores a une influence minimale sur la température opérative car celle-ci ne fait qu'occulter la part radiative des vitrages froids. Les stores jouent donc le rôle de barrière thermique et leur impact assez faible dépend de l'écart de température entre l'air et le vitrage (ici le gain est de $0,3^{\circ}\text{C}$ en ressenti).

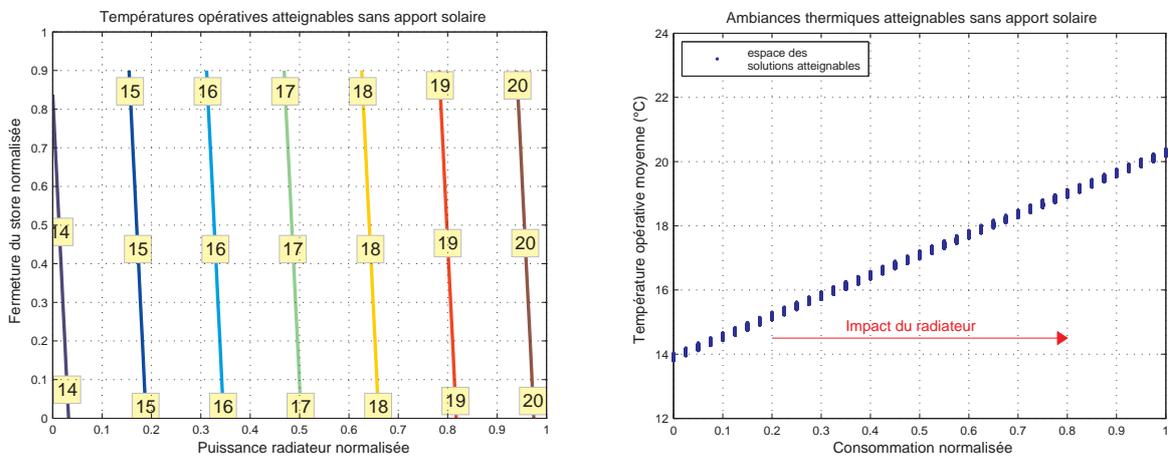


FIGURE III.26 – Espace des ambiances thermiques accessibles dans la pièce non insulée

Supposons maintenant que la pièce est ensoleillée. Le flux solaire reçu par les vitrages est fixé à 100 W/m^2 et le soleil est situé à une altitude de 30° . La représentation de l'espace des solutions atteignables (voir Figure III.27) montrent bien que l'impact du radiateur est similaire au cas précédent. Le gain potentiel se situe ici dans l'utilisation des stores vénitiens. En effet, la commande des stores permet de monter notablement la température opérative en jouant le rôle de dissipateur du flux radiatif solaire. Cette représentation montre qu'une commande adaptée des stores permet d'augmenter la température ressentie de 2°C ce qui correspond à une diminution importante de la consommation énergétique du radiateur. Dans cet exemple, pour un objectif de température opérative de 20°C , la consommation du radiateur peut être diminuée de plus de 30%.

Nous allons maintenant définir la fonction de confort optique. Nous suivrons la même approche que pour la fonction de confort thermique.

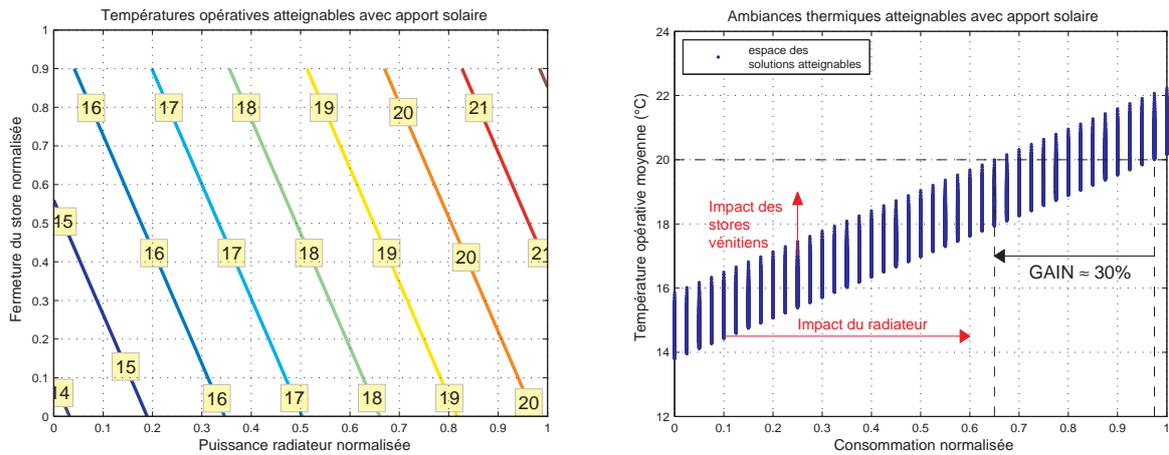


FIGURE III.27 – Espace des ambiances thermiques accessibles dans la pièce insolée

III.4.2.2 L'objectif de confort optique

Le deuxième terme de la fonction coût répond à la mission de confort optique que nous avons définie comme visant à assurer l'éclairage moyen et le barycentre lumineux souhaité par les occupants. Ici l'ambiance est définie par deux critères afin de permettre à l'occupant de moduler la répartition de la lumière dans l'espace de la pièce. L'éclairage moyen, noté E_m , correspond à la quantité de lumière dans la pièce et le barycentre lumineux, noté \overline{XE} , à la position d'une source de lumière équivalente.

$$f_{opt} = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{E_m(\vec{u}) - E_m^d}{E_m^d} \right| + \left\| \frac{\overline{XE}(\vec{u}) - \overline{XE}^d}{l} \right\| \right)$$

Avec :

- E_m , l'éclairage moyen dans la pièce ;
- E_m^d , l'éclairage moyen de consigne ;
- \overline{XE} , le vecteur position du barycentre lumineux dans la pièce ;
- \overline{XE}^d , le vecteur position du barycentre de consigne ;
- l , la plus grande longueur de la pièce.

Dans cette équation normalisée, deux termes sont des fonctions du vecteur de commande \vec{u} . Le premier de ces termes est l'éclairage moyen dont une expression simple peut s'écrire en fonction de la surface totale S de la pièce et des contributions lumineuses ϕ des différentes sources :

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{1}{S} \sum_{sources} \phi \\ &= \frac{1}{S} (\phi_{lum} + \phi_{fenêtres}) \end{aligned}$$

Le flux lumineux généré par les luminaires étant directement une grandeur de commande, nous ne le développerons pas plus. Par contre, les grandeurs de commande des stores vénitiens sont la descente et l'angle des lamelles, nous devons donc développer le terme du flux lumineux passant par les fenêtres afin de l'exprimer en fonction de l'état mécanique des deux stores vénitiens. Comme nous l'avons fait précédemment, nous allons exprimer les apports lumineux des fenêtres en considérant les proportions d'occultation des stores vénitiens. Le flux passant à travers une fenêtre s'exprime en fonction du potentiel extérieur et se décompose en une composante diffuse et une composante directe.

$$\phi_{fen} = S_{fen} (E_{dif} T_{dif} + E_{dir} T_{dir})$$

Avec :

- S_{fen} , la surface (m^2) de la fenêtre ;
- E_{dif} , l'éclairement (lux) diffus reçu sur la façade extérieure du vitrage ;
- E_{dir} , l'éclairement (lux) direct reçu sur la façade extérieure du vitrage ;
- T_{dif} , la transmittance du flux diffus du système fenêtre store vénitien ;
- T_{dir} , la transmittance du flux direct du système fenêtre store vénitien.

Les deux transmittances optiques de l'ouvrant s'expriment ainsi :

$$T_{dif} = 1 - d_{sv} \cdot (1 - \tau_{dif}) \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{L}{D - E} \right) \cos(\theta_{sv}) \right)$$

$$T_{dir} = 1 - d_{sv} \cdot (1 - \tau_{dir}) \cdot \min \left(\frac{|L \sin(\theta_{sv} + \gamma_s)| + E \cos(\theta_{sv} + \gamma_s)}{D \cos(\gamma_s)}, 1 \right)$$

Le deuxième terme de la fonction objectif de confort optique correspond à l'erreur de position du barycentre des sources. Comme son nom l'indique, le barycentre des sources correspond à un centre de masse dont les pondérations sont associées aux flux lumineux. Le barycentre a donc toujours tendance à se déplacer vers la source dont l'intensité lumineuse est la plus élevée. Le barycentre des sources peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{XE} &= \frac{1}{S \times E_m} \sum_{sources} (\overrightarrow{OP} \cdot \phi) \\ &= \frac{1}{S \times E_m} (\overrightarrow{OP}_{lum} \phi_{lum} + \overrightarrow{OP}_{fenêtres} \phi_{fenêtres}) \end{aligned}$$

Le flux passant à travers les fenêtres s'exprime de manière équivalente en tenant compte de l'apport diffus et direct de l'environnement extérieur. En déplaçant la consigne de barycentre, l'occupant donne une information importante sur la zone qu'il veut éclairer en priorité. Nous remarquons aussi que le barycentre s'exprime en fonction de l'éclairement moyen. Les deux grandeurs d'ambiance sont donc couplées.

Visualisation Pour se rendre compte de l'impact de ce modèle d'ambiance optique sur le contrôle des actionneurs, nous allons représenter l'espace des solutions attei-

gnables dans un cas simple, c'est-à-dire sans rayons solaires directs. Du point de vue optique, les fenêtres sont donc considérées comme totalement diffusantes.

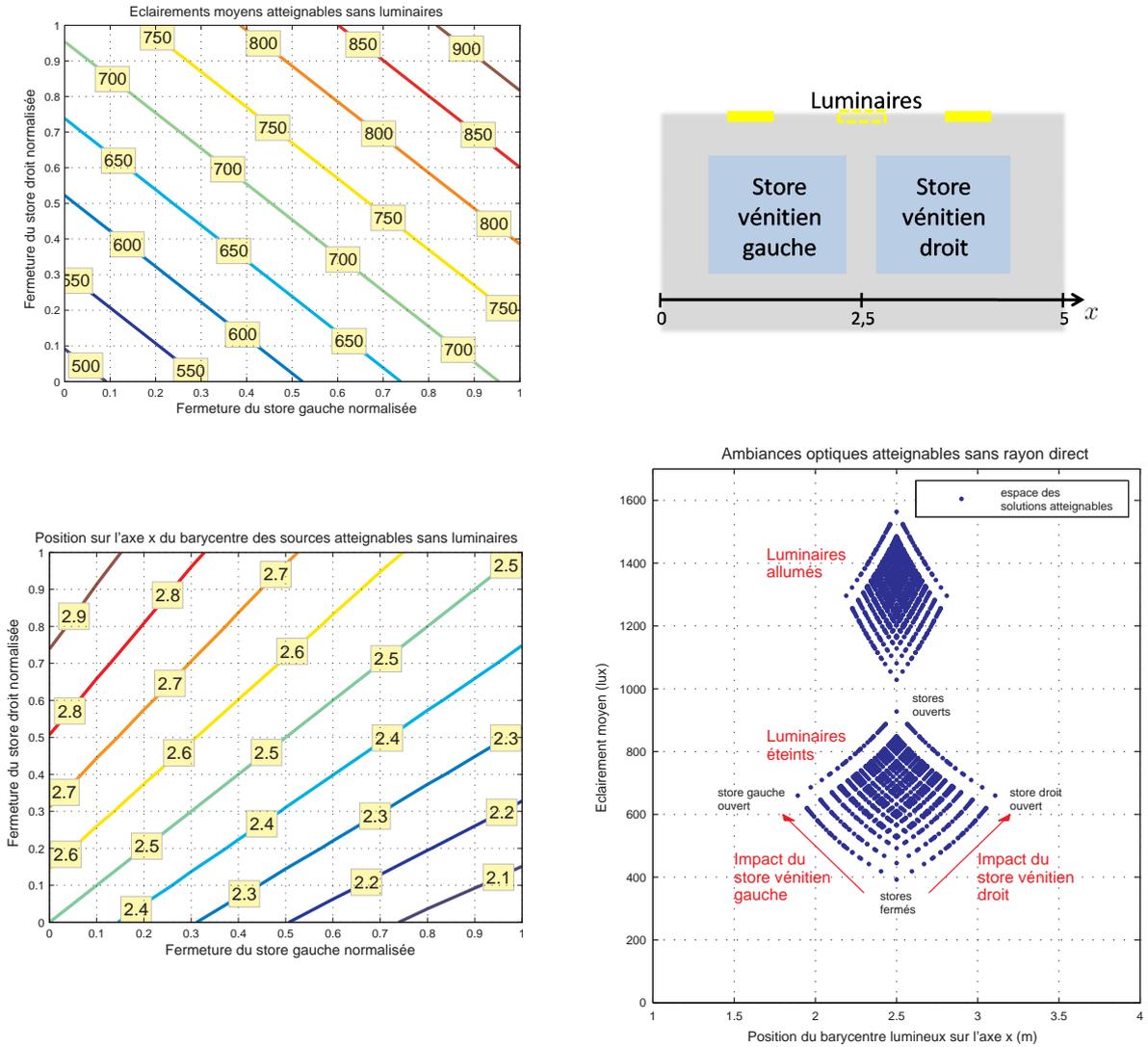


FIGURE III.28 – Représentation de l'espace des ambiances optiques accessibles

Dans la représentation (voir Figure III.28) de l'espace des ambiances optiques réalisables, nous avons fixé l'éclairage diffus extérieur reçu sur la façade à 10^4 lux. Le potentiel lumineux offert par les luminaires est de $7 \cdot 10^4$ lm. La position du barycentre est ici uniquement étudiée dans une dimension, celle de la façade fenêtrée car c'est sur cette axe que le barycentre aura la plus grande amplitude de variation. Les ouvrants sont situés à $x = 1.5$ m et à $x = 3.5$ m et les luminaires sont assimilés à une source centrée en $x = 2.5$ m. Nous observons que contrairement au domaine d'ambiance thermique, le domaine d'ambiance optique est très contraint par la présence du couplage entre éclairage moyen et barycentre.

