



HAL
open science

Modélisation et instrumentation d'un bâtiment et de ses systèmes pour optimiser sa gestion énergétique

Hugo Viot

► **To cite this version:**

Hugo Viot. Modélisation et instrumentation d'un bâtiment et de ses systèmes pour optimiser sa gestion énergétique. Autre [cond-mat.other]. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0349 . tel-01503037

HAL Id: tel-01503037

<https://theses.hal.science/tel-01503037>

Submitted on 6 Apr 2017

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 pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BORDEAUX

Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Spécialité : Mécanique

Par Hugo VIOT

Modélisation et instrumentation d'un bâtiment et de ses systèmes pour optimiser sa gestion énergétique

Modeling and instrumentation of a building and its systems to optimize energy management

Sous la direction de : Jean-Christophe BATSALE

et encadrée par : Alain SEMPEY, Laurent MORA

au sein du laboratoire I2M, UMR 5295, 33400 Talence

Soutenue en public le 29 novembre 2016

Membres du jury :

Christian INARD	Professeur des Universités (HDR), Université de La Rochelle	Président du jury
Benoit DELINCHANT	Maître de Conférences (HDR), Université de Grenoble	Rapporteur
Gilles FRAISSE	Professeur des Universités (HDR), Université Savoie Mont Blanc	Rapporteur
Jean-Christophe BATSALE	Professeur des Universités (HDR), ENSAM	Directeur de thèse
Alain SEMPEY	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Encadrant de thèse
Laurent MORA	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Encadrant de thèse

Résumé

Dans un contexte de raréfaction des énergies à bas coût et de lutte contre le changement climatique, le secteur du bâtiment est contraint à des objectifs de diminution de ses consommations d'énergie. Un contrôle adapté des systèmes énergétiques du bâtiment peut constituer un levier important pour tendre vers cet objectif.

Le but premier de ces travaux est la construction de modèles de faibles dimensions afin de pouvoir les embarquer dans un contrôleur pour améliorer la gestion énergétique. Ces modèles doivent être capables de s'enrichir des mesures disponibles sur site. Un bâtiment démonstrateur situé à l'Institut Universitaire de Technologie Génie Civil Construction Durable de Bordeaux sert de support au projet. Ce travail se décline en quatre volets. Le premier concerne la modélisation puisque des modèles légers basés sur l'analogie électrique et la représentation d'état sont proposés afin de décrire la dynamique du bâtiment sur un horizon de contrôle de quelques jours. Le deuxième volet concerne l'instrumentation du bâtiment puisque des campagnes de mesures courtes sont réalisées afin d'identifier les valeurs des paramètres du modèle de façon à minimiser l'écart modèle-mesure. Certains capteurs servent par la suite pour la gestion énergétique du bâtiment ; ces travaux posent donc également la question du jeu minimal de capteurs. Le troisième volet concerne la caractérisation des systèmes servant à piloter l'ambiance puisque dans une logique de contrôle optimal il faut être capable de relier l'effet de la commande sur la grandeur d'intérêt (température de confort). Le bâtiment démonstrateur comprend deux systèmes de chauffage : un plancher chauffant et des ventilo-convecteurs ainsi qu'une centrale de traitement d'air double flux pour le renouvellement d'air. Le dernier volet concerne la gestion énergétique avec l'utilisation d'un contrôleur prédictif embarquant l'un des modèles identifiés.

Ainsi l'objectif est de chercher à anticiper le pilotage d'un système capacitif à long temps de réponse, tel que le plancher chauffant, grâce à la connaissance des perturbations futures (occupation, météo) sur un horizon de prédiction de quelques heures. Un contrôle réactif est assuré par les ventilo-convecteurs en appoint. La gestion prédictive est comparée à des stratégies de gestion plus classiques en simulation et in situ avec le bâtiment démonstrateur.

L'originalité de ces travaux est de proposer une démarche pour la mise en place d'une boucle de contrôle complète (contrôleur/capteurs/actionneurs) et de montrer s'il existe un intérêt à la gestion prédictive de systèmes à long temps de réponse dans le domaine du bâtiment.

Mots clés : bâtiments, modèles légers, identification, systèmes énergétiques, contrôle anticipatif.

Abstract

The building sector is forced to reduce its energy consumption in a context of high energy prices and global warming. Proper control of building energy systems can be an important lever to move towards this goal.

The main goal of this work is to obtain small size buildings models in order to use it in a controller to improve energy management. The inputs of these models are fed in real-time with available measurements on site. A demonstration building at the IUT Civil Engineering and Sustainable Construction of Bordeaux serves as experimental support for the project. This work consists of four parts. The first one is to make lightweight models based on the electrical analogy and state-space representation to describe the dynamics of the building on upcoming days. The second part concerns the instrumentation of the building because short measurement campaigns are carried out to identify the model parameter values to minimize the gap between model output and measurement. Some sensors are then used for energy management of the building; thus this work also raise the question of the minimum set of sensors. The third address the characterization of the systems used to control air temperature. For an optimal control logic we must be able to link the effect of the command on the interest variable (air temperature). The demonstration building includes two heating systems : floor heating system (FHS) and fan coil units (FC). A dual flow air handling unit (AHU) is used for air renewal. The last part concerns energy management with the use of a predictive controller boarding one of the identified models.

This project intends to anticipate the control of long time response capacitive systems as floor heating through knowledge of future disturbances on a prediction horizon of a few hours (occupation, weather). A reactive control is ensured by the fan coil units. Predictive management is compared to more conventional management strategies in simulation and on-site with the demonstrator building.

The originality of this work is to propose a method for the establishment of a full control loop (controller/sensor/actuator) and demonstrate an interest in the predictive management of long response time systems in the building sector.

Keywords : building, reduced models, identification, systems, anticipative control.

Remerciements

Je voudrais profiter de cette page pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de façon directe ou indirecte à l'aboutissement de ce travail de thèse.

En premier lieu je tiens évidemment à remercier mes encadrants qui m'ont accompagné tout au long de ces trois années :

- **Alain SEMPEY** qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail de thèse après une première collaboration lors de mon stage de fin d'étude. Je le remercie pour la qualité et la rigueur de son encadrement ainsi que son support qui a été très précieux sur le plan humain et scientifique,
- **Laurent MORA** pour sa capacité à faire prendre du recul sur son propre travail grâce à son expérience et à sa vision globale du domaine du bâtiment, des remarques toujours justes et pertinentes,
- **Jean-Christophe BATSALE** qui a dirigé ma thèse et dont j'ai été le (discret) voisin de bureau, je le remercie pour m'avoir fait changer d'échelle avec la réflexion sur la maquette et avoir étendu mon champ de compétences à la thermographie infrarouge.

J'ai apprécié la liberté que vous m'avez laissé dans mon travail tout en sachant me guider au travers de nombreux « points thèse » qui ont permis à ma réflexion de progresser par sauts successifs.

Je tiens également à remercier les membres du jury à commencer par les rapporteurs **Benoit DELINCHANT** et **Gilles FRAISSE** pour le travail de relecture et l'analyse minutieuse des 220 pages de ce manuscrit. Je remercie vivement **Christian INARD** pour avoir accepté de présider le jury de thèse.

Mener à bien un travail de thèse requière de nombreuses compétences que l'on n'a pas forcément au départ. Ainsi, il faut les acquérir et un moyen efficace est parfois d'aller chercher la compétence dans les personnes. J'adresse donc un remerciement spécial à **Jérôme MALVESTIO** pour son appui extrêmement précieux sur la partie expérimentale de ce travail et pour les nombreuses heures passées ensemble perchés sur une échelle dans les faux-plafonds de la plateforme expérimentale.

Je voudrais également remercier les **partenaires du projet PRECISION** avec qui j'ai pu échanger et collaborer sur certaines thématiques de ce travail de thèse. Je remercie en particulier les équipes des sociétés **Vesta-System** et **Deltadore** pour leur appui sur la mise en place du contrôle prédictif.

De plus, j'ai pu dispenser des heures d'enseignement en parallèle de mon travail de thèse, à ce titre je souhaite remercier **toutes les personnes de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Bordeaux** avec qui j'ai pu travailler de près ou de loin.

Je remercie également **l'ensemble des personnes du laboratoire I2M** et du **département TREFLE** ainsi que les autres doctorants dont j'ai croisé la route : **Miguel, Marita, YingYing, Ludovic, Stéphanie, Youssef, Mehdi, Xabi, Mehrez, Tom, Charlotte, Yajie, Yibao** et **Jose Luis** mon super voisin de bureau.

Merci au cercle d'amis : **Simon, Flo, Tocayo, Théo, Quentin, Lucas, Astrid, Nelly.**

La thèse a aussi été l'occasion de faire de belles rencontres et d'élargir ce cercle : merci à **Jérémy** et **Maimouna** pour ces moments passés ensemble.

Je remercie **mes parents** pour leur soutien et l'éducation qu'ils ont su me donner sans laquelle je ne serai pas là à écrire ces lignes.

Je remercie les **Pyrénées**, qui furent pour moi un formidable exutoire.

Le mot de la fin sera pour **Elena**, mon inestimable partenaire de vie qui va bientôt arriver au bout d'un projet commun avec la naissance de notre progéniture, et ça promet !

Table des matières

RESUME.....	3
ABSTRACT.....	5
REMERCIEMENTS.....	7
TABLE DES MATIERES	10
LISTE DES FIGURES.....	14
LISTE DES TABLEAUX.....	19
NOMENCLATURE.....	20
Introduction	23
Chapitre I : Objectifs, contexte et démarche	25
1. OBJECTIFS.....	26
2. CONTEXTE GENERAL.....	28
2.1. Etat des lieux - Contexte mondialisé.....	28
2.2. Contexte énergétique et secteur du bâtiment en France	32
2.3. La régulation du chauffage dans le bâtiment	36
2.4. Contrôle anticipatif.....	40
3. CONTEXTE DU PROJET	43
4. DEMARCHE ET ORGANISATION DU MANUSCRIT.....	44
Chapitre II : Construction de modèles d'ordre réduit et réalisation de campagnes de mesures courtes en vue de faire du contrôle sur un bâtiment démonstrateur	47
1. LA MODELISATION POUR LE BATIMENT.....	48
1.1. Différents types de modèles.....	48
1.2. Obtention d'un modèle d'ordre réduit.....	51
1.2.1. Représentation d'état.....	51
1.2.2. Modèles obtenus par des techniques de réduction.....	52
1.2.3. Construction directe de modèles d'ordre réduit	55
2. PRESENTATION DE LA PLATEFORME SYNERGI ET DE SES SYSTEMES	61

2.1. Caractéristiques de l'enveloppe.....	61
2.1. Systèmes en présence	62
2.1.1. Centrale de traitement d'air double flux	63
2.1.2. Ventilo-convecteurs.....	64
2.1.3. Plancher chauffant.....	65
3. CAMPAGNES DE MESURES RAPIDES POUR L'IDENTIFICATION DE MODELES LEGERS DE BATIMENTS EN VUE DU CONTROLE.	66
3.1. Protocole expérimental	67
3.2. Représentativité de la mesure infrarouge	71
3.3. Résultats obtenus.....	72
3.3.1. Campagne 1 : plancher chauffant	72
3.3.2. Campagne 2 : rafraichissement nocturne	72
3.3.3. Campagne 3 : plancher chauffant et rafraichissement nocturne	73
3.4. Propositions de modèles pour l'identification et le contrôle	74
4. UTILISATION D'UNE MAQUETTE DE LABORATOIRE ECHELLE REDUITE COMME OUTIL D'EXPERIMENTATION RAPIDE POUR LA THERMIQUE DU BATIMENT	77
4.1. Construction du modèle réduit.....	79
4.1.1. Maquette cube	79
4.1.2. Passage à la maquette 2D	79
4.2. Modèle RC associé.....	81
4.3. Réalisation de campagnes de mesures	81
Chapitre III : Identification de modèles légers adaptés pour le contrôle	83
1. METHODE D'IDENTIFICATION	84
1.1. Critère de validité	85
1.2. Algorithme utilisé	85
2. ETUDE PRELIMINAIRE AVEC LA MAQUETTE	88
2.1. Validation de la méthode d'identification avec la maquette	88
2.2. Utilisation d'un modèle détaillé	90
2.3. Orienter l'identification	91
2.3.1. Par la mesure	91
2.3.2. Par la richesse des sollicitations	92
3. PEUT-ON UTILISER DIRECTEMENT DES MODELES/DONNEES DE CONCEPTION ?.....	93

3.1. Construction de modèles à partir de données de conception.....	93
3.2. Utilisation directe d'un modèle de conception.....	94
4. IDENTIFICATION DE MODELES POUR LA PLATEFORME SYNERGI.....	96
4.1. Identification à partir de résultats de simulations.....	96
4.2. Identification à partir de données mesurées.....	98
4.2.1. Analyse de sensibilité.....	99
4.2.2. Choix des paramètres initiaux et des conditions initiales.....	102
4.3. Résultats.....	104
4.4. Identification et sollicitations.....	106
4.5. Niveau de modélisation du plancher chauffant.....	109
4.5.1. Analyse temporelle.....	112
4.5.2. Analyse fréquentielle.....	112
4.6. Obtention d'un nouveau modèle.....	114
4.7. Orienter l'identification.....	118
4.7.1. Par la mesure.....	118
4.7.2. Par la richesse des sollicitations.....	119
4.8. Validation du modèle.....	122
4.8.1. Sur des sollicitations différentes.....	122
4.8.2. Dans des conditions de fonctionnement normales avec tous les systèmes.....	123
4.9. Modèle candidat pour le contrôleur prédictif.....	124
5. CONCLUSIONS.....	126
Chapitre IV : Contrôle optimal et anticipatif	129
1. TECHNIQUES DE REGULATIONS CLASSIQUES POUR LES SYSTEMES CAPACITIFS.....	130
2. LE CONTROLE PREDICTIF DANS LE BATIMENT.....	134
2.1. Principe.....	134
2.2. Etat de l'art.....	137
2.3. Contrôle anticipatif pour des planchers chauffants.....	144
3. STRATEGIES DE GESTION ET MISE EN APPLICATION DE LA BOUCLE DE CONTROLE COMPLETE SUR LA PLATEFORME DE DEMONSTRATION SYNERGI.....	147
3.1. Contrôleur de référence avec loi d'eau uniquement.....	148
3.1.1. Plancher chauffant.....	148
3.1.2. Ventilo-convecteurs.....	150

3.1.3. Centrale de traitement d'air	151
3.2. Contrôleur de référence avec ralenti de nuit et relance fixe	151
3.3. Contrôleur anticipatif	152
3.3.1. Données mesurées et actions sur les systèmes	154
3.3.2. Modèle interne	157
3.3.3. Logique de contrôle	163
4. COMPARAISON DES STRATEGIES DE CONTROLE POUR LA PLATEFORME SYNERGI.....	165
4.1. Critères d'évaluation.....	166
4.2. Simulation	168
4.2.1. Contrôleur de référence avec loi d'eau uniquement	168
4.2.2. Contrôleur de référence avec ralenti de nuit et relance fixe	169
4.2.3. Contrôleur anticipatif	169
4.2.4. Scénarios d'occupation et conditions extérieures utilisés	170
4.2.5. Analyse des résultats	172
4.2.6. Robustesse du contrôle prédictif et erreurs de prévision	175
4.3. Semi-empirique	176
4.3.1. Correction climatique entre les campagnes	179
4.3.2. Analyse des résultats	180
4.4. Expérimental.....	181
4.4.1. Résultats pour les deux stratégies de référence	181
4.4.2. Comparaison avec la simulation et la méthode semi-empirique	183
4.5. Potentiel des stratégies de contrôle anticipatives.....	185
Conclusions et perspectives	187
REFERENCES	190
ANNEXE A.....	204
ANNEXE B.....	207
ANNEXE C.....	208
ANNEXE D.....	212
ANNEXE E.....	214
ANNEXE F.....	216
ANNEXE G.....	218

Liste des figures

FIGURE 1 - <i>PERTES ENERGETIQUES DE LA PRODUCTION A LA CONSOMMATION</i>	28
FIGURE 2 - <i>MIX ENERGETIQUE EN ENERGIE PRIMAIRE DANS LE MONDE EN 2012</i> [10]	29
FIGURE 3 - <i>HISTORIQUE ET PREVISION DE LA PRODUCTION MONDIALE DE PETROLE JUSQU'EN 2050</i> [12].....	29
FIGURE 4 - <i>DONNEES RECUEILLIES PAR L'ANALYSE DES CAROTTES DE GLACE DE VOSTOK</i> [15].....	30
FIGURE 5 - <i>TENEUR EN CO₂ DES CAROTTES GLACIAIRES ANTARCTIQUES ET MESURES ATMOSPHERIQUES RECENTES (MAUNA Loa)</i> [16]	30
FIGURE 6 - <i>HISTORIQUE DES MESURES DE TEMPERATURES ET DE PRECIPITATIONS. LES PERIODES D'AVANCEES GLACIAIRES SONT EN GRIS FONCE, CELLE DE REcul EN GRIS CLAIR</i>	31
FIGURE 7 - <i>MODELE DE PREVISION DE LA FONTE DU GLACIER D'OSSOUE A PARTIR DE MESURE GPR (GROUND PENETRATING RADAR)</i>	31
FIGURE 8 - <i>PREVISION D'ELEVATION DE LA TEMPERATURE SELON LE GIEC</i> [21].....	31
FIGURE 9 - <i>REPRESENTATION DE L'ELEVATION DE LA TEMPERATURE ENTRE 1850 ET 2016 PAR ED HAWKINS</i>	31
FIGURE 10 - <i>ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE FINALE PAR SECTEUR EN FRANCE</i>	33
FIGURE 11 - <i>ÉVOLUTION DES EMISSIONS DE CO₂ PAR SECTEUR EN FRANCE</i>	33
FIGURE 12 - <i>PHOTOGRAPHIE DU PARC RESIDENTIEL EN 2011</i>	35
FIGURE 13 - <i>ÉVOLUTION DE LA REGLEMENTATION THERMIQUE</i>	35
FIGURE 14 - <i>ÉVOLUTION DES CONSOMMATIONS UNITAIRES DES RESIDENCES PRINCIPALES PAR USAGE</i>	36
FIGURE 15 - <i>ADAPTATION DE LA GTB AUX EVOLUTION DU BATIMENT</i>	37
FIGURE 16 - <i>ARCHITECTURE TYPE D'UNE INSTALLATION GTB</i>	37
FIGURE 17 - <i>REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES CONFIGURATIONS DE CHAUFFAGE USUELLES</i> [34]	39
FIGURE 18 - <i>ECONOMIE D'ENERGIE OBTENUE PAR LA REDUCTION DE LA CONSIGNE HORS OCCUPATION</i> [35]	40
FIGURE 19 - <i>ANTICIPATION DE LA RELANCE</i> [35]	40
FIGURE 20 - <i>NOMBRE D'ARTICLES TROUVES DANS LA BASE DE DONNEES SCOPUS AVEC LES MOTS CLES « BUILDING » ET « PREDICTIVE »</i> [38]	41
FIGURE 21 - <i>SCHEMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN CONTROLEUR PREDICTIF (LAMOUDI [39])</i>	41
FIGURE 22 - <i>MPC UTILISE DANS LE CADRE DU PROJET OPTICONTROL</i>	42
FIGURE 23 - <i>PRINCIPE DE REDUCTION D'UN MODELE D'ETAT MODAL</i> [67].....	53
FIGURE 24 - <i>MODELE 3R2C DE CRABB ET AL.</i>	57
FIGURE 25 - <i>MODELE 2R2C DE MADSEN ET HOLST</i>	57
FIGURE 26 - <i>MODELE 4R37C DE DENG ET AL.</i>	58
FIGURE 27 - <i>COMPORTEMENT TYPIQUE DU BATIMENT PRESENTE PAR KUMMERT ET ANDRE</i>	60
FIGURE 28 - <i>ANTICIPATION DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE PAR RETROACTION</i>	60
FIGURE 29 - <i>SALLE DE CONFERENCE AU DEUXIEME ETAGE DU BATIMENT DEMONSTRATEUR</i>	62
FIGURE 30 - <i>METRE DE LA PLATEFORME SYNERGI DE L'UT GENIE CIVIL CONSTRUCTION DURABLE DE BORDEAUX</i>	62

FIGURE 31 - <i>VUE DE LA SALLE DE CONFERENCE ET DES SYSTEMES EN PRESENCE</i>	63
FIGURE 32 - <i>DISPOSITION DES BOUCHES DE VENTILATION</i>	63
FIGURE 33 - <i>VOLET A CHAQUE BOUCHE DE SOUFFLAGE/REPRISE</i>	63
FIGURE 34 - <i>SONDE DE CO2</i>	63
FIGURE 35 - <i>CONE DE MESURE DES DEBITS DE SOUFFLAGE POUR LES BOUCHES A JETS HELICOÏDAL</i>	63
FIGURE 36 - <i>AUTORITE DES QUATRE BOUCHES DE LA SALLE SYNERGI</i>	64
FIGURE 37 - <i>MESURE DES DEBITS DE SOUFFLAGE SUR UNE UNITE VCV</i>	65
FIGURE 38 - <i>SCHEMA EN COUPE DU PLANCHER CHAUFFANT ET DE SA REGULATION</i>	65
FIGURE 39 - <i>SCHEMA DE PRINCIPE DES CAMPAGNES DE MESURES, GRANDEURS MESUREES ET FLUX EN PRESENCE</i>	68
FIGURE 40 - <i>CAPTEURS DE TEMPERATURE INTERIEURE FIXES AU MUR</i>	68
FIGURE 41 - <i>CAPTEUR DE TEMPERATURE QUE SE TROUVANT SUR LE TUYAU ALLER ET RETOUR DU PLANCHER CHAUFFANT</i>	68
FIGURE 42 - <i>DISPOSITIF DE MESURE INFRAROUGE EMPLOYE</i>	68
FIGURE 43 - <i>FLUX REELLEMENT REÇU A L'OBJECTIF DE LA CAMERA INFRAROUGE (FOKAIDES ET KALOGIROU [114])</i>	69
FIGURE 44 - <i>FACTEUR MOYEN DE TRANSMISSION ATMOSPHERIQUE EN FONCTION DE LA DISTANCE POUR UNE HUMIDITE RELATIVE A 50% [113]</i>	69
FIGURE 45 - <i>TEMPERATURES RELEVÉES SUR CHAQUE THERMOGRAMME</i>	70
FIGURE 46 - <i>SOLLICITATIONS DE LA CAMPAGNE 1</i>	72
FIGURE 47 - <i>DONNEES MESUREES LORS DE LA CAMPAGNE 1</i>	72
FIGURE 48 - <i>SOLLICITATIONS DE LA CAMPAGNE 2</i>	73
FIGURE 49 - <i>DONNEES MESUREES LORS DE LA CAMPAGNE 2</i>	73
FIGURE 50 - <i>SOLLICITATIONS DE LA CAMPAGNE 3</i>	74
FIGURE 51 - <i>DONNEES MESUREES LORS DE LA CAMPAGNE 3</i>	74
FIGURE 52 - <i>MODELISATION DE LA SALLE SYNERGI, MODELE A (A), MODELE B (B), MODELE C (C) ET REPRESENTATION SCHEMATIQUE (D)</i>	75
FIGURE 53 - <i>PROCEDURE DE CALCUL DES APPORTS SOLAIRES NETS UTILISES COMME DONNEE D'ENTREE DES MODELES RC</i>	77
FIGURE 54 - <i>MAQUETTE CONSTRUITE POUR TESTER DES STRATEGIES DE CONTROLE</i>	78
FIGURE 55 - <i>RENDU VISUEL DE L'INTERIEUR D'UNE MAQUETTE SOUS CIEL ARTIFICIEL</i>	78
FIGURE 56 - <i>MESURES SUR LA MAQUETTE 3D</i>	79
FIGURE 57 - <i>HETEROGENEITES THERMIQUES SUR LES FACES EXTERNES</i>	79
FIGURE 58 - <i>SCHEMA DE PRINCIPE DE L'UTILISATION DE LA MAQUETTE</i>	80
FIGURE 59 - <i>MODELE RC ASSOCIE A LA MAQUETTE</i>	80
FIGURE 60 - <i>SOLLICITATIONS EXPERIMENTALES DE LA MAQUETTE</i>	81
FIGURE 61 - <i>VUE GENERALE DE L'EXPERIENCE</i>	82
FIGURE 62 - <i>DETAIL DE LA MAQUETTE</i>	82
FIGURE 63 - <i>PRINCIPE GENERAL D'UNE PROCEDURE D'IDENTIFICATION</i>	85
FIGURE 64 - <i>PRINCIPE DE LA METHODE D'IDENTIFICATION UTILISEE</i>	86
FIGURE 65 - <i>PRINCIPE DE LA METHODE DES POINTS INTERIEURS</i>	87

FIGURE 66 - ANALOGIE ENTRE LA MAQUETTE ET LA PLATEFORME SYNERGI.....	88
FIGURE 67 - AMELIORATION OBTENUE ENTRE LE MODELE NON IDENTIFIE (HAUT) ET LE MODELE APRES IDENTIFICATION (BAS)	89
FIGURE 68 - MODELE DETAILLE POUR LA MAQUETTE.....	90
FIGURE 69 - IDENTIFICATION POUR LE MODELE DETAILLE DE LA MAQUETTE.....	90
FIGURE 70 - MODELE IDENTIFIE AVEC DEUX VARIABLES D'INTERET.....	91
FIGURE 71 - SOLLICITATION SBPA UTILISEE.....	92
FIGURE 72 - MODELE IDENTIFIE AVEC DES SOLLICITATIONS PLUS RICHES	92
FIGURE 73 - MODELISATION DANS L'ENVIRONNEMENT AMESIM.....	93
FIGURE 74 - TEMPERATURE INTERIEURE MESUREE ET EN SORTIE DU MODELE AMESIM.....	93
FIGURE 75 - ETAPES DE REDUCTION ET COUPLAGE [72]	95
FIGURE 76 - RESULTATS OBTENUS A PARTIR DU MODELE D'ETAT DE PLEIADES+COMFIE.....	95
FIGURE 77 - MODELE DE BATIMENT SIMPLIFIE UTILISE PAR CANDENEDO ET ATHIENITIS [136]	96
FIGURE 78 - IDENTIFICATION DU MODELE B A PARTIR D'UN MODELE DETAILLE PLEIADES+COMFIE.....	98
FIGURE 79 - MODELISATION DE LA SALLE SYNERGI, MODELE A (A), MODELE B (B), MODELE C (C) ET REPRESENTATION SCHEMATIQUE (D)	99
FIGURE 80 - DISCRETISATION DES PARAMETRES EN DEUX VALEURS MINIMUM ET MAXIMUM.....	100
FIGURE 81 - NATURE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES SELON LEUR POSITION SUR LE GRAPHE $\Sigma=F(M)$ (IOOSS [142]).....	101
FIGURE 82 - CLASSEMENT DES PARAMETRES PAR ORDRE D'IMPORTANCE AVEC LA METHODE DE MORRIS POUR LES MODELES A (A), MODELE B (B) ET MODELE C (C).....	102
FIGURE 83 - INFLUENCE DE LA CONDITION INITIALE SUR LE MODELE - APPLICATION AU MODELE B.....	103
FIGURE 84 - RESULTATS DE L'IDENTIFICATION A PARTIR DE LA CAMPAGNE 1 POUR LES MODELES A (A), MODELE B (B) ET MODELE C (C).....	105
FIGURE 85 - MODELISATION PAR ANALOGIE ELECTRIQUE D'UN PLANCHER CHAUFFANT FAITE PAR LIU ET AL.....	110
FIGURE 86 - PARTIE DU MODELE PROPOSE PAR LEHMANN ET AL. CORRESPONDANT AU PLANCHER CHAUFFANT.....	110
FIGURE 87 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE POUR LES CINQ MODELES DE PLANCHER	113
FIGURE 88 - PASSAGE DU MODELE D'ETAT A LA FONCTION DE TRANSFERT.....	113
FIGURE 89 - DIAGRAMME DE BODE DES MODELES DE PLANCHER CHAUFFANT.....	113
FIGURE 90 - SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT DU MODELE E.....	114
FIGURE 91 - COMPARAISON DE DONNEES MESUREES AU NIVEAU DE PLAQUES CHAUFFANTES DANS DIFFERENTES CONFIGURATION [153].....	115
FIGURE 92 - INFLUENCE DU COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBAL SUR L'IDENTIFICATION POUR LA CAMPAGNE 3	117
FIGURE 93 - EVOLUTION DU RISQUE D'ERREUR EN FONCTION DE LA COMPLEXITE DU MODELE	117
FIGURE 94 - IDENTIFICATION DU MODELE E PAR RAPPORT A LA TEMPERATURE INTERIEURE (Ti).....	118
FIGURE 95 - IDENTIFICATION DU MODELE E PAR RAPPORT A LA TEMPERATURE INTERIEURE (Ti) ET DE SURFACE DU PLANCHER (Ts)	119
FIGURE 96 - IDENTIFICATION PAR ETAPE AU REGARD DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE.....	121
FIGURE 97 - SOLLICITATIONS DE LA CAMPAGNE 4.....	122

FIGURE 98 - <i>DONNEES MESUREES LORS DE LA CAMPAGNE 4</i>	122
FIGURE 99 - <i>REPONSE DU MODELE E AVEC LA CAMPAGNE 4</i>	123
FIGURE 100 - <i>REPONSE DU MODELE E AVEC LA CAMPAGNE 5</i>	124
FIGURE 101 - <i>MODELE E FINAL CANDIDAT AU CONTROLE</i>	125
FIGURE 102 - <i>VALIDATION DE LA MODIFICATION DU MODELE E POUR LE CONTROLE</i>	125
FIGURE 103 - <i>DIFFERENCES RELEVES ENTRE DEUX CAPTEURS DE TEMPERATURE INTERIEURE</i>	127
FIGURE 104 - <i>EVOLUTION DES PARTS DE MARCHE DES ENERGIES DANS LES LOGEMENTS NEUFS</i>	130
FIGURE 105 - <i>LOI D'EAU</i>	131
FIGURE 106 - <i>INSTALLATION TYPIQUE DE PLANCHER CHAUFFANT [159]</i>	131
FIGURE 107 - <i>PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA REGULATION D'UN PLANCHER CHAUFFANT A LA RELANCE AVEC SONDE EXTERIEURE SEULE (A), SONDE EXTERIEURE ET THERMOSTAT D'AMBIANCE ON/OFF (B) SONDE EXTERIEURE ET THERMOSTAT D'AMBIANCE CHRONOPROPORTIONNEL (C), SONDE EXTERIEURE ET THERMOSTAT D'AMBIANCE MODULANT (D) [160]</i>	133
FIGURE 108 - <i>FONCTIONNEMENT D'UN CONTROLEUR MPC OU $m = p$ ET PRINCIPE D'HORIZON FUYANT</i>	137
FIGURE 109 - <i>RESULTATS DU RECENSEMENT EFFECTUE EN 1999 [169]</i>	138
FIGURE 110 - <i>RESULTAT DE L'ETUDE EFFECTUEE EN 2005 ET REPONSE AU SONDAGE</i>	138
FIGURE 111 - <i>BATIMENT MODELISE PAR KUMMER ET AL.</i>	140
FIGURE 112 - <i>APPROCHES : DECENTRALISEES (A), CENTRALISEE (B), DISTRIBUEE (C) UTILISEES PAR MOROSAN ET AL</i>	142
FIGURE 113 - <i>MPC AVEC UNE FONCTION COUT CLASSIQUE [179]</i>	142
FIGURE 114 - <i>SEQUENCE DE CONSIGNE DE TEMPERATURE PRECONISEE PAR NORME NF EN ISO 13790</i>	143
FIGURE 115 - <i>TYPE DE RELANCE SELON LES CONTRAINTES DE CONFORT ET DE COUT</i>	143
FIGURE 116 - <i>CONTROLE DU PLANCHER CHAUFFANT PAR UN MPC ET UNE LOI D'EAU [190]</i>	146
FIGURE 117 - <i>PRINCIPE DU PREMIER CONTROLEUR DE REFERENCE</i>	148
FIGURE 118 - <i>REGLAGE DE LA LOI D'EAU SUR LE LOGICIEL DE SUPERVISION PAR DEFAUT</i>	149
FIGURE 119 - <i>PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PID AUTO-ADAPTATIF</i>	149
FIGURE 120 - <i>SUIVI DE CONSIGNE AVEC UN PID AUTO-ADAPTATIF</i>	150
FIGURE 121 - <i>REGLAGE DE LA CONSIGNE ET FORÇAGE DU DECALAGE DES VCV</i>	151
FIGURE 122 - <i>FORÇAGE DE LA CTA AVEC LA SUPERVISION PAR DEFAUT</i>	151
FIGURE 123 - <i>PRINCIPE DU SECOND CONTROLEUR DE REFERENCE</i>	152
FIGURE 124 - <i>ARCHITECTURE DE LA CHAINE DE CONTROLE POUR LA PLATEFORME SYNERGI</i>	153
FIGURE 125 - <i>PHOTOGRAPHIE DE L'INSTALLATION AU NIVEAU DE L'ARMOIRE ELECTRIQUE</i>	154
FIGURE 126 - <i>PHOTOGRAPHIE DE L'INSTALLATION AU NIVEAU DES ACTIONNEURS DES VENTIL-CONVECTEURS</i>	154
FIGURE 127 - <i>PLACEMENT DES CAPTEURS</i>	156
FIGURE 128 - <i>REPRESENTATION SCHEMATIQUE</i>	157
FIGURE 129 - <i>MODELE E MODIFIE ET MESURES ASSOCIEES POUR LE CONTROLE</i>	157
FIGURE 130 - <i>CAPTEUR DE TEMPERATURE PLACE AU NIVEAU DE LA GRILLE DE REPRISE D'UN VCV</i>	158
FIGURE 131 - <i>ATTENUATION DES APPORTS SOLAIRES PAR LES BRISES SOLEIL</i>	158