III.4.2.3 L'objectif de consommation énergétique

Le troisième terme de la fonction coût représente la consommation énergétique. Nous cherchons globalement à la minimiser. Ainsi, nous ne définissons pas de consigne de consommation car nous partons du principe qu'une consommation idéale est une consommation nulle. Du point de vue de la mission de consommation énergétique, nous cherchons à réduire l'énergie totale consommée par les actionneurs de la pièce sur un certain intervalle de temps Δt .

$$f_{\text{ener}} = \left| \frac{E_{\text{conso}}(\vec{u})}{E_{\text{conso}}^{\text{max}}} \right|$$

L'énergie consommée dans la pièce correspond simplement à la somme des consommations des différents actionneurs :

$$\begin{aligned} E_{\text{conso}} &= \sum_{\text{actionneurs}} E_{\text{conso}} \\ &= E_{\text{rad}} + E_{\text{lum}} + E_{\text{sv}} \end{aligned}$$

Nous allons maintenant détailler l'expression de ces trois consommations. Pour la chaudière, la consommation correspond au niveau de diffusion de l'énergie stockée dans le fluide caloporteur. En définissant un coefficient d'efficacité énergétique du radiateur n_{rad} , la puissance consommée P_{rad} s'exprime :

$$E_{\text{rad}} = \frac{1}{n_{\text{rad}}} |\Phi_{\text{rad}}| \Delta t$$

De la même manière, nous pouvons écrire la puissance consommée par les luminaires de la manière suivante :

$$E_{\text{lum}} = \frac{1}{n_{\text{lum}}} \phi_{\text{lum}} \Delta t$$

Par contre, les stores vénitiens sont des systèmes occultants. L'énergie lumineuse et thermique qu'ils apportent dans la pièce dépend donc de l'énergie naturelle gratuite disponible à l'extérieur. L'énergie consommée payante correspond uniquement à la consommation du moteur pour permettre le déplacement du store :

$$E_{\text{sv}} = \frac{1}{n_{\text{sv}}} (k_d \Delta d_{\text{sv}} + k_a \Delta \theta_{\text{sv}}) \Delta t$$

Evidemment, la puissance consommée par les stores vénitiens peut paraître négligeable par rapport aux consommations des autres actionneurs. Cependant, nous avons souhaité garder cette expression dans le calcul de la consommation totale de la pièce car c'est le seul terme qui fait intervenir la variation de position des stores. Or nous avons vu dans notre étude de la mécanique des stores vénitiens que les variations de descente

devaient être réduites au maximum car elles engendraient un inconfort acoustique et optique important dû respectivement à l'activation du moteur et à la fermeture des lamelles.

De plus, il aurait été possible d'inclure soit dans la fonction objectif soit sous forme de contraintes, une fonction permettant d'éviter tout mouvement intempestif et de grande amplitude des stores. Toutefois, nous verrons par la suite que ce problème ne s'est pas posé et nous a ainsi permis de conclure que l'approche développée ici était suffisante.

Résumé Nous avons détaillé dans ce chapitre deux approches du contrôle d'une pièce. La première consiste à réguler la température dans la pièce à l'aide d'un thermostat d'ambiance. Cet asservissement classique permettra de fixer une référence de contrôle. La deuxième approche est issue d'une réflexion plus globale sur les apports énergétiques des différents équipements et vise à déterminer la solution optimale pour répondre à des critères de confort et de consommation. Cette méthode permettra d'étudier le couplage entre confort optique et confort thermique. Elle se base sur la régulation de la température opérative, l'éclairement et la répartition lumineuse. Nous évaluerons, lors des simulations, l'efficacité de ce contrôle optimisé par rapport au contrôle de référence.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini différentes stratégies de contrôle. Ces stratégies diffèrent en terme d'échelle et de critères de représentation du confort. Cependant, elles se rejoignent sur un point primordial, celui de la réduction des consommations énergétiques. En résumé, nous avons implémenté deux types de régulation des équipements partagés du bâtiment :

- Un contrôle proportionnel-intégral du chauffage central basé sur une mesure de la température moyenne de l'air dans le bâtiment ;
- Un contrôle prédictif du chauffage central basé sur une mesure de la température moyenne de l'air dans le bâtiment et sur une prise en compte de l'évolution future de la température extérieure et de l'apport radiatif solaire.

De même, nous avons proposé deux types de régulation des équipements partagés des pièces :

- Un contrôle proportionnel du radiateur basé sur une mesure de la température moyenne de l'air dans la pièce ;
- Un contrôle par optimisation numérique de la puissance dissipée par le radiateur et les luminaires et de l'état mécanique des stores vénitiens basé sur des critères de confort tels que la température opérative, l'éclairage moyen et la répartition lumineuse. Nous avons pris soin dans ce contrôle de coupler les apports optiques et thermiques des stores vénitiens.

Pour les deux échelles de commande, nous avons implémenté un contrôle de référence en utilisant de simples régulateurs PI et P ; et un contrôle plus optimal visant à évaluer et à privilégier les apports énergétiques gratuits.

Dans le prochain chapitre, nous allons confronter ces stratégies afin d'évaluer les gains énergétiques potentiels et leurs impacts sur le confort des occupants. Pour cela, nous ferons interagir modèles de contrôles présentés dans ce chapitre et modèles de simulations présentés dans le chapitre précédent. Nous étudierons les différents contrôles implémentés en exploitant les données annuelles de la station IDMP de Vaulx-en-Velin.

Chapitre IV

Les résultats de simulation

Introduction

Pour évaluer l'apport de cette structure de contrôle du bâtiment, nous l'avons implémentée et intégrée au modèle de simulation du bâtiment présenté dans le deuxième chapitre de ce mémoire. Nous présentons dans ce dernier chapitre les résultats de simulation obtenus. Pour réaliser ces simulations, nous avons utilisé comme précédemment les données d'environnement extérieur issues des mesures de l'année 2009 de la station IDMP de Vaulx-en-velin.

Plusieurs scénarios de validation seront appliqués afin de tester le contrôle lors de diverses phases de vie du bâtiment. Nous observerons le fonctionnement du contrôle sur l'année entière et sur quatre journées critiques (en hiver et en été, sous atmosphère nuageuse et ensoleillée). Au niveau bâtiment, nous comparerons les gains énergétiques offerts par le passage d'une commande PID à une commande prédictive du chauffage central. Au niveau pièce, nous démontrerons l'impact du contrôleur thermique et optique sur le confort et sur les consommations énergétiques. Pour cela, nous définirons plusieurs critères de performance judicieusement choisis.

L'implémentation du simulateur de contrôle du bâtiment a été réalisée sous MATLAB Simulink. L'interface de ce simulateur (voir Figure IV.1) a été pensée en dissociant les modèles de simulation (en gris) des modèles de commande (en bleu). Les différentes boucles de contrôle (bâtiment et pièces) ont aussi été séparées. Pour interagir avec le modèle, l'utilisateur dispose d'une interface de visualisation qui lui permet d'afficher une grande partie des courbes présentes dans ce mémoire.

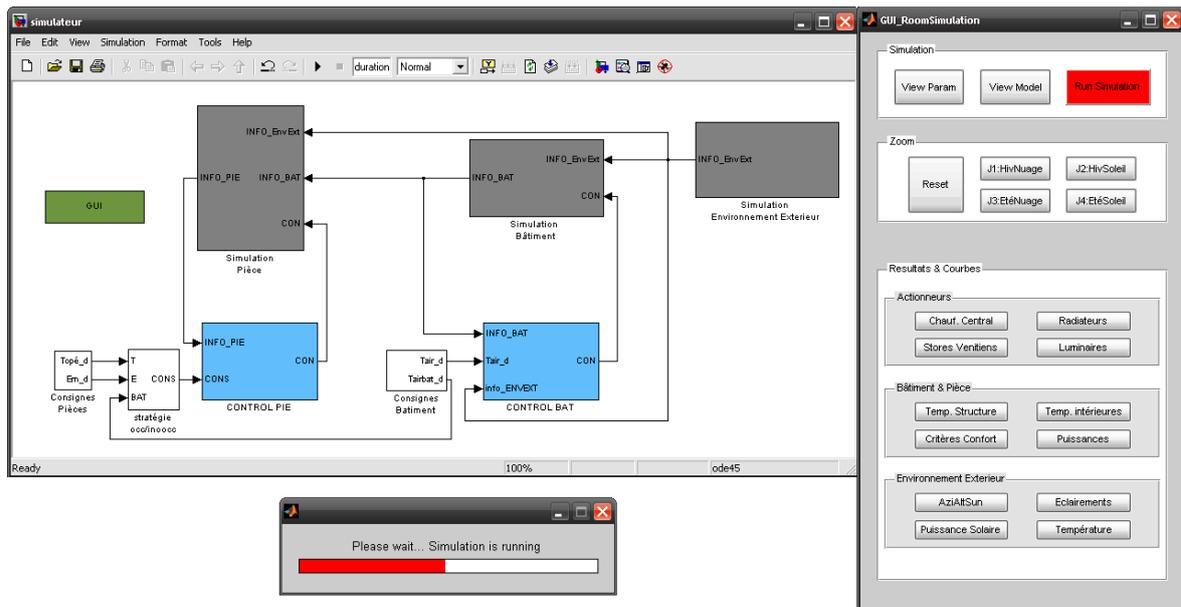


FIGURE IV.1 – Interface du logiciel de simulation intégré à Matlab et Simulink

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du contrôle au niveau du bâtiment, c'est-à-dire la boucle de contrôle du chauffage central. Dans la deuxième partie, nous nous intéresserons au contrôle du confort dans la pièce.

IV.1 Simulation du contrôle des besoins thermiques

Dans ce chapitre, nous allons expérimenter le contrôle du chauffage central et des radiateurs. Dans un premier temps, nous nous intéresserons au bâtiment dans sa globalité et nous confronterons la commande de référence (PI) et la commande prédictive du chauffage central. Nous cherchons à mettre en valeur les gains énergétiques potentiels et la qualité de la régulation de la température de l'air dans le bâtiment. De plus, nous étudierons l'impact de ces deux commandes sur le confort thermique dans les pièces et nous justifierons l'intérêt de la régulation des radiateurs par thermostat d'ambiance.

IV.1.1 Les scénarios et les critères d'évaluation

Les simulations que nous présentons dans ce chapitre sont des simulations annuelles. Le bâtiment simulé correspond au bâtiment décrit dans les chapitres précédents (voir Partie I.3.3). Les données météorologiques utilisées sont tirées des mesures de la station IDMP de Vaulx-en-Velin (voir Partie II.4.1). Pour visualiser plus clairement l'évolution des grandeurs physiques, nous avons isolé quatre journées de référence (hiver et été, nuageux et ensoleillé). Les données présentées sur ces quatre journées sont des zooms tirés de simulations annuelles. Pour information, nous avons simulé le comportement thermique du bâtiment sur les trois mois précédant le début de l'année afin d'obtenir des conditions initiales proches du régime établi. Nous avons ainsi réduit au maximum la durée du régime transitoire lié à l'initialisation du modèle pour l'année étudiée.

Pour étudier le contrôle thermique du bâtiment, nous allons procéder en trois étapes :

1. Confrontation du contrôle Proportionnel Intégral et du contrôle prédictif du chauffage central (chaudière et distribution) pour la régulation de la température moyenne dans l'air du bâtiment (voir Partie III.3). L'objectif est d'observer les gains énergétiques offerts par le contrôle prédictif à l'échelle du bâtiment.
2. Observation de l'impact de ces deux contrôles sur le confort dans des pièces Nord et Sud sans régulation thermique dans les pièces. Les critères de confort étudiés seront la température de l'air et la température opérative. L'objectif est d'observer la disparité des températures selon l'orientation des pièces.
3. Intégration du contrôle Proportionnel des radiateurs par thermostat d'ambiance dans les pièces Nord et Sud (voir Partie III.4.1). Les mêmes critères de confort thermique seront étudiés. L'objectif est de montrer l'efficacité du contrôle thermique local sur le confort thermique.

Dans l'ensemble de ces simulations, nous considérons les consignes suivantes :

- Au niveau du bâtiment, la consigne de température moyenne de l'air pour la régulation du chauffage central est de 19°C entre 8h et 20h. La nuit, une tolérance est autorisée de $\pm 4^{\circ}\text{C}$, cela correspond à un maintien de la température intérieure entre 15°C et 23°C .
- Au niveau des pièces, la consigne de température de l'air pour la régulation du radiateur est de 21°C entre 8h et 20h. Le reste du temps il n'y a pas de consignes ce qui correspond au maintien des vannes des radiateurs ouvertes.

Les données simulées sont des données de température d'air et de température opérative. Les résultats que nous présentons sont les écarts entre ces données simulées et leurs consignes. Pour ces grandeurs d'erreur, nous présenterons trois critères mathématiques :

- la moyenne de l'erreur ;
- l'écart-type de l'erreur ;
- la proportion du temps passé dans plusieurs bandes d'erreur (plus de -3°C , de -3°C à -2°C , de -2°C à -1°C ... jusqu'à plus de $+3^{\circ}\text{C}$).

Naturellement, le calcul de ces erreurs sera réalisé uniquement lorsqu'une consigne est effective, c'est-à-dire entre 8h et 20h chaque jour. De plus, nous présenterons les données de consommation totale du chauffage central dans les différentes configurations de contrôle.

Rappelons enfin que le système de chauffage que nous considérons ici est un système permettant de faire circuler un fluide chaud ou froid. Cette hypothèse est importante afin d'évaluer les consommations énergétiques au cours des journées de forte chaleur.

IV.1.2 La simulation du contrôle du chauffage central

La première étape de nos expérimentations se consacre uniquement au bâtiment dans sa globalité. La simulation annuelle du contrôle du chauffage central (comprenant la commande de la chaudière et la commande de la vanne trois voies) permet de représenter graphiquement le suivi de température moyenne de l'air du bâtiment. Pour faciliter la lecture, nous ne représentons ce suivi que sur les quatre journées de référence (voir Table IV.1). Les données visualisées sont la température moyenne des radiateurs (grandeurs de commande) et la température moyenne de l'air du bâtiment (grandeur de consigne et grandeur contrôlée). La nuit, lorsque la consigne n'est pas représentée, cela signifie que la température moyenne du bâtiment est située dans le domaine de

tolérance. Dans ce cas, le circuit de distribution d'eau est en circuit fermé.

Nous souhaitons que le système réponde avec un temps de réponse en boucle fermé de deux heures. L'horizon de prédiction sera donc aussi de deux heures. Par conséquent, à tout instant de commande, le contrôleur prédictif connaîtra l'évolution de la consigne et des perturbations sur les deux prochaines heures.

Ces résultats de simulation montrent des différences nettes entre les deux types de commande :

- Sur les deux journées d'hiver, en utilisant la commande prédictive, la température de consigne est atteinte dès 8h alors que la commande de référence nécessite plus d'une heure de chauffe pour atteindre la consigne (vers 9h10). L'anticipation de la consigne offre donc un intérêt indéniable en terme de suivi et par conséquent de confort. Notamment après de longues phases d'inactivités (week-ends, vacances...).
- Sur ces mêmes phases de début de journée, la grandeur de commande (température des radiateurs) est nettement plus amortie et il n'y a pas de dépassement de consigne comme dans le cas de la commande PI. La commande des radiateurs est beaucoup plus lisse avec le contrôleur prédictif ce qui offre un avantage certain pour l'usure des actionneurs. Ainsi, lors de la journée d'hiver ensoleillée (cas 2), la commande fluctue entre 27°C (vers 14h30) et 36°C (vers 9h00) avec la commande de référence. Avec la commande prédictive, les variations de commande sont fortement réduites et fluctuent entre 28,5°C (vers 15h30) et 31°C (vers 7h30).
- Par ailleurs, nous remarquons que le contrôle est beaucoup moins efficace en été qu'en hiver. Cela provient du principe physique du chauffage central dont la puissance thermique est calibrée pour répondre aux besoins de chauffe et non au besoin de refroidissement. Or nous savons bien que la climatisation nécessite un transfert thermique plus élevée que le chauffage ; c'est pour cette raison que les climatiseurs exploitent des systèmes à ventilation forcée pour augmenter le coefficient de convection de l'échangeur.

Intéressons-nous maintenant au bilan annuel de ces deux contrôles (voir Table IV.2). Nous allons pour cela exprimer les gains du contrôle prédictif par rapport au contrôle PI.

- **Gain énergétique : 22,8% ;**
- **Gain sur le suivi global :**
 - 39,8% sur l'erreur moyenne ;
 - 57,4% sur l'écart-type.

Pour se ramener à des objectifs concrets de consommation énergétique, nous allons

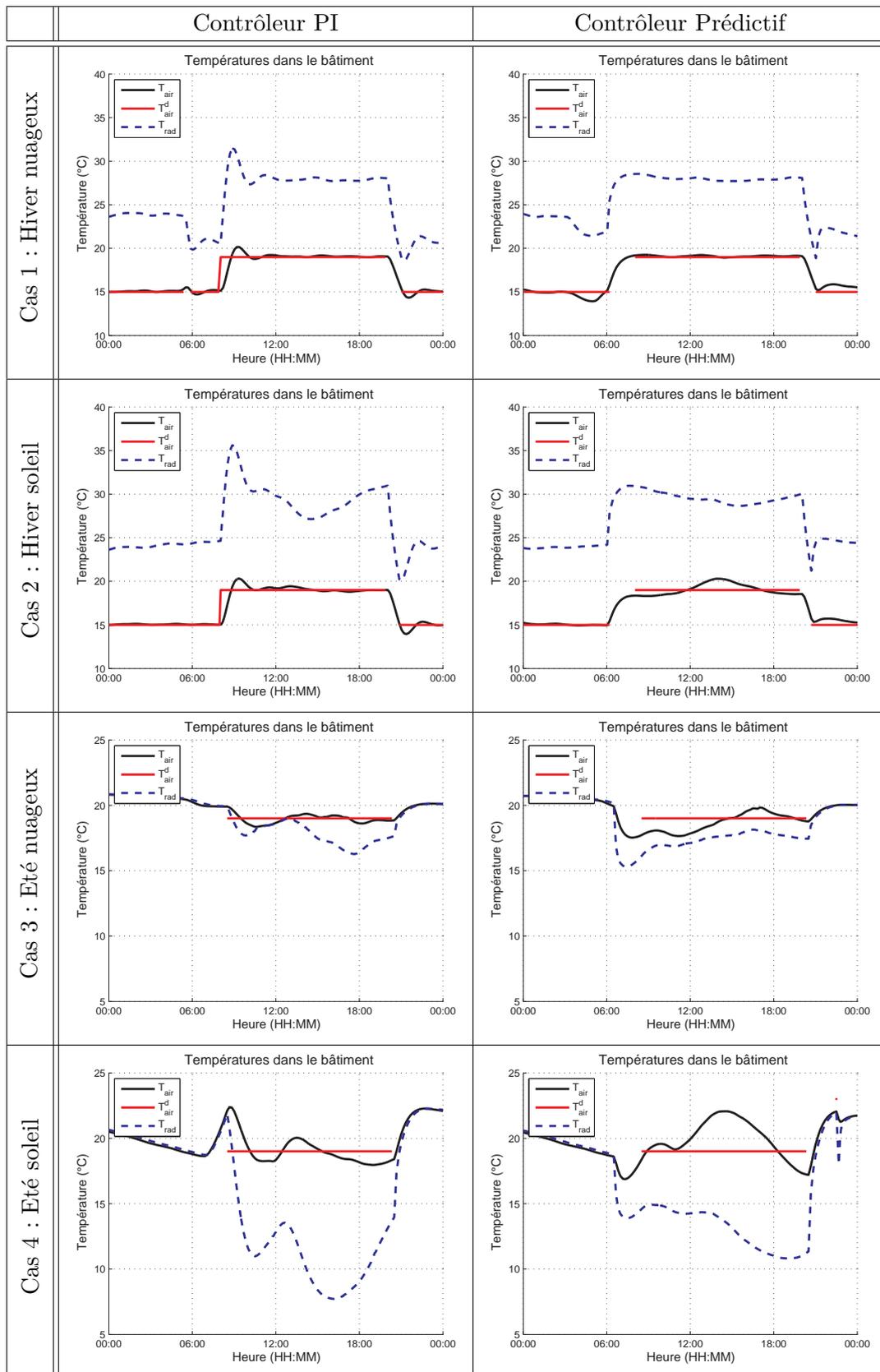


TABLE IV.1 – Contrôle de la température du bâtiment sur les 4 journées de référence

	Consommation (MWh/an)	Erreur de température (°C)	
		Moyenne	Ecart-type
PI	664,16	1,08	1,92
Prédictif	512,79	0,65	0,93

	Histogramme des écarts de température (°C)							
	$[-\infty; -3]$	$[-3; -2]$	$[-2; -1]$	$[-1; 0]$	$[0; +1]$	$[+1; +2]$	$[+2; +3]$	$[+3; +\infty]$
PI	6,8%	3,2%	6,2%	36,9%	34,4%	5,6%	2,5%	4,4%
Prédictif	0,7%	5,3%	9,9%	34,5%	43,6%	5,7%	0,3%	0%

TABLE IV.2 – Comparaison entre contrôle PI et contrôle prédictif du chauffage central

comparer avec les références actuelles. Pour la rénovation, il existe deux labels : HPE (Hautes Performances Energétiques) rénovation 2009 pour une consommation maximale de 150 kWh/m²/an et BBC (Bâtiment Basse Consommation) rénovation 2009 pour une consommation maximale de 80 kWh/m²/an.

Avec le contrôle PI, les consommations totales annuelles s'élèvent à 664,16 MWh soit 221,38 kWh/m²/an. Avec le contrôle prédictif, les consommations totales annuelles s'élèvent à 512,79 MWh soit 170,93 kWh/m²/an. **L'implantation d'une commande prédictive a donc permis de réaliser plus de 70% du chemin nécessaire à l'obtention d'un label HPE rénovation 2009 sans efforts particuliers sur l'isolation du bâtiment.**

Nous garderons comme référence cette commande prédictive pour les prochaines simulations.

IV.1.3 La simulation du contrôle des radiateurs

Nous allons maintenant observer l'impact de la commande des radiateurs sur le confort thermique au niveau des pièces. Le critère de confort thermique que nous avons retenu est la température opérative moyenne. Nous simulerons le comportement de deux pièces d'intérêt, l'une orientée au Sud et l'autre au Nord. Nous considérerons dans un premier temps qu'il n'y a aucun asservissement des radiateurs dans les pièces. Les vannes des radiateurs sont donc continuellement ouvertes. Ensuite, nous nous intéresserons au contrôle par thermostat d'ambiance et nous présenterons les gains qu'il procure en terme de confort. Nous considérons ici que le chauffage central est piloté par le contrôleur prédictif décrit auparavant.

Comme précédemment, nous présentons dans les tableaux suivants des résultats sur les quatre journées de référence ; ces résultats étant issus d'une simulation annuelle. Le tableau suivant (voir Table IV.3) représente l'évolution de la température de l'air et de la température opérative dans les deux pièces étudiées et sur les quatre journées de référence. Sur ces courbes, il n'y a pas de signaux de consigne car nous considérons ici que les vannes des radiateurs restent constamment ouvertes. Plusieurs remarques :

- Pendant les journées nuageuses (cas 1 et 3), les comportements des deux pièces sont identiques. La température de l'air ainsi que la température opérative sont sensiblement les mêmes quelque soit l'orientation de la pièce. De plus, nous observons que l'évolution de ces températures est directement reliée à l'évolution de la température moyenne dans le bâtiment.
- A contrario, pendant les journées ensoleillées (cas 2 et 4), l'apport énergétique solaire perçu par la pièce Sud engendre une élévation rapide de température par rapport à la pièce Nord. En hiver, l'écart est au maximum de 3°C en température d'air et de 1,5°C en température opérative. En été, cet écart est plus élevé, jusqu'à 5,3°C en température d'air et 2,8°C en température opérative.

Introduisons maintenant la régulation de la température de l'air à l'aide d'un thermostat d'ambiance. Cette boucle de régulation mise en place localement dans chaque pièce permet d'asservir le débit d'eau passant dans le radiateur et ainsi la puissance thermique apportée par le radiateur à l'air de la pièce. Comme le tableau précédent, le tableau suivant (voir Table IV.4) montre l'évolution de la température de l'air et de la température opérative dans les deux pièces étudiées et sur les quatre journées de référence. Ces courbes sont à comparer avec les températures dans les pièces passives présentées ci-dessus. Nous avons ajouté sur les courbes suivantes le signal de consigne fixe à 21°C entre 8h et 20h.

- En hiver, lors de la journée nuageuse (cas 1), nous remarquons que l'asservissement de la température d'air est très bien réalisé quelque soit l'orientation de la pièce. Comme nous l'avons vu précédemment, les deux pièces ont un comportement équivalent quelque soit leur orientation à cause de l'absence de flux solaire radiatif.
- En hiver, lors de la journée ensoleillée (cas 2), nous observons que la régulation a permis de contrer l'élévation de température due à l'ensoleillement dans la pièce Sud. Son action est visible à partir de 10h. Ainsi le contrôle des radiateurs en utilisant un thermostat d'ambiance est un bon moyen pour réduire les variations locales (c'est-à-dire à entre les pièces) de la température.
- En été, lors de la journée nuageuse (cas 3), le constat est le même qu'en hiver : Les deux pièces se comportent de la même manière. Cependant, nous observons