FIGURE 132 - <i>CALCUL DU FACTEUR SOLAIRE EQUIVALENT POUR LA PRISE EN COMPTE DES BRISES SOLEIL</i>	159
FIGURE 133 - <i>VALIDATION DE LA METHODE DU FACTEUR SOLAIRE EQUIVALENT</i>	160
FIGURE 134 - <i>COMPOSITION DU MODELE DE CONTROLE PREDICTIF DANS L'OUTIL VESTAENERGY STUDIO</i>	161
FIGURE 135 - <i>TESTS DE GENERATION DE PLAN DE COMMANDE OPTIMALE. MINIMISATION DE L'ENERGIE UNIQUEMENT (A), TEMPERATURE INTERIEURE CONTRAINTE UNIQUEMENT (B), MINIMISATION DE L'ENERGIE ET TEMPERATURE INTERIEURE CONTRAINTE (C)</i>	162
FIGURE 136 - <i>CONTROLEUR PID EXTERNE POUR APPLICATION DU PLAN OPTIMAL</i>	162
FIGURE 137 - <i>PRINCIPE DU CONTROLEUR ANTICIPATIF</i>	163
FIGURE 138 - <i>METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR MONTRER UN INTERET AU CONTROLE PREDICTIF</i>	166
FIGURE 139 - <i>DETERMINATION DE LA LOI D'EAU POUR LE CONTROLEUR DE REFERENCE 1</i>	169
FIGURE 140 - <i>DETERMINATION DE LA LOI D'EAU POUR LE CONTROLEUR DE REFERENCE 2</i>	169
FIGURE 141 - <i>PARAMETRAGE DU MPC AVEC LA TOOLBOX MPC</i>	170
FIGURE 142 - <i>SIMULATION DU COMPORTEMENT DU CONTROLEUR PREDICTIF AVEC LA TOOLBOX MPC</i>	170
FIGURE 143 - <i>TEMPERATURE MOYENNE ET ENSOLEILLEMENT MENSUEL MOYENNES SUR 5 ANS (HAUT), DJU ET ENSOLEILLEMENT ANNUEL POUR LES TROIS VILLES (BAS)</i>	171
FIGURE 144 - <i>COMPARAISON INTERCLIMAT DES STRATEGIES DE CONTROLE</i>	172
FIGURE 145 - <i>MOYENNE SUR LES TROIS CLIMATS DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE UTILE MENSUELLES ET REPARTITION DES ECONOMIES RELATIVES (%) ET ABSOLUES (kWh) REALISEES AVEC LE CONTROLE PREDICTIF</i>	173
FIGURE 146 - <i>FOCUS SUR LE COMPORTEMENT DES TROIS TYPES DE CONTROLEURS POUR UNE SEMAINE FROIDE ET UNE SEMAINE EN INTERSAISON</i>	174
FIGURE 147 - <i>ROBUSTESSE DU MODELE AUX ERREURS DE PREVISION</i>	176
FIGURE 148 - <i>RESULTATS SEMI-EMPIRIQUES DU PREMIER CONTROLEUR DE REFERENCE</i>	177
FIGURE 149 - <i>RESULTATS SEMI-EMPIRIQUES DU SECOND CONTROLEUR DE REFERENCE</i>	178
FIGURE 150 - <i>RESULTATS SEMI-EMPIRIQUES DU CONTROLEUR PREDICTIF</i>	178
FIGURE 151 - <i>DEGRES-HEURES ET APPORTS POUR EFFECTUER LA CORRECTION CLIMATIQUE</i>	180
FIGURE 152 - <i>CONSOMMATIONS ENERGETIQUES CORRIGES ET TAUX D'INCONFORT POUR LA METHODE SEMI-EMPIRIQUE</i>	180
FIGURE 153 - <i>RESULTATS EXPERIMENTAUX DU PREMIER CONTROLEUR DE REFERENCE</i>	182
FIGURE 154 - <i>RESULTATS EXPERIMENTAUX DU SECOND CONTROLEUR DE REFERENCE</i>	182
FIGURE 155 - <i>COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET L'EXPERIMENTATION</i>	184
FIGURE 156 - <i>IDENTIFICATION SEPARÉE DU MODELE E</i>	214
FIGURE 157 - <i>RESULTAT POUR LE MODELE E ASSEMBLE</i>	215

Liste des tableaux

TABLEAU 1 - POSITIONNEMENT PAR RAPPORT A D'AUTRES PROJETS ANR [43]	43
TABLEAU 2 - CLASSIFICATION DES DIFFERENTS TYPES DE MODELES ET INTERET (BERTHOU [60])	49
TABLEAU 3 - VALEURS DES CRITERES DE REDUCTION POUR CHACUNE DES METHODES	54
TABLEAU 4 - VALEURS DES CRITERES DE REDUCTION POUR CHACUNE DES METHODES	54
TABLEAU 5 - EQUIVALENCE ENTRE LES GRANDEURS THERMIQUES ET ELECTRIQUES (CORREYON [76])	55
TABLEAU 6 - UTILISATION DE MODELES RC POUR LA THERMIQUE DU BATIMENT	56
TABLEAU 7 - UTILISATION DE MODELES RC POUR LE CONTROLE PREDICTIF DANS LE BATIMENT	59
TABLEAU 8 - DEBITS MESURES A L'AIDE DU CONE EN FONCTION DU MODE DE VITESSE	65
TABLEAU 9 - COMMANDES ASSOCIEES AUX SYSTEMES EN PRESENCE	67
TABLEAU 10 - CARTOGRAPHIE INFRAROUGE DU PLANCHER CHAUFFANT ET VERIFICATION DE LA REPRESENTATIVITE DE LA ZONE ETUDIEE	71
TABLEAU 11 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX DE LA MAQUETTE	80
TABLEAU 12 - QUALITE DU MODELE ET FACTEUR A OBSERVER	85
TABLEAU 13 - JEU DE PARAMETRES INITIAL ET IDENTIFIE POUR LE MODELE DE LA MAQUETTE	88
TABLEAU 14 - JEU DE PARAMETRE INITIAL ET CONDITIONS INITIALES	104
TABLEAU 15 - JEU DE PARAMETRES OPTIMAL POUR CHACUN DES MODELES ET POUR LA CAMPAGNE 1	105
TABLEAU 16 - RESULTATS DES IDENTIFICATIONS SUCCESSIVES EN TERMES DE DYNAMIQUE ET DE REPARTITION DES ERREURS MODELE/MESURE	108
TABLEAU 17 - MODELES PROPOSES POUR LE PLANCHER CHAUFFANT	111
TABLEAU 18 - COMPARAISON DES MODELES AVEC LA MESURE EN TERME D'ERREUR MAXIMALE ET D'ERREUR MOYENNE	112
TABLEAU 19 - COEFFICIENT D'ECHANGE CONVECTIF POUR UN PLANCHER CHAUFFANT	116
TABLEAU 20 - IDENTIFICATION AVEC L'ANALYSE DE SENSIBILITE	120
TABLEAU 21 - VALEURS RETENUES POUR LE MODELE E	121
TABLEAU 22 - BIBLIOGRAPHIE PRESENTANT UNE APPLICATION DE CONTROLE PREDICTIF POUR LE CHAUFFAGE	140
TABLEAU 23 - PUBLICATIONS TRAITANT DE CONTROLE ANTICIPATIF POUR UN PLANCHER CHAUFFANT	145
TABLEAU 24 - PROGRAMMATION HORAIRE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE [189]	145
TABLEAU 25 - PROGRAMMATION DE LA POMPE DU PLANCHER CHAUFFANT POUR LE PREMIER CONTROLEUR DE REFERENCE	149
TABLEAU 26 - PROGRAMMATION DE L'OCCUPATION POUR LES VCV	151
TABLEAU 27 - PROGRAMMATION DE LA POMPE DU PLANCHER CHAUFFANT POUR LE SECOND CONTROLEUR DE REFERENCE	151
TABLEAU 28 - CAPTEURS ET ACTIONNEURS	155

Nomenclature

Abréviations

ANN	Artificial Neural Network	PID	Proportionnelle Intégrale Dérivée
AR	Auto Regressive	PMV	Predicted Mean Vote
BEPOS	Bâtiment à Energie POSitive	POD	Proper Orthogonal Decomposition
BMS	Building Management System	PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
CTA	Centrale de Traitement d'Air	RE	Réalisation Equilibrée
eff	Efficacité de l'échangeur	RIC	Relative Information Content
GTB	Gestion Technique du Bâtiment	RT	Réglementation Thermique
IHM	Interface Homme-Machine	SVD	Singular Value Decomposition
MA	Moving Average	Tep	Tonne équivalent pétrole
MPC	Model Predictive Control	VCV	Ventilo-ConVecteur
PAC	Pompe A Chaleur		

Lettres latines

A	Apports	[W]	P	Puissance	[W]
C	Capacité thermique	[J/K]	P	Paramètre	[-]
C_{ep}	Consommation d'énergie primaire	[kWh]	Q_v	Débit volumique	[m ³ /h]
c_p	Capacité calorifique massique	[J/(kg.K)]	r	Consigne	[-]
E	Energie	[J]	R	Résistance thermique	[m ² .K/W]
h	Coefficient d'échange surfacique	[W/(m ² .K)]	S	Surface	[m ²]
Dh	Degrés-heures	[°C.h]	T	Température	[K]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]	U	Vecteur de commande	[-]
M_c	Matrice de commandabilité	[-]	V	Vitesse	[m/s]
M_o	Matrice d'observabilité	[-]	Y	Vecteur des sorties	[-]

Lettres grecques

α	Facteur solaire	[-]	ϕ	Flux thermique surfacique	[W/m ²]
ε	Emissivité	[-]	τ	Coefficient de transmission	[-]
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	[W/(m ² .K ⁴)]			

Indices

app	appareil	me	mur extérieur
atm	atmosphère	MOE	modèle d'ordre élevée
cond	conduction	MOR	modèle d'ordre réduit
conv	convection	obj	object
d	dalle	occ	occupant
dp	départ plancher	pl	plancher
e	extérieur	rad	radiatif
env	environnement	ref	référence
ep	énergie primaire	rp	retour plancher
g	gains	s	solaire
i	intérieur	si	superficielle intérieure
m	mur	surf	surface
mi	mur intérieur	surfapp	surface apparente

Introduction

L'utilisation massive d'énergies fossiles depuis la révolution industrielle est à l'origine de dérèglements climatiques majeurs dont les effets sont visibles de nos jours. De plus, les chocs pétroliers de 1973, 1979 et plus récemment en 2008, incitent les décideurs à légiférer pour tendre vers plus de sobriété énergétique et encourager le développement d'énergies alternatives. Les mesures de réduction de la consommation d'énergie se font ainsi en priorité sur les secteurs les plus énergivores. En France le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le premier contributeur en terme de consommation d'énergie et le troisième émetteur de Gaz à Effet de Serre (GES). Cette consommation d'énergie importante est en partie liée à l'utilisation du chauffage qui dépend principalement du niveau d'isolation thermique. La réduction des dépenses liées au chauffage passe donc par la rénovation des bâtiments existants et par des exigences de performances minimales pour les bâtiments neufs. En France, cette quête de performance est incarnée par l'entrée en vigueur en 1974 de la première réglementation thermique qui définit le niveau de performance pour la construction neuve. A partir de 2008, une autre réglementation thermique encadre celui des bâtiments existants pour les opérations de rénovation. Les réglementations thermiques successives imposent des niveaux de performance toujours plus importants qui sont rendus possibles par le développement de nouveaux matériaux et de systèmes énergétiques efficaces.

L'utilisation du chauffage permet de maintenir une situation de confort pour les personnes se trouvant dans le bâtiment. Ainsi la consommation du système de chauffage est directement liée à l'occupation. Les bâtiments sont en très grande majorité occupés de façon intermittente : un moyen simple de réduire la dépense énergétique est alors de minimiser l'utilisation du chauffage lorsqu'il n'y a personne. Ainsi des techniques de contrôle sont utilisées pour gérer cette intermittence de fonctionnement du système de chauffage. Cela se fait généralement par un thermostat qui permet de suivre une consigne de température de la pièce dont la valeur est abaissée lors des périodes d'inoccupation et remontée à une valeur de confort lors des périodes d'occupation. Ce type de régulation est donc généralement établi sur un scénario défini par l'utilisateur et invariable tout au long de la saison de chauffe. Ces travaux de thèse proposent d'appliquer une technique de contrôle avancée basée sur l'anticipation de l'occupation et des conditions extérieures à venir. En effet, le déploiement d'une telle régulation dite « prédictive » dans le bâtiment est rendu possible grâce aux progrès dans la miniaturisation des contrôleurs, à la disponibilité d'une puissance de calcul toujours plus grande sur site ou délocalisée sur le cloud et à la démocratisation de la domotique. L'objectif

est d'évaluer s'il existe un potentiel d'économie d'énergie via le déploiement d'un tel contrôleur et le cas échéant de tenter de le chiffrer sur un cas d'application réel.

Ainsi, le premier chapitre présente le contexte de ces travaux de thèse et montre les évolutions réglementaires et technologiques qui rendent possible l'utilisation de techniques de contrôle avancées. Le deuxième chapitre introduit l'utilisation d'un modèle léger nécessaire au fonctionnement d'un contrôleur prédictif. Le bâtiment démonstrateur SYNERGI (SYstèmes eNERGétiques Innovants) qui sert de support au projet est également présenté dans ce chapitre. De plus, des résultats de campagnes de mesures y sont exposés. Le troisième chapitre propose une méthode pour obtenir un modèle représentatif du bâtiment à contrôler. Elle fait intervenir un algorithme d'identification de paramètres et utilise les résultats de campagnes de mesures spécifiquement réalisées dans ce but. Le quatrième et dernier chapitre permet de mettre en application le contrôleur prédictif avec le modèle candidat sur le bâtiment démonstrateur. Des comparaisons avec des techniques de régulations plus classiques sont effectuées en simulation et in situ afin de dégager un potentiel.

Chapitre I : Objectifs, contexte et démarche

Ce chapitre précise les objectifs de ces travaux de thèse et la démarche adoptée pour montrer l'intérêt d'un contrôleur prédictif pour le pilotage de systèmes de chauffage dans le bâtiment. Le contexte énergétique mondial est présenté et un focus est fait sur le cas de la France. Cette partie présente les modes de régulation du chauffage dans le bâtiment et introduit la notion de contrôle anticipatif. Une vue générale de ces travaux de thèse est proposée avec un schéma synoptique.

1. Objectifs

La réhabilitation énergétique des bâtiments est au cœur des politiques environnementales. Pour les bâtiments neufs la recherche de performance énergétique se fait généralement en phase de conception et est encadrée en France par la réglementation thermique en vigueur. Bien que liées à la conception, les dépenses énergétiques dépendent de l'usage.

Le bâtiment est un système énergétique complexe instationnaire. Plus la performance est grande, plus les couplages sont importants avec les usagers et l'environnement extérieur. Ainsi des écarts importants sont constatés entre les consommations prévues en simulation et mesurées (jusqu'à 200%) à cause d'erreurs sur les données d'entrée, les scénarios d'occupation ou les conditions environnementales ; on parle de « performance gap » (*IEA* [1], *Bonte* [2]). La plupart des projets de recherche portant sur l'explication du performance gap s'accordent sur le fait qu'il est principalement dû à la difficulté de prise en compte des occupants. Dans ce contexte, le pilotage du bâtiment en fonction de l'occupation passée et à venir est une voie d'étude intéressante. Cependant les modes de gestions classiques sont incapables de s'adapter à l'évolution du bâtiment (dégradations, changement d'usage, phénomènes météorologiques, mix énergétique) si ce n'est de façon réactive. Un pilotage anticipatif / prédictif, qui embarque un modèle du bâtiment et des systèmes permet de lever ces verrous mais nécessite un calibrage par des mesures in situ qui servent également pour le suivi et le pilotage. Ainsi ces travaux s'intéressent à l'utilisation de données mesurées pour le développement et la validation de modèles légers en vue d'une application pour le pilotage optimal des équipements de chauffage. De nombreux travaux en ont montré l'intérêt (*Freire et al.* [3], *Le et al.* [4], *Lepore et al.* [5]).

En France, le chauffage représente le premier poste de dépense énergétique dans le bâtiment avec 60% des consommations énergétiques pour le secteur résidentiel-tertiaire [6]. Classiquement, le pilotage du chauffage se fait par un thermostat programmable associé à des systèmes ayant un temps de réponse court (convecteur électrique, ventilo-convecteur, plinthe électrique). Pour ceux qui ont un temps de réponse long comme les planchers chauffants, la régulation se fait sur la température de départ au travers d'une loi d'eau. Il est assez courant de ne pas programmer de ralenti pour ce type d'installation. Dans ces conditions un système d'appoint est souvent nécessaire pour ajuster la température intérieure. Dans le cas de locaux à occupation intermittente (tertiaire, enseignement), le système à long temps de réponse peut néanmoins être programmé pour se lancer en avance par rapport aux périodes d'occupation. Cette durée de relance est alors fixe et estimée par l'utilisateur pour que la consigne soit atteinte en début d'occupation. Or, elle varie car elle est fonction des conditions extérieures et intérieures. Une relance trop rapide entraîne une surconsommation du système tandis qu'une relance trop lente conduit à une surconsommation de l'appoint ainsi qu'une situation d'inconfort. L'utilisation d'un contrôleur prédictif permet de palier ces problèmes (*Morosan* [7]).

Un contrôleur prédictif à modèle interne (MPC) nécessite d'embarquer un modèle du système à contrôler. Pour être compatible avec du contrôle en temps réel, il doit être léger et donc respecter le principe de parcimonie (*Mejri* [8]). Le préalable à l'utilisation d'un tel contrôleur est donc la validation d'un modèle. Elle peut se faire en utilisant des données mesurées sur le bâtiment dont l'ambiance doit être

contrôlée. Il faut donc déterminer une concordance entre les mesures à utiliser et le modèle et ainsi chercher à mesurer pour mieux piloter. Le choix s'est porté sur l'utilisation de modèles de type « boîte grise » dont les paramètres sont identifiés à partir de données acquises lors de campagnes de mesures courtes à l'échelle de temps d'un bâtiment (quelques jours). L'objectif final est de montrer s'il existe un potentiel d'économie d'énergie important lié à l'utilisation d'un contrôleur prédictif pour des systèmes capacitifs tel que le plancher chauffant du bâtiment démonstrateur.

Ce manuscrit présente la démarche quant au choix du type de modèle et de son niveau de complexité. Différentes mesures sont réalisées in situ de façon à déterminer si la mesure permet un meilleur pilotage des équipements de chauffage. Les données mesurées peuvent être utilisées soit pour connaître le bâtiment dans un but de modélisation et ainsi générer de la connaissance, soit pour piloter le système dans une logique de régulation. Les capteurs utilisés ne sont pas forcément les mêmes dans les deux cas. En effet, un nombre important de capteurs peut être nécessaire pour la phase de modélisation alors qu'un nombre moins important de capteurs peut être suffisant pour la régulation au quotidien. Dans une approche de régulation classique, les systèmes sont pilotés par une seule sonde avec une régulation en boucle fermée. Dans le cas présent avec des stratégies de type anticipatives il est nécessaire que la régulation se rapporte à un modèle physique décrivant le comportement du bâtiment et de ses systèmes. Pendant la durée de vie du bâtiment, les capteurs comme les modèles fournissent des informations au système de gestion. Ces travaux posent donc la question de l'instrumentation à utiliser et des grandeurs physiques d'intérêt à mesurer.

L'originalité de ces travaux est liée au contrôle d'un système capacitif difficile à piloter et faisant intervenir une stratégie de caractérisation de sa dynamique. La modélisation du bâtiment et l'identification de modèles ont une base théorique solide mais leur application pour le contrôle d'un bâtiment réel reste un défi important. Bien que le pilotage optimal et le contrôle soit un objectif majeur du projet, le parti pris est de traiter le sujet avec une approche d'énergéticien du bâtiment dans le sens où la recherche est toujours centrée sur l'analyse de la connaissance physique du bâtiment pour satisfaire aux objectifs de confort et d'économie d'énergie.

Résumé

En France le chauffage représente le premier poste de consommation d'énergie dans le bâtiment. Pour les systèmes de chauffage capacitifs, un pilotage prédictif exploitant l'inertie pourrait présenter un levier d'économie d'énergie intéressant dont on se propose de chiffrer le potentiel.

2. Contexte général

2.1. Etat des lieux - Contexte mondialisé

Avant la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle, l'essentiel de l'énergie provenait de la force humaine, de la traction animale, de l'action du vent ou de l'eau. Aujourd'hui dans les pays développés une grande partie de nos activités est fondée et permise par l'utilisation de machines ou d'appareils nécessitant d'être alimentés en énergie. Une part de ces consommations énergétiques est « visible » car elle est payée directement par l'utilisateur : c'est le carburant que nous mettons dans la voiture, l'électricité qui nous éclaire ou le gaz qui nous chauffe. Cependant la majeure partie de l'énergie que nous utilisons est invisible puisqu'elle est contenue dans le procédé de fabrication de tous les biens de consommation courante. Ainsi, tout produit manufacturé, comme alimentaire, présente un coût énergétique caché. Pour illustrer cette dépendance à l'énergie, J. M. Jancovici introduit la notion d'« esclave énergétique [9] ». Par des calculs simples reposant sur l'estimation de l'énergie que peut fournir un homme avec sa force propre, il estime qu'un européen dispose de l'équivalent de 400 esclaves énergétiques pour réaliser l'ensemble des services liés à son mode de vie (alimentation, transport, logement, biens matériels).

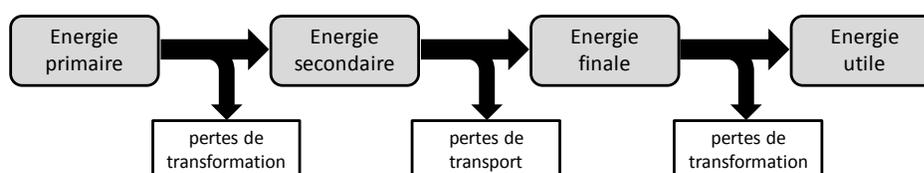


Figure 1 - *Pertes énergétiques de la production à la consommation*

Les consommations énergétiques réglementaires sont exprimées en « énergie primaire » représentant la dépense énergétique réelle pour assurer un service. Seule une partie de cette énergie est effectivement utilisée puisqu'un pourcentage de l'énergie primaire est perdue au cours du procédé de transformation. L'énergie restante dite « secondaire » subit également une perte du transport ne restant que l'« énergie finale » qui est distribuée et facturée à l'utilisateur. Enfin, une partie de cette énergie finale est perdue selon le rendement de l'appareil qui fournit une « énergie utile » (**Figure 1**). Ces transformations sont propres à chaque source d'énergie et à chaque procédé. Par exemple dans le cas de la production d'électricité avec une centrale nucléaire, le rendement est de 33% entre l'énergie thermique libérée par la réaction du combustible nucléaire (primaire) et l'électricité produite (secondaire) [10]. Les pertes en lignes dues au réseau électrique dépendent de la distance et de la tension. Une étude menée par ERDF avance le chiffre de 10% de pertes dues au transport de l'électricité entre le lieu de production et celui de consommation [11]. L'énergie finale restante alimente les appareils électriques dont les rendements sont très variables (ampoule incandescente 5%, radiateur électrique direct proche de 100%).

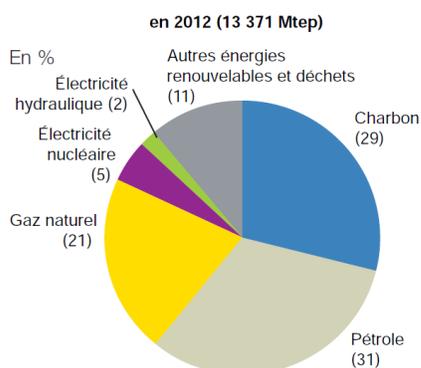


Figure 2 - Mix énergétique en énergie primaire dans le monde en 2012 [10]

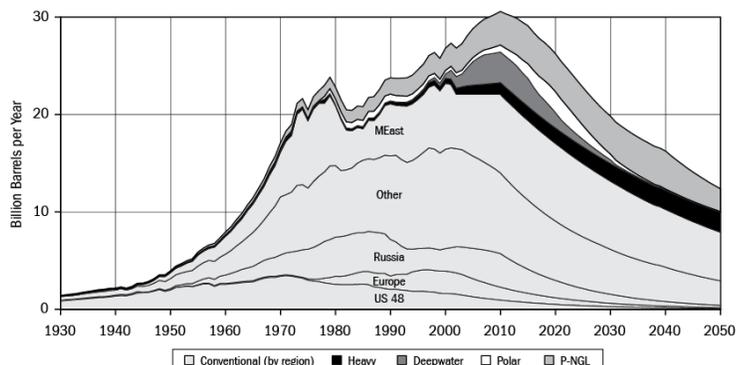


Figure 3 - Historique et prévision de la production mondiale de pétrole jusqu'en 2050 [12]

A l'échelle mondiale, la consommation en énergie primaire était estimée à 13 371 Mtep en 2012 [13] (Figure 2). L'unité de tonne-équivalent-pétrole (tep) permet de mettre sur une même échelle tout type d'énergie. Les énergies d'origine fossile représentent 81% de l'approvisionnement mondial, le nucléaire 5% et les énergies renouvelables 13% (dont 2% d'énergie hydraulique). Le modèle de développement suivi jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle est fondé sur une énergie abondante et bon marché. L'économie capitaliste qui s'est imposée au monde repose sur la croissance et sur la dynamique soutenue de la demande des biens de consommation auxquelles est corrélée la demande énergétique. L'accroissement de la population mondiale combinée à l'émergence de nombreux pays qui tendent vers ce modèle font grimper la demande énergétique mondiale. A titre de comparaison elle était de 5 528 Mtep en 1971.

Cependant, ce modèle de développement est remis en question car il se heurte à deux problèmes. Tout d'abord, celui de la raréfaction avérée des ressources fossiles mettant fin à l'hypothèse de disponibilité d'énergie peu coûteuse et abondante. Les ressources fossiles constituent un stock largement exploité et dont le pic de production prédit par *Hubbert* [14] en 1956 est vraisemblablement atteint (Figure 3). Ainsi la production de pétrole ne peut plus être corrélée à la croissance mondiale ce qui met le marché en tension et tend à faire augmenter les prix sur le long terme. Le second problème identifié est l'impact de ce modèle de développement sur l'environnement, en grande partie lié à la combustion d'énergies fossiles depuis plus d'un siècle qui a engendré la libération massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La conséquence est un réchauffement global dont les nombreux effets sont déjà visibles. La modification du climat entraîne la multiplication de phénomènes extrêmes : sécheresse, inondation, feux de forêt, tempête/ouragan. La fonte des glaces entraîne une montée du niveau de la mer ce qui met en tension les zones côtières fortement peuplées et fait apparaître une nouvelle notion, celle de refuge climatique. Les glaciers sont de très bons indicateurs du changement climatique. En 1998 un forage profond de 3,6 km (forage Vostok) a été effectué dans la calotte glaciaire de l'Antarctique et a permis d'extraire des glaces vieilles de 420 000 ans. Les carottes de glace renferment de l'air et constituent une archive climatique (Figure 4). Leur analyse a permis de retracer l'évolution de la concentration de certaines espèces chimiques présentes dans l'atmosphère jusqu'à nos jours [17].

Il apparaît clairement que la concentration de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) sont corrélées à l'élévation de la température et que leur concentration est naturellement bornée ce qui suggère un phénomène naturel autorégulé puisque l'atmosphère est un système fermé. Le pic de concentration de CO_2 constaté depuis 1850 paraît donc lié à une perturbation d'origine anthropique (**Figure 5**). De plus, les glaciers sont également des indicateurs visuels et font l'objet d'un suivi mondial à travers la base de donnée *WGMS* [18]. Contrairement aux calottes glacières de l'Antarctique, les glaciers de montagne sont soumis à un écoulement important sous l'effet de la pente et de leur propre poids, la glace se régénère de façon périodique et ne permet pas un grand recul dans le temps. Un glacier se forme par accumulation de neige qui par tassement se transforme en glace. Il est alimenté en partie haute où l'accumulation est supérieure à la fonte (zone d'accumulation) puis fond en partie basse où la fonte est supérieure à l'accumulation (zone d'ablation). La limite entre ces deux zones conditionne l'évolution d'un glacier et dépend de la température de l'air tandis que l'accumulation dépend des précipitations. L'exemple des glaciers Pyrénéens est intéressant puisque ce sont les plus méridionaux d'Europe ce qui les rendent particulièrement sensibles aux variations de température. A titre de comparaison la surface englacée des Pyrénées a diminué de 80% depuis 1850 (petit âge glaciaire) contre 40% pour les Alpes sur la même période [19]. La fonte n'est pas tant liée à un déficit en neige (**Figure 6**) mais bien à une augmentation des températures pour des glaciers qui sont déjà à la limite même de leurs conditions d'existence. Des travaux récents [20] menés sur le glacier d'Ossoue, situé dans le massif du Vignemale, prédisent une disparition totale des glaciers pyrénéens d'ici 50 ans (**Figure 7**).

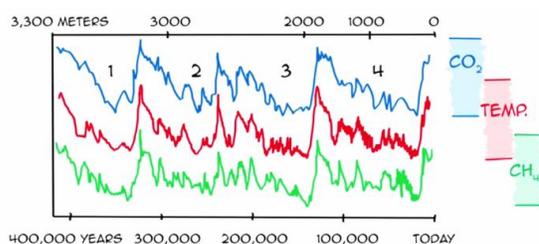


Figure 4 - Données recueillies par l'analyse des carottes de glace de Vostok [15]

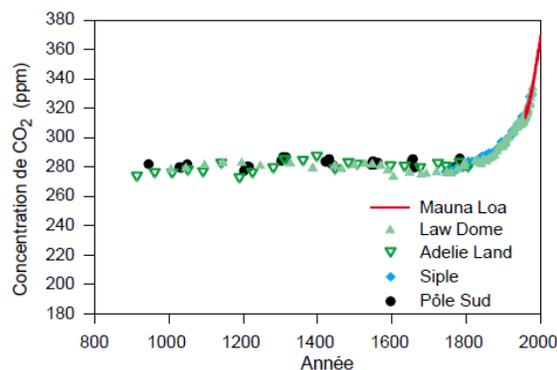


Figure 5 - Teneur en CO_2 des carottes glaciaires antarctiques et mesures atmosphériques récentes (Mauna Loa) [16]

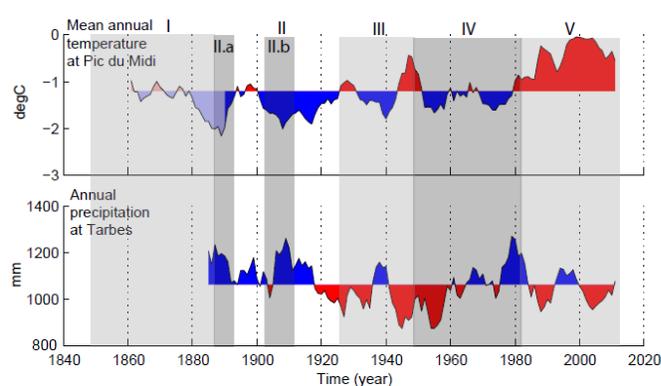


Figure 6 - Historique des mesures de températures et de précipitations. Les périodes d'avancées glaciaires sont en gris foncé, celle de recul en gris clair

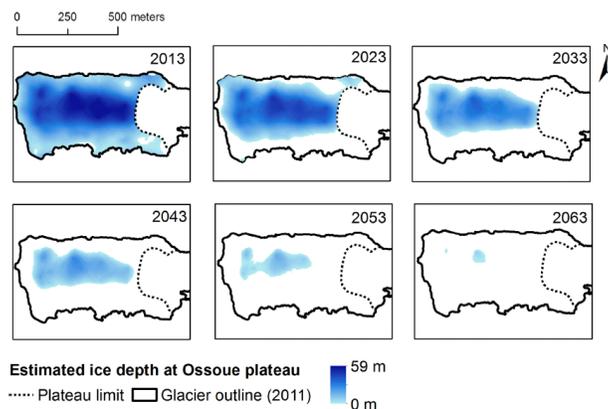


Figure 7 - Modèle de prévision de la fonte du glacier d'Ossoue à partir de mesure GPR (Ground Penetrating Radar)

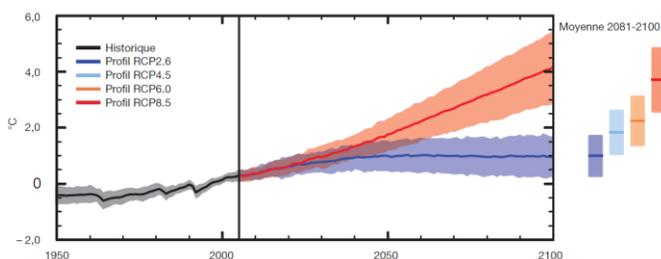


Figure 8 - Prévion d'élévation de la température selon le GIEC [21]

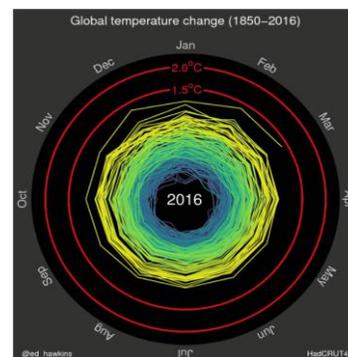


Figure 9 - Représentation de l'élévation de la température entre 1850 et 2016 par Ed Hawkins

La prise de conscience du problème climatique s'est amorcée au début des années 1990 notamment grâce aux travaux du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). Il est ouvert aux pays membres de l'ONU et se base sur l'ensemble des publications scientifiques du domaine afin d'éditer des rapports d'évaluation dont une version est soumise aux décideurs de ce monde. Depuis sa création en 1988, cinq rapports mettent en avant les perspectives d'évolution de la température du globe en fonction de différents scénarios sur les émissions des gaz à effet de serre (**Figure 8**). Le cas le plus optimiste fait état d'une élévation de 1°C en 2100 par rapport à 1990 et de 4°C pour le cas le plus pessimiste. Il est à noter qu'une élévation de 1,5°C a déjà été constatée par rapport à 1850 (**Figure 9**).

La première initiative pour la protection de l'environnement à l'échelle mondiale a été la création d'un Sommet de la Terre en 1972 par l'ONU. Cependant, la prise de conscience du problème climatique n'a réellement eu lieu que dans les années 1990 et c'est généralement le sommet de Rio en 1992 qui est retenu car c'est le premier à avoir réellement impulsé une dynamique mondiale en matière de protection de

l'environnement. En effet, il a permis la signature du protocole de Kyoto en 1997 qui est le premier accord international contraignant signé. Bien qu'historique, il a en réalité très peu d'effets puisque les grands pays émetteurs de gaz à effet de serre tels que les Etats-Unis, la Russie, le Canada et le Japon ne l'ont pas ratifié. De plus, il est à noter qu'il ne concerne pas de façon contraignante les pays en développement. Plus récemment en 2015, la Conférence de Paris sur le changement climatique (COP21) a abouti à un accord planétaire contraignant pour contenir le réchauffement de la planète en dessous de 2°C. Ces engagements sont déclinés à l'échelle continentale avec le paquet climat-énergie pour l'Union Européenne dont l'objectif est de réduire de 40% les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport au niveau de 1990, de réduire la consommation énergétique de 27% et d'avoir 27% du mix énergétique d'origine renouvelable. A ces engagements peuvent s'ajouter des objectifs nationaux comme précisé dans la partie suivante.

Dans ce contexte de politique de réduction des consommations énergétiques, le bâtiment est un secteur clé puisque c'est un grand consommateur d'énergie. En effet, il assure les besoins et le confort de ses occupants : chauffage, climatisation, cuisson, éclairage et appareils auxiliaires qui sont les cinq postes de dépenses courants. Selon le climat, la dépense principale du bâtiment est liée au chauffage ou à la climatisation. Avec le développement économique les bâtiments se standardisent et les modes de construction traditionnels pourtant bien adaptés au climat local sont délaissés. A l'échelle mondiale la consommation énergétique du secteur résidentiel représente 30% de la consommation annuelle [22] et est donc un levier d'action important.

2.2. Contexte énergétique et secteur du bâtiment en France

La France dépense l'équivalent de 3,4% de son PIB pour sa consommation énergétique et revendique un taux d'indépendance énergétique de 53% notamment grâce à son parc nucléaire. L'évolution de la consommation d'énergie finale depuis 1973 [23] montre que le secteur résidentiel-tertiaire est le premier secteur consommateur avec 45% en 2012 (**Figure 10**), devant les transports (31%) et l'industrie (21%). En termes d'émissions de gaz à effet de serre le bâtiment représente 20% (**Figure 11**) en troisième position derrière l'industrie (30%) et les transports (28%). C'est donc un secteur clé.

Depuis le premier Sommet de la Terre à Rio, la France a ratifié tous les accords internationaux en matière de lutte contre le changement climatique. Cela se traduit à l'échelle nationale par des mesures concrètes concernant le bâtiment. Récemment on peut citer :

- l'objectif « facteur4 » engagé par la France en 2003 visant à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990 et va au delà du paquet énergie-climat de l'Union Européenne.
- la mise en place en 2006 des Certificats d'Economie d'Energie (CEE [24]) qui obligent certains acteurs (vendeurs d'énergie, établissements publics, bailleurs sociaux) à réaliser un certain quota d'économies d'énergie qui peut être atteint par des actions sur leur propre patrimoine ou par le financement de travaux de rénovation chez les particuliers contre l'obtention d'un certificat à la fin du chantier.
- obligation de réalisation d'un diagnostic de performance énergétique (DPE) depuis 2006 pour toute vente ou mise en location d'un logement. Ce diagnostic permet d'estimer la consommation

annuelle d'énergie d'un logement, de la classer sur une échelle et abouti à des recommandations d'actions de rénovations.

- l'initiative du Grenelle de l'Environnement de 2007 visant à rassembler des acteurs du développement durable (politiques, associations, entreprises, ONG, organismes publics) afin de déterminer un carnet de route environnemental. Le vote des lois « Grenelle I » et « Grenelle II » engage l'Etat français à suivre une série de mesures pour satisfaire à des objectifs déclinés par domaines. Dans le secteur du bâtiment cela se traduit par des politiques de soutien à l'éco-construction avec l'octroi de prêts à taux zéro et à des objectifs chiffrés du nombre de constructions rénovées annuellement.
- lancement en 2009 du Plan Bâtiment Durable visant à réaliser les objectifs d'efficacité énergétique du secteur, notamment par la formation et la sensibilisation des acteurs du domaine.
- adoption par l'Assemblée Nationale en 2014 de la loi sur la transition énergétique et la croissance verte (*LTECV* [25]) avec un titre entièrement consacré à la rénovation énergétique. Des plateformes locales appelées PRIS (Points Rénovation Info Service) permettent l'accompagnement des ménages dans leur projet de rénovation.

La philosophie générale de la transition énergétique amorcée par la France s'inspire des concepts prônés par *l'Association Négawatt* [26] qui repose sur trois principes se déclinant à tout secteur. Il s'agit de limiter les besoins par la promotion de la sobriété énergétique, de l'utilisation de systèmes efficaces pour la part restante, et de l'approvisionnement maximal en énergie renouvelable. Ces trois objectifs se traduisent pour le bâtiment par une meilleure isolation de l'enveloppe, l'utilisation de systèmes énergétiques innovants et la mise en place de panneaux solaires.

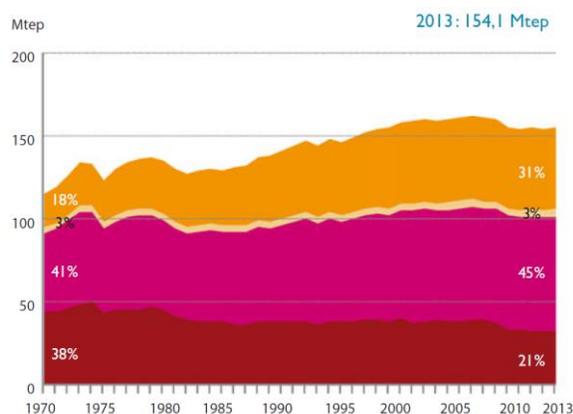


Figure 10 - Evolution de la consommation d'énergie finale par secteur en France

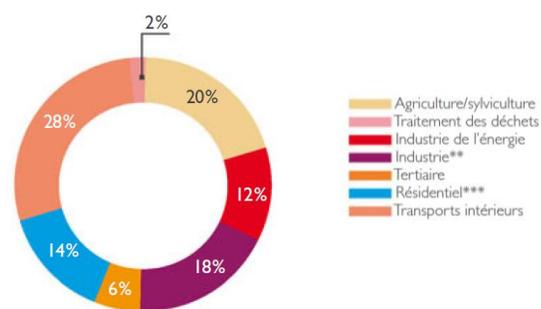


Figure 11 - Evolution des émissions de CO₂ par secteur en France

Le domaine du bâtiment a été identifié comme le premier gisement d'économie d'énergie, et dans ce contexte il est donc soumis à des exigences réglementaires de plus en plus fortes pour tendre vers des objectifs de performance dont le fer de lance sont les réglementations thermiques successives :

- **1974** : première réglementation thermique à la suite du choc pétrolier de 1973. L'objectif fixé est une réduction de 25% des consommations de chauffage par rapport à 1950, un coefficient de déperditions à travers les parois K est introduit et un coefficient de déperditions globales G ramené au volume d'air est calculé. Cette réglementation ne s'applique qu'aux bâtiments neufs résidentiels.
- **1976** : l'arrêté du 12 mars 1976 élargi la première réglementation thermique pour les bâtiments à usage autre que d'habitation (tertiaire, enseignement).
- **1982** : un coefficient B pour le calcul des besoins de chauffage est introduit et permet de tenir compte des apports solaires, avec cette modification la conception favorise la réflexion sur les surface vitrées et l'orientation. L'amélioration attendue par rapport à la réglementation thermique précédente est de 20%.
- **1988** : troisième réglementation thermique qui se base sur les consommations et non plus sur les besoins. Les moyens d'actions ne sont plus seulement mis sur l'enveloppe mais également sur les systèmes, favorisant le choix d'équipements ayant de bons rendements pour respecter une valeur maximale de coefficient de consommation C . Le calcul tient également compte des consommations d'Eau Chaude Sanitaire (ECS). Cette réglementation s'applique aux bâtiments résidentiels et non résidentiels.
- **2001** : quatrième réglementation thermique qui impose trois exigences et vise une réduction de 20% des consommations pour le résidentiel et 40% pour le tertiaire par rapport à la RT1988. La consommation d'énergie primaire C_{ep} doit être inférieure à une valeur de référence qui dépend du projet. Une température intérieure conventionnelle (T_{ic}) est calculée et doit être inférieure à une valeur de référence. L'objectif est de limiter le recours à la climatisation en évitant les pics de chaleur en été et fait intervenir le confort de l'occupant. Enfin des performances minimales sont imposées avec de nombreux garde fous sur le niveau d'isolation ou le traitement des ponts thermiques. L'exigence de consommation porte sur cinq postes : chauffage, climatisation, ECS, ventilation et éclairage.
- **2006** : les exigences sont renforcées avec un gain espéré de 15% et le calcul du C_{ep} est ramené au mètre carré pour comparer des bâtiments entre eux. L'utilisation d'énergie renouvelable est introduite dans le calcul de référence.
- **2008** : le taux de renouvellement des bâtiments n'est que de 1% par an, à titre d'exemple en 2011 les bâtiments résidentiels datant d'avant la première réglementation thermique (sans isolation) représentaient encore 55% du parc et 64% de la dépense énergétique (**Figure 12**). Ainsi, une réglementation thermique spécifique est mise en application pour la rénovation de bâtiments résidentiels et tertiaires existants. Pour le cas spécifique des bâtiments dont la construction est postérieure à 1948, d'une surface supérieure à 1000 m² et dont le coût des travaux est supérieur à 25% de la valeurs du bâtiment : la RT s'applique à tout le bâtiment. Dans le cas contraire les exigences de performance se font « élément par élément ».

- 2012** : la dernière réglementation thermique aujourd'hui en vigueur permet de passer d'une exigence de moyens (ne pas dépasser une valeur de coefficient de transmission maximale définie par paroi) à une exigence de résultats sur la consommation d'énergie primaire. En effet la consommation maximale pour les cinq usages n'est plus déterminée par rapport à une référence selon le bâtiment, mais fixée à 50 kWh_{ep}/m².an modulable selon la zone géographique. Un coefficient Bbio permet de porter plus d'attention à la conception du bâti et encourage la conception bioclimatique en favorisant la compacité, les apports solaires, le confort visuel avec l'éclairage naturel, l'inertie et l'orientation. Le calcul de la Tic est conservé et le nombre de garde-fous est réduit. Le gain attendu est de 50% par rapport à la RT2005.

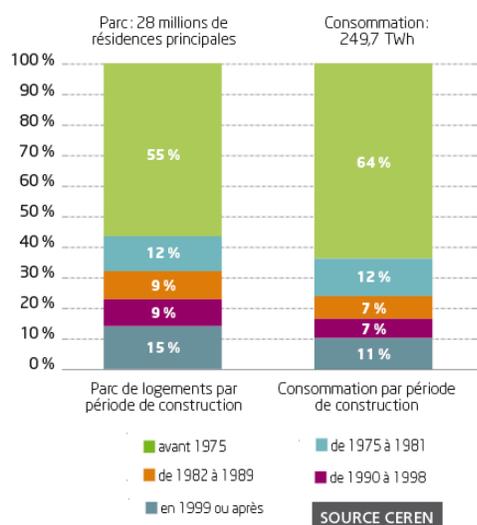


Figure 12 - Photographie du parc résidentiel en 2011

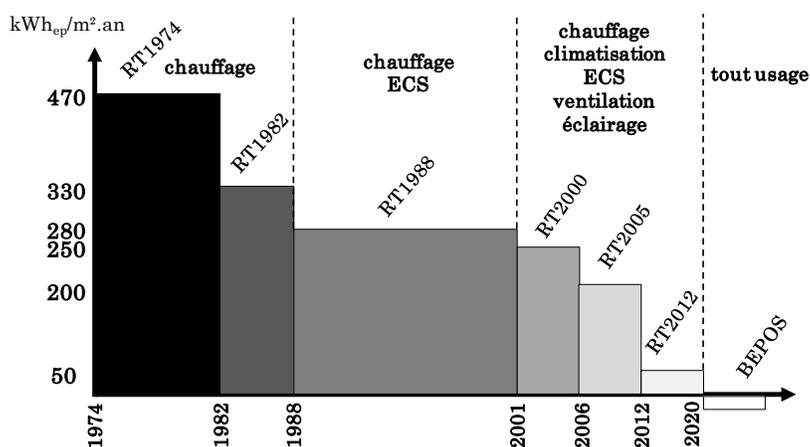


Figure 13 - Evolution de la réglementation thermique

La prochaine réglementation thermique attendue pour 2020 devrait franchir une nouvelle étape en généralisant la construction de bâtiment à énergie positive (BEPOS) qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment (**Figure 13**). L'arrivée de cette réglementation est préparée en amont par les industriels de la construction car elle implique notamment une garantie de performance. Le projet *COMEPOS* [27] porté par le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA) peut être cité en exemple puisqu'il a pour but de montrer la faisabilité de tels bâtiments par la conception et la réalisation d'une vingtaine de bâtiments démonstrateurs sur l'ensemble du territoire français.

Lors de la 4^{ème} conférence environnementale le 26 avril 2016, la Ministre de l'Environnement a annoncé d'ici la fin de l'année une réforme de la réglementation thermique dans l'existant de 2007. Elle doit s'appuyer sur les dispositifs les plus exigeants qui existent déjà dans d'autres pays européens.

Cependant, malgré ces mesures la consommation énergétique du secteur du bâtiment reste relativement stable en valeur absolue (**Figure 10**) puisque les améliorations obtenues sont compensées par l'augmentation du nombre de logements. Cette dernière est liée à la démographie et à la hausse de l'utilisation de l'électricité dite « spécifique » avec la multiplication des appareils électriques hi-fi, électroménagers et informatiques (**Figure 14**). Il est également important de souligner que la réglementation thermique ne prend pas en compte cette électricité spécifique et ne concerne que les dépenses énergétiques durant la phase d'utilisation du bâtiment. Comme tout produit manufacturé, un bâtiment consomme aussi de l'énergie pour sa fabrication et son recyclage. Dans une logique de réduction des consommations énergétiques, la part de cette énergie dite « grise » gagne en importance et pousse de plus en plus à raisonner de façon globale avec des outils d'analyse de cycle de vie [28]. Le rapport 2014 de l'ADEME [23] montre que le chauffage représente le premier poste avec 67% de la consommation d'énergie finale devant les appareils électriques (17%), l'ECS (10%) et la cuisson (6%). Ainsi, le choix et le pilotage des équipements de chauffage sont déterminants.

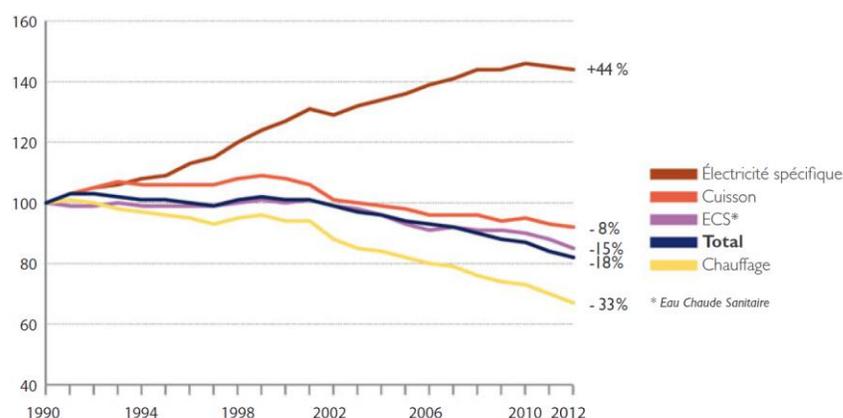


Figure 14 - Évolution des consommations unitaires des résidences principales par usage

2.3. La régulation du chauffage dans le bâtiment

Le terme régulation est utilisé lorsqu'un système est commandé par une logique dans le but de réaliser un service. Pour le système bâtiment, la régulation a pour but de satisfaire deux objectifs : réduire les consommations d'énergie et assurer le confort de l'occupant. Elle peut être faite de façon automatique par un mécanisme appelé « contrôleur » ou « régulateur » mais également par l'occupant lui-même qui peut agir sur les paramètres du contrôleur ou directement sur le système (ouverture de fenêtres, coupure manuelle du chauffage).

Le premier système de régulation de la température est le thermostat développé par Albert Butz en 1886 [29] pour réguler la température d'une chaudière à charbon en contrôlant l'arrivée d'air par l'ouverture et la fermeture d'une trappe. Le principe était basé sur la dilatation thermique de deux métaux différents (bilame) qui selon la température ouvraient ou fermaient le circuit électrique alimentant « l'organe de régulation » ou « actionneur ». Aujourd'hui, le thermostat est électronique et utilise un

thermistor dont la résistance varie en fonction de la température. C'est le système de régulation de la température le plus répandu dans le monde, il est très utilisé dans le bâtiment pour le chauffage d'appoint ou l'ECS. Les travaux de Norbert Wiener en 1948 [30] introduisent la notion de « rétroaction » ou « feedback » pour le contrôle de systèmes en boucle fermée nécessitant un retour d'état par la mesure sur la variable à piloter.

Dans le secteur résidentiel l'occupant, propriétaire ou locataire, est garant de la régulation du chauffage et est donc responsable des dépenses énergétiques et acteur de son confort. Pour les bâtiments de grande taille (tertiaire, enseignement, industriels) l'occupation est intermittente. On parle alors d'utilisateurs qui peuvent éventuellement agir sur le confort mais sont moins concernés par les dépenses énergétiques. Ainsi dans la plupart des cas, le pilotage du chauffage incombe au gestionnaire du bâtiment et fait intervenir un système de Gestion Technique du Bâtiment (GTB) ou Building Management System (BMS). Ce terme regroupe un ensemble d'outils permettant au gestionnaire d'optimiser le fonctionnement du bâtiment. D'abord dédié à des fonctions de régulation courante et d'alarme, la GTB évolue de paire avec les exigences du bâtiment en visant le confort et l'efficacité énergétique (Figure 15). Généralement elle inclue des points de mesure permettant la remontée d'information via des automates à un logiciel de supervision orientant ainsi les choix du gestionnaire. Au delà du retour d'information, une GTB comprend également des outils de régulation pour agir sur les systèmes en pilotant les actionneurs (Figure 16). Différents modes de transmissions peuvent être utilisés pour permettre la communication entre la supervision, les capteurs et les actionneurs : ondes radio, courant porteur, infrarouge ou classiquement par réseau câblé. Pour ces supports il existe un grand nombre de protocoles de communication. Certains sont propres au fabricant du matériel et dits « propriétaires » mais ils peuvent généralement communiquer via des passerelles avec des protocoles dits « ouverts » dont les plus connus sont TCP/IP, KNX, Modbus et LonWorks. La gestion se fait via une Interface Homme-Machine (IHM) qui peut être un ordinateur sur site ou un web-service accessible à distance depuis un Smartphone ou une tablette. La norme EN NF 15232 [31] précise les performances énergétiques attendues par la mise en place d'une régulation GTB et propose une méthode permettant d'estimer l'impact du système de gestion sur l'efficacité énergétique avec un classement entre A et D selon le niveau de performance.

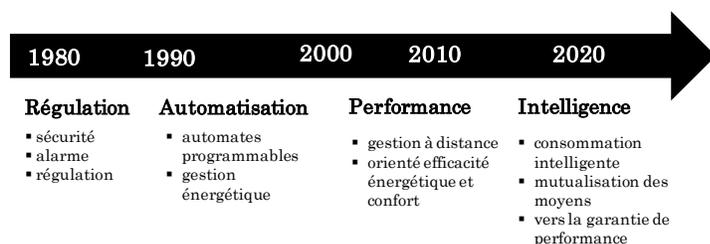


Figure 15 - Adaptation de la GTB aux évolutions du bâtiment

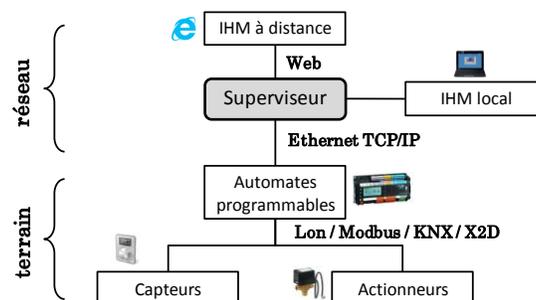


Figure 16 - Architecture type d'une installation GTB

Concernant le secteur résidentiel et la maison individuelle on parle de domotique pour désigner toutes les techniques d'automatisme et de communication dans le bâtiment. Principalement tournée vers les systèmes d'alarmes et de sécurité à ses débuts dans les années 1980, son utilisation se généralise à tous les usages (chauffage, éclairage, télégestion) et tend à se démocratiser avec l'avènement des Smartphones et l'omniprésence d'internet. La maison se fait « intelligente » et « connectée » avec l'apparition sur le marché de thermostats intelligents capables d'adapter le pilotage du chauffage en fonction des habitudes de l'occupant. A titre d'exemple il est possible de citer le thermostat intelligent Nest qui anticipe le lancement du chauffage en fonction des habitudes d'occupation apprises et qui gère également la production d'ECS. En France la société Ween propose un thermostat lié au Smartphone de l'occupant : grâce à la géolocalisation le thermostat peut couper le chauffage ou anticiper sa mise en route par l'estimation du temps de trajet de l'occupant. La mutualisation des moyens de production est également permise par l'essor des nouvelles technologies et crée de nouveaux modèles économiques. La société Qarnot Computing propose un radiateur gratuit qui chauffe le logement avec la chaleur dégagée par les processeurs intégrés et se rémunère en vendant de la capacité de calcul aux entreprises. L'intelligence peut être déportée par l'utilisation d'optimiseurs à distance ou dans le « cloud ». Néanmoins ces appareils posent la question de la protection des données personnelles car l'information de l'emploi du temps des usagers a un intérêt commercial certain. De plus la *RT2012* [32] impose à minima un comptage mensuel des consommations d'énergie par poste et par type d'énergie. L'arrivée de compteurs communicants doit se faire en trouvant un équilibre entre protection du consommateur et transition énergétique.

Actuellement, les équipements de chauffage du bâtiment sont souvent pilotés de manière simple avec une régulation « tout ou rien » via un thermostat pour des équipements avec peu d'inertie (vecteur air). Pour les systèmes avec un temps de réponse plus grand (vecteur eau généralement) le pilotage se fait avec des scénarios horaires fixes déterminés par le gestionnaire, un régulateur de type PI ou PID (*Bourlès* [33]) assure le suivi de la consigne de départ calculée en fonction de la température extérieure (loi d'eau). Pour un système de chauffage la régulation peut se faire à différents niveaux (**Figure 17**) :

- dans le cas d'un chauffage individuel, la production et l'émission de chaleur sont confondues et ces systèmes sont régulés avec un thermostat, il s'agit souvent de chauffage d'appoint.
- pour un chauffage central il y a séparation entre la production et l'émission de chaleur via un réseau de distribution. L'eau chaude est produite par une unité de production (chaudière, PAC) dont la température est régulée en fonction de la demande ou de la température extérieure. L'eau est ensuite distribuée jusqu'aux systèmes d'émission en fin de réseau. Une deuxième régulation dite « terminale » est effectuée (vanne trois voies, robinets thermostatiques).
- quand il s'agit de chauffer un grand bâtiment ou plusieurs bâtiments, une régulation est faite au niveau d'une sous-station.

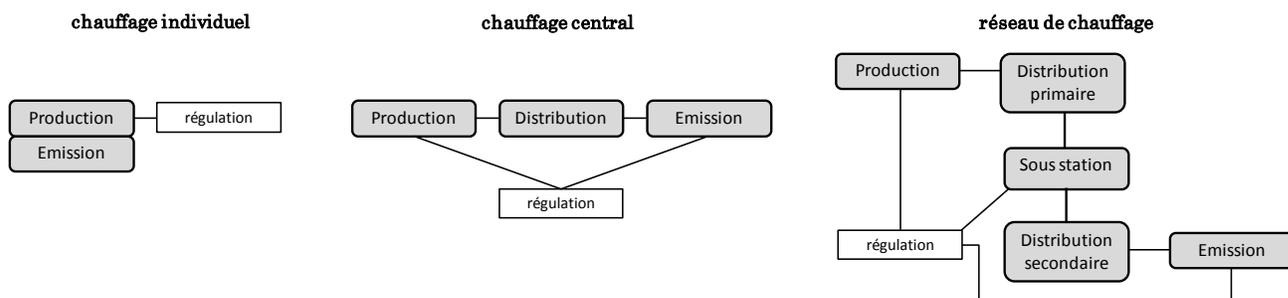


Figure 17 - Représentation schématique des configurations de chauffage usuelles [34]

Il existe trois modes de fonctionnement des régulateurs :

- « tout ou rien » : aussi appelé on/off, qui régule avec seulement deux positions. Un intervalle de température est défini autour de la consigne pour éviter les cycles courts, quand la mesure est supérieure à la borne haute la commande passe à off et quand elle atteint la borne basse elle passe à on.
- position multiple : la commande est discrétisée en plusieurs valeurs et dépend de l'écart entre la mesure et la consigne.
- progressive : la commande peut prendre n'importe quelle valeur et dépend également de l'écart à la consigne. Cette catégorie regroupe la régulation proportionnelle (P), proportionnelle intégrale (PI) et proportionnelle intégrale dérivée (PID).

La consommation d'un bâtiment est fonction de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur (**Figure 18**). Pour réaliser des économies d'énergie dans les bâtiments à occupation intermittente, un réducteur de température est mis en place pendant les périodes d'inoccupations (nuit, week-end). Ainsi la régulation doit permettre le suivi d'une température de consigne qui varie dans le temps et implique donc des périodes de « relance » et de « coupure ». Classiquement la variation de la consigne est prise en compte par l'utilisation de journées et de semaines types programmées. Une programmation annuelle peut être faite pour tenir compte des vacances notamment. Les changements de consignes se font de façon instantanée alors que le système de chauffage peut mettre du temps à réagir et différer l'atteinte des conditions de confort. On distingue ainsi deux catégories de systèmes de chauffage :

- les systèmes dits « réactifs » dont l'effet sur l'élévation de la température intérieure est rapide c'est à dire inférieur à la demi-heure. Il s'agit de la majorité des systèmes existants tels que les ventilo-convecteurs, radiateurs, convecteurs électriques,
- les systèmes dits « capacitifs » dont l'effet sur l'élévation de la température intérieure est lent du fait de l'inertie : c'est le cas des planchers chauffants dont la régulation se fait généralement avec une loi d'eau qui permet de régler la température de départ par rapport à la température extérieure.

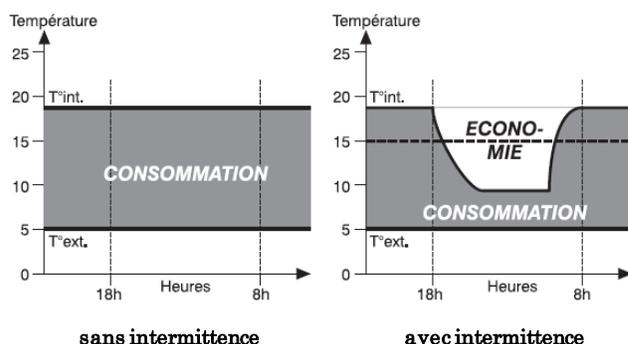


Figure 18 - Economie d'énergie obtenue par la réduction de la consigne hors occupation [35]

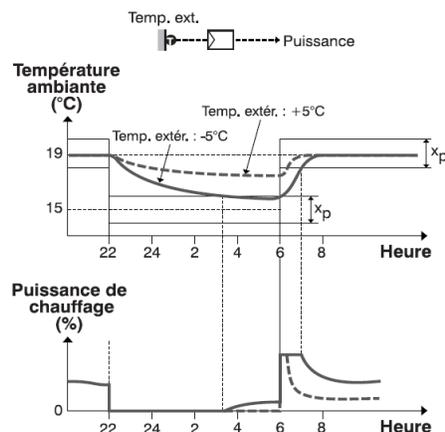


Figure 19 - Anticipation de la relance [35]

Du fait de son inertie, un système capacitif ne peut répondre à un changement de température de consigne. Si un ralenti est souhaité alors il est utilisé pour assurer une température de confort de base correspondant à la température de réduit et un système réactif est utilisé en appoint pour les périodes d'occupation. D'un point de vue énergétique il est préférable d'exploiter au maximum l'inertie du système capacitif par l'utilisation d'un optimiseur permettant de gérer les intermittences. Il consiste à couper au plus tôt et à relancer au plus tard tout en garantissant le confort lors de l'occupation. Néanmoins cela implique une connaissance précise de l'inertie du système et de l'enveloppe ainsi que de la puissance disponible pour effectuer la relance. La stratégie de relance dépend également des conditions extérieures à venir (Figure 19). Le contrôle d'un système capacitif implique donc une action anticipative.

2.4. Contrôle anticipatif

Ces dix dernières années ont vu deux tendances se développer dans le contrôle avancé :

- des modèles « boîtes noires » combinées à des techniques d'apprentissage venant de la recherche sur l'intelligence artificielle (fuzzy control, algorithmes génétiques, algorithmes évolutionnaires),
- le contrôle prédictif utilisant des modèles « boîtes grises » combinés à des techniques d'optimisation.

L'importance de la commande dans le bâtiment est sous estimée. Les régulateurs on/off, PI ou PID offrent de bonnes performances pour suivre une consigne constante mais dans une logique de baisse des dépenses énergétiques, l'utilisation des scénarios intermittents s'opère de plus en plus. Ils font intervenir l'inertie du bâtiment pour laquelle les régulateurs classiques ne sont pas les plus adaptés. Le principe de contrôle en boucle fermée repose sur le fait que la commande est fonction du retour d'état de la grandeur d'intérêt. Lorsqu'un contrôle du système avec un temps de retard important est souhaité, les techniques de contrôles classiques ne suffisent plus car basées sur une réponse rapide du système en temps réel. Dans les

bâtiments à chauffage intermittent, les systèmes capacitifs sont utilisés de façon passive en chauffage de base puisque souvent l'intermittence est gérée par un chauffage d'appoint dont l'usage pourrait être limité par un contrôle plus fin du système capacitif. Pour gérer un tel système de façon « active » en boucle fermée il est nécessaire que les variations de la grandeur d'intérêt soient anticipées par un modèle pour assurer la rétroaction. Dans le domaine du bâtiment ces techniques de contrôle avancées ne sont pas utilisées. Au mieux, l'aspect anticipatif se fait par la définition de scénarios fondés sur l'expérience du gestionnaire mais ne tient absolument pas compte des aléas climatiques et de l'occupation variable. Actuellement un nombre croissant de travaux de recherche porte sur la gestion anticipative des besoins de chauffage (**Figure 20**). Ce type de contrôleur a été développé dans les années 1980 (*Richalet et al. [36], Clarke et al. [37]*) pour des applications industrielles et reste aujourd'hui très utilisé notamment dans la métallurgie où les constantes de temps des procédés sont grandes. L'anticipation permet un gain économique notable par la limitation des dépenses énergétiques dans les procédés thermiques mais également en maintenance puisque l'anticipation permet une action plus douce sur les organes de régulation dont la durée de vie augmente. Le principe d'un tel contrôleur est de déterminer à l'aide d'un modèle du système, quelle est la séquence de commande optimale U_k calculée au pas de temps k qui minimise une fonction coût sur un horizon temporel donné. Pour cet horizon les entrées non contrôlables sont supposées connues (prévisions) et permettent de calculer la séquence de sortie Y_k correspondante. Seul le premier élément u_k de la séquence de commande optimale U_k est appliqué et correspond au premier élément de sortie y_k du modèle. La séquence de commande optimale est recalculée au pas de temps suivant (U_{k+1}) en suivant le principe d'« horizon fuyant » et permet de calculer une nouvelle séquence de sortie Y_{k+1} (**Figure 21**). L'utilisation de ce type de contrôleur nécessite donc un modèle du bâtiment et du système à contrôler. Il doit être léger pour être compatible avec du contrôle temps réel puisque le temps de calcul de la commande doit être inférieur au pas de temps d'action (de l'ordre de la minute).

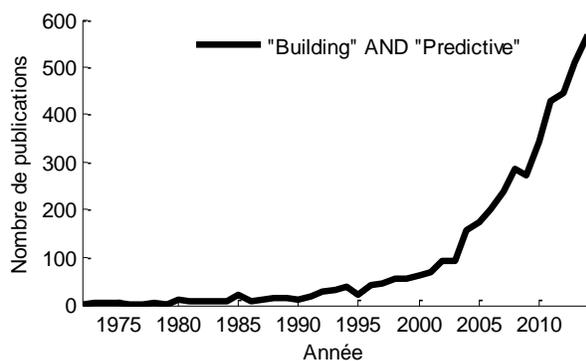


Figure 20 - Nombre d'articles trouvés dans la base de données Scopus avec les mots clés « Building » et « Predictive » [38]

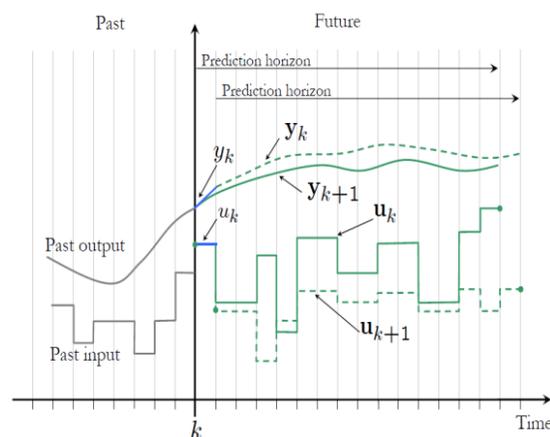


Figure 21 - Schéma du principe de fonctionnement d'un contrôleur prédictif (Lamoudi [39])

L'anticipation peut être basée sur chacun des critères suivants ou une combinaison de plusieurs d'entre eux selon l'expression de la fonction coût :

- **l'usage** : l'occupation dont dépend la température de consigne est variable, la connaissance de l'occupation future est déterminante pour le pilotage du chauffage et permet d'assurer le confort en temps voulu.
- **la météo** : les déperditions de l'enveloppe dépendent directement de la température extérieure, ainsi la durée de relance varie selon la météo à venir, la puissance de chauffage étant bornée. L'anticipation des apports solaires gratuits permet d'éviter d'utiliser le chauffage, inversement une concordance avec le chauffage peut occasionner des surchauffes et donc de l'inconfort.
- **le prix de l'énergie** : il est préférable d'utiliser les systèmes quand l'énergie est la moins chère lorsque la source d'énergie utilisée a un prix qui fluctue selon le moment de la journée. C'est le cas de l'électricité avec le système d'heures pleines et d'heures creuses.
- **l'origine de l'énergie** : pour l'utilisation de panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques, il est possible de chercher à favoriser l'utilisation directe d'énergie renouvelable en journée.