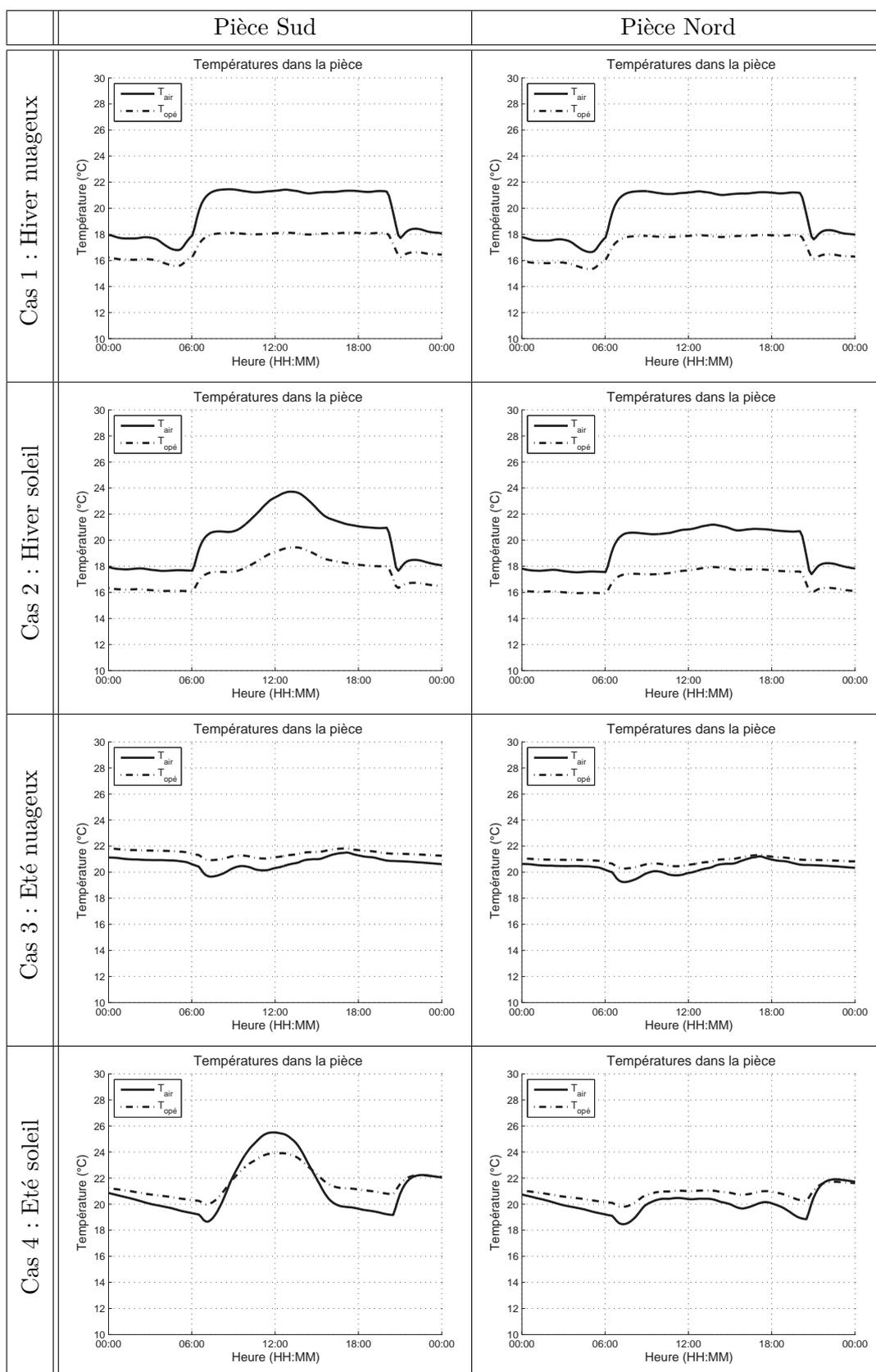


TABLE IV.3 – Température des pièces passives sur les 4 journées de référence

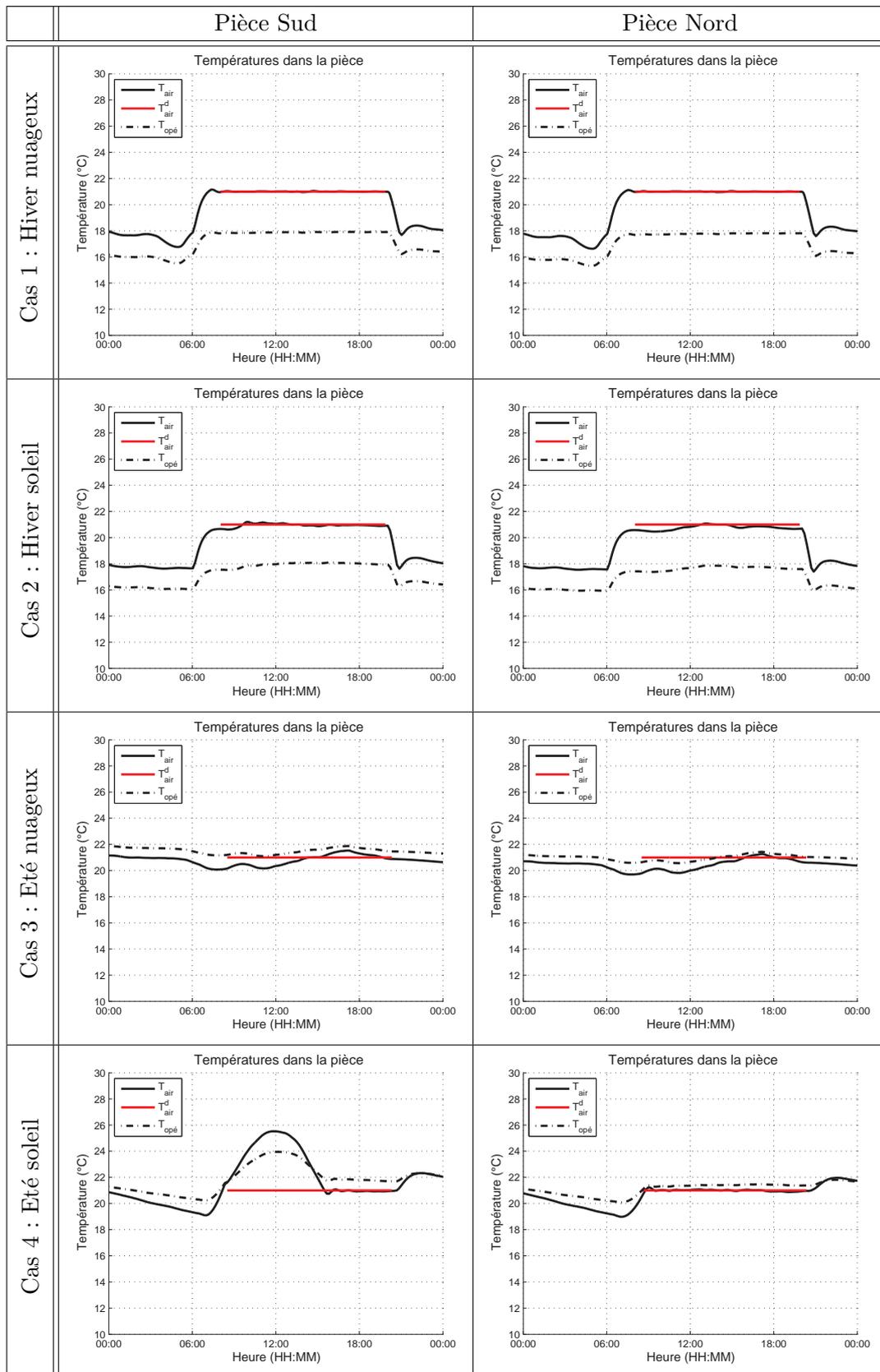


TABLE IV.4 – Contrôle par thermostat d'ambiance de la température des pièces sur les 4 journées de référence

que la régulation est beaucoup moins précise. Cela provient du fait que la température extérieure est très proche de la consigne. Ainsi le potentiel de chauffe (ou de refroidissement) véhiculé par le fluide caloporteur est très faible. La puissance des radiateurs est donc presque nulle et nous observons un comportement très proche du comportement passif de la pièce.

→ En été, lors de la journée ensoleillée (cas 4), la régulation locale ne suffit pas à éviter l'échauffement de l'air dans la pièce Sud. Par contre, la régulation est correctement réalisée dans la pièce Nord.

Erreur de température (°C) sans régulation		
	Moyenne	Ecart-type
Sud T_{air}	0,87	1,02
Nord T_{air}	0,57	0,91
Sud $T_{opé}$	1,60	1,58
Nord $T_{opé}$	1,54	1,35

Histogramme des écarts de température (°C) sans régulation								
	$[-\infty; -3]$	$[-3; -2]$	$[-2; -1]$	$[-1; 0]$	$[0; +1]$	$[+1; +2]$	$[+2; +3]$	$[+3; +\infty]$
Sud T_{air}	0%	0,3%	4,9%	44,3%	35,3%	11,6%	2,8%	0,8%
Nord T_{air}	0%	0,3%	4,2%	42,6%	37,3%	9,8%	5,0%	0,8%
Sud $T_{opé}$	6,1%	16,8%	21,4%	21,1%	18,7%	12,9%	2,5%	0,5%
Nord $T_{opé}$	17,5%	25,6%	20,3%	17,2%	18,9%	0,5%	0%	0%

Erreur de température (°C) avec régulation		
	Moyenne	Ecart-type
Sud T_{air}	0,63	0,91
Nord T_{air}	0,45	0,73
Sud $T_{opé}$	1,44	1,46
Nord $T_{opé}$	1,71	1,09

Histogramme des écarts de température (°C) avec régulation								
	$[-\infty; -3]$	$[-3; -2]$	$[-2; -1]$	$[-1; 0]$	$[0; +1]$	$[+1; +2]$	$[+2; +3]$	$[+3; +\infty]$
Sud T_{air}	0%	0,1%	2,3%	45,3%	40,3%	9,6%	1,8%	0,6%
Nord T_{air}	0%	0,2%	2,9%	48,8%	44,2%	3,7%	0,2%	0%
Sud $T_{opé}$	6,2%	21,5%	23,7%	21,4%	17,9%	6,2%	2,6%	0,5%
Nord $T_{opé}$	15,1%	27,7%	26,3%	26,2%	4,7%	0%	0%	0%

TABLE IV.5 – Comparaison entre avec et sans régulateur d'ambiance dans les pièces Sud et Nord

Pour conclure sur l'intérêt de la régulation locale par thermostat d'ambiance, nous présentons les données annuelles de confort thermique (voir Table IV.5). Nous observons sur ces tableaux que la régulation locale offre un avantage important pour le confort thermique des occupants. Même dans le cadre d'un contrôle simple comme le contrôle par thermostat d'ambiance.

Mettons en valeurs les gains offerts par la régulation locale des radiateurs :

→ **Gain sur le suivi** (température de l'air) :

- **21,1% au Nord et 27,6% au Sud sur l'erreur moyenne ;**
- **19,8% au Nord et 10,8% au Sud sur l'écart-type.**

Le contrôle de la température de l'air a un impact important sur le confort des occupants. Généralement, les occupants agissent sur la consigne de température du thermostat d'ambiance en fonction de leur ressenti. Ils modulent par conséquent la consigne de manière relative (en l'augmentant de plus ou moins quelques degrés) et s'intéressent peu à la valeur absolue de la consigne ; l'important étant de combler leur sensation d'inconfort.

Pour cette raison, nous avons calculé l'erreur sur la température opérative afin de quantifier l'erreur de confort thermique. Cependant, il faut rappeler que cette grandeur n'est pas directement pilotée car c'est la température de l'air qui est régulée. Ce calcul a permis d'observer que le contrôle de la température de l'air dans la pièce n'améliore pas nécessairement la sensation de confort. En effet, il faut pour cela que l'utilisateur adapte la consigne de température en fonction de la saison et de l'orientation des pièce.

Ainsi la régulation par thermostat d'ambiance ne permet pas de réguler correctement le confort et se doit de laisser l'occupant contrer les apports radiatifs en agissant sur la consigne. Cette conclusion conforte notre objectif de contrôler directement la température opérative dans les pièces afin d'adapter la commande aux composantes radiatives des vitrages, des façades et évidemment aux flux radiatifs provenant du soleil.

Résumé Les résultats de simulation du contrôle des besoins thermiques du bâtiment ont permis de mettre en évidence l'intérêt de la commande prédictive du chauffage central sur les consommations énergétiques de la chaudière. Elle offre un gain énergétique important ($\approx 20\%$ pour le bâtiment étudié). Dans le cadre de la rénovation de bâtiments anciens, ce gain considérable permettrait de répondre aux exigences européennes définies dans le plan d'action Energie-Climat. De plus, nous avons montré l'intérêt de la régulation locale des radiateurs via l'utilisation de thermostats d'ambiance sur le confort thermique. En effet, ces contrôles locaux au niveau des pièces permettent de réduire les variations thermiques spatiales à l'intérieur du bâtiment mais ne suffisent pas pour réguler le confort thermique.

IV.2 Simulation du contrôle du confort dans les pièces

Le chapitre précédent nous a permis de montrer l'intérêt de la commande prédictive pour la régulation du chauffage central d'un bâtiment et l'impact de la régulation des radiateurs par thermostat d'ambiance dans les pièces. Nous allons maintenant continuer à nous intéresser aux pièces en étudiant un contrôle couplé incluant la thermique, l'optique et les consommations énergétiques visant à faire coopérer les différents actionneurs présents dans la pièce.

IV.2.1 Le scénario et les critères d'évaluation

La pièce que nous étudions est la même que précédemment (voir Partie I.3.3). Elle comporte deux stores vénitiens présents sur une même façade, un radiateur et des luminaires. Nous nous limiterons à une pièce orientée vers le Sud car c'est la configuration la plus exposée aux apports énergétiques solaires qui représentent des perturbations pour notre système. Pour étudier le contrôle coopératif du confort dans la pièce (voir Partie III.4.2), nous allons décomposer le contrôle en trois étapes :

1. Premièrement, nous étudierons le contrôle du confort thermique que nous avons associé à la température opérative dans la pièce. L'objectif est d'observer la façon dont les actionneurs passifs (les stores vénitiens) peuvent être utilisés pour contribuer au confort thermique.
2. Deuxièmement, nous observerons le contrôle du confort optique que nous avons associé à la quantité et la répartition de la lumière dans la pièce. L'objectif est d'observer comment les stores vénitiens et les luminaires peuvent être utilisés conjointement pour asservir l'ambiance lumineuse.
3. Troisièmement, nous rassemblerons les deux contrôles précédents et nous nous intéresserons au contrôle couplé du confort thermique et optique dans la pièce. L'objectif est de montrer la prise en compte des deux missions de confort.

Pour chacune de ces étapes, nous observerons le comportement de la pièce pour les quatre journées de référence définies précédemment (voir Partie II.4.1). Nous comparerons ces résultats de simulation avec les résultats du chapitre précédent.

Dans l'ensemble de ces simulations, nous considérons les consignes suivantes liées à l'occupation :

- D'un point de vue thermique, la consigne de température opérative est de 21°C entre 8h et 20h. La nuit, il n'y a pas de consignes et nous considérons que la vanne du radiateur reste ouverte pendant cette période.