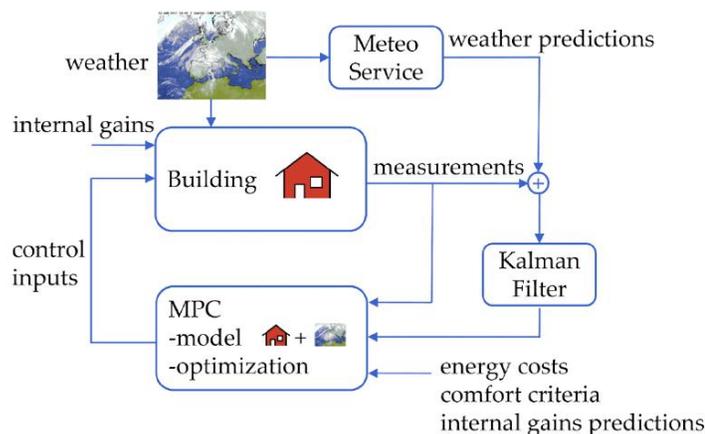


Figure 22 - MPC utilisé dans le cadre du projet *Opticontrol*

Le déploiement d'un tel contrôleur est donc conditionné par la disponibilité de prévisions météorologiques fiables, de points de mesures sur site, d'une puissance de calcul suffisante et de la connaissance fine du bâtiment avec un modèle. Le projet suisse *Opticontrol* [40] s'est intéressé à la part d'énergie qu'il est possible d'économiser avec un tel contrôleur. Des modèles de prévisions spécifiques au bâtiment ont été développés par MétéoSuisse tel que le rayonnement solaire global par façades. A partir de tests sur un bâtiment expérimental (**Figure 22**), le gain énergétique d'un tel contrôleur est supérieur à 20% [41]. Ce projet en partenariat avec SIEMENS montre l'intérêt des industriels. Ainsi il est pertinent de mener des projets de recherche en amont sur le contrôle anticipatif pour chiffrer un potentiel et permettre l'accès au grand public de moyens de contrôles innovants allant dans le sens de la performance énergétique.

Résumé

La crise environnementale combinée à la raréfaction des ressources fossiles poussent les décideurs à revoir un modèle de société qui reposait jusqu'alors sur la disponibilité d'une énergie abordable et abondante. Dans le bâtiment cela se traduit par des objectifs de réduction des dépenses énergétiques engendrés principalement par le chauffage. Dans les locaux à occupation intermittente le chauffage est régulé en fonction de la présence des occupants et introduit des périodes d'arrêt et de relance. Dans ce cas l'utilisation d'un système capacitif exploite l'inertie pour assurer un confort de base mais les techniques de régulation classiques ne permettent pas le suivi d'une consigne qui varie quotidiennement et un système d'appoint est souvent nécessaire. La mise en place d'un contrôle anticipatif apparait comme une solution intéressante dont il convient d'estimer le potentiel.

3. Contexte du projet

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR PRECISION (PREdiction et Contrôle Commande Intelligent par la Simulation et l'Optimisation Numérique) démarré en janvier 2013 pour une durée de 3 ans. Le projet PRECISION est issu de l'appel à projet ANR Bâtiment et Villes Durables 2012 [42] et répond au thème 2.2 : « mesures et garanties des performance » et au thème 2.3: « modèle, simulation, aide à la conception ».

	NEUF		REHABILITATION	
	Conception	Fonctionnement	Conception	Fonctionnement
Modèles	FIABILITE	SUPERBAT	FIABILITE	SUPERBAT
Mesure/identification	FIABILITE	BATIMETRE/ PRECISION	MEMOIRE	PRECISION
Optimisation	AMMIS	SIMINTEC/PRECISION	MEMOIRE	SIMINTEC/PRECISION

Tableau 1 - Positionnement par rapport à d'autres projets ANR [43]

Le projet vise à réduire l'impact du parc bâti sur le plan énergétique, environnemental et économique. Plus la performance est grande, plus les couplages sont importants avec les usagers et l'environnement extérieur. Dans cette logique, l'anticipation de l'état futur (météo, mix énergétique, occupation) est un point clé. Il vise également le développement d'outils et de méthodes de pilotage pour des bâtiments réhabilités (Tableau 1). Cela comprend des outils de modélisation du bâtiment intégrant modélisation directe, réduction de modèle, méthode d'identification, algorithme d'optimisation et de prédiction. Sa réalisation demande plusieurs domaines de compétences : énergétique du bâtiment, automatique, solutions logicielles, modélisation, domotique mais aussi des plateformes expérimentales pour effectuer des tests sur les produits développés ou sur les stratégies envisagées. C'est pour ces raisons que le projet regroupe :

- des spécialistes de l'énergétique du bâtiment (Armines, I2M, INES, IFSTTAR)
- une société spécialiste de la modélisation système (LMS International)
- des équipes spécialistes des environnements logiciels pour l'optimisation des systèmes électriques et énergétiques (Grenoble-INP),
- un spécialiste des solutions logicielles d'optimisation énergétique (Vesta System),
- un fournisseur de produits pour les économies d'énergie et le confort dans l'habitat (Deltadore)

Trois plateformes de démonstrations sont utilisées dont la plateforme SYNERGI de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Bordeaux qui sert de support dans le cadre du projet. Le bâtiment est un système énergétique complexe dû à l'interaction avec l'environnement et les usagers et des écarts importants sont constatés entre les consommations prévues et mesurées. Ainsi le calibrage par des mesures in situ servant également pour le suivi et le pilotage est un autre point clé du projet PRECCISION.

Le projet comprend cinq tâches. La première est de fournir des modèles de bâtiments qu'ils soient construits de façon détaillée ou par assimilation de données expérimentales. L'objectif étant de s'assurer que ces modèles soient légers et éligibles au contrôle. La deuxième tâche est de définir un protocole de mesure avec une instrumentation limitée et peu intrusive. La troisième tâche est fonction des tâches 1 et 2 et consiste à développer des méthodes et outils (observateurs d'état et algorithmes d'identification) pour construire l'état du système bâtiment en combinant mesures et modèles de simulation. La quatrième tâche consiste à développer et implémenter des algorithmes de contrôle pour la gestion des bâtiments. Enfin, la tâche 5 doit intégrer toutes les technologies dans les différentes plateformes expérimentales. Les travaux de thèse sont impliqués dans chacune des cinq tâches avec le choix de modèles légers (tâche 1), la réalisation de campagnes de mesures (tâche 2) pour identifier les modèles (tâche 3), et la mise en place de la régulation (tâche 4) sur la plateforme SYNERGI (tâche 5).

Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR PRECCISION qui s'intéresse au développement de méthodes de pilotage combinant modèles, mesures et optimisation pour réduire l'impact du parc bâti avec l'appui de bâtiments démonstrateurs.

4. Démarche et organisation du manuscrit

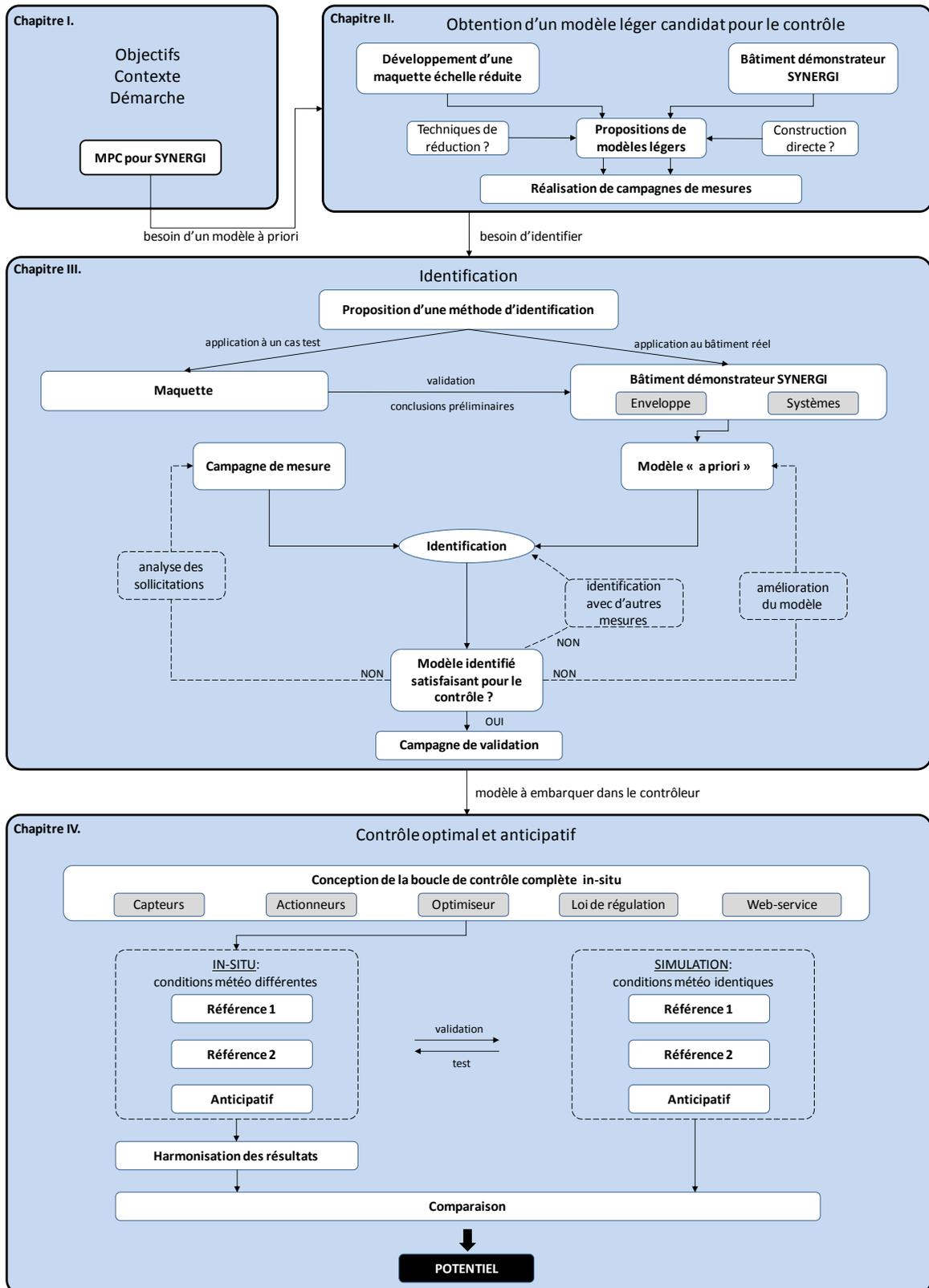
Ce premier chapitre a permis d'exposer le contexte de ces travaux dont le but est de montrer qu'il existe un intérêt pour le contrôle prédictif de systèmes de chauffage capacitifs tel qu'un plancher chauffant. Le contrôle prédictif fait partie des techniques de contrôle à modèle interne qui sont basées sur l'utilisation de la sortie d'un modèle du système à contrôler. Ainsi un modèle de connaissance est au cœur du système de contrôle. Ce pilotage anticipatif doit ensuite être confronté en simulation, puis sur un bâtiment démonstrateur, à des techniques de gestion plus classiques pour en comparer la performance.

Le deuxième chapitre traite de l'obtention d'un modèle adapté au contrôle. Une étude bibliographique est menée afin de dresser l'inventaire des différents types de modèles adaptables dans une logique de contrôle. Le besoin d'un modèle léger oriente le choix sur des modèles de type « analogie électrique » ou « RC » qui sont retenus pour modéliser le bâtiment démonstrateur SYNERGI servant de support au projet. La réduction d'un modèle RC de grande taille est testée à partir de trois techniques afin de regarder si les critères de commandabilité et d'observabilité peuvent être respectés. D'autres modèles légers sont construits directement par analyse physique en utilisant la représentation d'état. Un travail est mené sur le bâtiment démonstrateur : des mesures sont faites pour générer de la connaissance et lever des incertitudes sur certaines grandeurs importantes pour le bilan thermique du bâtiment (débits de soufflage, débit d'eau, caractéristiques de l'enveloppe). Puis des campagnes de mesures courtes (quelques jours) sont effectuées afin d'identifier les paramètres des modèles proposés et ainsi sélectionner un modèle qui peut être mis en œuvre dans le contrôleur prédictif. Des essais de construction de maquette de bâtiment échelle réduite sont réalisés afin d'effectuer des tests préliminaires quand à la méthode d'identification.

Le troisième chapitre propose une méthode permettant d'identifier les paramètres des modèles proposés au chapitre II. Cette méthode est utilisée dans un premier temps sur une maquette en laboratoire afin de la valider sur un cas présentant moins d'incertitudes avec un environnement bien maîtrisé. L'objectif est de montrer l'importance des sollicitations utilisées lors des campagnes de mesures sur la qualité du modèle identifié. Une étude est également réalisée quant à la possibilité d'utiliser des modèles de conception pour le contrôle. Les premiers modèles RC sont alors identifiés à partir des campagnes de mesures sur le bâtiment démonstrateur et plusieurs voies d'améliorations sont proposées pour satisfaire à une application de contrôle. Cela passe par l'utilisation de mesures additionnelles et d'analyse de sensibilité fondée sur la méthode de Morris. Le modèle RC candidat obtenu est alors testé sur deux nouvelles campagnes de mesures pour vérifier la robustesse en condition de fonctionnement espéré.

Le dernier chapitre porte sur la mise en œuvre de ce modèle dans un contrôleur prédictif. Un premier état de l'art est proposé sur les travaux menés sur le contrôle anticipatif et un focus est effectué sur le contrôle anticipatif de planchers chauffants. Par la suite, des travaux en simulation et in situ sont menés en parallèle. Une comparaison de la gestion prédictive du plancher chauffant avec deux modes de régulation plus classiques est réalisée. Dans le premier contrôle de référence le ralenti est assuré par un système de chauffage d'appoint tandis que le plancher chauffant est utilisé en base. Le second contrôle de référence consiste à effectuer un ralenti avec le plancher chauffant via une programmation hebdomadaire de son fonctionnement. La simulation de ces trois modes de pilotage se fait dans les mêmes conditions permettant un comparaison plus directe. Elle est combinée à une étude expérimentale puisqu'un travail important a été mené de façon à mettre en place une boucle de régulation complète sur le bâtiment démonstrateur SYNERGI.

Le synoptique suivant résume la démarche décrite.



Chapitre II : Construction de modèles d'ordre réduit et réalisation de campagnes de mesures courtes en vue de faire du contrôle sur un bâtiment démonstrateur

Ce chapitre amorce la réflexion sur les éléments nécessaires à la réalisation d'un contrôleur anticipatif. Dans une première partie une analyse bibliographique est proposée afin de faire un inventaire des types de modèles pouvant être utilisés. Se pose la question de la taille du modèle et de la manière de l'obtenir. Le bâtiment démonstrateur est ensuite présenté dans une deuxième partie ainsi que ses systèmes et des modèles sont proposés. La troisième partie porte sur la réalisation de campagnes de mesures in situ pour permettre l'identification des modèles à partir de la connaissance du comportement réel du bâtiment démonstrateur. Enfin pour appuyer le travail sur la construction de modèles à partir de données mesurées : une expérimentation de bâtiment à échelle réduite est présentée pour permettre de réaliser des tests préliminaires avec des campagnes de mesures rapides dont les conclusions peuvent être extrapolées au bâtiment démonstrateur.

1. La modélisation pour le bâtiment

Les premiers outils de simulation thermique du bâtiment développés dans les années 1970 servaient uniquement à faire des estimations de consommation annuelle basées sur des calculs en régime permanent (*Schumann [44]*). Pour prendre en compte les systèmes énergétiques des outils dynamiques ont été développés pour effectuer des simulations au pas de temps horaire avec des bâtiments multizones. Aujourd'hui, il existe des outils puissants qui permettent de simuler des bâtiments de très grande taille s'étendant même jusqu'à l'échelle du quartier. De nombreux couplages sont également possibles entre outils pour prendre en compte la multitude de phénomènes physiques impliqués dans le domaine du bâtiment (thermique, aéraulique, éclairage, acoustique, hygrométrie, modèles comportementaux, métabolisme). Par exemple la modification d'une paroi pour respecter des contraintes sonores a un impact sur la thermique et inversement. De même, des variations de températures peuvent pousser l'occupant à changer son comportement en agissant sur un système de chauffage faisant ainsi varier le niveau de confort. Cependant dans un objectif de pilotage optimal, le niveau de complexité du modèle est contraint par la puissance des contrôleurs dont le temps de calcul augmente avec la taille du modèle.

1.1. Différents types de modèles

Il existe un grand nombre d'outils mathématiques pour la modélisation énergétique du bâtiment et la littérature est très riche. Sous le terme « modélisation » sont regroupés beaucoup de types de modèles qui peuvent être utilisés à différents moments que ce soit en conception :

- pour vérifier que le projet répond aux contraintes règlementaires,
- pour valider des choix de conception en fonction des volontés du maître d'ouvrage et des contraintes économiques,
- pour dimensionner des équipements dont les caractéristiques dépendent directement de la performance de l'enveloppe,
- dans une démarche collaborative avec l'utilisation d'une maquette numérique (BIM).

ou en phase d'exploitation :

- pour piloter un équipement (chauffage, climatisation, alarme, éclairage),
- pour anticiper les besoins énergétiques et piloter les équipements de façon optimale.

La modélisation thermique du bâtiment est un préalable au calcul des besoins énergétiques pour la simulation ou la prédiction. Cette dernière peut se faire sur le long terme pour dimensionner des équipements ou établir des scénarios de consigne (année), sur le moyen terme pour des applications de maintenance (mois/semaines) ou à court terme pour la gestion au quotidien (jour). Généralement la taille du modèle est d'autant plus grande que l'horizon temporel de prédiction est grand puisque le modèle doit intégrer un nombre plus important de constantes de temps. Ici, un intérêt particulier est porté aux modèles pour une application au pilotage à court terme avec un horizon de l'ordre de 24h. Les modèles peuvent-être regroupés en trois catégories (**Tableau 2**) qui diffèrent par l'approche utilisée (*Li et Wen [45]*):

- modèles « boîte noire » : ce sont des modèles empiriques construits sur la base de mesures et des relations entrées/sorties, ils nécessitent des mesures sur une grande période pour s'entraîner et

être capable de prédire le comportement du bâtiment dans plusieurs conditions. C'est la phase d'apprentissage, le domaine de validité du modèle ne peut s'étendre au-delà des données d'entrée ayant servies à celle-ci.

- modèles « boîte blanche » : ce sont des modèles déterministes ou de connaissances construits à partir des lois physiques qui régissent les phénomènes intervenant dans le système étudié. Ils sont capables de très bien reproduire la dynamique des bâtiments mais peuvent devenir très lourds et gourmands en temps de calcul ce qui n'est pas compatible avec une application en temps réel. Cependant les phénomènes peuvent être trop complexes ou mal connus ce qui introduit de nombreux biais dans le modèle de connaissance.
- modèles hybrides dits « boîte grise » correspondant à une modélisation semi-physique lorsque le modèle de connaissance est imparfait. Ils prennent en considération à la fois les connaissances et les mesures tout en restant de taille réduite pour un meilleur compromis avec l'application de contrôle. Ces modèles combinent les avantages de l'intelligibilité d'un modèle « boîte blanche » avec la souplesse d'un modèle ayant des paramètres ajustables et en petit nombre.

Ce dernier type de modèle est retenu par la suite car c'est un bon compromis évitant la complexité des modèles « boîte blanche » et nécessitant moins de mesures qu'un modèle « boîte noire » puisque la valeur des paramètres à ajuster est bornée par la physique.

Méthode de prévision	Boîte blanche	Boîte noire	Boîte grise
Modèles	EnergyPlus [46-48] ESP-r [49] TRNSYS [50-51] Modelica [52-54]	ARMAX [55] Fonctions de transfert [56] Réseau de neurones artificiels (ANN) [57-59]	Analogie électrique (RC) Equations différentielles
Rapidité de paramétrage	-	++	+
Accès aux données	-	++	+
Rapidité d'exécution	-	+	+
Sens physique	++	-	+
Précision de la prévision	++	?	?
Adapté aux changements de stratégie	++	?	?

Tableau 2 - Classification des différents types de modèles et intérêt (Berthou [60])

Pour la simulation du bâtiment le logiciel EnergyPlus est très utilisé. Il a été développé à la fin des années 1990 suite à une volonté du gouvernement des Etats-Unis de se doter d'outils de simulation thermique plus puissants du fait des avancées en termes de méthodes et de capacités de calculs. Il est basé

sur deux outils de calculs existants : *BLAST* [61] et *DOE-2* [62]. La publication de *Crawley et al.* [47] en décrit le fonctionnement. L'outil se compose d'un module qui effectue les bilans de masse et de chaleur en associant à chaque zone un nœud d'air. Un deuxième module permet de prendre en compte les systèmes énergétiques et un troisième module de gestion contrôle les simulations et permet d'éventuelles connections avec d'autres outils. Cela est notamment utilisé dans les travaux de *Zhao et al.* [46] où un contrôleur prédictif est développé en utilisant EnergyPlus pour la simulation du bâtiment et Matlab/Simulink pour la partie optimisation. La communication est permise par l'outil de co-simulation *MLE+* [63]. L'auteur précise cependant qu'il est difficile d'implémenter un modèle de grande taille comme dans EnergyPlus. Néanmoins, le fait que le code source soit libre et open-source est un point fort de l'outil puisque cela peut permettre d'automatiser des simulations comme dans la publication de *Miller et al.* [48] avec un script Python.

Egalement libre et open-source, le langage Modelica dispose d'une bibliothèque « building » développée en 2007 par le Lawrence Berkeley National Laboratory. La publication de *Wetter et al.* [52] présente un modèle de bâtiment monozone en utilisant cette bibliothèque. Plus récemment une bibliothèque bâtiment/systèmes appelée BuildSysPro a été développée par EDF [53]. C'est un outil orienté objet avec un langage équationnel utilisant des relations acausales, il n'y a pas besoin d'identifier les inconnues d'un problème puisqu'il repère la variable manquante et réécrit l'équation en fonction. La bibliothèque comprend différents packages (airflow, control, fluid, rooms) ce qui permet par exemple de tester des logiques de régulation pour les systèmes du bâtiment (publication de *Bois et al.* [54] sur l'utilisation d'un système solaire combiné). Les modèles Modelica (extension .mo) sont des fichiers texte qui peuvent donc être facilement parsés pour automatiser des calculs de la même façon que pour EnergyPlus.

Comme outil « boîte blanche » il existe le logiciel ESP-R basé sur les volumes finis. Il est libre et a été développé dans les années 1970 à l'Université de Strathclyde en Ecosse. Plusieurs modules sont proposés pour les différentes physiques du bâtiment (acoustique, CFD, éclairage) et il est possible d'exporter un projet vers EnergyPlus. Ce logiciel reste peu utilisé en recherche.

Un des outils les plus connus en recherche pour la simulation thermique du bâtiment est le logiciel TRNSYS (Transient System Simulation Tool) qui a été développé par l'Université de Madison (USA) et codé en Fortran. Il présente une architecture modulaire et dispose d'une grande bibliothèque de composants qu'il suffit de relier entre eux. Les modèles ont souvent été validés dans le cadre de travaux de l'IEA (International Energy Agency). Pour modéliser un bâtiment il existe un module spécifique appelé « type 56 » paramétrable avec son interface TRNBuild. Il est également possible de faire de la co-simulation comme par exemple avec les travaux de *Liu et al.* [50] où Matlab est couplé à TRNSYS pour effectuer du contrôle prédictif à l'aide d'algorithmes génétiques. La simulation thermo-aéroulque est possible avec l'outil TRNFlow qui modélise les transferts de masse et permet de simuler finement des systèmes comme une centrale de traitement d'air ou des ventilo-convecteurs (*Flory-Celini* [51]).

Dans la famille des modèles « boîte noire » il y a les modèles ARMA qui sont composés d'une partie AutoRégressive AR et moyenne mobile MA (Moving Average) qui permettent de comprendre et prédire les

valeurs d'une série temporelle. La série est modélisée à partir des valeurs passées d'entrée/sortie, des valeurs passées et présentes d'un bruit blanc et d'un modèle linéaire.

Les modèles des fonctions de transfert permettent d'établir de relations directes entrée-sortie. *Ghiaus [56]* utilise cette représentation pour estimer la charges thermique d'un bâtiment (chauffage ou refroidissement). Il y a autant de fonctions de transfert que de relations entrée-sortie, classiquement une sortie (température d'air) et plusieurs entrées (température extérieure, rayonnement extérieure, apports internes, puissance de chauffage).

Les modèles de type réseaux de neurones ou ANN pour Artificial Neural Network sont très présents dans la littérature. C'est une méthode statistique basée sur le comportement des neurones du cerveau humain. Le modèle est ajusté par apprentissage et peut permettre de prédire les consommations des bâtiments (*Melo et al. [57]*, *Khosravani et al. [58]*, *Cheung et al. [59]*). Cependant *Berthou [60]* constate un manque de robustesse dans le cas d'utilisation de modèles de ce type pour faire de la prédiction et préconise plutôt les modèles de type analogie électrique pour de la prédiction sur quelques jours.

Le bâtiment présente beaucoup de paramètres d'entrée et peu d'observables ce qui se prête peu aux modèles « boîte noire ». *Zhao et Magoulès [64]* précisent que les modèles « boîte grise » sont adaptés dans le cas où le système est partiellement connu ce qui correspond à la conjoncture du bâtiment. Par l'ajout de connaissances physiques, les modèles hybrides semblent donc plus adaptés à la problématique de contrôle prédictif court terme.

1.2. Obtention d'un modèle d'ordre réduit

Un modèle doit être adapté en fonction de l'application souhaitée. Dans une optique de contrôle avec un horizon de quelques heures, il n'est pas nécessaire que le modèle décrive les dynamiques longues (mensuelles, annuelles). Ainsi, si l'utilisation d'un modèle de taille réduite est souhaitée, deux voies sont possibles : partir d'un modèle détaillé de type « boîte blanche » puis procéder à une étape de réduction de modèle pour en obtenir un d'ordre réduit, ou alors en construire un directement de taille réduite. Ainsi, la réduction de modèle n'est pas obligatoire, elle se fait si nécessaire.

1.2.1. Représentation d'état

La représentation d'état permet de mettre sous forme matricielle les équations régissant un système linéaire comme c'est souvent le cas pour la thermique du bâtiment. Ce formalisme est particulièrement adapté au domaine de l'automatique. Dans une telle représentation, l'état du système est fonction de l'état passé et des entrées ou sollicitations. La représentation d'état comprend une équation d'état et une équation de sortie (Eq.1) :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) + DU(t) \end{cases} \quad (\text{Eq.1})$$

$X(t) \in \mathbb{R}^n$: vecteur d'état qui représente les n variables d'état

$Y(t) \in \mathbb{R}^p$: vecteur de sortie qui représente les p sorties observées

$U(t) \in \mathbb{R}^m$: vecteur des sollicitations qui représente les m sollicitations ou commandes

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$: matrice d'état

$B \in \mathbb{R}^{n \times m}$: matrice des sollicitations ou commandes

$C \in \mathbb{R}^{p \times n}$: matrice d'observation

$D \in \mathbb{R}^{p \times m}$: matrice d'action

1.2.2. Modèles obtenus par des techniques de réduction

La réduction de modèle permet une diminution de l'ordre sans perte majeure d'information pour l'application souhaitée. Ainsi le temps de calcul s'en trouve diminué ce qui est utile pour du calcul temps réel. La plupart des techniques de réduction s'appuient sur la représentation modale ou représentation d'état (*Kalman [65]*) dont on cherche à diminuer l'ordre en analysant les modes propres (**Figure 23**). Il est possible de citer :

- Troncature de Marshall : consiste à tronquer la base modale et à ne conserver que les N premiers modes propres classés par ordre décroissant des constantes de temps (*Marschall [66]*),
- Amalgame Modal (*Oulefki [67]*),
- Méthode de Michalesco : conservation des modes pour lesquels l'erreur de sortie est minimum (*Michalesco [68]*),
- Décomposition en Valeurs Singulières (SVD) : méthode basée sur l'analyse modale qui consiste à ne garder que les variables d'état dont les constantes de temps sont importantes, c'est à dire dont les variations associées sont les plus importantes (*Golub et Reinsch [69]*),
- Réalisations équilibrées : seuls les états à fort degré de commandabilité et d'observabilité sont conservés (*Moore [70]*),
- Décomposition Orthogonales aux valeurs Propres (POD) : cette méthode utilise des snapshots (échantillons), elle consiste à rechercher les vecteurs propres d'un opérateur de corrélation (*Sempey [71]*).

Les modèles de conception généralement de grande taille peuvent théoriquement être adaptés au contrôle grâce à ces techniques de réduction. Celles-ci sont adaptées au formalisme du modèle d'état. Cela est notamment employé par un outil de simulation thermique dynamique de référence en France : *Pleiades+COMFIE [72]*. Le bâtiment y est décrit par des modèles d'états avec des matrices de grande taille puis un changement de base est effectué pour réduire l'ordre du modèle en utilisant la SVD. Dans la version commerciale les dix premiers modes sont conservés, cette valeur est déterminée comme étant un compromis entre la fiabilité et le temps de calcul puisque le temps de réduction est du même ordre que le temps de simulation. Cependant les modèles de conception ne sont peut-être pas directement adaptés au contrôle.

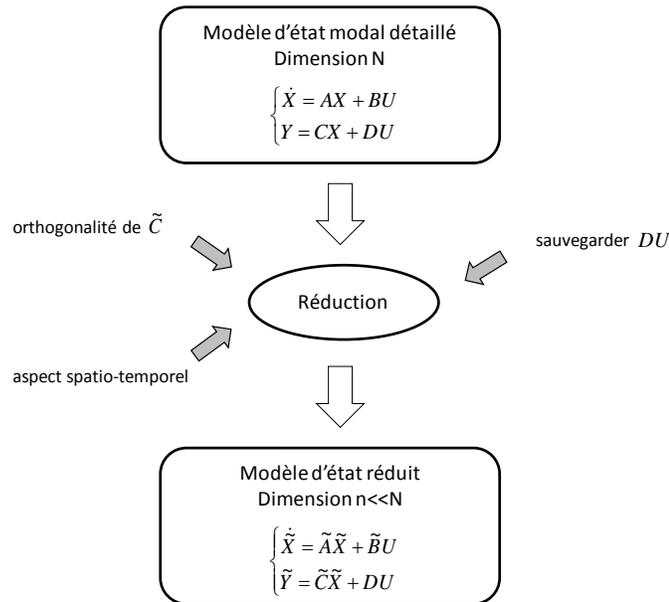


Figure 23 - Principe de réduction d'un modèle d'état modal [67]

Dans le cadre d'un stage de fin d'étude nous avons réalisé un travail sur la réduction de modèles pour le contrôle [73] à partir d'un modèle de la maison INCAS (4 zones), une des trois plateformes de démonstration du projet située à Chambéry. Le modèle d'état non réduit d'ordre 133 est réduit par trois techniques différentes pour ne garder que les modes dominants. Plusieurs critères sont utilisés pour déterminer si le modèle réduit est satisfaisant :

- le Contenu Informationnel Relatif (RIC) qui est égal à la somme des valeurs des k modes conservés sur la somme des valeurs de tous les modes (n modes) doit être supérieur à 95% (Eq.2) :

$$RIC = \frac{\sum_{j=1}^k \sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \geq 95\% \quad (\text{Eq.2})$$

- le rapport de la valeur du premier mode non conservé sur la valeur du mode le plus important doit être inférieur à 0,01 (Eq.3) :

$$r = \frac{\sigma_{k+1}}{\sigma_1} \leq 0,01 \quad (\text{Eq.3})$$

- la moyenne quadratique de l'évolution des écarts entre la température d'une zone du Modèle d'Ordre Elevé (MOE) et du Modèle d'Ordre Réduit (MOR) doit être inférieur à 0,5°C qui est le seuil de sensibilité du corps humain à une variation de température (Eq.4) :

$$\|T_{MOE} - T_{MOR}\|^2 \leq 0,5^\circ\text{C} \quad (\text{Eq.4})$$

Les trois méthodes de réduction comparées sont la SVD, les Réalisations Equilibrées (RE) et la POD. Pour chacune d'elles la réduction est faite en ne conservant que dix modes par zone. Les résultats du **Tableau 3** permettent de vérifier que les modèles réduits sont suffisamment précis par rapport au modèle détaillé pour un ordre de réduction à dix modes.

	$RIC \geq 95\%$				$r \leq 0,01$				$\ T_{MOE} - T_{MOR}\ ^2 \leq 0,5^\circ C$			
Méthode	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
SVD	99%	100%	98%	100%	4.10^{-3}	8.10^{-5}	7.10^{-3}	4.10^{-5}	8.10^{-2}	3.10^{-2}	8.10^{-2}	2.10^{-3}
RE	100%	100%	100%	100%	3.10^{-6}	7.10^{-7}	4.10^{-7}	2.10^{-11}	4.10^{-3}	1.10^{-3}	4.10^{-3}	1.10^{-2}
POD	100%	100%	100%	100%	5.10^{-8}	6.10^{-18}	5.10^{-8}	2.10^{-6}	9.10^{-3}	2.10^{-3}	2.10^{-4}	9.10^{-2}

Tableau 3 - Valeurs des critères de réduction pour chacune des méthodes

Ensuite il faut vérifier si ces modèles réduits satisfont deux critères liés au contrôle. Ces critères s'appliquent aux variables d'états du système étudié. Dans le cas présent ces variables d'état sont des températures :

- critère de commandabilité : un état commandable signifie qu'au moins une des commandes (ici une des puissances chauffantes) peut faire passer cet état d'un état initial donné à un état final, lui aussi donné, en une période finie. Le nombre d'états commandables est obtenu en calculant le rang de la matrice de commandabilité M_c du système d'état (Eq.5) :

$$M_c = [BABA^2B...A^{n-1}B] \quad (\text{Eq.5})$$

- critère d'observabilité : dire qu'un état est observable signifie que connaissant l'historique sur un intervalle $[t_0, t_1]$ de toutes les sorties du modèle et de toutes les commandes alors il est possible de déterminer la valeur de cet état à l'instant t_0 . Le nombre d'états observables est obtenu en calculant le rang de la matrice d'observabilité M_o (Eq.6) :

$$M_o = [CCACA^2...CA^{n-1}] \quad (\text{Eq.6})$$

	Commandabilité				Observabilité			
Méthode	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
SVD	9	10	9	10	4	4	4	5
RE	10	10	10	10	5	5	6	7
POD	10	10	10	10	5	5	4	4

Tableau 4 - Valeurs des critères de réduction pour chacune des méthodes

Les résultats en termes de commandabilité et d'observabilité sont donnés dans le **Tableau 4**. Ainsi ces modèles ne sont pas suffisamment réduits pour être éligible au contrôle étant donné qu'ils ne sont pas entièrement observables.

1.2.3. Construction directe de modèles d'ordre réduit

Un modèle peut-être directement d'ordre réduit de par sa construction. Il faut ensuite calibrer le modèle en utilisant des méthodes fondées sur l'identification paramétrique à partir de jeux de données entrées/sorties. Ces méthodes ont été développées par *Ljung* en 1987 [74] avec les équations écrites sous forme de fonctions de transfert (domaine fréquentiel) puis adaptées au formalisme du modèle d'état dans le domaine temporel par *Petit* en 1991 [75]. Les modèles de type « analogie électrique » ou « RC » sont les plus répandus dans la littérature. Ils sont rapides à prendre en main et intuitifs d'utilisation, ils sont mis sous forme de modèle d'état. Le principe consiste à établir des équivalences entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques (**Tableau 5**) :

Grandeurs thermiques			Grandeurs électriques		
T	Température	[K]	U	Tension	[V]
ϕ	Densité de flux	[W/m ²]	J	Densité de courant	[A/m ²]
P	Puissance	[W]	I	Courant	[A]
Q	Quantité de chaleur	[J]	Q	Charge	[C]
λ	Conductivité thermique	[W/K.m]	σ	Conductivité électrique	[1/ Ω .m]
R _{th}	Résistance thermique	[K/W]	R	Résistance électrique	[Ω]
C _{th}	Capacité thermique	[J/K]	C	Capacité électrique	[F]
$C_{th} \frac{d(T_A - T_B)}{dt} = \frac{(T_B - T_A)}{R_{th}} + p$			$C \frac{d(U_A - U_B)}{dt} = \frac{(U_B - U_A)}{R} + i$		

Tableau 5 - Equivalence entre les grandeurs thermiques et électriques (Correvon [76])

Pour écrire le modèle RC sous forme de modèle d'état il suffit d'appliquer la loi d'ohm et la loi de Kirchhoff qui traduit la conservation de l'énergie à chaque nœud pour obtenir le système d'équations différentielles qui décrit l'évolution en température du bâtiment. La taille du modèle correspond au nombre de résistances et de capacités, et s'écrit alors « xRyC » avec x le nombre de résistances et y le nombre de capacités. L'ordre du modèle correspond au nombre de nœuds de température reliés à une capacité. Sa structure est rapidement compréhensible avec le schéma électrique équivalent. Il est alors aisé de rajouter des entrées aux nœuds souhaités pour s'adapter aux spécificités de chaque bâtiment. Plusieurs outils de calculs à destination des bureaux d'études font appel à ce type de modèle comme le moteur de calcul de la réglementation thermique 2012 [77] même si cela reste invisible pour l'utilisateur. La norme *ISO 13790:2008* [78] relative au calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux, utilise également un modèle RC. Dans la littérature les modèles RC ou « boîte grise » sont très largement utilisés (**Tableau 6**).

Auteurs	Année	Taille	Application	réf
McLaughlin et al.	1981	-	contrôle du chauffage	[79]
Lorenz et Masy	1982	2C	contrôle du chauffage pour l'économie d'énergie	[80]
Nielsen et Nielsen	1984	2R2C	réalisation de tests en dynamique pour calibrer un modèle de bâtiment	[81]
Achterbosch et al.	1985	15R13C	simulation thermique du bâtiment pour faible et forte inertie	[82]
Crabb et al.	1987	3R2C	simulation thermique du bâtiment	[83]
Athienitis et al.	1990	-	contrôle des systèmes de ventilation	[84]
Coley et Penman	1995	3R2C	contrôle d'un système de chauffage	[85]
Madsen et Holst	1995	2R2C	estimation d'un modèle de bâtiment	[86]
Hudson et Underwood	1999	8R6C	simulation thermique pour bâtiment à forte inertie	[87]
Mendes et al.	2001	9C	contrôle du chauffage dans les bâtiments à faible inertie	[88]
Fraisse et al.	2002	38R35C	simulation thermique du bâtiment par agrégation de sous-modèles 3R4C	[89]
Gouda et al.	2002	3R2C	interaction entre deux pièces séparées par un mur	[90]
Wang et Xu	2006	3R2C	modélisation simplifiée pour estimer les performances d'un bâtiment	[91]
Deng et al.	2010	48R37C	simulation d'un bâtiment monozone	[92]
Bacher et Madsen	2011	4R4C	identification d'un modèle de bâtiment	[93]
Park et al.	2013	2R2C	identification d'un modèle de bâtiment	[94]
Faggianelli et al.	2015	6R2C	modèle de bâtiment pour la ventilation naturelle	[95]

Tableau 6 - Utilisation de modèles RC pour la thermique du bâtiment

Nielsen et Nielsen [81] utilisent un modèle RC pour représenter les performances thermiques d'une petite maison. Une campagne de mesure de 63 heures est effectuée sur deux pièces expérimentales pour identifier les paramètres d'un modèle à deux capacités. La première pièce orientée ouest est à faible inertie tandis que celle orientée à l'est a une forte inertie. Dans les deux cas le modèle identifié est adapté. La même démarche est effectuée dans les travaux de Achterbosch et al. [82], cette fois-ci à l'échelle de la maison avec une à forte inertie (murs béton) et une autre à faible inertie (ossature bois). Les conclusions sont similaires. Le modèle RC employé est de grande taille avec plusieurs niveaux de finesses : un nœud pour toute la maison ou quatre pour chacune des pièces. Crabb et al. [83] soulignent l'intérêt de tels modèles pour leur faible complexité et la faible puissance de calcul requise. Ce type de modèle était bien adapté aux faibles capacités de calcul de l'époque (1984-1987). En outre, un modèle à deux constantes de temps suffit généralement. Ils ont développé une interface avec des architectes qui permet de calculer la réponse thermique d'un bâtiment, le modèle est de type 3R2C (Figure 24), deux résistances pour une paroi lourde, une résistance pour une paroi légère et deux capacités respectivement pour l'air et les murs. La température extérieure est imposée et il y a un terme source sur le nœud d'air correspondant à la puissance de chauffage. En 1995 Cowley et Penman [85] utilisent exactement le même modèle pour le contrôle de l'allumage du système de chauffage d'un bâtiment dont le modèle est identifié à partir de sollicitations expérimentales. Madsen et Holst [86] utilisent également un modèle à deux constantes de temps (Figure 25) identifié à partir de données expérimentales obtenus en sollicitant un chauffage électrique. Comme dans les travaux précédents les deux capacités correspondent à l'air et aux murs, une résistance entre le nœud d'air et le nœud de la paroi pour les murs et une entre l'air intérieur et extérieur pour la ventilation. Deux termes sources prennent en compte les apports solaires et le radiateur.

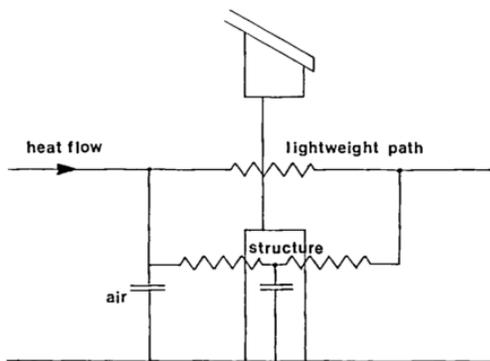


Figure 24 - Modèle 3R2C de Crabb et al.

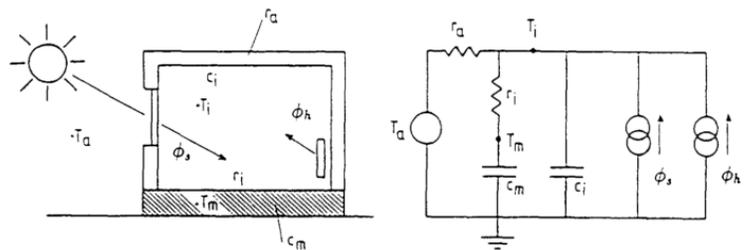


Figure 25 - Modèle 2R2C de Madsen et Holst

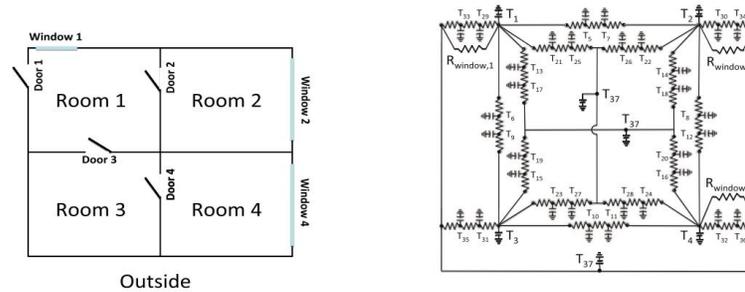


Figure 26 - Modèle 48R37C de Deng et al.

Dans le même esprit, les travaux de *Hudson et Underwood* [87] comparent des modèles RC du premier ordre et du second ordre mis sous forme de modèle d'état dans Matlab/Simulink pour des applications de contrôle à court terme. Ils concluent qu'il n'y a pas besoin d'avoir un ordre plus élevé. Les modèles sont identifiés à partir de données provenant d'un bâtiment à forte inertie thermique. Ils justifient le choix de ce type de modèles par le fait qu'ils sont transparents, facile à interpréter et peuvent être initialisés à partir de mesures. Les modèles RC sont donc généralement d'ordre inférieur à trois pour des applications de contrôle, néanmoins il est possible de réaliser des modèles de grande taille. On note l'utilisation du critère de Laret par *Fraisse et al.* [89] pour déterminer le nombre minimal de capacités dans une paroi. *Deng et al.* [92] valident une méthode de réduction de modèles pour des bâtiments de grande taille à partir d'un modèle 48R37C (Figure 26) : 4 nœuds d'air, 8 nœuds pour les planchers, 8 nœuds pour les plafonds, 8 nœuds pour les cloisons internes et murs extérieurs et un nœud pour l'air extérieur. *Bacher et Madsen* [93] proposent des modèles RC avec une complexité croissante de deux à cinq capacités afin de tester une méthode d'identification à l'aide de données collectées sur un bâtiment de 120m². La performance de chaque modèle est évaluée selon trois critères :

- suivi de la dynamique avec une fonction d'autocorrélation,
- les résidus pour savoir quels sont les effets non pris en compte par le modèle,
- sens physique des paramètres.

La méthode proposée semble valide pour l'ensemble des modèles présentés puisque les paramètres identifiés permettent de satisfaire aux critères. Pour une application de contrôle prédictif *Park et al.* [94] représentent un bâtiment bien isolé avec un modèle d'ordre faible. Les systèmes peuvent également être modélisés grâce à l'analogie électrique puisque dans ces travaux un modèle RC est associé au système de chauffage pour représenter son inertie à l'allumage et à l'arrêt.

Depuis une dizaine d'années il y a également un grand nombre de papiers traitant du contrôle prédictif qui utilisent des modèles RC ou « boîte grise ». Ils sont utilisés pour le pilotage anticipatif de la ventilation naturelle ou contrôlée, de planchers chauffants, de divers systèmes de chauffage ou de refroidissement ainsi que pour le stockage de l'énergie (Tableau 7).

En 1997, la publication de *Garcia-Sanz* [96] introduit un contrôleur prédictif de type on/off pour un bâtiment équipé d'un système de chauffage central. Le modèle de taille 8R3C est calibré avec des données mesurées in situ et donne des résultats concluants lors des simulations du contrôleur dans

l'environnement Simulink. Plus tard, *Kummer et André* [97] utilisent un modèle RC de grande taille pour le contrôle prédictif d'un chauffage d'appoint par ventilo-convecteurs. Il s'agit d'une maison solaire passive où les apports solaires suffisent la majorité du temps au chauffage. Dans ce cas particulier le chauffage d'appoint est parfois utilisé en début de journée mais la chaleur ainsi stockée combinée à l'arrivée d'apports solaires peut occasionner des surchauffes et en l'absence de système de climatisation, un contrôle anticipatif est nécessaire (**Figure 27**). Avec un horizon de prédiction de 24h, le contrôleur anticipatif détermine le plan optimal de température d'eau en entrée dans le ventilo-convecteur, le suivi de ce plan est assuré par un contrôleur de type PID.

Auteurs	Année	Taille	Application	réf
Garcia-Sanz	1997	8R3C	MPC pour un système de chauffage central	[96]
Kummert et André	2005	25R10C	MPC pour les systèmes de chauffage	[97]
Wen et Smith	2007	2C	MPC pour la ventilation mécanique	[98]
Ha et al.	2008	2R2C	MPC pour la prévision et l'optimisation de la charge	[99]
Ghiaus et Hazyuk	2010	4R2C	MPC pour les bâtiments à chauffage intermittent	[100]
Karlsson et Hagetoft	2011	2R2C	MPC pour un plancher chauffant	[101]
Lehmann et al.	2012	38R12C	MPC pour la ventilation, l'ouverture des fenêtres et le chauffage	[102]
Sourbron et al.	2013	4R2C	MPC pour plancher/plafond chauffant et système de ventilation	[103]
Hu et Karava	2013	24R9C	MPC pour systèmes de refroidissement	[104]
Bacha et al.	2013	5R1C	MPC pour le contrôle du chauffage et d'appareils ménagers électriques	[105]
Sarabi et al.	2013	9R2C	Identification d'un modèles RC pour du contrôle prédictif	[106]
Berthou	2013	6R2C	MPC pour l'effacement des pointes de consommation	[60]
Leclere et al.	2013	5R3C	MPC pour la ventilation naturelle	[107]

Tableau 7 - Utilisation de modèles RC pour le contrôle prédictif dans le bâtiment

Dans le cadre des travaux de *Wen et Smith* [98] pour une application de contrôle, un modèle est identifié on-line à partir des données mesurées en temps réel et conduit à une erreur maximale inférieure à 0,28°C. La gestion anticipative a souvent pour but l'effacement ou le décalage d'un pic d'appel de puissance. Le papier de *Ha et al.* [99] s'intéresse à la gestion de la demande d'électricité tout usage (chauffage, éclairage, cuisson). Un modèle 2R2C est utilisé pour ajuster le fonctionnement des systèmes pour satisfaire à une contrainte sur l'appel de puissance avec également une contrainte de température de confort à maintenir entre 20,5°C et 24,5°C. De façon analogue un modèle 4R2C est utilisé par *Ghiaus et Hazyuk* [100] pour prévoir la charge thermique. Le modèle est ensuite décomposé en trois parties pour isoler la contribution de chaque sollicitation (température extérieure, flux solaire, occupants). Un modèle

d'état et une fonction de transfert sont associés à chaque sous-modèle puis le principe de superposition est appliqué (**Figure 28**), ainsi la commande est déterminée par rétroaction (Eq.7). Pour *Hu et Karava* [104] les modèles légers facilitent l'implémentation d'un MPC dans un bâtiment réel. Ils ont implémenté un MPC dans un bâtiment à forte inertie bénéficiant d'importants apports solaires et doté d'un système de climatisation passive (par ouverture des fenêtres) et active. Il s'agit d'un atrium de grande hauteur sur plusieurs étages attenant à des couloirs, le modèle est divisé en trois zones pour tenir compte de la stratification. On compte donc trois nœuds de température pour l'atrium et six pour les couloirs. La modélisation est faite dans l'environnement Matlab.

$$U_{wc} = H_3^{-1} H_1 \theta_0 + H_3^{-1} H_2 \dot{Q}_s \quad (\text{Eq.7})$$

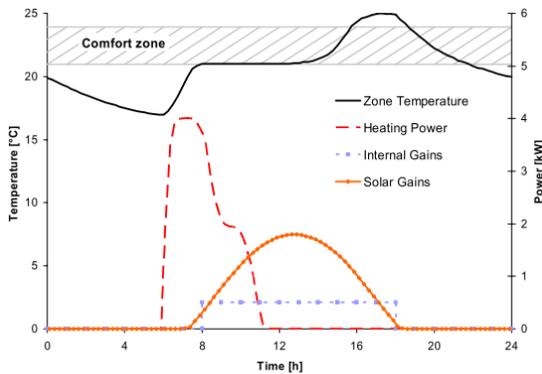


Figure 27 - Comportement typique du bâtiment présenté par Kummert et André

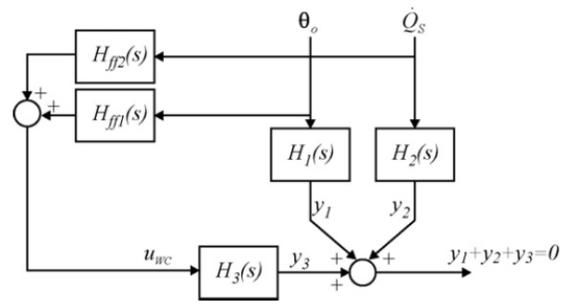


Figure 28 - Anticipation de la température extérieure par rétroaction

Lehmann et al. [102] utilisent un modèle RC unique d'ordre 12 pour décrire le bâtiment et les systèmes :

- ventilation naturelle : résistance variable entre l'extérieur et le nœud d'air,
- ventilation mécanique : résistance variable selon la position de l'échangeur entre la température d'entrée de la CTA et l'air intérieur,
- radiateurs, éclairage et gains internes : source de courant directement connectée au nœud d'air,
- plancher et plafond rayonnant : source de courant au niveau des nœuds correspondant au plancher et au plafond,
- free cooling : résistance variable en fonction des conditions de températures,
- volets : résistance variable additionnelle selon la position,
- infiltrations : résistance fixe entre l'extérieur et l'air intérieur.

Le modèle RC est volontairement détaillé pour permettre des analyses paramétriques précises. Une comparaison avec un modèle TRNSYS donne une erreur moyenne de 0,5°C. La publication de *Sarabi et al.* [106] porte sur la modélisation de la plateforme PREDIS qui est l'une des trois plateformes de démonstration du projet PRECISION. Cette plateforme est un « bâtiment dans le bâtiment » et

l'influence des conditions extérieures est donc minimisée. Le bâtiment comprend une zone d'enseignement et une zone de bureau. Le modèle de la zone d'enseignement a une seule capacité, cinq conditions limites de température et un terme source pour le chauffage. Pour finir *Leclere et al.* [107] propose un modèle 5R3C pour contrôler la température intérieure d'un bâtiment résidentiel par l'ouverture de volets (rafraichissement passif). Le modèle est identifié à partir d'un modèle EnergyPlus jugé comme étant de référence.

Les conclusions de ces nombreux travaux encouragent l'utilisation de la modélisation par l'analogie électrique, ainsi le choix est fait d'utiliser ce type de modèle. Des modèles RC « a priori » sont proposés puis identifiés à l'aide de la méthode décrite dans le chapitre III.

Résumé

Un modèle se doit d'être léger pour être embarqué dans un contrôleur. Un modèle d'ordre faible peut être obtenu directement ou à partir d'un modèle détaillé avec des techniques de réductions. L'analyse bibliographique montre la pertinence des modèles de type « analogie électrique » pour une application de contrôle anticipatif.

2. Présentation de la plateforme SYNERGI et de ses systèmes

Trois bâtiments expérimentaux sont utilisés dans le cadre du projet ANR PRECISION. Les maisons INCA au Bourget-du-Lac sont très bien isolées et contrôlées mais il n'y a pas d'occupants, la plateforme PREDIS à Grenoble est un ensemble de deux salles (bureau et salle de classe) occupées mais où les interactions avec l'extérieur sont limitées car il s'agit d'un bâtiment dans un bâtiment. La plateforme SYNERGI est un bâtiment neuf de 900 m² sur deux niveaux faisant partie de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Bordeaux. Ce bâtiment est un support de formation puisqu'il est équipé d'un panel de systèmes énergétiques (production et émission, chauffage et climatisation, ventilation) pour permettre aux étudiants et aux professionnels de se former sur un bâtiment réel en fonctionnement. Dans ces travaux une seule zone de cette plateforme est utilisée, il s'agit d'une salle de conférence d'environ 200 m² située au deuxième étage. Le bâtiment est occupé et est conforme aux exigences de la réglementation thermique 2005.

2.1. Caractéristiques de l'enveloppe

La plateforme SYNERGI orientée ouest, est conforme à la réglementation thermique 2005. La salle de conférence étudiée est en contact avec l'extérieur par une grande façade vitrée avec bardage métallique à l'ouest et par un mur pignon non vitré isolé par l'intérieur au sud. Le plancher haut en contact avec la toiture est constitué d'un faux plafond. La paroi orientée à l'est est en contact avec un local non chauffé et la paroi nord avec un bureau adjacent chauffé (**Figure 29** et **Figure 30**). La plateforme est située au dessus de salles d'enseignement chauffées. Le plancher intermédiaire est constitué d'une dalle de béton de 12 cm au dessus de laquelle est installé une deuxième dalle pour le plancher chauffant. Les menuiseries sont de

type double-vitrages avec cadre aluminium. Des brises soleil fixes permettent de limiter les apports solaires en été sur la face ouest. Le détail des compositions, les coefficients de transmission thermique des parois et des vitrages sont donnés **annexe A**.

2.1. Systèmes en présence

Trois systèmes sont présents pour la plateforme (**Figure 31**). Le renouvellement d'air est assuré par une Centrale de Traitement d'Air (CTA) double flux et le chauffage par un plancher chauffant et des ventilo-convecteurs (VCV). Afin de prendre en compte ces systèmes dans les modèles, des études préalables ont été menées pour relier l'effet de chaque système à la température intérieure du modèle.

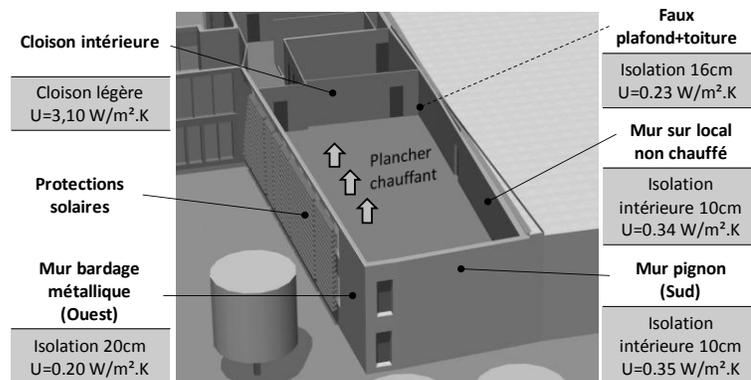


Figure 29 - Salle de conférence au deuxième étage du bâtiment démonstrateur

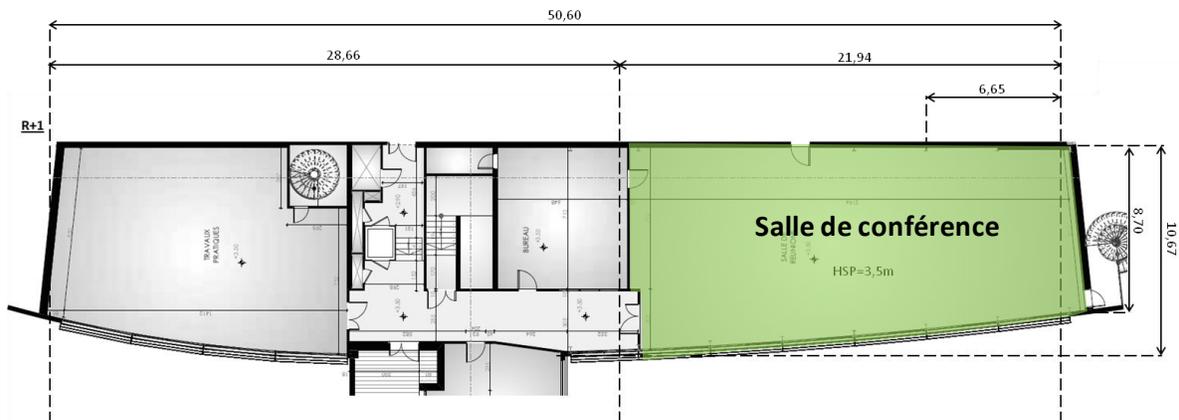


Figure 30 - Métré de la plateforme SYNERGI de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Bordeaux

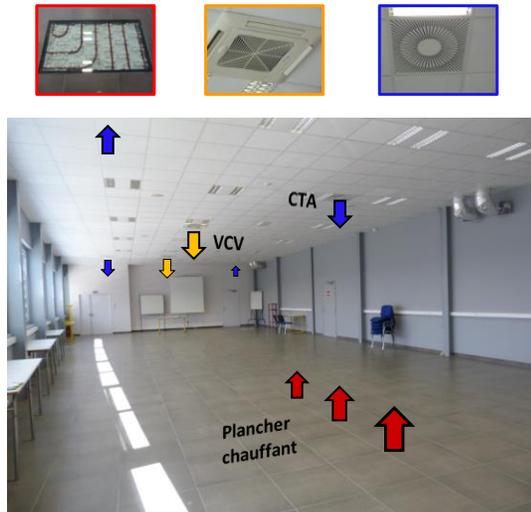


Figure 31 - Vue de la salle de conférence et des systèmes en présence

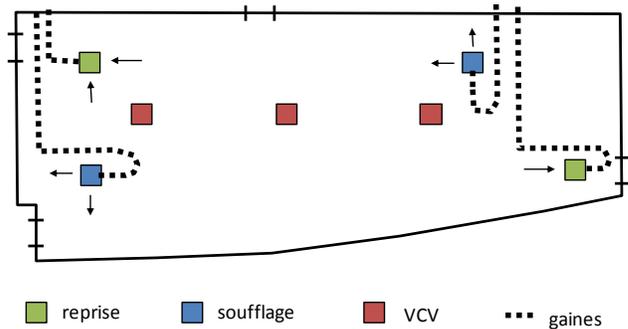


Figure 32 - Disposition des bouches de ventilation

2.1.1. Centrale de traitement d'air double flux

Une centrale double flux permet de traiter l'air de tout le bâtiment. Etant donné le grand volume de la pièce, il y a deux jeux de bouches de soufflage/reprise (Figure 32). Le débit d'air règlementaire [108] est fixé à $18 \text{ m}^3/\text{h.occupant}$ soit $1080 \text{ m}^3/\text{h}$ sur une base de 60 occupants ($540 \text{ m}^3/\text{h}$ à chaque bouche). Ce débit est contrôlé de façon mécanique par un volet asservi à une sonde de CO_2 (Figure 33 et Figure 34). A la réception du bâtiment il a fallu procéder au rééquilibrage de l'installation puisque les débits n'étaient pas ceux attendus. Ainsi, un travail de calcul de pertes de charges et d'équilibrage du réseau a été effectué par ajustement des iris de réglage (annexe B). Pour vérifier précisément les débits de soufflage/reprise, des mesures ont été réalisées à l'aide d'un cône de mesure de débit (Figure 35) pour plusieurs valeurs d'ouverture de volet. Cela permet de vérifier l'autorité du volet et de s'assurer que le débit de soufflage est proche du débit règlementaire souhaité.



Figure 33 - Volet à chaque bouche de soufflage/reprise



Figure 34 - Sonde de CO_2



Figure 35 - Cône de mesure des débits de soufflage pour les bouches à jets hélicoïdal

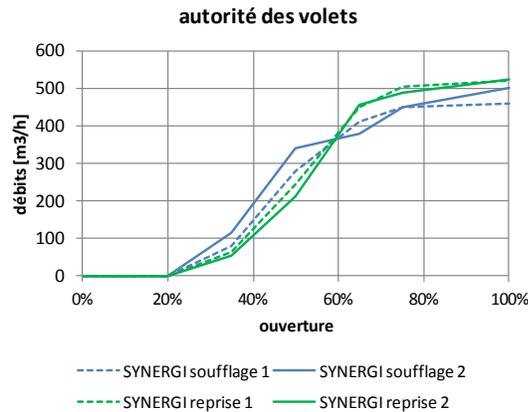


Figure 36 - Autorité des quatre bouches de la salle SYNERGI

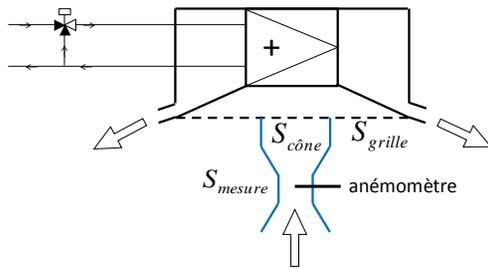
La Figure 36 montre que le débit maximal est bien proche du débit nominal (540 m³/h) et que la plage d'action du volet se situe entre 20% et 80% d'ouverture (100% pour soufflage2). Le comportement est le même pour les deux bouches de soufflage et les deux bouches de reprise.

L'efficacité de l'échangeur est mesurée en conditions hivernales à partir du ratio des différentiels de température air soufflé/air neuf et air repris/air neuf, elle est de 80%. En été la CTA peut servir pour des scénarios de rafraîchissement nocturne. A ce moment là, l'échangeur est by-passé mais des mesures dans de telles conditions ont permis de montrer un défaut du by-pass puisqu'en réalité une partie de l'air passe tout de même dans l'échangeur avec une efficacité moyenne de 35%.

2.1.2. Ventilconvecteurs

Des ventilconvecteurs quatre tubes permettent d'assurer un chauffage d'appoint (mode chaud) en complément du plancher chauffant. Ils peuvent également servir au rafraîchissement (mode froid). Pour le mode chaud les ventilconvecteurs sont alimentés en eau chaude par une chaudière à condensation ou un réseau de chaleur local. Pour le mode froid c'est une pompe à chaleur air/eau qui est utilisée. Trois unités sont présentes sur la salle de la plateforme SYNERGI (Figure 32), l'air est soufflé par des ailettes latérales et repris en partie centrale avant de repasser dans la batterie chaude ou froide selon le mode de fonctionnement.

Dans ces travaux seul le mode chaud sera utilisé. L'arrivée d'eau chaude se fait par l'ouverture ou la fermeture d'une vanne trois voies (Figure 37). La température d'entrée est donc constante et environ égale à 35°C. La régulation en puissance se fait par variation de la vitesse de soufflage puisqu'ils disposent de trois vitesses de soufflage selon l'éloignement à la température de consigne. Les débits de soufflage pour chacune des vitesses ont été mesurés à l'aide d'un cône de mesure différent de celui utilisé pour la CTA du fait que sur les VCV le soufflage et la reprise se font au même endroit. Ce cône mesure la vitesse de passage de l'air avec un anémomètre à fil chaud (Figure 37) et permet de calculer le débit de soufflage total avec l'Eq.8. Les valeurs mesurées des débits de soufflage pour chacune des trois vitesses du ventilateur sont données Tableau 8.



vitesse	débit total [m ³ /h]
petite	783
moyenne	1146
grande	1566

Figure 37 - Mesure des débits de soufflage sur une unité VCV

Tableau 8 - Débits mesurés à l'aide du cône en fonction du mode de vitesse

$$Q_v = N_{vcv} \times V \times 3600 \times S_{mesure} \times \frac{S_{grille}}{S_{cône}} \quad (\text{Eq.8})$$

2.1.3. Plancher chauffant

Un plancher chauffant sert de système de chauffage principal. Des tuyaux dans lesquels circule de l'eau sont recouverts d'une dalle de béton anhydre de 2 cm sur laquelle est posé un carrelage de 1 cm d'épaisseur. Un isolant en polystyrène de 2 cm, dans lequel sont encastrés les tuyaux, isole le plancher chauffant de la dalle principale du plancher intermédiaire afin que le flux de chaleur soit dirigé vers la pièce à chauffer.

Le plancher comporte neuf boucles d'eau et est régulé en température par l'ouverture d'une vanne trois voies qui assure le mélange entre l'eau chaude provenant de la chaudière ou du réseau de chaleur et l'eau de retour du plancher (Figure 38). Le débit est constant et mesuré à 2 m³/h. Des sondes de température permettent de connaître à chaque instant les températures d'eau en entrée et en sortie du plancher chauffant.

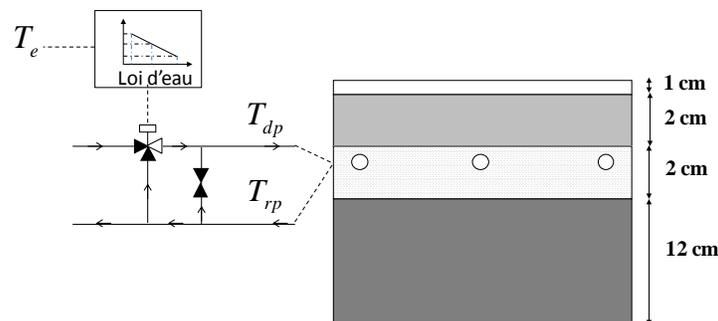


Figure 38 - Schéma en coupe du plancher chauffant et de sa régulation

Par la suite, la stratégie de gestion de chauffage est d'utiliser le plancher chauffant en base et les ventilo-convecteurs en appoint. En effet il est admis que les systèmes à basse température apportent une meilleure sensation de confort que les systèmes par air soufflé tels que les ventilo-convecteurs qui produisent une sensation d'inconfort à cause du brassage d'air. De plus, le confort ne dépend pas uniquement de la température d'air mais également de celle des parois. Dans le cas d'un chauffage par air soufflé il est nécessaire que la température de soufflage soit élevée pour compenser le phénomène de paroi froide qui est présent dans les bâtiments mal isolés. Avec un plancher chauffant une grande part des échanges se fait par rayonnement [109] ce qui minimise les écarts entre la température d'air et celle des parois environnantes. Le plancher chauffant est un système capacitif (temps de réponse long) alors que les ventilo-convecteurs sont des systèmes réactifs (effet rapide). Du fait de son inertie, la difficulté consiste donc à trouver un modèle qui reproduit bien l'effet du plancher chauffant sur la température d'air intérieur.

Résumé

Une salle du bâtiment démonstrateur SYNERGI sert de support à ces travaux. Il comprend trois systèmes : un plancher chauffant, des ventilo-convecteurs et une centrale de traitement de l'air. Le plancher chauffant est le système à piloter de façon anticipative alors que les ventilo-convecteurs servent comme système d'appoint.

3. Campagnes de mesures rapides pour l'identification de modèles légers de bâtiments en vue du contrôle.

Selon la classification établie par le manuel ASHRAE de 2009 [110] il existe deux approches pour la modélisation. L'approche dite classique consiste à dire que les équations et les entrées d'un modèle sont parfaitement connues pour pouvoir simuler son comportement. Dans ce cas, plus le modèle est complexe, plus la précision est grande a priori. La seconde approche, correspondant à ces travaux, est dite « inverse » ou également « data-driven » puisque ce sont des mesures sur le système réel qui permettent d'affiner la description mathématique d'un problème défini « a priori ».

Il arrive qu'un bâtiment soit instrumenté ponctuellement dans le cadre d'une démarche d'audit énergétique en prévision d'une opération de rénovation. On peut citer *Cornaro et al.* [110] qui présentent une méthode pour évaluer des solutions de rénovation sur un bâtiment historique en utilisant des mesures in situ. Ici, le but des campagnes de mesures est de solliciter le bâtiment avec ses systèmes afin d'identifier les paramètres des modèles qui doivent décrire au mieux l'effet de la commande (ouverture de la vanne trois voies du plancher, ouverture des volets de la CTA, mise en route du ventilateur des VCV) sur la variable de contrôle (la température intérieure). Le **Tableau 9** donne les commandes pour les trois systèmes de la salle SYNERGI.