- D'un point de vue optique, la consigne d'éclairement moyen est fixé à 600 lux entre 8h et 20h. Le barycentre lumineux est positionné au centre de la pièce. La nuit, il n'y a pas de consignes optiques ce qui signifie que les stores sont remontés et les luminaires éteints.

Les données simulées sont des données de température opérative et d'éclairement moyen. Les résultats que nous présentons sont les écarts entre ces données simulées et leurs consignes. Pour ces grandeurs d'erreur, nous présenterons trois critères d'analyse :

- la moyenne de l'erreur ;
- l'écart-type de l'erreur ;
- la proportion du temps passé dans plusieurs bandes d'erreur (plus de -3°C , de -3°C à -2°C , de -2°C à -1°C ... jusqu'à plus de $+3^{\circ}\text{C}$, et plus de -200 lux, entre -200 lux et -100 lux... jusqu'à plus de 200 lux).

Naturellement, le calcul de ces erreurs sera réalisé uniquement lorsqu'une consigne est effective, c'est-à-dire entre 8h et 20h chaque jour.

IV.2.2 La simulation du contrôle du confort thermique

Dans cette première simulation, nous allons nous intéresser au contrôle de l'ambiance thermique. Pour cela, nous ajustons les pondérations de la fonction objectif (voir Partie III.4.2) afin de ne plus tenir compte de la fonction de confort optique et de concentrer l'optimisation sur l'erreur de température opérative et sur la diminution des consommations énergétiques. Nous observerons l'évolution des températures ainsi que la commande des stores vénitiens intérieurs.

$$\begin{cases} \alpha_{th} = 0,5 \\ \alpha_{opt} = 0 \\ \alpha_{ener} = 0,5 \end{cases}$$

Ces résultats de simulation (voir Table IV.6) montrent les différentes utilisations des stores vénitiens pour soulager l'utilisation du radiateur :

- Pendant les deux journées d'hiver (cas 1 et 2), les vitrages sont froids. Les stores vénitiens sont alors utilisés pour contrer cet impact radiatif qui fait chuter la température opérative. De plus, la température opérative n'atteint pas la consigne de 21°C car le chauffage est en limite d'ouverture. Nous remarquons tout de même que la fermeture des stores pour occulter les vitrages froids ne permet d'augmenter que de $0,1^{\circ}\text{C}$ la température opérative. Cette utilisation des stores a donc peu d'intérêt.

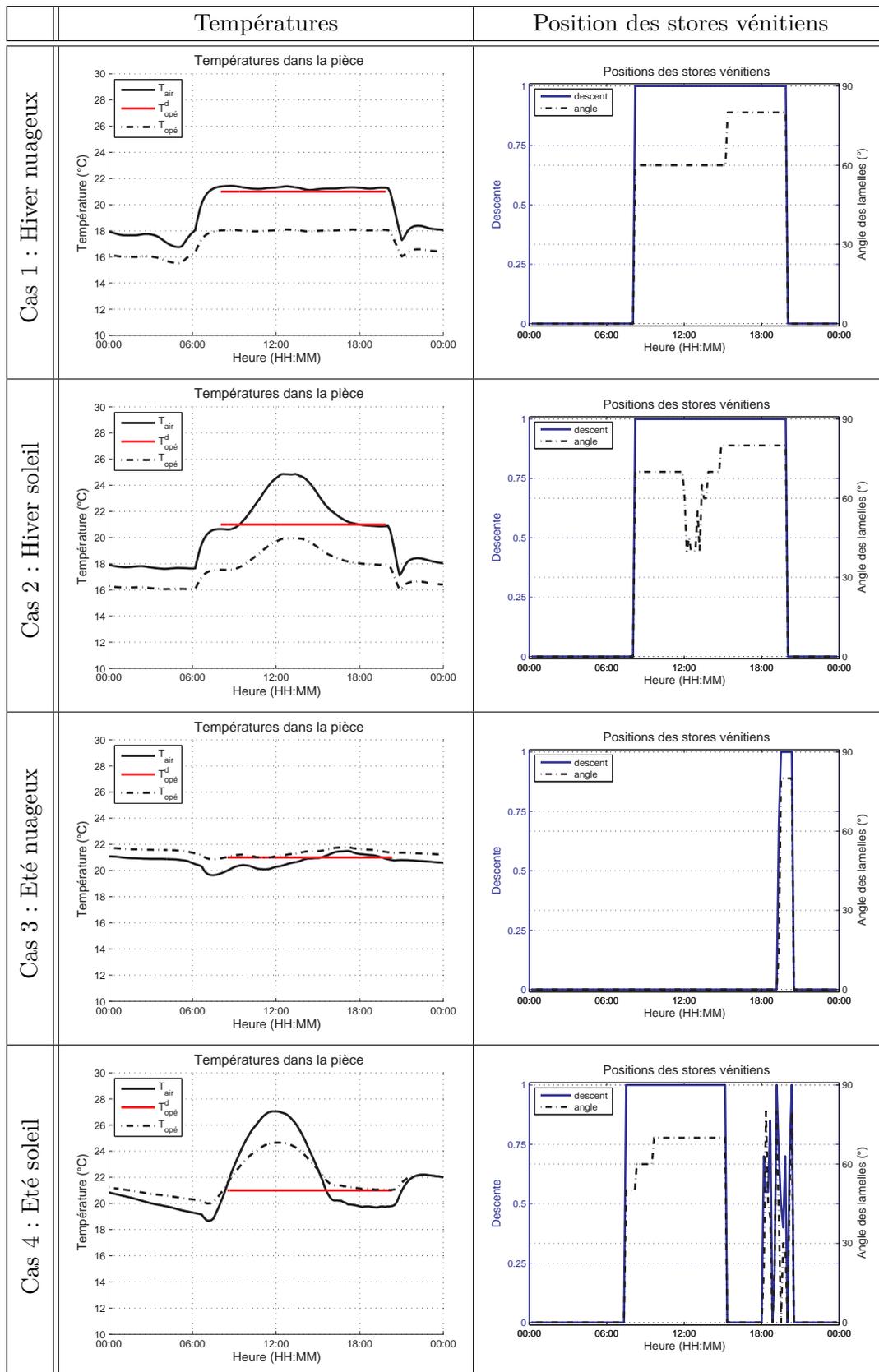


TABLE IV.6 – Contrôle de la température opérative dans la pièce Sud sur les 4 journées de référence

- Pendant les journées ensoleillées (cas 2 et 4), les contraintes de la fonction d'objectif sont adaptées afin d'éviter la pénétration du soleil dans la pièce. Nous observons clairement l'impact de ses contraintes sur la position des stores qui restent descendus au cours de ces journées.
- Lors de la journée d'été nuageuse (cas 3), le store reste relevé car l'impact radiatif des vitrages sur la température opérative est négligeable.
- Pendant la journée d'été ensoleillée (cas 4), la position du store est soumise à la contrainte d'occultation ce qui a pour effet de dissiper l'apport solaire directement dans l'air. L'effet est rapidement observable est la température de l'air dans la pièce monte jusqu'à 27°C.

Nous allons maintenant réaliser la même simulation en basculant les pondérations de l'objectif de confort thermique vers l'objectif de confort optique.

IV.2.3 La simulation du contrôle du confort optique

La fonction de confort optique vise à assurer la quantité de lumière désirée dans la pièce et à positionner le barycentre des sources lumineuses vers le centre de la pièce. Dans les simulations suivantes (voir Table IV.7), la position du barycentre a été fixée au centre de la pièce ; de cette manière, les deux stores vénitiens sont coordonnés. Le contrôle présenté ne vise qu'à assurer les objectifs de confort optique et de réduction des consommations énergétiques. La pondération associée au confort thermique est donc nulle.

$$\begin{cases} \alpha_{th} = 0 \\ \alpha_{opt} = 0,5 \\ \alpha_{\acute{e}ner} = 0,5 \end{cases}$$

L'observation de ces résultats de simulation nous permet d'énoncer plusieurs remarques :

- Sur les quatre journées, en l'absence de consigne d'éclairage moyen, les stores sont totalement relevés et les luminaires éteints.
- Lors de la journée d'hiver nuageuse (cas 1), les stores restent ouverts et les luminaires allumés tout au long de la journée car le potentiel extérieur n'est pas suffisant pour atteindre la consigne dans la pièce. Nous remarquons à quelques instants (9h00, 11h30, 12h15, 14h00) que les luminaires s'éteignent puis se rallument. Ce comportement est lié au choix des pondérations car, à ces instants, l'objectif de consommation a pris le pas sur l'objectif de confort optique. Ces phénomènes apparaissent pendant des pics d'éclairage extérieur.
- Pendant la journée d'hiver ensoleillée (cas 2), nous observons un fort dépasse-

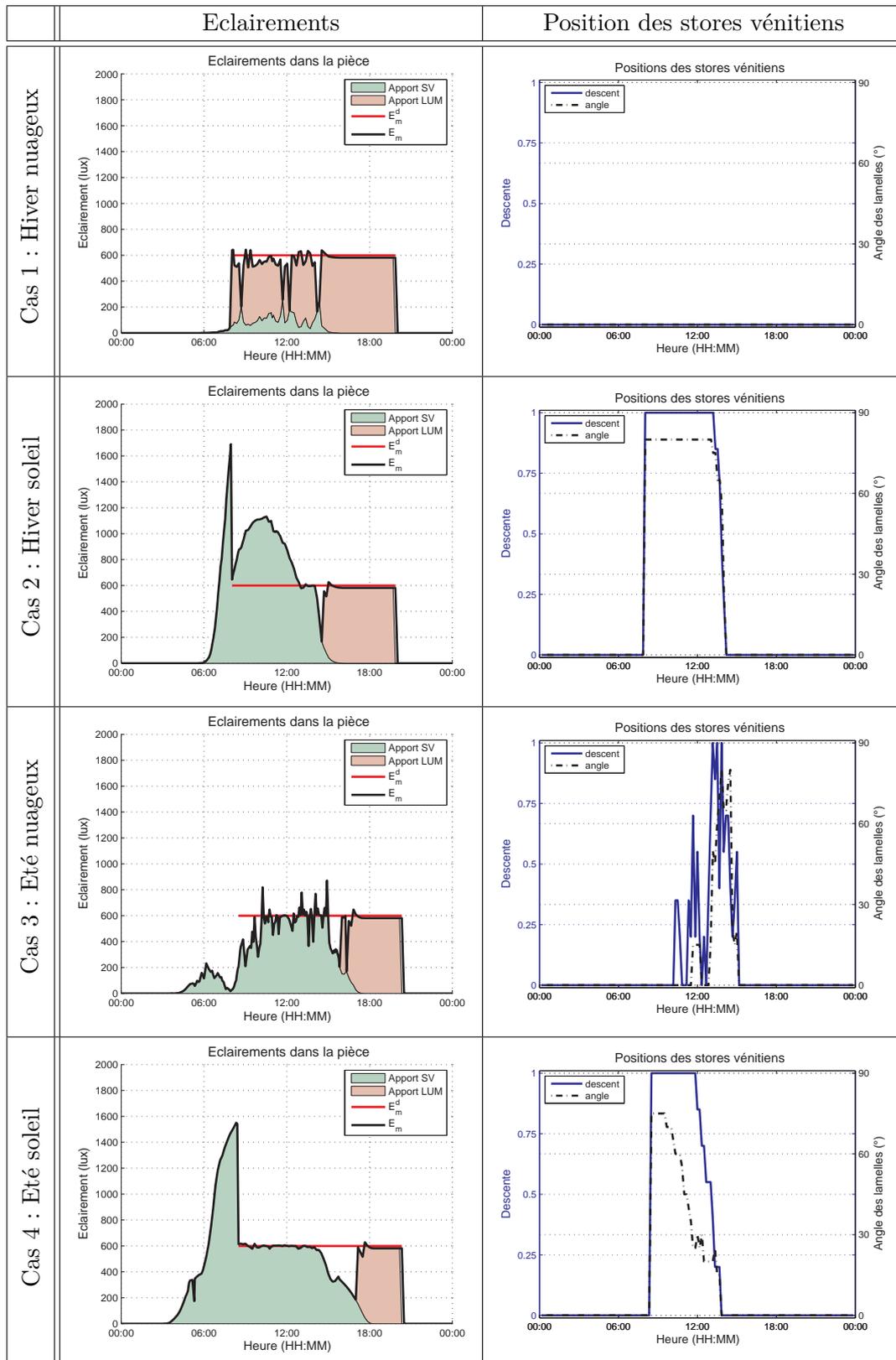


TABLE IV.7 – Contrôle de l'éclairage moyen dans la pièce Sud sur les 4 journées de référence

ment de consigne entre 8h et 13h. L'éclairement moyen dans la pièce s'élève à plus de 1100 lux malgré une fermeture complète des stores vénitiens ($d = 1$ et $\theta = 80^\circ$). Ce dépassement est causé par une grande quantité de rayons solaires directs pénétrant dans la pièce. En effet, nous sommes dans une pièce orientée au sud et en hiver la position du soleil dans la voûte céleste est très basse (voir Figure II.25). Ainsi l'incidence du flux solaire direct sur les vitrages est très faible et la quantité de lumière entrant dans la pièce est plus élevée.

- Lors de la journée d'été nuageuse (cas 3), entre 8h et 16h, les stores jouent bien leur rôle et modulent le potentiel extérieur pour asservir l'éclairement moyen dans la pièce. Les variations de l'éclairement, visibles pendant cette période, sont liées aux fermetures totales des lamelles au cours des variations de descente des stores (voir Partie III.2.2). De plus, nous remarquons que la position des stores vénitiens est très changeante et qu'ils s'ouvrent et se referment régulièrement à cause des fortes variations du potentiel extérieur.
- Lors de la journée d'été ensoleillée (cas 4), l'asservissement de l'éclairement moyen est mieux réalisé car le potentiel extérieur suit la fréquence journalière classique sans être perturbé par la présence de nuages. Les déplacements des stores sont donc mieux calculés : les stores se ferment le matin puis s'ouvrent et se relèvent peu à peu.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons coupler le contrôle thermique et le contrôle optique autour d'une fonction objectif commune.