Système	Commande	Action
Plancher chauffant	ouverture de la vanne trois voies	proportionnelle
CTA	ouverture des volets de la CTA	tout ou rien
	ouverture du by-pass	tout ou rien
VCV	ouverture de la vanne trois voies mode chaud	tout ou rien
	ouverture de la vanne trois voies mode froid	tout ou rien
	vitesse du ventilateur (petite, moyenne, grande)	trois positions

Tableau 9 - Commandes associées aux systèmes en présence

Les systèmes par air soufflé (CTA, VCV) sont dits « réactifs » c'est-à-dire que la durée entre la mise en route et l'effet sur la température intérieure est rapide. Le plancher chauffant est au contraire un système « capacitif » puisqu'il faut que toute l'épaisseur de béton du plancher se charge thermiquement et que l'élévation de température de surface se traduise par une augmentation de la température d'air via des échanges convectifs et radiatifs.

Pour que le contrôle prédictif soit efficace il est essentiel que le comportement du plancher chauffant, piloté par celui-ci, soit bien décrit par le modèle. Pour cela une série de trois campagnes de mesures a été réalisée dans des conditions différentes :

- **campagne 1** : en condition hivernale en sollicitant le plancher chauffant la journée et en le réduisant la nuit,
- **campagne 2** : en condition estivale en ne sollicitant pas le plancher chauffant, ce qui permet d'observer le comportement de la dalle avec les variations de température intérieure car du fait de l'isolation par l'intérieur, la majeure partie de l'inertie de la pièce est assurée par celle-ci. La pièce est ventilée la nuit,
- **campagne 3** : en condition hivernale en sollicitant le plancher chauffant la journée et en forçant la décharge thermique de celui-ci la nuit par de la ventilation à l'aide de la CTA, cela permet d'augmenter la richesse des sollicitations en faisant varier l'amplitude.

Les résultats sont présentés à la partie 3.3.

3.1. Protocole expérimental

Au cours des campagnes de mesures le même protocole est utilisé, il est schématisé sur la **Figure 39**. Le plancher chauffant délivre une puissance de chauffage à la dalle. Une faible part de cette puissance ($\approx 10\%$) est perdue vers la pièce du bas, l'autre partie est transmise par conduction dans la dalle et se traduit par une élévation de la température de surface. Le flux de chaleur est ensuite transmis à la pièce via des échanges conductifs et radiatifs.

Des capteurs de température installés pour la régulation du bâtiment permettent de connaître :

- la température intérieure T_i (Figure 40)
- la température extérieure T_e
- la température de soufflage de la CTA T_{cta}
- la température de soufflage des VCV T_{vcv}
- la température de l'eau au départ du plancher chauffant T_{dp} (Figure 41)
- la température de l'eau en retour du plancher chauffant T_{rp}

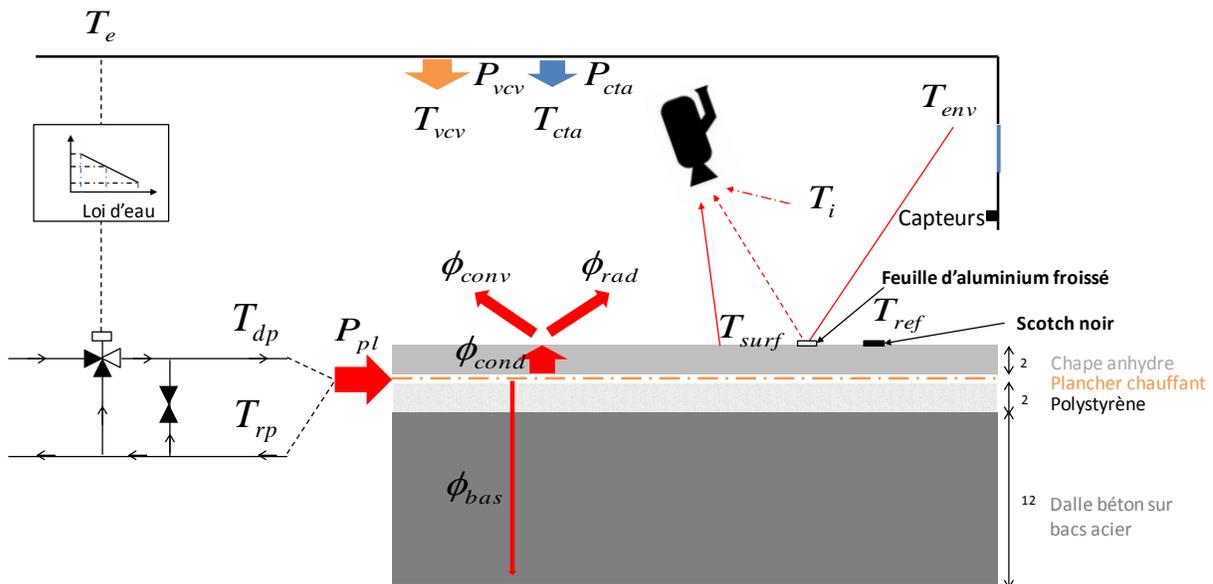


Figure 39 - Schéma de principe des campagnes de mesures, grandeurs mesurées et flux en présence

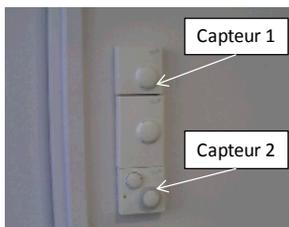


Figure 40 - Capteurs de température intérieure fixés au mur



Figure 41 - Capteur de température que se trouve sur le tuyau aller et retour du plancher chauffant

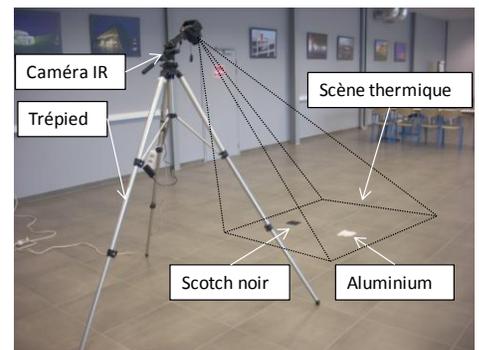


Figure 42 - Dispositif de mesure infrarouge employé

Un dispositif de mesure infrarouge (**Figure 42**) permet de suivre l'évolution de la température de surface de la dalle au cours du temps et suit un protocole couramment utilisé en thermographie passive [112,113]. Placée sur un trépied, la caméra mesure les flux thermiques sur une surface d'environ 2 m² éloignée de la façade vitrée pour éviter les perturbations liées à la tâche solaire. S'il s'agit d'une montée en température on parle de charge thermique, s'il s'agit d'une descente en température on parle de décharge thermique. La caméra est de type bolométrique et a une résolution de 320×240 pixels. Elle permet de mesurer deux grandeurs :

- la température de surface du plancher T_{surf}
- la température de l'environnement T_{env} qui est la température de surface moyenne du demi espace au dessus du plancher

La température de surface T_{surf} ne peut être obtenue directement par la lecture du thermogramme. Une étape de post-traitement est nécessaire. La caméra mesure le flux provenant de l'objet visé mais aussi le flux réfléchi par l'environnement. Le rayonnement reçu par l'objectif de la caméra est également en partie absorbé par l'atmosphère qui le sépare de l'objet (**Figure 43**).

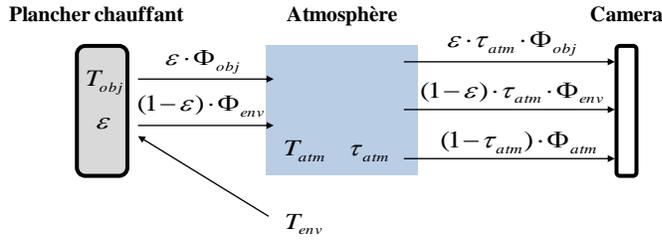


Figure 43 - Flux réellement reçu à l'objectif de la caméra infrarouge (Fokaides et Kalogirou [114])

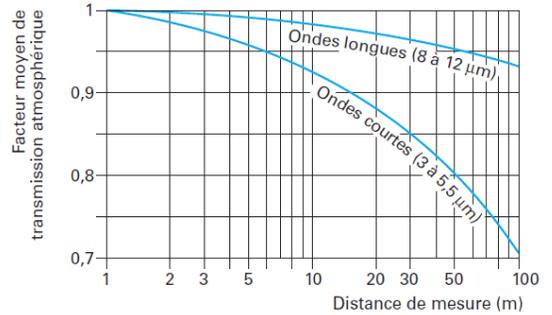


Figure 44 - Facteur moyen de transmission atmosphérique en fonction de la distance pour une humidité relative à 50% [113]

Le flux reçu par la caméra peut s'écrire (Eq.9) :

$$\phi_{cam} = (\varepsilon\phi_{obj} + (1-\varepsilon)\phi_{env}) \cdot \tau_{atm} + (1-\tau_{atm})\phi_{atm} \quad (\text{Eq.9})$$

Pour des mesures à courtes distances (<3m dans notre cas) le coefficient de transmission de l'atmosphère τ_{atm} est voisin de 1 (**Figure 44**) donc l'Eq.9 devient l'Eq.10 :

$$\phi_{cam} = \varepsilon\phi_{obj} + (1-\varepsilon)\phi_{env} \quad (\text{Eq.10})$$

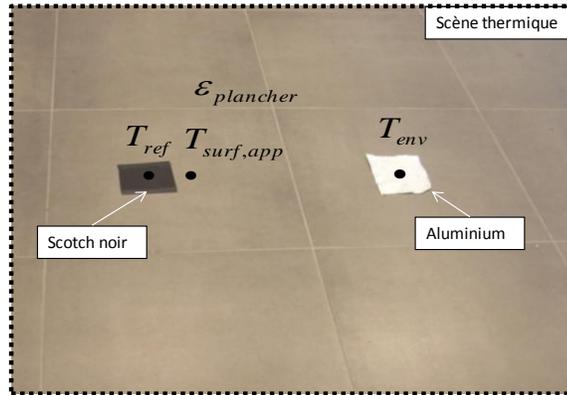


Figure 45 - Températures relevées sur chaque thermogramme

Un adhésif de couleur noire considéré comme un corps noir et un papier aluminium froissé considéré comme un réflecteur parfait sont fixés à la surface du plancher (Figure 45) :

- une mesure au niveau de l'adhésif ($\varepsilon \approx 1$) permet de déduire la température de référence du corps noir T_{ref} (Eq.11) :

$$\phi_{cam} = \phi_{ref} = \sigma T_{ref}^4 \quad (\text{Eq.11})$$

- une mesure au niveau du papier aluminium ($\varepsilon \approx 0$) permet de déduire la température de l'environnement T_{env} qui amalgame les températures d'air et de parois (Eq.12) :

$$\phi_{cam} = \phi_{env} = \sigma T_{env}^4 \quad (\text{Eq.12})$$

Afin de déterminer l'émissivité ε du plancher chauffant (carrelage en surface), un relevé la température sur le sol juste à côté de l'adhésif est effectué. Cette température de surface apparente est notée $T_{surfapp}$ et apparaît différente de T_{ref} car l'émissivité n'est pas la même. L'émissivité est définie de la façon suivante (Eq.13) :

$$\varepsilon = \frac{\phi_{objet,T}}{\phi_{corpsnoir,T}} \quad (\text{Eq.13})$$

Donc

$$\varepsilon_{plancher} = \frac{\phi_{surfapp}}{\phi_{ref}} = \frac{T_{surfapp}^4}{T_{ref}^4} \quad (\text{Eq.14})$$

Or en réalité $T_{surf} = T_{ref}$ car l'adhésif est en équilibre thermique avec le carrelage du plancher chauffant donc il est correct écrire (Eq.15) :

$$\varepsilon_{plancher} = \frac{T_{surfapp}^4}{T_{surf}^4} \quad (\text{Eq.15})$$

Ainsi en tout point de la zone d'étude est calculé (Eq.16) :

$$T_{surf} = \frac{T_{surfapp}}{\sqrt[4]{\varepsilon_{plancher}}} \quad (\text{Eq.16})$$

Sont donc calculés successivement T_{env} , $\varepsilon_{plancher}$, T_{surf} et la connaissance de T_i par la sonde de température permet de calculer pour chaque thermogramme le flux conductif vers la salle projet.

3.2. Représentativité de la mesure infrarouge

La scène thermique observée par la caméra infrarouge couvre une surface d'environ 2 m². Les observations faites sur cette petite surface sont extrapolées au reste du plancher. Il est donc nécessaire de s'assurer que la zone observée est représentative de l'ensemble du plancher chauffant et procéder à des corrections le cas échéant.

Le plancher chauffant se compose de neuf boucles d'eau permettant de couvrir toute la surface. A l'échelle de la pièce, la répartition des tuyaux dans le sol n'est pas uniforme compte tenu de leur espacement et il est difficile à priori de savoir si la surface observée est représentative. Pour cela le plancher est mis en chauffe, lorsque le régime permanent est proche, une cartographie infrarouge de l'ensemble du plancher est réalisée et comparée en terme de température de surface moyenne à la scène thermique étudiée. Les résultats sont donnés dans le **Tableau 10** :

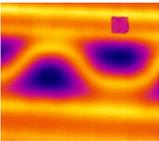
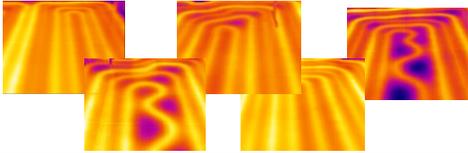
	Zone étudiée	Cartographie (9 boucles)								
Thermogramme										
Température moyenne de surface [°C]	24,7	25,3	24,6	24,5	25,1	24,6	22,4	25	24,9	25,4
Température moyenne globale [°C]		24,6								

Tableau 10 - Cartographie infrarouge du plancher chauffant et vérification de la représentativité de la zone étudiée

En régime permanent l'écart entre la température moyenne de la zone étudiée et celle du plancher est de 0,1°C, permettant l'hypothèse que la zone étudiée est représentative de l'ensemble du plancher.

3.3. Résultats obtenus

3.3.1. Campagne 1 : plancher chauffant

Cette campagne s'est déroulée du 22/02/2013 au 28/02/2013, soit six jours. Seul le plancher chauffant est utilisé : les volets de la CTA sont fermés (débit nul) et les ventilo-convecteurs sont éteints. Les quatre premiers jours le bâtiment est en « évolution libre », c'est-à-dire soumis seulement aux variations de température extérieure et aux apports solaires nets. Puis il est soumis à deux échelons sur la température d'entrée du plancher fixée à 35°C. Les échelons ont une durée respective de 4h et 8h et sont séparés d'une journée. Entre les deux échelons le bâtiment est en évolution libre et se décharge thermiquement (**Figure 46** et **Figure 47**).

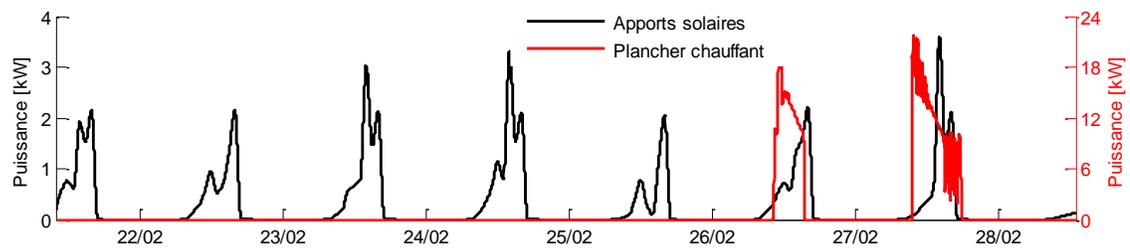


Figure 46 - Sollicitations de la campagne 1

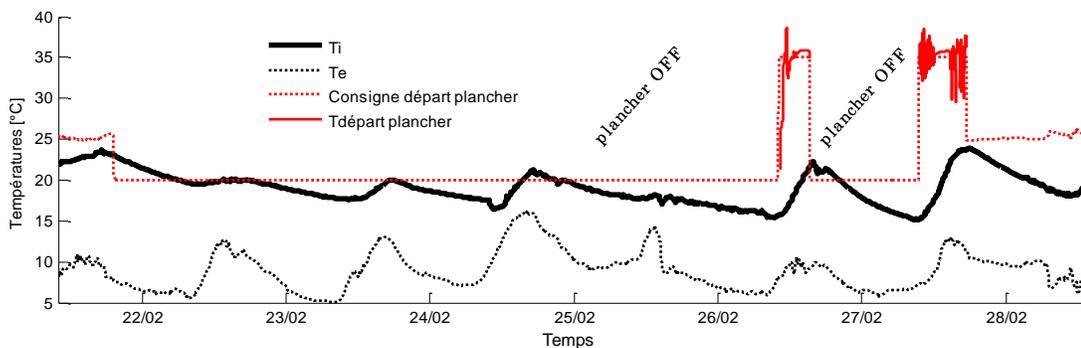


Figure 47 - Données mesurées lors de la campagne 1

3.3.2. Campagne 2 : rafraîchissement nocturne

Cette campagne correspond à des conditions estivales avec trois scénarios de rafraîchissement nocturne les 23-24-25/09/2014 avec l'échangeur de la CTA by-passé. Pour le deuxième scénario de rafraîchissement le taux de renouvellement d'air est de 3 vol/h contre 1 vol/h pour les deux autres jours. Le reste du temps de bâtiment est en évolution libre (**Figure 48** et **Figure 49**).

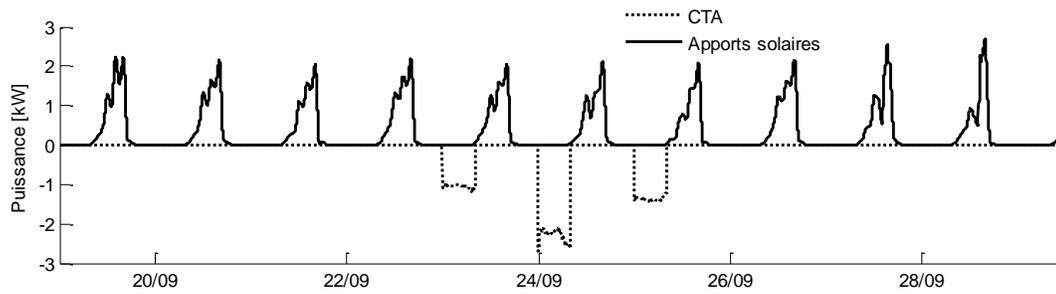


Figure 48 - Sollicitations de la campagne 2

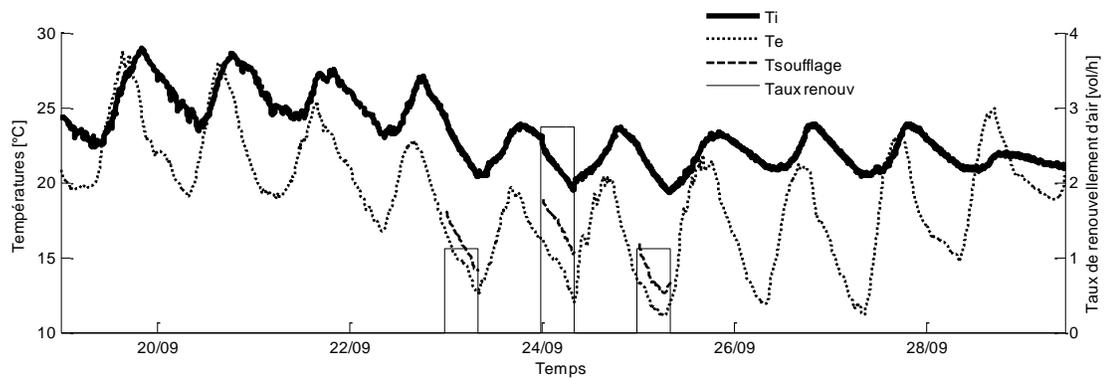


Figure 49 - Données mesurées lors de la campagne 2

3.3.3. Campagne 3 : plancher chauffant et rafraîchissement nocturne

La troisième campagne s'est déroulée du 05/12/2014 au 15/12/2014 et combine la sollicitation du plancher chauffant et de la CTA : pendant quatre jours la pièce est chauffée la journée (10h-18h) par le plancher chauffant et rafraîchie la nuit avec la ventilation (1 vol/h), des cycles de charge/décharge sont ainsi réalisés (Figure 50 et Figure 51). Ils sont précédés par quatre jours à une température constante assurée par les VCV et suivis de trois jours en évolution libre.

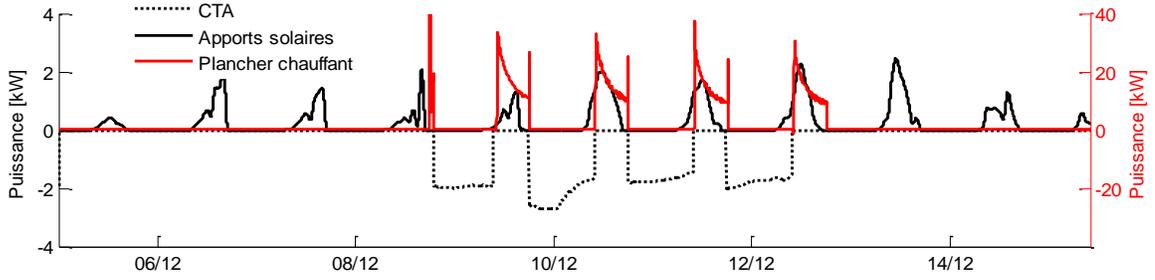


Figure 50 - Sollicitations de la campagne 3

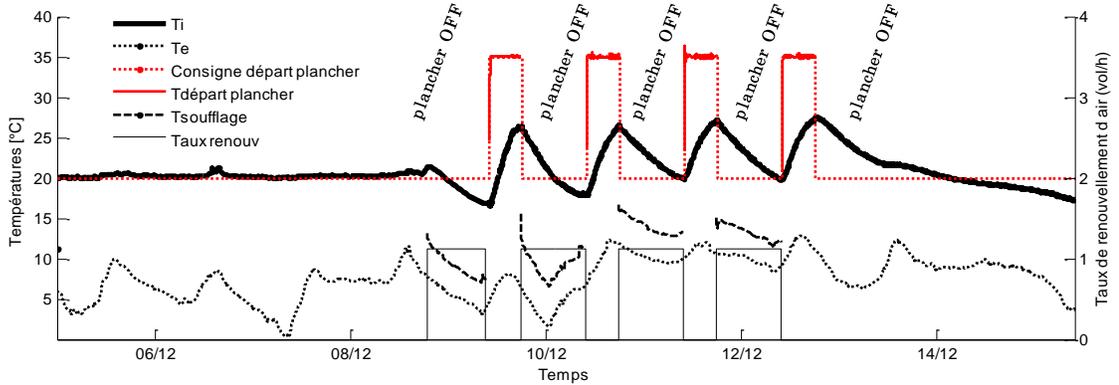


Figure 51 - Données mesurées lors de la campagne 3

3.4. Propositions de modèles pour l'identification et le contrôle

Le choix s'est porté sur des modèles légers car pour une application de contrôle à un horizon de quelques heures, les dynamiques mensuelles ou annuelles n'ont pas d'intérêt. Trois modèles de type analogie électrique (RC) sont proposés. A chaque modèle correspond une façon de prendre en compte l'effet du plancher chauffant sur la température intérieure, déterminée en fonction des mesures disponibles suite aux campagnes de mesures :

- modèle A : puissance imposée au niveau du plancher calculée avec les mesures de températures sur le tuyau de départ et de retour du plancher chauffant (Eq.17)

$$P_{pl} = \dot{m} \cdot c_p (T_{dp} - T_{rp}) \quad (\text{Eq.17})$$

- modèle B : puissance imposée au nœud d'air calculée avec la mesure de température intérieure, de surface de plancher et la température de l'environnement déterminée avec les mesures infrarouge de surface (Eq.18)

$$P_{pl,i} = S\epsilon\sigma (T_{surf}^4 - T_{env}^4) + hS(T_{surf} - T_i) \quad (\text{Eq.18})$$

- modèle C : température imposée à la surface de la dalle et mesurée avec la caméra infrarouge (Eq.19)

$$T_s = T_{surf} \quad (\text{Eq.19})$$

La métrologie utilisée est la suivante : capteurs de température de contact (type Pt100) sur les tuyaux d'entrée et sortie du plancher, mesure de température de surface à l'aide d'une caméra infrarouge et deux capteurs de température ambiante (type Pt1000). Ces différentes mesures sont faites dans les campagnes de mesures in situ servant à l'identification et décrites à la partie 3.1.

La **Figure 52** montre les modèles associés aux mesures. Ils sont formulés sous forme d'équation d'état et donnés en **annexe C**. Dans un premier temps les paramètres initiaux de ces modèles (résistances, capacités) sont déterminés à partir des caractéristiques physiques de l'enveloppe puis identifiés par la suite comme expliqué au chapitre III. Ces modèles dits nodaux font l'hypothèse que la température de l'air est homogène. Les modèles A et B comprennent trois nœuds associés à une capacité respectivement pour l'air (T_i, C_i), la dalle de plancher (T_d, C_d) et les murs (T_m, C_m). Le modèle C ne comprend que deux nœuds car l'effet du plancher chauffant est pris en compte par la température de surface imposée qui a été mesurée lors des campagnes. Les variations de température mesurées traduisent la dynamique de la dalle. La résistance entre la couche qui représente le nœud d'air et la dalle est appelée R_d ou R_{si} dans le modèle C où la température de surface est imposée. Le nœud qui représente le mur est relié à celui qui représente l'air par une résistance R_{mi} et relié à l'environnement extérieur par une résistance R_{me} .

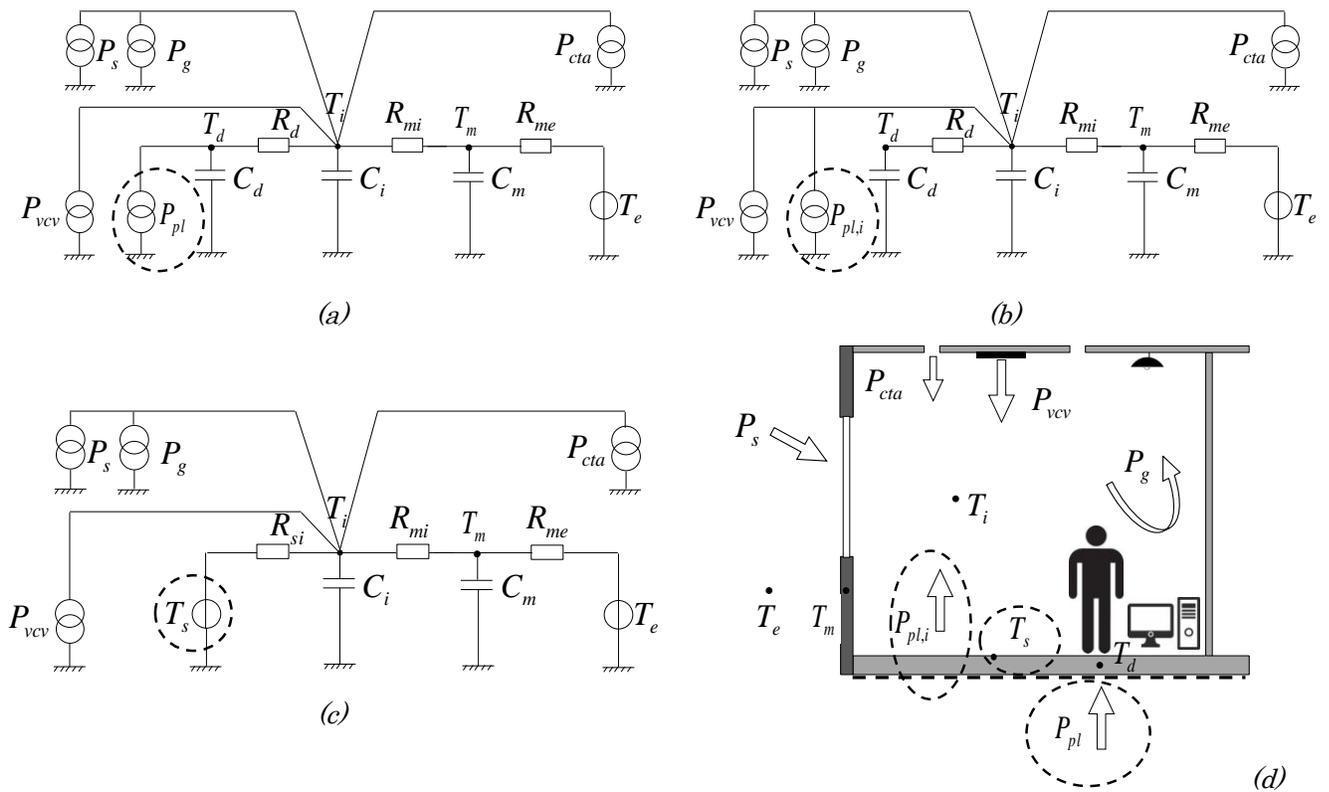


Figure 52 - Modélisation de la salle SYNERGI, Modèle A (a), Modèle B (b), Modèle C (c) et représentation schématique (d)

Les autres sollicitations sont prises en compte par un terme de puissance directement lié au nœud d'air :

- le terme P_g correspond aux apports liés aux occupants (P_{occ}) et au dégagement de chaleur des appareils (P_{app}) éventuellement présents dans la salle (Eq.20) :

$$P_g = n_{occ} \times P_{occ} + \sum_i n_{app,i} \times P_{app,i} \quad (\text{Eq.20})$$

- le terme P_{vcv} correspond aux ventilo-convecteurs, s'ils fonctionnent en mode chaud la puissance est positive et elle est négative si le mode froid est utilisé (Eq.21), le terme T_{vcv} est la température de l'air soufflé par les ventilo-convecteurs :

$$P_{vcv} = \dot{m}_{vcv} \cdot c_p (T_{vcv} - T_i) \quad (\text{Eq.21})$$

- le terme P_{cta} correspond à l'effet de la centrale de traitement d'air qui peut se traduire par une puissance de chauffage (Eq.22) si l'air extérieur est à une température supérieure à la température de l'air intérieur (cas estival), ou une puissance de refroidissement si l'air extérieur est à une température inférieure à l'air ambiant (cas hivernal). Le terme eff représente l'efficacité de l'échangeur :

$$P_{cta} = (1 - eff) \times \dot{m}_{cta} \cdot c_p (T_e - T_i) \quad (\text{Eq.22})$$

- le terme P_s correspond aux apports solaires nets c'est-à-dire restant effectivement dans la pièce après réflexion sur les murs intérieurs. Il est calculé à l'aide de l'outil de simulation *Pleiades+COMFIE* [72] qui permet d'estimer les apports solaires nets restant dans la pièce au cours du temps en tenant compte du facteur d'absorption moyen α_m des surfaces opaques. Le terme Q_{sol} est la part du rayonnement solaire incident ayant traversé les vitrages et tient compte du facteur solaire des vitrages et des masques proches ou lointains (Eq.23) :

$$P_s = \left[1 - (1 - \alpha_m) \times \frac{S_{transparent}}{S_{transparent} + S_{opaque}} \right] \times Q_{sol} \quad (\text{Eq.23})$$

La procédure utilisée est la suivante : pour chaque campagne de mesures les données d'éclairement en J/cm^2 sont récupérées auprès de Météo France puis intégrées à un fichier météo utilisé par l'outil de simulation qui calcule les gains solaires en W au pas de temps horaire. Une interpolation permet ensuite de se ramener au pas de temps des autres grandeurs utilisées en entrée des modèles RC (**Figure 53**).

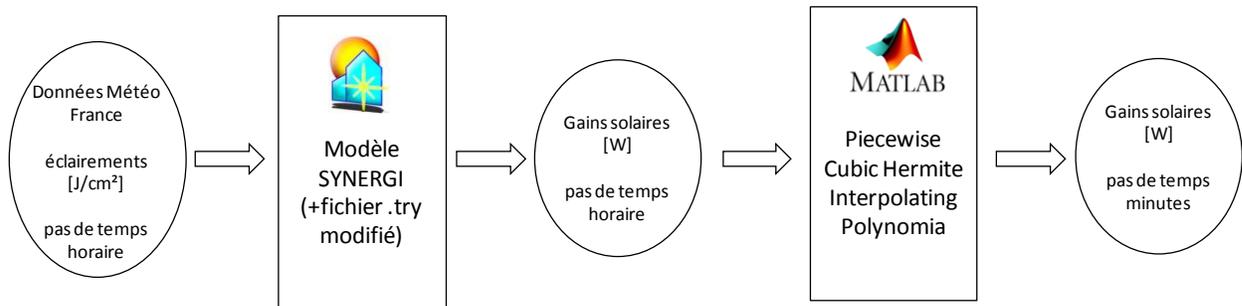


Figure 53 - Procédure de calcul des apports solaires nets utilisés comme donnée d'entrée des modèles RC

Résumé

Pour identifier les modèles, trois campagnes de mesures sont réalisées avec un même protocole de mesure faisant intervenir un dispositif de mesure infrarouge pour relever la température de surface du plancher chauffant. Chaque campagne sollicite différemment le plancher et l'air de la salle de façon à étudier la qualité de l'identification selon les données d'entrée. Trois modèles RC sont présentés qui diffèrent par la façon de prendre en compte l'effet du plancher chauffant sur la température d'air qui est la variable à piloter.

4. Utilisation d'une maquette de laboratoire échelle réduite comme outil d'expérimentation rapide pour la thermique du bâtiment

Il est connu qu'un bâtiment même simple est en réalité un système physique instationnaire complexe. Dès lors que l'on cherche à simuler le comportement thermique d'un bâtiment de nombreuses incertitudes entrent en jeu (*Spitz et al. [115]*) :

- composition de l'enveloppe,
- apports solaires,
- gains internes (occupants, appareils),
- prise en compte des systèmes (puissance de chauffage, débits de renouvellement d'air)
- infiltrations.

Avant d'appliquer la méthode d'identification au bâtiment, le choix est fait de la valider sur une maquette « physique » en laboratoire. La maquette décrite à la partie 4.1, est un système plus simple, bien maîtrisé au niveau des sollicitations et donc à priori avec peu de biais.