IV.2.4 La simulation du contrôle du confort thermique et optique

Pour conclure sur le contrôle du confort dans les pièces, nous allons réaliser une simulation en tenant compte à la fois du confort thermique et du confort optique. Les consignes sont les mêmes que pour les deux simulations précédentes. Le contrôle vise à assurer un compromis pour les trois objectifs simultanément (confort thermique, confort optique et consommations énergétiques). Les pondérations sont donc réparties sur ces trois objectifs.

$$\begin{cases} \alpha_{th} = 0,3 \\ \alpha_{opt} = 0,3 \\ \alpha_{ener} = 0,4 \end{cases}$$

Les courbes présentées (voir Table IV.8) montrent l'évolution de l'ambiance thermique et optique. Elles mettent en évidence la capacité du contrôle implémenté à combiner différents objectifs de confort pour déterminer la solution la plus adaptée.

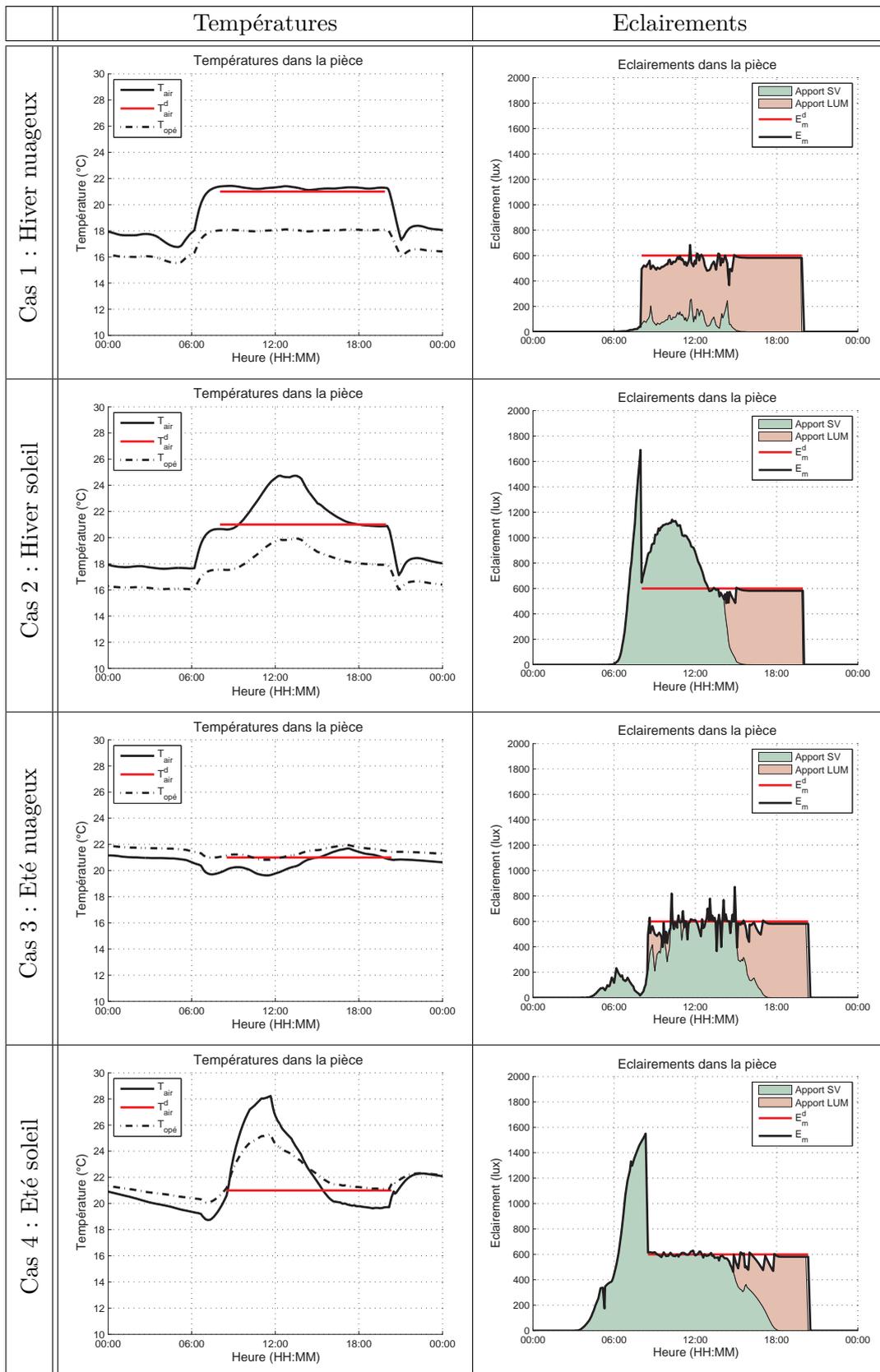


TABLE IV.8 – Contrôle de l'éclairement moyen dans la pièce Sud sur les 4 journées de référence

Erreur de consigne		
	Moyenne	Ecart-type
Sans contrôle	T_{air} (°C)	0,87
	$T_{opé}$ (°C)	1,60
	E_m (lux)	177,4
Thermostat d'ambiance	T_{air} (°C)	0,63
	$T_{opé}$ (°C)	1,44
	E_m (lux)	168,3
Contrôle des luminaires	T_{air} (°C)	0,83
	$T_{opé}$ (°C)	1,14
	E_m (lux)	43,6

Histogramme des écarts de température (°C)										
	$[-\infty; -3]$	$[-3; -2]$	$[-2; -1]$	$[-1; 0]$	$[0; +1]$	$[+1; +2]$	$[+2; +3]$	$[+3; +\infty]$		
Sans contrôle	T_{air} (°C)	0%	0,3%	4,9%	44,3%	35,3%	11,6%	2,8%	0,8%	
	$T_{opé}$ (°C)	6,1%	16,8%	21,4%	21,1%	18,7%	12,9%	2,5%	0,5%	
Thermostat d'ambiance	T_{air} (°C)	0%	0,1%	2,3%	45,3%	40,3%	9,6%	1,8%	0,6%	
	$T_{opé}$ (°C)	6,2%	21,5%	23,7%	21,4%	17,9%	6,2%	2,6%	0,5%	
Contrôle optimal	T_{air} (°C)	0%	0,1%	2,4%	35,3%	28,8%	22,7%	7,3%	3,4%	
	$T_{opé}$ (°C)	3,5%	6,5%	12,7%	34,4%	32,8%	9,7%	0,4%	0%	

Histogramme des écarts d'éclairement (lux)										
	$[-\infty; -200]$	$[-200; -100]$	$[-100; 0]$	$[0; +100]$	$[+100; +200]$	$[+200; +\infty]$				
Sans contrôle	E_m (lux)	17,9%	3,6%	4,4%	8,3%	23,5%	42,3%			
	E_m (lux)	0%	0%	2,1%	32,1%	23,5%	42,3%			
Contrôle optimal	E_m (lux)	0%	0,7%	42,6%	36,0%	11,3%	9,4%			

TABLE IV.9 – Comparaison des contrôles d'ambiance dans la pièce Sud

Enfin, pour étudier l'impact du contrôle global sur l'ensemble du bâtiment à l'échelle d'une année. Nous avons réalisé un tableau comparant les résultats de confort de la commande de référence par rapport à ceux de la commande optimisée (voir Table IV.9). Pour le confort thermique, nous comparons le comportement des pièces passives au contrôle par thermostat d'ambiance et au contrôle optimal. Pour l'optique, nous comparons le comportement des pièces passives aux contrôle des luminaires et au contrôle optimal.

Sans contrôle La pièce est passive, la vanne du radiateur est toujours ouverte, les stores sont toujours relevés et les luminaires sont constamment éteints ;

Thermostat d'ambiance La pièce est équipée d'un contrôle thermique qui commande la vanne du radiateur en utilisant un contrôleur proportionnel et une mesure de la température de l'air grâce à un thermostat d'ambiance ;

Contrôle des luminaires La pièce est équipée d'un contrôle optique qui allume les luminaires lorsque l'éclairement moyen dans la pièce est inférieur à un seuil de consigne. Les stores restent toujours relevés ;

Contrôle optimal La pièce est équipée du contrôle proposé dans cette thèse qui coordonne l'ensemble des actionneurs pour asservir la température opérative moyenne ainsi que l'éclairement dans la pièce tout en minimisant les consommations énergétiques. Le radiateur, les stores et les luminaires sont pilotés.

Au niveau du bâtiment, le chauffage central est toujours considéré comme piloté par une commande prédictive prenant en compte la température extérieur et l'apport énergétique solaire.

Les gains en terme de confort thermique et optique offerts par le contrôle coopératif des actionneurs de la pièce sont les suivants :

- **Gain sur le confort thermique par rapport au contrôle par thermostat d'ambiance :**
 - 20,8% dans une pièce Sud sur l'erreur moyenne ;
 - 39,7% dans une pièce Sud sur l'écart-type.
- **Gain sur le confort optique par rapport au contrôle des luminaires :**
 - 75,4% dans une pièce Sud sur l'erreur moyenne ;
 - 64,9% dans une pièce Sud sur l'écart-type.

Evidemment, les gains présentés ci-dessus sont valables pour une pièce orientée au Sud. Pour parfaire nos résultats nous avons réalisé les mêmes simulations du contrôle coopératif des actionneurs sur une pièce orientée au Nord. Ces résultats ont aussi mis en valeurs une amélioration du confort thermique et optique. Cependant, l'absence de rayonnement solaire pénétrant dans la pièce a réduit l'intérêt de l'usage des stores vénitiens. Sur l'erreur moyenne, les gains sur l'erreur moyenne sont de 5,3% sur le confort thermique et de 53,0% sur le confort optique (avec respectivement 17,3% et

60,7% sur l'écart-type).

Résumé Les simulations du contrôle dans la pièce ont permis de montrer l'influence des différentes fonctions de confort sur le pilotage des actionneurs. Les objectifs de confort thermique et de confort optique ont été étudiés séparément. Nous avons pu observer que l'utilisation des stores vénitiens intérieurs pour contrer la température radiative des vitrages n'offrait pas d'amélioration notable du confort. Par contre, les stores ont un intérêt thermique important lorsque le rayonnement direct pénètre dans la pièce. En optique, le contrôle coopératif des luminaires et des stores vénitiens a permis de réaliser un asservissement assez précis de l'éclairage moyen. Enfin, nous avons réalisé une simulation complète en agrégeant confort thermique et confort optique. Les résultats ont montré le bon comportement du système et la cohérence du contrôle.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté des résultats de simulation du contrôle. Nous nous sommes dans un premier temps intéressés au contrôle des besoins thermiques du bâtiment, puis au contrôle du confort optique et thermique dans les pièces.

Pour les besoins thermiques du bâtiment, les résultats du contrôle du chauffage central ont permis de mettre en évidence les gains énergétiques issus de l'implantation d'une commande prédictive. La commande prédictive simulée prenant en considération l'évolution des températures extérieures et de l'apport solaire sur un horizon futur de deux heures. Il a été observé que cette commande permet de réduire de plus de 20% les consommations de la chaudière tout en améliorant le suivi et en réduisant les dépassements de consigne.

Pour le confort dans les pièces, les résultats du contrôle coopératif des stores vénitiens, des radiateurs et des luminaires ont permis de mettre en évidence l'intérêt du contrôle multi-objectifs que nous avons implémenté. Ce contrôle est basé sur la minimisation de trois objectifs principaux : l'erreur de confort thermique, l'erreur de confort optique et la consommation énergétique. L'intérêt principal de ce type de commande est la possibilité de pondérer chaque critère de confort en fonction du ressenti des occupants. Ainsi, nous avons montré que le contrôle pouvait passer d'un contrôle purement thermique ou optique à un contrôle combiné sans dégrader le confort dans la pièce.

Conclusion générale

Pour conclure ce mémoire de doctorat, nous allons exprimer les principales contributions scientifiques de notre travail. Comme notre modèle de commande est régi par plusieurs hypothèses, le domaine de validité de notre étude est limité. Nous mettrons donc en valeur ces limitations. Enfin, nous ouvrirons le sujet en proposant plusieurs perspectives de recherche.

Les contributions scientifiques

Notre étude a nécessité une ouverture à de nombreux domaines scientifiques. Naturellement, l'automatique ainsi que la modélisation thermique et optique ont été les domaines clés de notre travail et ont été étudiés dans le cadre spécifique du contrôle des bâtiments. Un sujet aussi large que celui des bâtiments impose forcément de s'intéresser à des domaines connexes tels que la modélisation du confort, la prédiction des données environnementales, l'analyse des systèmes, la commande répartie... Ainsi, il semble important de noter que les contributions scientifiques de cette thèse découlent pour la plupart de la transversalité de nos recherches.

D'un côté, nous avons proposé une méthode originale de modélisation du comportement optique et thermique du bâtiment. Issu d'une réflexion poussée sur l'analyse systémique du bâtiment, notre modèle permet de simuler simplement et simultanément le comportement moyen du bâtiment et de plusieurs de ses pièces. Ce modèle offre un grand intérêt du point de vue de l'Automatique et de la Commande car il est basé sur une décomposition des dynamiques propres au bâtiment et aux pièces. La mise en équation du modèle a été réalisée en suivant les règles du Bond Graph ce qui nous a permis d'exprimer simplement et graphiquement les multiples échanges énergétiques en présence. En outre, ce modèle a été conçu pour pouvoir s'intégrer facilement dans une architecture de contrôle et offre l'avantage d'être un support très efficace pour la simulation de tout type de lois de commandes optiques et thermiques. En effet, les principales perturbations que sont la température extérieure, le flux solaire incident, la

circulation d'air et l'occupation sont pris en considération dans le modèle. Par ailleurs, les contributions et les consommations énergétiques des actionneurs sont aussi modélisée ce qui accentue le caractère de modèle porté vers l'expérimentation du contrôle et de l'automatisation du bâtiment. Les actionneurs que nous avons modélisés sont des stores vénitiens, des luminaires, des radiateurs à eau ainsi qu'une chaudière.

La modélisation fine des actionneurs a pris tout son sens lors de la mise en équation de la commande du système. En effet, en partant du modèle de simulation, nous avons pu réduire le modèle afin de réaliser la synthèse des lois de commande des actionneurs. Le modèle de commande analytique obtenu a permis d'implémenter une régulation du chauffage central sous la forme d'une commande prédictive de type PFC. Les perturbations prises en considération dans la prédiction sont la température extérieure ainsi que la puissance et l'orientation du flux solaire radiatif. Nous avons simulé l'impact de cette commande prédictive sur un bâtiment de l'INSA Lyon en exploitant des mesures annuelles issue de la station IDMP de l'ENTPE. Les résultats ont démontrés une diminution de 20% de consommations énergétiques liées au chauffage ce qui représente un gain financier très important. Par ailleurs, la synthèse des lois de commande a aussi permis de concevoir une commande coopérative des actionneurs des pièces pour asservir le confort des occupants. Nous avons assimilé le confort à la quantité et la répartition de la lumière ainsi qu'à la température opérative moyenne souhaitée par les occupants. Ce contrôle est basé sur une commande optimale dont la fonction d'optimisation vise à minimiser la consommation énergétique des actionneurs et les écarts de confort optique et thermique. Nous nous sommes attachés à exploiter une commande par optimisation numérique afin de simuler les avantages d'un contrôle purement optique, d'un contrôle purement thermique et les conséquences du couplage optique-thermique au sein d'un contrôle global. Les simulations de ces trois contrôles ont mis en évidence le fort potentiel de cette commande pour l'amélioration du confort optique et thermique. En optique nous avons démontré un gain de 75% sur le suivi de l'éclairement moyen par rapport à un contrôle tout-ou-rien des luminaires. En thermique nous avons démontré un gain de 20% sur le suivi de température opérative moyenne par rapport à un contrôle par thermostat d'ambiance.

Somme toute, l'apport principal en automatique se situe incontestablement en amont, dans la démarche de conception de l'architecture de contrôle qui nous a poussés vers la hiérarchisation en plusieurs niveaux de commande. Cette structure de contrôle est issue d'une étude systémique qui a permis d'identifier les différents systèmes en interaction et leurs différents objectifs. Ainsi nous avons identifié deux niveaux de contrôle. Premièrement le contrôle global du bâtiment ayant le rôle de fournisseur d'énergie et dont la commande vise à minimiser les consommations énergétiques en considérant l'évolution future des apports énergétiques extérieurs. Deuxièmement le contrôle local des pièces dont le rôle est de maintenir l'ambiance souhaitée par les occupants en exploitant les énergies mises à disposition par le contrôle du bâtiment et les apports

énergétiques gratuits.

Les limitations

Il est impossible de décrire avec une généralité absolue des lois d'automatisation des bâtiments. Notre étude est donc naturellement soumise à plusieurs limitations.

Tout d'abord, nous avons appliqué nos recherches à un bâtiment élémentaire : de forme rudimentaire (un parallélépipède rectangle), avec une structure régulière (coefficients thermiques et optiques homogènes), dans le secteur tertiaire (une seule mission sociétale contrairement à un bâtiment d'habitation avec plusieurs logements et autant de rythmes de vie), équipé d'un unique producteur de chaleur (une chaudière) et d'équipements de confort très classiques (radiateurs à eau, stores vénitiens intérieurs et luminaires). Un certain nombre de bâtiments ne rentrent pas dans ces critères et l'intérêt de nos travaux pour des bâtiments plus complexes est donc limité. Cependant la démarche d'analyse systémique que nous avons suivi au début de notre étude reste toutefois applicable, même s'il semble évident que l'architecture hiérarchisée du contrôle dépendra toujours des équipements de confort et des missions sociétales propres au bâtiment que l'on souhaite contrôler.

En outre, les modèles de simulation que nous avons développés sont basés sur plusieurs hypothèses fortes. Ces hypothèses ont permis de simplifier les modèles mais ont par conséquent réduit la finesse des simulations. Par exemple, nous avons considéré que les pièces étaient soumises au comportement moyen du bâtiment ; sans prendre en compte l'influence des pièces sur leurs voisines et sur le reste du bâtiment. Ainsi nous avons fait l'hypothèse qu'une pièce était énergétiquement négligeable par rapport au bâtiment ; ce qui nous place dans le cadre des bâtiments de grande taille. En outre, nous avons supposé l'uniformité des matériaux afin de nous affranchir des phénomènes de conduction pour réduire le maillage des modèles. Ces hypothèses sont des considérations importantes qui limitent le domaine de validité de notre étude, cependant il faut garder à l'esprit que ces modèles ont été mis en œuvre afin d'expérimenter des stratégies de contrôle. Ils n'ont donc pas pour ambition de décrire finement le comportement physique mais d'exprimer de manière simplifiée le comportement d'un bâtiment et d'une pièce pour alimenter une boucle de régulation.

Enfin, ce modèle de bâtiment simplifié est à l'origine des équations qui ont permis la synthèse des lois de commande proposées. Ainsi la boucle de régulation est intégrée dans un cadre parfait où le calcul des signaux de commande est issu d'une réduction du modèle de simulation. La validation de notre architecture de commande n'est donc pas

absolument recevable car nous ne l'avons pas alimenté avec un modèle de simulation tiers, basé purement sur la physique. Ainsi, il aurait été intéressant de tester notre structure de contrôle sur un modèle de simulation éprouvé et validé expérimentalement. Ceci afin de pouvoir, entre autre, comparer les gains de la commande prédictive.

Les perspectives de recherche

La problématique de la gestion énergétique dans les bâtiments est de plus en plus présente, en témoigne les engagements drastiques des états pour le renouvellement de leur parc immobilier. Nos travaux proposent une approche intéressante pour aborder ce problème contemporain en évaluant l'apport potentiel de l'automatisation des équipements de confort. Cependant, la complexité née de l'ancrage sociétal et de la pluralité des bâtiments pose de nombreux verrous à la mise en application de ces solutions. Pour cette raison, notre étude offre beaucoup de perspectives dans le domaine de l'automatique.

Du point de vue de la démarche d'expérimentation du contrôle, il serait avant tout nécessaire d'observer les performances des lois de commande en utilisant des modèles de simulation éprouvés (comme par exemple TRNSYS, SIMBAD, Radiance...). Ceci afin de valider la commande et les gains énergétiques potentiels. Mais aussi pour étudier la précision du modèle de simulation que nous avons développé et l'impact des hypothèses considérées.

Au niveau de la commande, plusieurs points peuvent-être amenés à évoluer :

1. Au niveau du contrôle du bâtiment, nous pourrions faire évoluer la commande prédictive en utilisant une trajectoire de référence (MPC) plutôt qu'un point de coïncidence (PFC). Ceci devrait théoriquement augmenter les gains énergétiques. De plus, nous nous sommes placés dans un cadre idéal en ce qui concerne la prédiction des données météorologiques car nous avons utilisé des mesures annuelles. Or la justesse de la prédiction est un critère primordial pour évaluer les performances du contrôle. Cet aspect mérite donc d'être étudié.
2. Au niveau du contrôle des pièces, la commande optimale pourrait prendre en considération l'évolution des perturbations. En effet, dans notre étude, la fonction objectif est minimisée uniquement sur les données courantes. La fonction objectif est donc statique et il pourrait être bénéfique d'y implanter des composantes dynamiques.
3. Au niveau de l'architecture de contrôle, il serait intéressant d'étudier comment les contrôleurs peuvent interagir les uns avec les autres et l'impact de ces interactions. Nous avons déjà imaginé plusieurs types d'interactions :

- le contrôleur bâtiment pourrait adapter les pondérations de la fonction objectif des contrôleurs pièces en fonction d'un besoin global ou en fonction du cycle de vie ;
 - le contrôleur bâtiment pourrait piloter les pièces inoccupées pour éviter les forts gradients thermiques synonymes de pertes énergétiques ;
 - en retour, les contrôleurs pièces pourraient informer le contrôleur bâtiment des écarts de confort pour qu'il puisse adapter la puissance énergétique mise à disposition ;
 - le retour sur l'état des contrôleurs pièces pourrait être utile au contrôleur bâtiment pour mettre à jour le modèle interne utilisé pour la commande prédictive.
- En s'intéressant à ces interactions, il apparaît que l'usage de techniques telles que la commande multi-agent, la commande répartie ou la commande floue offrirait des solutions tout à fait pertinentes.
4. Concernant les occupants, nous nous sommes basés sur des consignes de température et d'éclairage fixes tout au long de l'année. Or nous pourrions faire varier ces consignes en fonction des saisons et du cycle de vie du bâtiment.

En outre, l'approche engagée pour la modélisation du bâtiment pourrait être utilisée en phase de conception d'un bâtiment. En effet, une analyse énergétique des bâtiments en utilisant un modèle complet (intégrant les équipements de confort et la stratégie de commande) peut être très intéressante pour dimensionner la puissance de ces équipements et évaluer la performance du contrôle.

Pour conclure, nous pouvons dire que ce travail a permis d'offrir une approche nouvelle pour la conception des systèmes de contrôle des bâtiments. Cependant, il est encore nécessaire d'éprouver cette méthodologie pour mettre en valeur son impact dans différents cadres d'études. Nous espérons que le lecteur aura pu apprécier cette présentation de nos travaux et n'hésitera pas à exploiter nos résultats dans le cadre de ses propres recherches.

Bibliographie

- ABRAS S. (2009). *Système domotique Multi-Agents pour la gestion de l'énergie dans l'habitat*. Thèse de doctorat, 166 pages, Grenoble-INP, Grenoble, France. Mai, 2009.
- ABRAS S., PLOIX S., PESTY S. et JACOMINO M. (2010). Advantages of mas for the resolution of a power management problem in smart homes. *Dans 8th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, PAAMS'10*, pages 269–278, Salamanca, Espagne. 26–28 Avril, 2010.
- ADEME (2012). Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. <http://www.ademe.fr>. 2012. Site accessible le 01/07/2012.
- ANDERSEN M., RUBIN M., POWLES R. et SCARTEZZINI J. L. (2005). Bi-directional transmission properties of venetian blinds : experimental assessment compared to ray-tracing calculations. *Solar Energy*, 78(2):187–198. 2005.
- ANTHIERENS C., LECLERCQ M., BIDEAUX E. et FLAMBARD L. (2008). A smart sensor to evaluate visual comfort of daylight into buildings. *International Journal of Optomechatronics*, 2(4):413–434. 2008.
- ARNAL E., ANTHIERENS C. et BIDEAUX E. (2011a). Consideration of glare from daylight in the control of the luminous atmosphere in buildings. *Dans IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1070–1075, Budapest, Hongrie. 3–7 Juillet, 2011.
- ARNAL E., ANTHIERENS C. et BIDEAUX E. (2011b). Contrôle de l'ambiance lumineuse d'une pièce. application au pilotage de stores vénitiens. *Dans 4^{èmes} Journées Doctorales / Journées Nationales MACS*, 6 pages, Marseille, France. 6–10 Juin, 2011.
- AURIAT F. (2008). Modélisation systémique du bâtiment. contribution au projet homes de schneider electric. Mémoire de maîtrise, 126 pages, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin, France. 2008.
- BALAN R., STAN S. D. et LAPUSAN C. (2009). A model based predictive control algorithm for building temperature control. *Dans 3rd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*, pages 540–545, Istanbul, Turquie. 1–3 Juin, 2009.

- BASHIR Z. et EL-HAWARY M. E. (2000). Short term load forecasting by using wavelet neural networks. *Dans Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, volume 1, pages 163–166, Halifax, Nouvelle-Écosse. 8–10 Mai, 2000.
- BERTALANFFY L. V. (1968). *Théorie Générale des Systèmes*. Editions DUNOD, 328 pages. 1968.
- BOULDING K. E. (1956). General systems theory - the skeleton of science. *Management Science*, 2(3):197–208. Avril, 1956.
- CAMPBELL N. S. et WHITTLE J. K. (1997). Analysing radiation transport through complex fenestration systems. *Dans IBPSA Conference on Building Simulation '97*, 8 pages, Prague, République Tchèque. 8–10 Septembre, 1997.
- CAPENERGIES (2006). Système adaptatif de pilotage pour la maîtrise énergétique du bâtiment. <http://www.capenergies.fr/fichiers/projets/labellises2006/SAPB.doc>. 2006. Site accessible le 01/07/2012.
- CARROLL W. L. (1999). *Daylighting Simulation : Methods, Algorithms, and Resources*. A Report of IEA SHC Task 21 / ECBCS ANNEX 29 and Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL-44296, 34 pages. Décembre, 1999.
- CATALINA T., VIRGONE J. et BLANCO E. (2008). Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy and Buildings*, 40(10):1825–1832. 2008.
- CHAIN C. (2004). *Caractérisation spectrale et directionnelle de la lumière naturelle : application à l'éclairage des bâtiments*. Thèse de doctorat, 281 pages, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France. Septembre, 2004.
- CHAUVEL J., COLLINS B., DOGNIAUX R. et LONGMORE J. (1982). Glare from windows : Current view of the problem. *Lighting Research and Technology*, 14(1):31–46. Mars, 1982.
- CIE (1992). *Discomfort Glare in the Interior Lighting*. Commission Internationale de l'Éclairage, Technical committee TC-3.13, Division 4, Interior Environment and Lighting Design. 1992.
- CIE (2003). *Spatial Distribution of Daylight : CIE Standard General Sky*. Commission Internationale de l'Éclairage S011/E :2003, ISO15469 :2003(E). 2003.
- CLARKE D. W., MOHTADI C. et TUFFS P. S. (1987). Generalized Predictive Control - Part I. The Basic Algorithm. *Automatica*, 23(2):137–148. 1987.
- COOPERMAN A., DIECKMANN J. et BRODRICK J. (2010). Using weather data for predictive control. *ASHRAE Journal : American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*, 52(12):130. Décembre, 2010.