Actuellement, dans le monde du bâtiment, la maquette est utilisée uniquement dans un but de rendu esthétique. Pour la conception de produits fabriqués de façon industrielle, une phase de prototypage est souvent réalisée en amont de la fabrication. Dans le cas du bâtiment, chaque ouvrage est un prototype et en phase de conception, que ce soit en thermique, acoustique ou éclairage, l'utilisation des maquettes

numériques est requise pour réaliser des simulations. Une maquette peut être envisagée comme outil d'instrumentation rapide pour trois applications :

- pour du diagnostic : développer des méthodes de diagnostic via la maquette car les temps caractéristiques sont courts. Ces méthodes peuvent ensuite être reprises pour des bâtiments taille réelle,
- pour étudier une maison en fonctionnement : reproduire le comportement d'un bâtiment réel avec une maquette,
- pour tester des stratégies de contrôle dans un environnement maîtrisé.

Ce dernier point a été traité dans le cadre de la thèse de Julien Eynard [116] où un prototype de bâtiment à l'échelle 1/27^{ème} a été construit pour tester des stratégies de contrôle du chauffage (**Figure 54**). La température est contrôlée au moyen de deux résistances chauffantes : une servant de chauffage principal avec l'hypothèse d'une alimentation par des énergies renouvelables et une en appoint approvisionnée par des énergies d'origine fossile. L'évolution en température est suivie à l'aide de huit capteurs et trois stratégies de contrôles sont comparées : un PID, un contrôle basé sur la logique floue et un contrôle prédictif. Cette maquette est employée par la suite comme outil pédagogique dans le cadre de travaux pratiques sur la gestion optimale de l'énergie dans le bâtiment à l'Université de Perpignan [117]. Pour l'étude de l'éclairage naturel, des maquettes sont construites par le Centre Scientifique et Technique de la Construction (équivalent Belge du CSTB en France). Contrairement à la thermique ou l'acoustique, la physique de l'éclairage ne nécessite aucune correction d'échelle car « *la longueur d'onde de la lumière est si petite en comparaison des dimensions du modèle réduit que son comportement n'est que très peu affecté par le passage à l'échelle* ». La maquette peut donc reproduire la sensation visuelle d'un bâtiment taille réelle puisqu'observée directement (**Figure 55**), ce qu'aucun logiciel ne peut faire. Ici, la maquette est donc utilisée comme un véritable outil de conception [118].

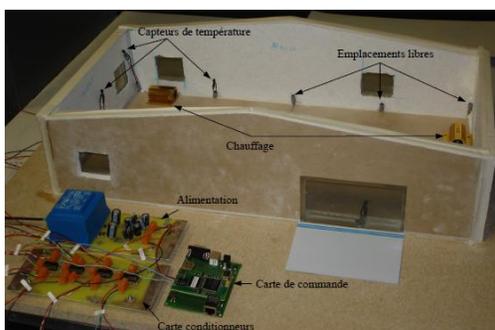


Figure 54 - *Maquette construite pour tester des stratégies de contrôle*

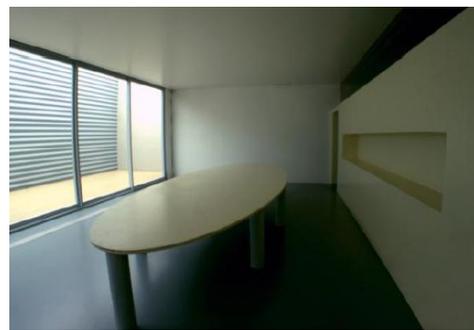


Figure 55 - *Rendu visuel de l'intérieur d'une maquette sous ciel artificiel*

Dans le cas de l'identification la maquette est intéressante car les constantes de temps sont réduites (quelques minutes au lieu d'heures ou de jours), les campagnes expérimentales sont donc courtes ce qui permet de tester rapidement la méthode d'identification et les futures stratégies de contrôle.

4.1. Construction du modèle réduit

L'originalité de la maquette est de travailler sur des excitations très inférieures à 24h mais d'avoir un comportement proche d'un vrai bâtiment avec des temps caractéristiques bien plus courts. Toutes les composantes du système sont réduites de manière homothétique de façon à ce que les excitations et la réponse de la maquette soient proches d'un bâtiment réel.

4.1.1. Maquette cube

De manière très simplifiée, un bâtiment monozone peut être assimilé à un volume d'air fermé par des parois et pouvant être sollicité thermiquement de l'intérieur ou depuis l'extérieur. Un premier essai de maquette a consisté en la fabrication d'un cube de 10 cm ouvert sur une des faces et réalisé à l'aide d'une imprimante 3D. Le matériau utilisé est un thermoplastique ABS qui a l'avantage de résister à de grands écarts de températures et pouvant donc être chauffé sans risquer un phénomène de fonte ou de déformation. Une résistance chauffante de 9 W et un élément isolant viennent fermer le volume d'air au niveau de la face ouverte. La maquette est chargée thermiquement par l'intérieur et observée depuis l'extérieur par une caméra infrarouge (**Figure 56**).

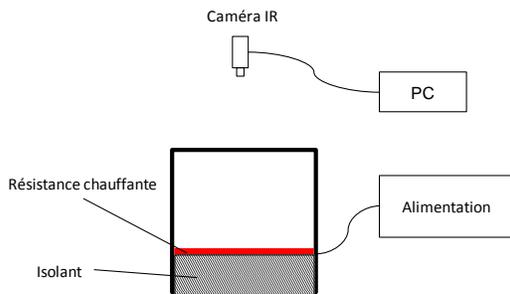


Figure 56 - Mesures sur la maquette 3D

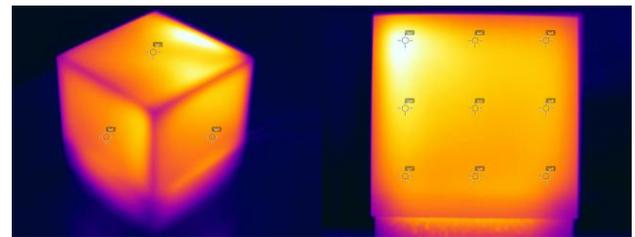


Figure 57 - Hétérogénéités thermiques sur les faces externes

Les premières mesures ont rapidement montré que même avec un petit volume d'air la constante de temps est de l'ordre d'une heure. De plus il n'était pas possible d'augmenter la puissance de la résistance chauffante car les températures atteintes auraient été supérieures à limite de fusion de l'ABS ($\approx 80^{\circ}\text{C}$). Le volume d'air implique des phénomènes aérodynamiques rendant plus complexe la réduction d'échelle et l'observation de la réponse thermique sur les faces extérieures à cause d'hétérogénéités (**Figure 57**). La réalisation d'une maquette réaliste de bâtiment n'étant pas le but de ces travaux, nous avons décidé de fabriquer une seconde maquette ne faisant pas intervenir de volume d'air.

4.1.2. Passage à la maquette 2D

La maquette 2D est un simple bloc multicouche de dimensions $5,3\text{cm} \times 6,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$ constituée d'une alternance de 27 plaques d'aluminium et de polychlorure de vinyle (PVC). Pour faire l'analogie avec le bâtiment démonstrateur décrit à la partie 2, le nœud d'air est représenté arbitrairement par un certain

nombre de couches. Le reste des couches se trouvant à gauche représentent un plancher sollicité par une résistance chauffante, les couches de droite s'apparentent à un mur (**Figure 58**).

Les caractéristiques physiques du PVC et de l'aluminium sont données dans le **Tableau 11** :

Caractéristique physique	Unité	Aluminium	PVC
conductivité thermique	[W/m.K]	230	0,16
capacité thermique massique	[J/kg.K]	850	1000
masse volumique	[kg/m ³]	2700	1379

Tableau 11 - Caractéristiques physiques des matériaux de la maquette

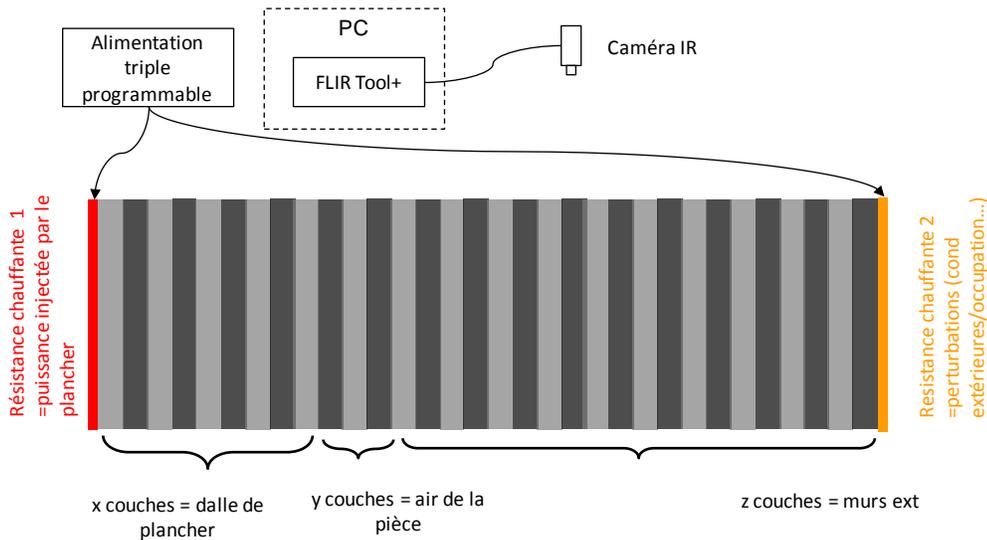


Figure 58 - Schéma de principe de l'utilisation de la maquette

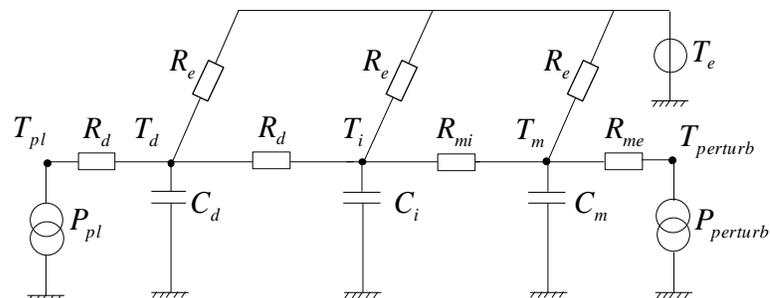


Figure 59 - Modèle RC associé à la maquette

4.2. Modèle RC associé

Un modèle de type RC (**Figure 59**) permet de décrire le comportement thermique de la maquette, il est semblable à ceux utilisés pour le bâtiment démonstrateur. Le modèle comprend quatre nœuds éventuellement associés à une capacité respectivement pour l'air (T_i, C_i), la dalle de plancher (T_d, C_d), les murs (T_m, C_m) et la surface extérieure (T_s). La résistance thermique de la demi-épaisseur de l'ensemble des couches représentant la dalle est appelée R_d . La couche qui représente le mur est reliée à celle qui représente l'air par une résistance R_{mi} et reliée à la surface extérieure perturbée par une résistance R_{me} . Par la suite la face inférieure est isolée et considérée comme adiabatique, la face supérieure de la maquette échange avec l'ambiance à une température T_e via une résistance superficielle R_e . La maquette est sollicitée par une résistance chauffante P_{pl} simulant un plancher chauffant et par une résistance chauffante $P_{perturb}$ simulant des perturbations extérieures. Le modèle d'état est donné à l'**annexe C**. Les paramètres initiaux sont calculés à partir de la géométrie, des propriétés des matériaux et de données de la littérature.

4.3. Réalisation de campagnes de mesures

La campagne de mesure est faite dans la configuration où la maquette est chauffée à gauche de manière périodique (10 minutes) avec une puissance de 2W pendant 4h simulant un plancher chauffant. La maquette est chauffée à droite par une perturbation aléatoire de 2W (**Figure 60**). La face du dessous est isolée ainsi que les résistances chauffantes de façon à ce que la chaleur soit transmise à la maquette. La face du dessus est en contact avec l'air de la pièce qui est à une température de 28°C pendant toute la campagne. A l'état initial la maquette est considérée en équilibre thermique avec la température de la pièce.

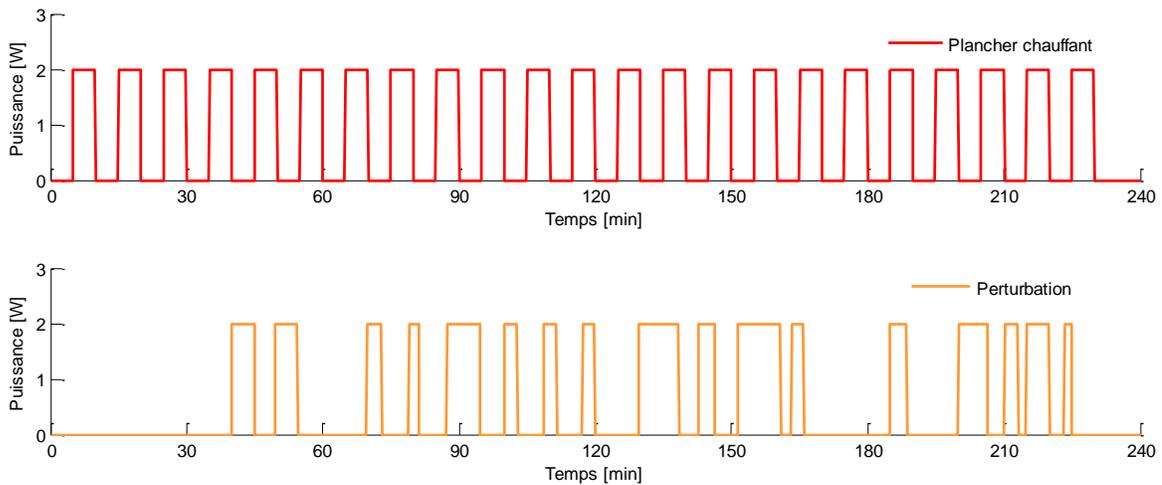


Figure 60 - Sollicitations expérimentales de la maquette

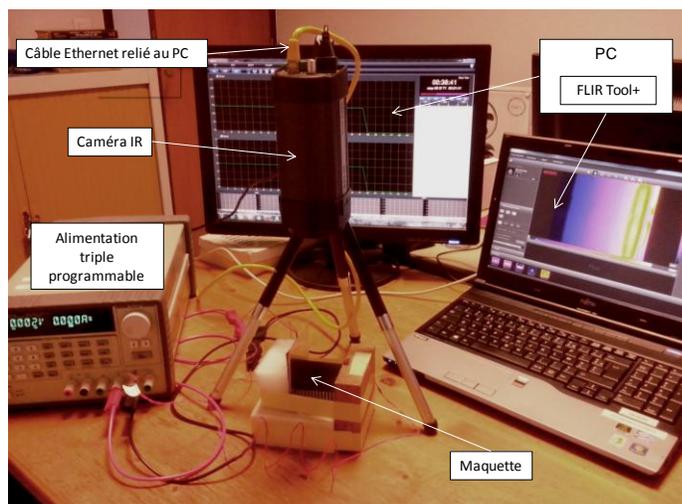


Figure 61 - Vue générale de l'expérience

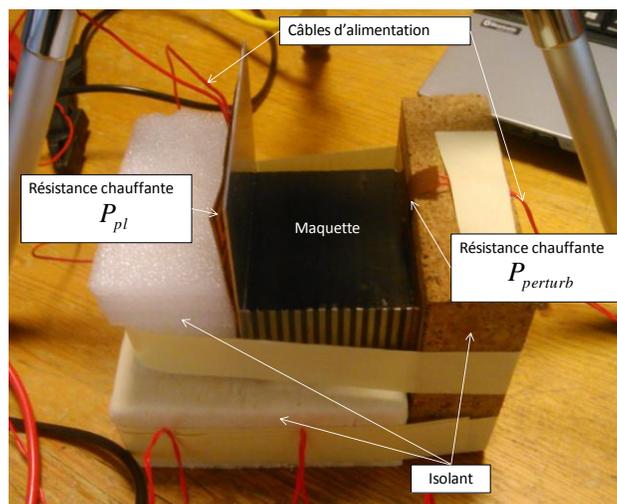


Figure 62 - Détail de la maquette

L'évolution en température des nœuds se fait par la face du dessus avec une caméra infrarouge. Le pas de temps d'acquisition est fixé à 10 secondes. Les résistances thermiques sont pilotées par une alimentation programmable 0-25V (Figure 61 et Figure 62).

Résumé

Afin de faire des études préliminaires sur l'identification, une maquette échelle réduite est construite pour s'affranchir de campagnes de mesures longues. Après une première approche en 3D, une maquette multicouche en 2D est construite pour présenter un comportement homothétique à celui d'un bâtiment réel. Une campagne de mesure simule la mise en marche d'un plancher chauffant et les perturbations extérieures.

Ce chapitre a permis de poser les fondements nécessaires à l'élection d'un modèle candidat pour le contrôle prédictif. La sélection de celui-ci se fait par le choix d'un modèle a priori dont la valeur des paramètres est ajustée à partir de données collectées lors de campagnes de mesures. Dans la partie 4 ont été présentés des modèles et des campagnes de mesures sur une maquette échelle réduite qui servent dans le chapitre III à réaliser des études préliminaires sur un système physique bien maîtrisé en termes de propriétés physiques et de données d'entrée. Le même travail sera ensuite effectué pour la salle de conférence de SYNERGI à partir de trois campagnes de mesures (campagne 1, campagne 2, campagne 3) et de trois modèles RC (modèle A, modèle B, modèle C) qui ont été présentés dans la partie 3. La campagne 1 est utilisée pour une première identification et les campagnes 2 et 3 servent à comparer l'identification pour d'autres sollicitations. Ainsi, il sera possible d'étudier dans quelle mesure les sollicitations influent sur la qualité de l'identification afin d'améliorer cette dernière pour le choix d'un modèle candidat.

Chapitre III : Identification de modèles légers adaptés pour le contrôle

Ce chapitre présente la méthode suivie pour l'identification des modèles RC présentés au chapitre II. Dans un premier temps la méthode d'identification est expliquée puis une deuxième partie présente les études préliminaires réalisées à partir des expérimentations sur la maquette. La troisième partie pose la question de l'utilisation de modèles de conception. Enfin dans la quatrième partie la méthode d'identification est appliquée aux campagnes de mesures effectuées sur le bâtiment démonstrateur et présente le cheminement effectué pour aboutir à un modèle léger satisfaisant pour le contrôle prédictif du plancher chauffant de la salle du bâtiment démonstrateur SYNERGI.

1. Méthode d'identification

L'identification sert à trouver un jeu de valeur pour les paramètres d'un modèle a priori et utilise pour cela des données mesurées ou provenant d'un modèle de référence. Cette technique est utilisée depuis longtemps pour l'identification de propriétés des matériaux (*Cucumo et al. [119]*, *Jayamaha et al. [120]*, *Luo et al. [121]*). En thermique du bâtiment la littérature est également riche pour l'identification de la résistance des murs ou des capacités (*Peng et al. [122]*).

Un modèle est caractérisé par son domaine de validité, c'est-à-dire le domaine de l'espace des entrées dans lequel l'accord entre les valeurs des sorties du modèle et leurs valeurs mesurées, est considéré comme satisfaisant pour l'utilisation qui est faite du modèle. Une fois que le modèle est choisi il faut donc résoudre un problème d'estimation de paramètres appelé identification. Comme précisé dans le livrable 3.3.2 du projet PRECISION [123] : « l'identification d'un système nécessite la résolution de deux problèmes correspondant au choix de la structure du modèle et à l'estimation des paramètres de la structure choisie (*Walter et Pronzato [124]*, *Ljung [125]*). L'étude de ces deux problèmes (estimation des paramètres et choix de la structure) conduit alors respectivement à deux concepts : l'identifiabilité et la discernabilité. En effet, il est connu que l'identifiabilité vérifie l'existence et l'unicité de la solution du problème de l'estimation des paramètres ».

Il est important de distinguer le modèle et le système réel qui peuvent être décrits par les équations suivantes (Eq.24) (*Place et Trigallez [126]*) :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, U, p) + \varepsilon \\ X(0) = X_0 \\ Y = h(X, p) + \sigma \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{X}_{\text{mod}} = f(X_{\text{mod}}, U, p_{\text{mod}}) \\ X_{\text{mod}}(0) = X_{\text{mod},0} \\ Y_{\text{mod}} = h(X_{\text{mod}}, p_{\text{mod}}) \end{cases} \quad (\text{Eq.24})$$

Les entrées U sont connues mais l'état X , les sorties Y et les conditions initiales $X(0)$ sont incertaines. De plus les perturbations ε et σ sur le système réel ne sont pas connues et non prises en compte par le modèle. Les modèles RC sont écrits sous forme de modèle d'état et l'identification permet d'estimer les paramètres inconnus p_{mod} du système contenus dans les matrices A et B . Pour approcher au mieux le système réel, le choix des paramètres passe par la minimisation d'une fonction traduisant l'écart entre les états de sortie du modèle et les données du système réel mesurées. L'identification est parfaite si les paramètres sont égaux aux paramètres réels.

$$J(p) = \sum_{n=1}^N (Y_{\text{mod},n} - Y_n)^2 \quad (\text{Eq.25})$$

La fonction coût $J(p)$ est le plus souvent minimisée au sens des moindres carrés où $Y_{\text{mod},N}$ est la sortie du modèle avec un jeu de paramètres possible p et pour un nombre N de mesures qui définit la séquence d'apprentissage (Eq.25).

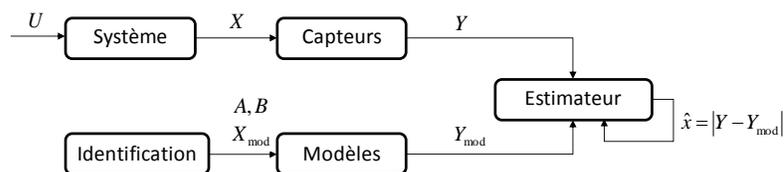


Figure 63 - Principe général d'une procédure d'identification

En phase d'exploitation le modèle reçoit des données différentes de la période d'apprentissage et sa robustesse peut être mesurée en calculant l'erreur quadratique. La Figure 63 résume la méthodologie générale de l'identification.

1.1. Critère de validité

Pour pouvoir être éligible à des applications de contrôle, le modèle doit satisfaire à certains critères. Le lecteur peut se référer au livrable 3.3.2 [123] sur les algorithmes d'estimation paramétrique en ligne où ce point a été traité et d'où est tiré le tableau suivant (Tableau 12) :

Qualité à avoir	Facteurs observés/améliorés
Rapidité à être (re)calibré	Modèles peu complexes : choix du nombre de paramètres
Fiabilité	Comportement de l'erreur : convergence vers la même valeur à chaque identification
Précision	Valeur de l'erreur
Prédiction et adaptabilité	Observation des résultats pour un autre jeu de données
Robustesses	Non sensibilité au jeu de paramètres

Tableau 12 - Qualité du modèle et facteur à observer

1.2. Algorithme utilisé

L'algorithme d'identification utilisé dans ces travaux fait appel à la fonction « fmincon » de la toolbox « Optimization » de MATLAB. Ce choix est motivé par la publication de travaux similaires faisant intervenir des modèles RC de même ordre (Leclere et al. [107], Le Mounier et al. [127]). L'algorithme « interior point » (Segalat [128]) permet de trouver de proche en proche et dans un espace des solutions borné par l'utilisateur, le jeu de paramètres qui permet de minimiser une fonction coût. Cette fonction « deviation » est définie comme la somme quadratique de l'écart entre la température intérieure mesurée et la température intérieure en sortie du modèle (Eq.26).

$$deviation = \sum_{t=0}^N (T_{i,mod,n} - T_{i,n})^2 \quad (\text{Eq.26})$$

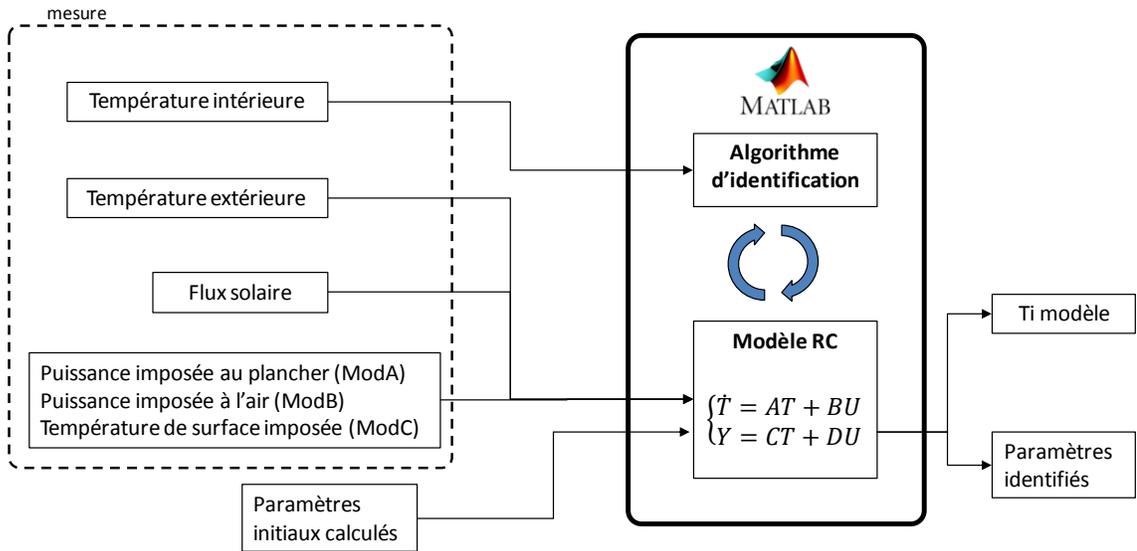


Figure 64 - Principe de la méthode d'identification utilisée

Le programme prend en entrée les mesures des sollicitations extérieures et intérieures ainsi que le jeu de paramètres initial (Figure 64). Cette procédure est appliquée pour toutes les identifications effectuées. La méthode des points intérieurs a été inventée par *Frisch* en 1955 [129] pour résoudre des problèmes non linéaires puis a été appliquée à la programmation linéaire en 1979 (*Khachiyani* [130]). La méthode est améliorée en 1984 par *Karmarkar* [131]. Le problème posé est le suivant (Eq.27) :

$$\begin{cases} \min c(x) \\ Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (\text{Eq.27})$$

Ce problème est résolu dans un ensemble de solutions réalisables $P = \{x : Ax = b, x \geq 0\}$ et les solutions sont recherchées à l'intérieur de ce domaine tel que $P = \{x \in P, x \geq 0\}$. Il est difficile de minimiser directement $c(x)$ dans l'espace entier P , en revanche il est aisé de minimiser $c(x)$ sur une ellipsoïde. Ainsi, le problème est décomposé en une suite d'optimisation en partant d'une ellipsoïde S_0 centrée sur une solution initiale x_0 à l'intérieur de P . La solution optimale qui minimise la fonction coût sur cette ellipsoïde définit un nouveau point x_1 qui est le centre de l'ellipsoïde suivante. Le processus s'arrête quand les critères d'arrêt sont satisfaits (Figure 65).

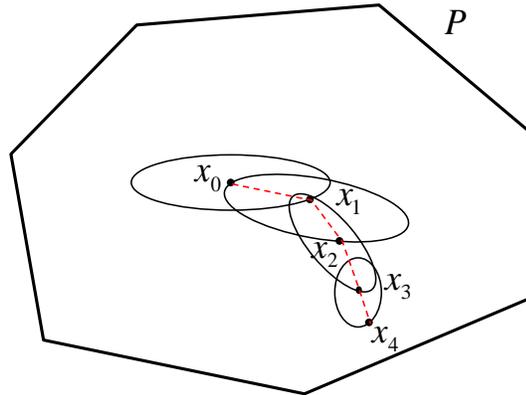


Figure 65 - Principe de la méthode des points intérieurs

Le choix des paramètres initiaux s'effectue par analyse physique. Il est important que les paramètres initiaux soient cohérents pour que l'optimisation se fasse correctement car il s'agit d'une méthode locale. Dans l'algorithme, les paramètres sont normalisés pour se ramener à des valeurs comprises entre 0 et 1 car cela améliore la convergence. Pour définir l'espace des solutions, des bornes minimum et maximum sont définies pour chaque paramètre toujours sur une base physique. Si un des paramètres est identifié sur une borne, il est préférable de relancer une simulation en partant de cette valeur bornée. La définition de ces bornes est importante car les solutions trouvées ne sont pas nécessairement les mêmes selon le niveau de contrainte du problème. Dans la suite de cette étude les bornes sont volontairement assez larges. Dans des travaux récents *Hazyuk et al.* [132] soulignent qu'avec cette méthode les modèles sont précis autour du point d'identification mais que « *les paramètres identifiés ont tendance à perdre du sens physique et que parfois leur valeur est contradictoire avec la physique attendue* ». Il est donc important de noter que des résultats peuvent être numériquement acceptables même s'ils ne le sont pas physiquement.

Résumé

L'identification consiste à trouver le jeu de paramètres qui minimise l'écart entre la mesure et la sortie du modèle pour une séquence d'apprentissage donnée. L'algorithme d'identification choisi utilise la méthode des points intérieurs. Le choix des paramètres initiaux et les bornes des paramètres sont importants.

2. Etude préliminaire avec la maquette

La maquette a un comportement semblable à un bâtiment réel. En effet, la dynamique est similaire si on compare l'évolution en température de la maquette soumise uniquement aux sollicitations périodiques à l'évolution en température de la salle SYNERGI de la campagne 3. Dans les deux cas, le plancher et son équivalent sur la maquette, sont soumis à des créneaux de puissance. La **Figure 66** montre bien un comportement similaire des deux systèmes puisque l'échelle de temps et l'amplitude sont différents mais la dynamique est semblable. Une analogie est donc possible et des tests sur la qualité de l'identification sont réalisés en amont de l'identification pour la plateforme SYNERGI.

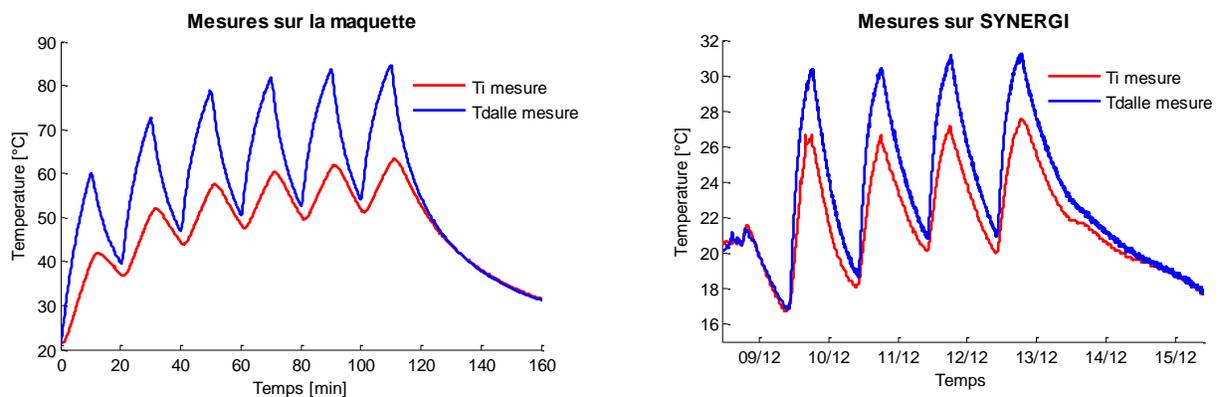


Figure 66 - Analogie entre la maquette et la plateforme SYNERGI

2.1. Validation de la méthode d'identification avec la maquette

La procédure d'identification décrite à la partie 1 est menée à partir de la campagne de mesure de la partie 4.3 chapitre II et permet de comparer l'évolution en température de T_i entre le modèle non identifié (jeu de paramètres initial calculé) et le modèle identifié (jeu de paramètres optimal). Pour le modèle non identifié des écarts supérieurs à 25 % sont constatés alors que le modèle identifié présente un écart relatif maximum de 6 % (**Figure 67**).

paramètres	C_i	C_d	C_m	R_d	R_{mi}	R_{me}	R_e
unité	[J/K]			[m ² .K/W]			
valeur initiale	4,5	31,3	126,9	0,038	0,14	0,13	0,04
valeur identifiée	3,0	25,9	190,3	0,045	0,09	0,19	0,03

Tableau 13 - Jeu de paramètres initial et identifié pour le modèle de la maquette

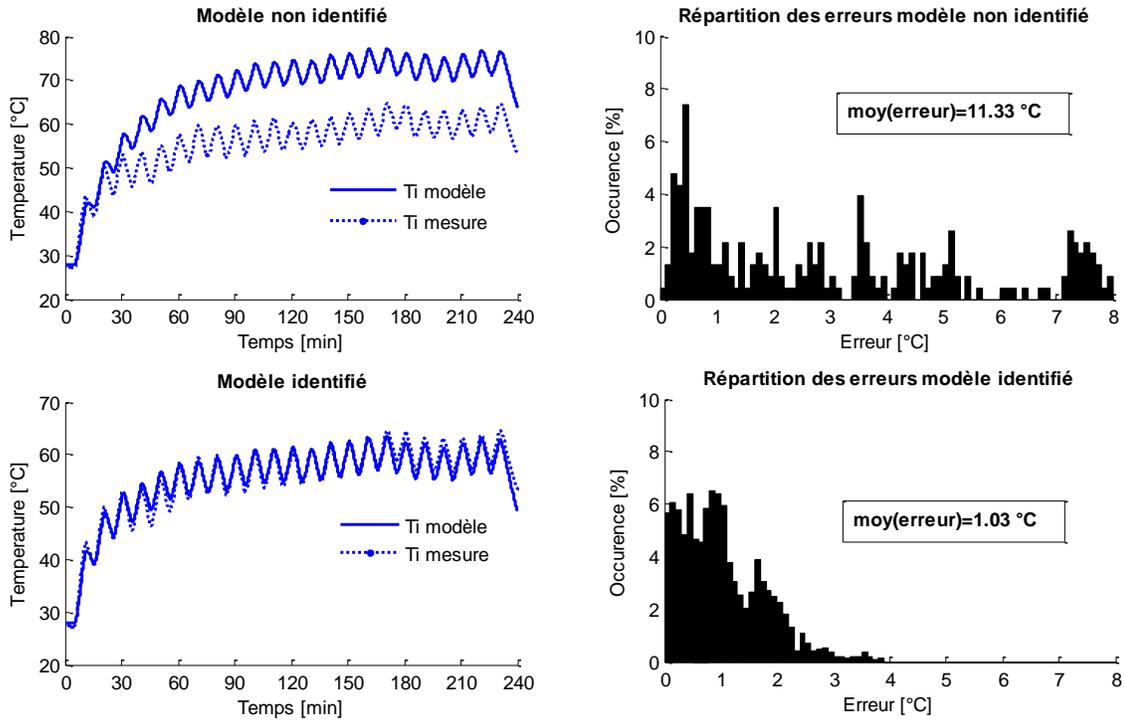


Figure 67 - Amélioration obtenue entre le modèle non identifié (haut) et le modèle après identification (bas)

Les écarts importants constatés pour le modèle non identifié peuvent s'expliquer par deux raisons :

- la valeur initiale des paramètres n'est pas bonne,
- le modèle n'est pas complet.