- DANTZIG G. B. (1951). Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities. *Dans Activity Analysis of Production and Allocation (Tj.C. Koopmans, ed)*, pages 339–347, New York, Etats-Unis. 1951.
- DARULA S. et KITTLER R. (2002). CIE General Sky Standard Defining Luminance Distributions. *Dans eSim Conference, IBPSA*, pages 1113–1120, Montréal, Canada. 12–13 Septembre, 2002.
- DIALUX (2011). Logiciel dialux. <http://www.dial.de/DIAL/fr/>. 2011. Site accessible le 01/07/2012.
- DONNADIEU G., DURAND D., NEEL D., NUNEZ E. et SAINT-PAUL L. (2003). L'approche systémique : de quoi s'agit-il? Rapport technique, Synthèse des travaux du Groupe AFSCET "Diffusion de la pensée systémique", 11 pages. Septembre, 2003.
- DUBOIS C., DEMERS C. et POTVIN A. (2007). The influence of daylighting on occupants : comfort and diversity of luminous ambiances in architecture. *Dans The American Solar Energy Society (ASES), SOLAR*, 6 pages, Cleaveland, Etats-Unis. Juillet, 2007.
- DUBOIS M. C. (2001). Impact of shading devices on daylight quality in offices. simulations with radiance. Rapport technique, Department of Construction and Architecture, Lund University, 162 pages. 2001.
- DUMORTIER D. (2011). Serveur de la station de mesure de la lumière naturelle et du rayonnement solaire de l'entpe. <http://idmp.entpe.fr/vaulx/>. 2011. Site accessible le 01/07/2012.
- DUMUR D., BOUCHER P., MURPHY K. M. et DÉQUÉ F. (1997). Comfort control in residential housing using predictive controllers. *Dans The IEEE CCA*, pages 265–270, Hartford, Etats-Unis. 5–7 Octobre, 1997.
- EN 13363-1 :2003 (2003). *Solar Protection Devices Combined With Glazing - Calculation Of Solar And Light Transmittance - Part 1 : Simplified Method*. CEN. 2003.
- ENERGIE⁺ (2009). Le confort thermique. <http://www.energieplus-lesite.be/>. 2009. Site accessible le 01/07/2012.
- EYNARD J. (2010). *Gestion optimale de l'énergie dans un procédé multi-source pour le chauffage de bâtiments*. Thèse de doctorat, 278 pages, Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan, France. Octobre, 2010.
- FANGER P. O. (1967). Calculation of thermal comfort : Introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Transactions*, 73(2):III4.1–III4.20. 1967.
- FAUCONNIER R. (1992). L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires. *Chauffage, ventilation, conditionnement*, 64(10):57–62. 1992.

- FRAISSE G. (1997). *La régulation thermique des bâtiments tertiaires : Application de la logique floue à la régulation centrale du chauffage en régime intermittent*. Thèse de doctorat, 166 pages, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France. Octobre, 1997.
- FREIRE R. Z., OLIVEIRA G. H. C. et MENDES N. (2005). Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems. *Dans The 16th IFAC World Congress*, 6 pages, Prague, République Tchèque. 3–8 Juillet, 2005.
- FREIRE R. Z., OLIVEIRA G. H. C. et MENDES N. (2008). Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings*, 40(7):1353–1365. 2008.
- GEBBERSA J. O. et GLÜCK U. (2003). Sick building syndrome. *Schweiz Med Forum*, 5:109–113. Janvier, 2003.
- GIEC (2008). Changement climatique 2007. Rapport technique, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 114 pages. 2008.
- GIVONI B. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Editions du Moniteur. 1978.
- GUILLEMIN A. (2001). Un confimètre visuel utilisant une rétine artificielle. Rapport technique, Rapport Final, Bourse SATW, 11 pages. Octobre, 2001.
- GUILLEMIN A. (2003). *Using Genetic Algorithms to Take into Account User Wishes in an Advanced Building Control System*. Thèse de doctorat, 184 pages, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse. Juin, 2003.
- GUILLEMIN A. et MOREL N. (2001). An innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system. *Energy and Buildings*, 33(5):477–487. Mai, 2001.
- HERNOT D. et PORCHER G. (1997). *Thermique appliquée aux bâtiments*. Les éditions parisiennes, C.F.P. Chaud-Froid Plomberie, 168 pages. 1997.
- JAMONT J. P., MENDES E. et OCCELLO M. (2011). A framework to simulate and support the design of distributed automation and decentralized control systems : application to control of indoor building comfort. *Dans 2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA)*, pages 80–87, Paris, France. 11–15 Avril, 2011.
- JUNG O. (2009). *Approche multicritère numérique et expérimentale de la ventilation et du rafraîchissement passif d'un bâtiment multizone par contrôle de composants de façade*. Thèse de doctorat, 293 pages, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France. Décembre, 2009.

- KEYSER R. M. C. D. et CAUWENBERGHE A. V. (1981). A self-tuning multistep predictor application. *Automatica*, 17(1):167–174. Janvier, 1981.
- KOLOKOTSA D., POULIEZOS A., STAVRAKAKIS G. et LAZOS C. (2009). Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings. *Building and Environment*, 44(9):1850–1863. Septembre, 2009.
- KOLOKOTSA D., TSIAVOS D., STAVRAKAKIS G. S., LALAITZAKIS K. et ANTONIDAKIS E. (2001). Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and buildings*, 33(6):531–543. Juillet, 2001.
- KOTEY N. A. et WRIGHT J. L. (2006). Simplified solar optical calculations for windows with venetian blinds. *Dans 31st Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada*, 8 pages, Montréal, Canada. 20–24 Août, 2006.
- LE GRENELLE ENVIRONNEMENT (2007). Document récapitulatif des tables rondes tenues à l’hôtel de roquelaure les 24, 25 et 26 octobre 2007. Rapport technique, Ministère de l’écologie, du développement et de l’aménagement durables, 34 pages. 2007.
- LE PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE (2010). Loi n° 2010-238 du 9 mars 2010 visant à rendre obligatoire l’installation de détecteurs de fumée dans tous les lieux d’habitation. *Journal Officiel de la République française*, 0058(2):4759. 10 Mars, 2010.
- LECLERCQ M. (2009). *Conception et Intégration d’un Système de Vision pour la Gestion du Confort Visuel dans le Bâtiment*. Thèse de doctorat, 184 pages, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France. Décembre, 2009.
- LECLERCQ M., ARNAL E., ANTHIERENS C. et BIDEAUX E. (2011). Control of visual conditions for open-plan offices. *Mechatronics*, 21(3):581–593. Avril, 2011.
- LOMANOWSKI B. A. et WRIGHT J. L. (2007). Heat transfer analysis of windows with venetian blinds : a comparative study. *Dans 2nd Canadian Solar Buildings Conference*, 9 pages, Calgary, Canada. 10–14 Juin, 2007.
- LOVEDAY D. L., VIRK G. S. et CHEUNG J. M. (1992). Advanced control for BEMS : A model-based predictive approach. *Building Services Engineering Research and Technology*, 13:217–223. 1992.
- MAHDAVI A., SPASOJEVIC B. et BRUNNER K. A. (2005). Elements of a simulation-assisted daylight-responsive illumination systems control in buildings. *Dans 9th International IBPSA Conference*, pages 693–700, Montréal, Canada. 15–18 Août, 2005.
- MAQSOOD I., KHAN M. R. et ABRAHAM A. (2004). An ensemble of neural networks for weather forecasting. *Neural Computing & Applications*, 13(2):112–122. Juin, 2004.

- MATHWORKS (2012). Logiciel MATLAB-Simulink. <http://www.mathworks.fr/products/simulink/>. 2012. Site accessible le 01/07/2012.
- MCGUIRE M. E. (2005). A system for optimizing interior daylight distribution using reflective venetian blinds with independant blind angle control. Mémoire de maîtrise, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Etats-Unis. 2005.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER (2010). Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments. *Journal Officiel de la République française*, 0250(7):19260. Octobre, 2010.
- MINISTÈRE DE L'EMPLOI, DE LA COHÉSION SOCIALE ET DU LOGEMENT (2006). Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments. *Journal Officiel de la République française*, 121(14):7747. Mai, 2006.
- MOON J. W., JUNG S. K. et KIM J. J. (2009). Application of ANN (Artificial-Neural-Network) in residential thermal control. *Dans 11th International IBPSA Conference*, pages 64–71, Glasgow, Ecosse. 27–30 Juillet, 2009.
- MOROSAN P. D., BOURDAIS R. et GUÉGUEN H. (2010). Apports de la commande prédictive pour la régulation thermique des bâtiments. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 44(4-5):479–492. Avril, 2010.
- MUKHERJEE S., BIRRU D., CAVALCANTI D., SHEN E., PATEL M., WEN Y. J. et DAS S. (2010). Closed loop integrated lighting and daylighting control for low energy buildings. *Dans 2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, pages 9.252–9.269, Pacific Grove, Etats-Unis. 15–20 Août, 2010.
- NAZZAL A. A. (2005). A new evaluation method for daylight discomfort glare. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(4):295–306. Avril, 2005.
- NF EN 12464-1 (2011). *Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieur*. AFNOR. 2011.
- OLDEWURTEL F., GYALISTRAS D., GWERDER M., JONES C. N., PARISIO A., STAUCH V., LEHMANN B. et MORARI M. (2010). Increasing energy efficiency in building climate control using weather forecasts and model predictive control. *Dans 10th REHVA World Congress Clima 2010*, 8 pages, Antalya, Turquie. 9–12 Mai, 2010.
- OLIVEIRA G. H. C., COELHO L. S. et MENDES N. (2003). Using fuzzy logic in heating control systems. *Dans 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference (AJTEC'03)*, Hawaï, Etats-Unis. 16–20 Mars, 2003.

- OUMEZIANE H. (2005). *Approche systémique pour une ingénierie du bâtiment intégrée. Contribution à l'interopérabilité d'acteurs en conception avancée*. Thèse de doctorat, 201 pages, Ecole Centrale Paris, Paris, France. Juillet, 2005.
- PAYNTER H. A. (1961). *Analysis and design of engineering systems*. The M.I.T. Press. 1961.
- PEREZ R., SEALS R. et MICHALSKY J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution - preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3):235–245. Mars, 1993.
- PRÍVARA S., SIROKY J., FERKLA L. et CIGLERA J. (2011). Model predictive control of a building heating system : The first experience. *Energy and Buildings*, 43(2-3):564–572. Février-Mars, 2011.
- RADIANCE (2011). Radiance, synthetic imaging system. <http://radsite.lbl.gov/radiance/>. 2011. Site accessible le 01/07/2012.
- RAFFENEL Y., BLANCO E., VIRGONE J., NEVEUX P., SCORLETTI G. et THOMAS G. (2008). Reducing the energy consumption of space heating in buildings : Design of an optimal controller. *Dans 17th IFAC World Congress*, pages 11098–11105, Séoul, République de Corée. 6–11 Juillet, 2008.
- REA M. S. (1993). *Lighting Handbook : Reference & Application*. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). 1993.
- REITER S. et HERDE A. D. (2004). *L'éclairage naturel des bâtiments*. Presses universitaires de Louvain, 265 pages. 2004.
- RICHALET J., LAVIELLE G. et MALLET J. (2005). *La commande prédictive*. Editions Eyrolles, 256 pages. 2005.
- RICHALET J., RAULT A., TESTUD J. L. et PAPON J. (1978). Model predictive heuristic control : Applications to industrial processes. *Automatica*, 14(5):413–428. Septembre, 1978.
- RIORDAN D. et HANSEN B. K. (2002). A fuzzy case-based system for weather prediction. *Engineering Intelligent Systems*, 10(3):139–146. Septembre, 2002.
- ROULET C. A. (2008). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments (2^{ème} édition mise à jour et complétée)*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 2008.
- ROUX J. J. (1999). *Comportement thermique des bâtiments en régime dynamique*. Cours de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Département Génie Civil et Urbanisme. 1999.

- ROUX J. J., SAFER N., WOLOSZYN M. et NOËL J. (2005). Modélisation des stores venitiens. Influence de leur gestion d'ouverture sur les bilans thermiques d'été. *Dans Climaned*, 10 pages, Madrid, Espagne. 24–25 Février, 2005.
- SERVICE DE L'OBSERVATION ET DES STATISTIQUES (2010). Bilan énergétique de la France pour 2009. Rapport technique, Commissariat Général au Développement Durable, 60 pages. Juin, 2010.
- SIMBAD (2011). Building and HVAC modelling toolbox for Matlab/Simulink. <http://www.simbad-cstb.fr/>. 2011. Site accessible le 01/07/2012.
- TREGENZA P. R. (1980). The daylight factor and actual illuminance ratios. *Lighting Research and Technology*, 12(2):64–68. Juin, 1980.
- TRNSYS (2011). A TRaNsient SYstems Simulation Program. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>. 2011. Site accessible le 01/07/2012.
- WARD G. J. (1994). The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System. *Dans SIGGRAPH 94 Conference*, pages 459–472, Orlando, Etats-Unis. 24–29 Juillet, 1994.
- WIENOLD J. et CHRISTOFFERSEN J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and buildings*, 38(7):743–757. Juillet, 2006.
- ZIEGLER J. G. et NICHOLS N. B. (1993). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 115(2B):220–222. 1993.