Les valeurs des paramètres obtenues après identification sont cohérentes avec la physique en terme d'ordre de grandeur. Cependant la comparaison entre les valeurs initiales et les valeurs identifiées (**Tableau 13**) montrent que même pour un cas très simple constitué de matériaux bien connus, il est difficile d'estimer les paramètres. En effet l'écart relatif le plus faible est d'environ 20% pour les paramètres C_d et R_d alors que l'écart relatif maximum est de l'ordre de 50% pour les paramètres C_m et R_{me} . Cela peut s'expliquer par le fait que ces deux paramètres sont liés au mur qui est représenté par un nombre important de couches et dont l'erreur sur l'estimation des propriétés physiques est d'autant plus impactant. De plus, une grande partie des couches associées au mur se situent en partie centrale de la maquette (**Figure 58**) elles sont donc moins sollicitées car éloignées des deux résistances chauffantes. Enfin les capacités observées sont des capacités apparentes car le point mesuré est à la surface et non au centre de chaque couche (chaque couche est considérée comme thermiquement uniforme). Cependant les résultats confortent la méthode puisque l'erreur moyenne entre le modèle et la mesure est de 1,0°C contre 11,3°C avant identification.

2.2. Utilisation d'un modèle détaillé

Un modèle détaillé de la maquette (**Figure 68**) est soumis à l'identification pour faire le parallèle avec les outils de simulations du bâtiment qui utilisent des modèles détaillés. La maquette n'est plus décrite avec seulement trois nœuds mais comprends 27 nœuds : autant que de couches. La température T_i correspond à la couche n°6, T_d correspond à la couche n°3 et T_m est associée à la couche n°17. Comme dans le cas du modèle réduit les paramètres initiaux sont calculés à partir des propriétés physiques des matériaux.

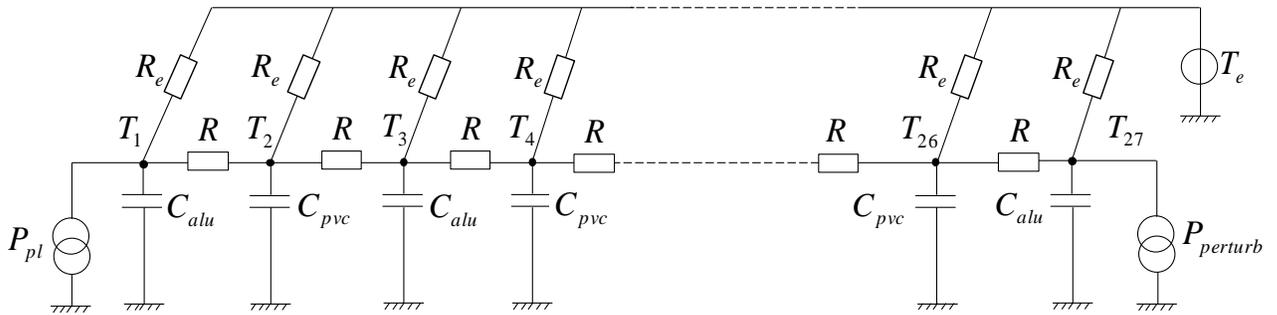


Figure 68 - Modèle détaillé pour la maquette

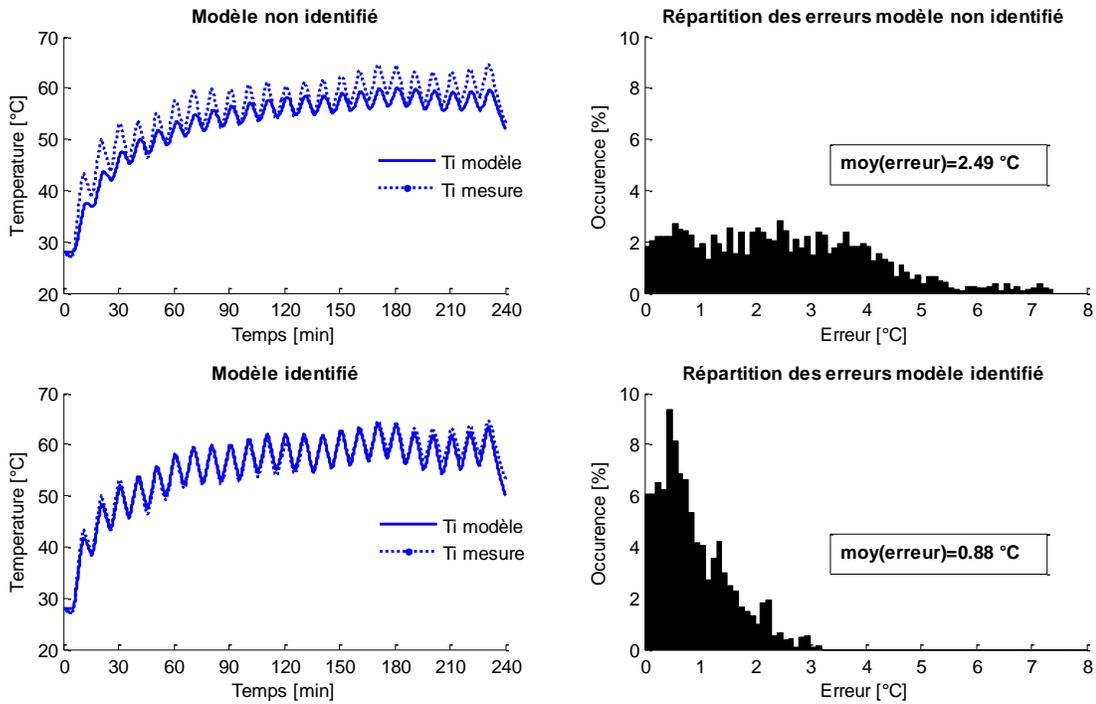


Figure 69 - Identification pour le modèle détaillé de la maquette

L'analyse des données montre que contrairement au modèle léger, le modèle avant identification donne de bons résultats puisque l'erreur moyenne est de 2,5°C contre 11,3°C pour le modèle réduit (**Figure 69**) et un écart relatif maximum de 12% contre plus de 25%. Lors de la simplification de modèle une partie de l'information et du sens physique est perdue. Le modèle détaillé est plus fidèle à la réalité physique donc la précision obtenue est meilleure pour un jeu de paramètres a priori. Cependant même dans le cas d'un modèle détaillé, l'identification permet d'améliorer significativement la précision du modèle dont l'erreur moyenne est de 0,9°C avec un écart relatif maximal de 4%. Un modèle plus complet ne dispense donc pas d'une étape d'identification.

2.3. Orienter l'identification

L'idée est d'améliorer l'identification par deux moyens : en utilisant des sollicitations plus riches ou en ajoutant de l'information par de la mesure additionnelle.

2.3.1. Par la mesure

L'avantage de la mesure infrarouge est de permettre une mesure continue en n'importe quel point de la surface de la maquette. Jusqu'à présent l'identification se fait par rapport à la seule grandeur T_i tandis que les autres mesures ne sont pas utilisées. La température de la dalle est relevée sur la couche n°3 et est intégrée à la fonction coût, ainsi l'identification est contrainte par deux grandeurs d'intérêt (Eq.28).

$$deviation = \sum_{t=0}^N \left[(T_{i\text{mod},n} - T_{i,n})^2 + (T_{d\text{mod},n} - T_{d,n})^2 \right] \quad (\text{Eq.28})$$

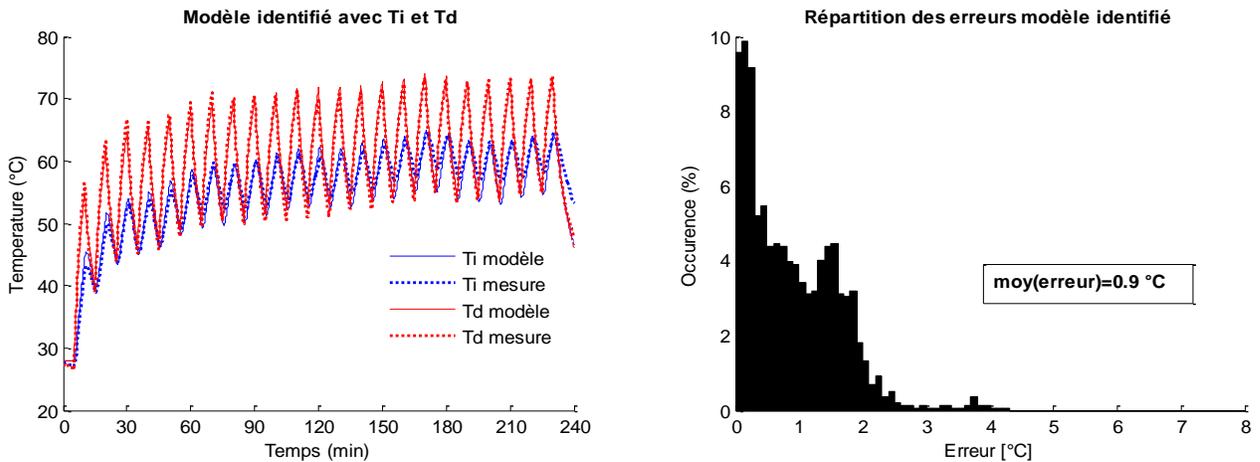


Figure 70 - *Modèle identifié avec deux variables d'intérêt*

L'ajout d'une information additionnelle permet d'améliorer légèrement l'identification (**Figure 70**) puisque l'erreur moyenne est de 0,9°C et l'écart relatif maximal de 4%. Dans ce cas l'erreur moyenne est calculée par rapport aux deux grandeurs d'intérêt. Ainsi, l'utilisation d'une mesure supplémentaire permet de redonner du sens physique au modèle identifié.

2.3.2. Par la richesse des sollicitations

La deuxième voie d'amélioration possible consiste à utiliser des sollicitations plus riches. Il s'agit de rendre influent le plus grand nombre de paramètres. Plus un paramètre est influent sur la variable d'intérêt et plus son identification est aisée. Lorsqu'un paramètre est peu influent il peut prendre toute une gamme de valeurs sans changer la qualité de l'identification. Pour augmenter la richesse des sollicitations, une nouvelle campagne de mesure est réalisée. La résistance chauffante 1 correspondant au plancher chauffant n'est plus soumise aux sollicitations périodiques mais à une sollicitation de type SBPA (Séquence Binaire Pseudo Aléatoire) ou PRBS en anglais (Pseudo Random Binary Sequence) comme c'est déjà le cas pour la résistance 2 représentant les perturbations qui restent inchangées. Ce type de sollicitation permet d'exciter un grand nombre de fréquences correspondant à différentes constantes de temps du modèle. Il s'agit d'un signal dont l'espacement entre deux créneaux et la largeur de ceux-ci sont aléatoires et se répètent de manière périodique. Dans notre cas le signal est exécuté une seule fois (**Figure 71**).

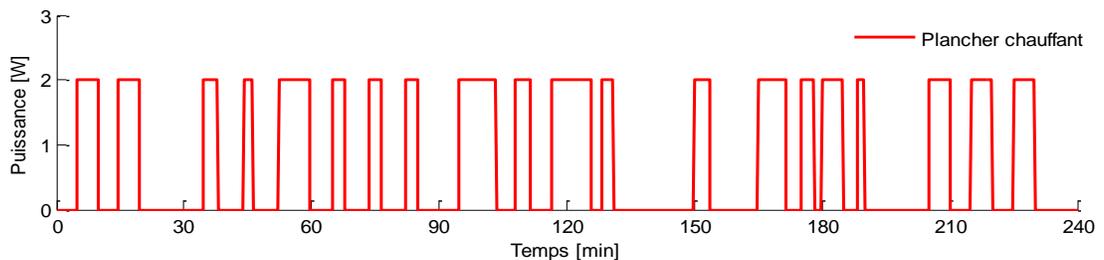


Figure 71 - Sollicitation SBPA utilisée

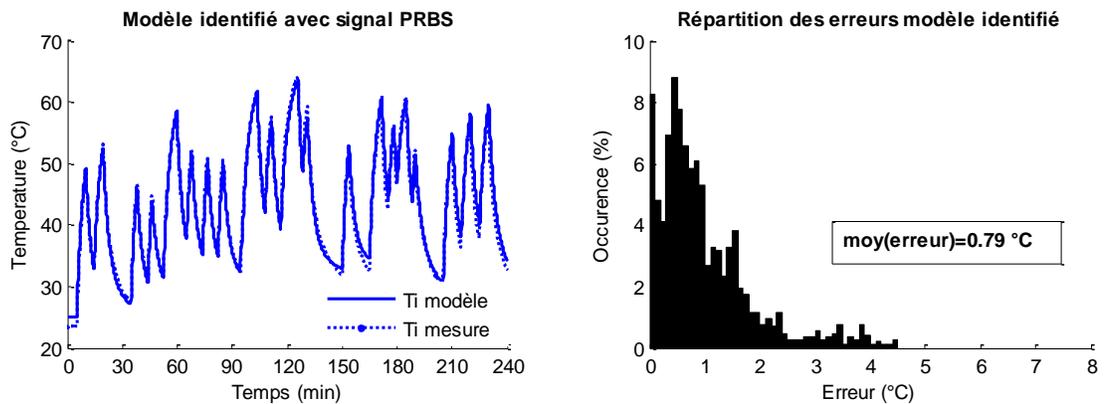


Figure 72 - Modèle identifié avec des sollicitations plus riches

Les résultats montrent que la richesse des sollicitations permet encore d'améliorer la qualité de l'identification puisque l'erreur moyenne est en deçà de 0,8°C (**Figure 72**) pour un écart relatif maximal de 6%. Ces conclusions obtenues à partir d'essais très simples sur la maquette permettent de valider des méthodes. Celles-ci vont pouvoir être transposées afin de tenter de les appliquer au bâtiment échelle réelle pour obtenir un modèle satisfaisant.

Résumé

La maquette permet de valider la procédure d'identification. Un modèle plus détaillé de celle-ci réduit l'erreur avant identification mais pas suffisamment pour s'en passer. Un modèle léger est donc aussi bien approprié. L'ajout d'une mesure additionnelle pour l'identification améliore la précision du modèle de même que des sollicitations plus riches.

3. Peut-on utiliser directement des modèles/données de conception ?

Avant d'utiliser les modèles RC décrit au chapitre II, la plateforme SYNERGI a été modélisée avec des modèles plus détaillés. Premièrement, un modèle de taille intermédiaire est construit à partir des données de conception, le modèle de conception est ensuite lui-même utilisé et confronté aux campagnes de mesures. Cela va permettre de démontrer si ces modèles peuvent être directement employables pour une application de contrôle.

3.1. Construction de modèles à partir de données de conception

Avec les modèles RC l'ensemble des propriétés thermiques d'une paroi est résumé en un seul terme de résistance et de capacité. Ici le but est de chercher à avoir une description plus fine de l'enveloppe composant le bâtiment. Le logiciel AMESim est utilisé ici dans le cadre du projet PRECISION et sert à construire ce modèle. Chaque paroi est discrétisée avec chaque couche de matériaux. Les sollicitations sont les mêmes que pour les modèles de type RC (température extérieure, CTA, flux solaires, plancher chauffant). La puissance du plancher mesurée est donc imposée au niveau de la couche correspondant à son emplacement réel (**Figure 73**). Ce modèle correspond au niveau de détail qui est demandé dans le cadre du dimensionnement des équipements de chauffage selon la norme *NF EN 12831* [133].

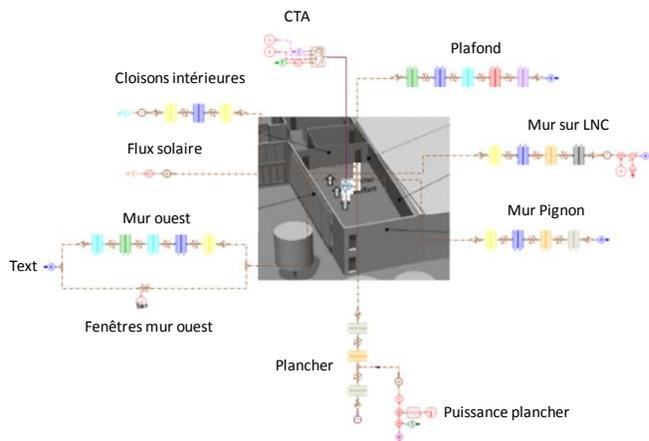


Figure 73 - Modélisation dans l'environnement AMESim

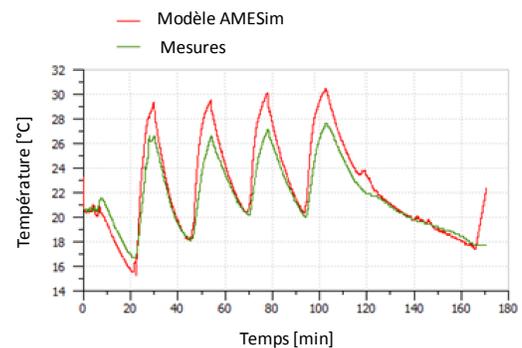


Figure 74 - Température intérieure mesurée et en sortie du modèle AMESim

Les résultats obtenus sont ceux de la campagne 3 (**Figure 74**). Des écarts supérieurs à 2°C et une erreur moyenne de 1,4°C sont constatés. Dans le cas présenté, une description plus fine de l'enveloppe à partir de données de conception ne permet donc pas de meilleurs résultats. L'identification d'un modèle RC par la mesure comme cela a été fait avec la maquette paraît donc être une voie intéressante.

3.2. Utilisation directe d'un modèle de conception

En phase conception un modèle détaillé est établi par les bureaux d'études pour réaliser des simulations thermiques dynamiques et orienter les choix du maître d'ouvrage. Ainsi, ce type de modèle est théoriquement disponible pour chaque projet de construction. Le but est de chercher à savoir si un modèle de conception peut être réutilisé dans une optique de contrôle. Pour cela, l'ensemble de l'IUT Génie Civil Construction Durable incluant la plateforme SYNERGI est modélisé avec la suite logicielle Pleiades+COMFIE. Des éléments supplémentaires sont pris en compte dans ce modèle comme les ponts thermiques qui ne le sont pas dans les modèle RC ou AMESim. Les valeurs des coefficients de transmission linéiques peuvent être trouvées dans des catalogues dédiés pour des configurations usuelles, ici elles sont calculées au cas par cas selon la norme *NF EN ISO 10211* [134] pour correspondre aux jonctions réelles. Les caractéristiques des parois et des ponts thermiques sont données à l'**annexe A**.

Lorsqu'un bâtiment est modélisé avec la suite logicielle Pleiades+COMFIE, un modèle d'état est construit pour chaque zone thermique. Les parois sont discrétisées en mailles en suivant des règles qui dépendent de la capacité thermique des matériaux, de la position de chaque couche, des conditions limites et de la présence d'isolant. Le maillage est fait de telle sorte que les mailles les plus fines se trouvent du côté intérieur de la paroi car le couplage avec l'évolution de la température de la zone est fort. Le volume d'air de la zone ainsi que le mobilier et les cloisons internes sont définis par une unique maille correspondant au nœud de température intérieur. A la suite de ce découpage interne au logiciel, un modèle d'état d'ordre élevé est établi pour chaque zone. Ensuite, le logiciel calcule un deuxième modèle d'ordre élevé en effectuant un changement de variable et une diagonalisation grâce à un changement de base. Après troncature de la base de projection, pour chaque zone un modèle d'ordre réduit est obtenu en ne conservant que les plus grandes constantes de temps. La dernière étape consiste à coupler les modèles pour prendre en compte les transferts thermiques entre zones (**Figure 75**). Ces étapes sont invisibles pour l'utilisateur mais dans le cadre du projet PRECISION avec la collaboration d'Armines il est possible de récupérer les modèles d'état à chacune de ces étapes. Ainsi, le modèle d'état d'ordre élevé de taille 26 de la salle SYNERGI est obtenu. Le vecteur des sollicitations contient la puissance interne, la température extérieure, les flux solaires et la température équivalente des zones adjacentes. Ce modèle est soumis aux sollicitations de la campagne 3 et la sortie est comparée à la température intérieure mesurée. Il est à noter que les températures équivalentes des zones adjacentes n'ont pas toutes été mesurées. Dans ce cas la température est approximée à une valeur constante de 18°C. Les résultats sont donnés (**Figure 76**) et montrent que le modèle fournit de bons résultats bien que des écarts importants soient localement constatés, l'erreur moyenne reste supérieure à 1°C ce qui demeure trop élevé pour du contrôle. En passant du temps sur des réajustements au niveau de la modélisation il serait néanmoins possible de les utiliser. Il a d'ailleurs été déjà démontré que cet outil de simulation pouvait produire de très bons résultats lorsqu'il

est comparé à des données mesurées [135]. Néanmoins, cela revient à faire de l'identification « à la main » et une approche d'identification de modèles légers paraît donc plus appropriée.

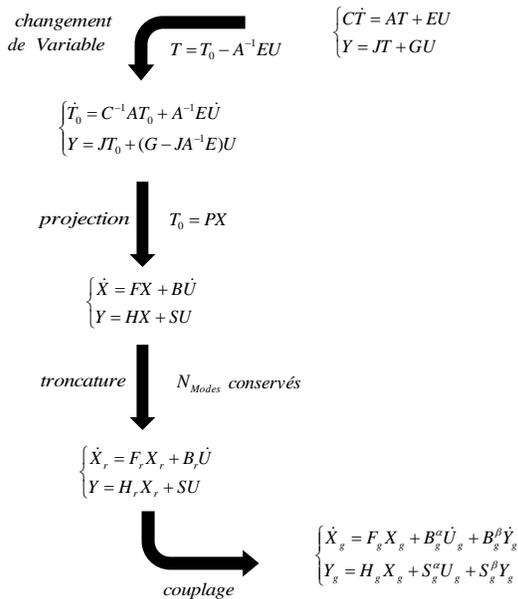


Figure 75 - Etapes de réduction et couplage [72]

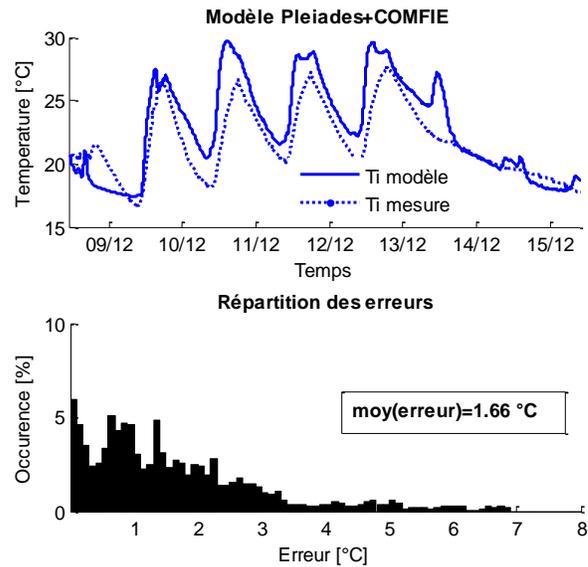


Figure 76 - Résultats obtenus à partir du modèle d'état de Pléiades+COMFIE

Augmenter la complexité du modèle permet de réduire l'écart avec la mesure. Cependant, il faut voir l'utilité du modèle par rapport au besoin, ici le contrôle. Pour ce type d'application, une précision importante est attendue puisqu'il s'agit des prévisions de l'ordre du jour ou de la semaine. Ainsi comme montré précédemment, aussi détaillé ou complexe que soit le modèle, cela ne dispense pas d'une étape d'identification ou de calibration pour contrôler un bâtiment en temps réel. L'analyse bibliographique ayant montré que des modèles RC simples combinés à de l'identification donne des résultats très satisfaisants, c'est cette approche qui est utilisée par la suite.

Résumé

Comme pour la maquette, un modèle détaillé de conception peut difficilement être utilisé directement pour une application de contrôle. Cela conforte le choix d'avoir recours à des modèles RC légers identifiés par la mesure.

4. Identification de modèles pour la plateforme SYNERGI

4.1. Identification à partir de résultats de simulations

La partie 3 a permis de démontrer qu'il est difficile de se passer d'une étape d'identification pour obtenir un modèle satisfaisant. Bien que très détaillés, les modèles de conception ne sont pas directement éligibles au contrôle. L'analyse bibliographique indique que beaucoup de travaux portant sur l'identification de modèles de bâtiment se font à partir d'un modèle de référence, généralement d'ordre élevé, plus rarement à partir de mesures in situ. La différence fondamentale entre les deux cas réside dans la maîtrise et la connaissance des sollicitations. Lorsqu'un modèle léger est identifié à partir de la sortie d'un modèle détaillé, la connaissance est exacte des entrées utilisées pour le modèle détaillé et il est alors possible de les injecter dans le modèle léger. Ainsi, il n'y a pas d'incertitude sur les sollicitations et un jeu de paramètres optimal est plus facile à trouver. De plus, le modèle de référence étant simulé, il est aisé d'agir sur les sollicitations en choisissant des scénarios riches en contenu fréquentiel pour faciliter l'identification. Dans les travaux de *Candanedo et Athienitis* [136] un modèle de bâtiment décrit sous forme de fonctions de transfert est identifié à partir d'un modèle détaillé EnergyPlus. Une fonction de transfert est associée à chacune des trois sollicitations (température extérieure, flux solaire, puissance de chauffage) traduisant leurs effet sur la température intérieure (**Figure 77**). Chaque fonction de transfert est identifiée en excitant de façon adéquate la sollicitation associée et en limitant l'influence des deux autres :

- pour la température extérieure le modèle détaillé est soumis à un fichier météo dont l'amplitude de variation est élevée et les apports solaires sont nuls,
- pour la fonction de transfert correspondant aux apports solaires, la température extérieure est constante et fixée à 0°C,
- pour le système de chauffage, le bâtiment est soumis à des échelons de puissance, la température extérieure vaut 0°C et le flux solaire est nul.

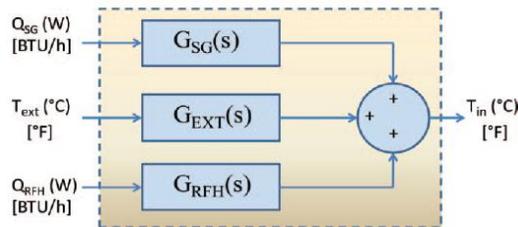


Figure 77 - Modèle de bâtiment simplifié utilisé par *Candanedo et Athienitis* [136]

La comparaison entre le modèle identifié et le modèle détaillé indique une erreur moyenne de 0,88°C. Cela est possible uniquement parce que la sortie de référence provient d'une simulation EnergyPlus. Cet aspect est souligné par *Hazyuk et al.* [132] : « l'avantage de la simulation est qu'il n'y a pas de contraintes sur le choix des sollicitations ou des perturbations. Souvent les outils de simulation peuvent remplacer le

bâtiment réel pour l'identification des paramètres ». Sur un bâtiment réel, le travail de *Candanedo et Athienthis* aurait été plus compliqué à réaliser :

- pour annuler l'influence des sollicitations solaires il est nécessaire d'effectuer des campagnes nocturnes,
- pour limiter l'effet de la température extérieure il faut solliciter l'air intérieur de façon à ce que l'amplitude ou la fréquence soit grande en comparaison des variations extérieures, ou disposer d'un bâtiment découplé de l'environnement extérieur comme la plateforme PREDIS,
- pour annuler l'influence du système de chauffage il faut arrêter celui-ci et attendre que le bâtiment se décharge thermiquement ce qui peut prendre plusieurs jours.

Cela est également souligné par *Hazyuk et al.*, qui précisent que l'identification expérimentale de modèles requiert des jeux de données entrée/sortie conséquents. Pour avoir un modèle précis, les sollicitations doivent avoir un large spectre en fréquence afin d'exciter les constantes de temps et avoir suffisamment de variations en sortie et ainsi pouvoir être observées [137]. Dans le cas de mesures in situ, le choix des sollicitations est plus restreint et limité dans la durée et le nombre puisque cela implique de réaliser une campagne de mesure à chaque fois. Se pose également la contrainte du coût de leurs réalisations sur plusieurs jours. De plus les incertitudes sur les sollicitations réelles et les perturbations non prises en compte par le modèle peuvent dégrader la qualité du modèle identifié.

Afin de montrer que l'identification à partir d'un modèle de simulation est aisée, une simulation thermique de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Bordeaux est effectuée avec Pleiades+COMFIE. Elle est réalisée sur une année avec le fichier météo typique (.try) pour la ville d'Agen. L'hiver, la consigne est de 20°C en occupation et de 15°C le reste du temps, en dehors de la saison de chauffe il n'y a pas de climatisation et le bâtiment est en évolution libre. Pour le mois de janvier et pour le mois de juillet l'évolution de la température de la zone ainsi que les sollicitations sont récupérées, à savoir : température extérieure, gains solaires et puissance de chauffage calculée par le logiciel pour respecter les consignes en hiver. Ces sollicitations sont appliquées à un des modèles RC qui est identifié séparément pour les deux mois considérés. La puissance de chauffage qui est calculée par le logiciel correspond à une puissance fournie au nœud d'air, c'est donc le modèle B qui est utilisé pour l'identification puisque pour celui-ci l'effet du plancher chauffant est pris en compte par une puissance imposée à l'air (partie 3.4 chapitre II). La **Figure 78** présente l'évolution de la température intérieure en sortie de Pleiades+COMFIE et du modèle B ainsi que les sollicitations associées et le graphe de répartition d'erreur pour les mois de janvier et de juillet. L'identification donne de très bons résultats en hiver avec une erreur maximale de 1°C constatée entre la température intérieure de sortie de Pleiades+COMFIE et celle du modèle B. En été les puissances mises en jeu et donc les sollicitations sur l'air sont moindres mais la qualité d'identification reste excellente avec une erreur moyenne de 0,6°C.

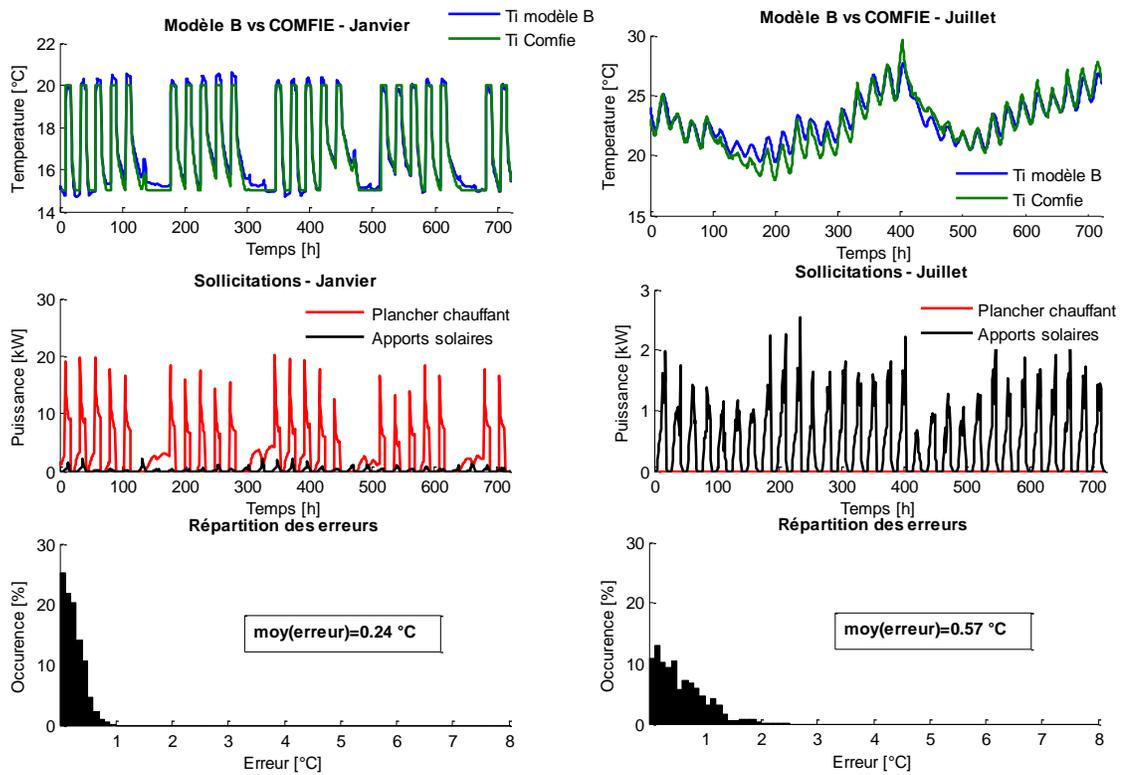
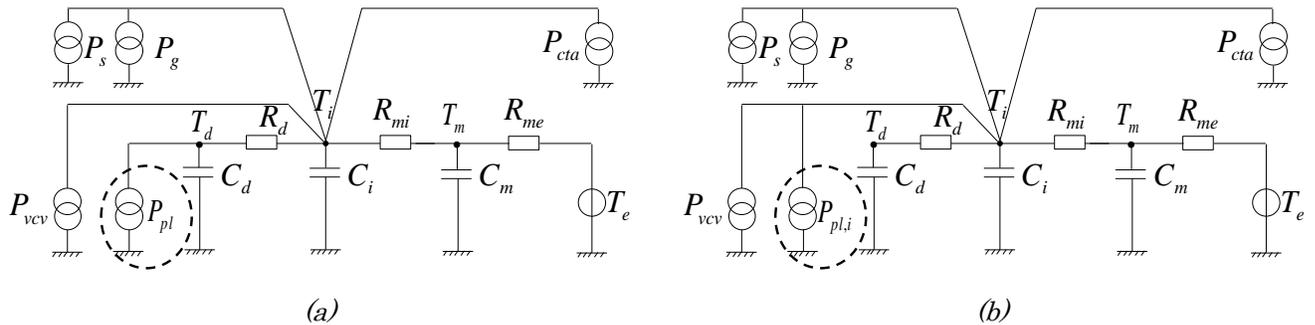


Figure 78 - Identification du modèle B à partir d'un modèle détaillé Pleiades+COMFIE

4.2. Identification à partir de données mesurées

La procédure d'identification est celle décrite à la partie 1 en utilisant les campagnes de mesures et les modèles proposés au chapitre II correspondant à trois façons de prendre en compte l'effet du plancher chauffant. Ils sont rappelés ci-dessous par souci de clarté (**Figure 79**). En premier lieu, une analyse de sensibilité doit être menée afin de déterminer si des paramètres peu sensibles peuvent être fixés et dispensés d'identification.



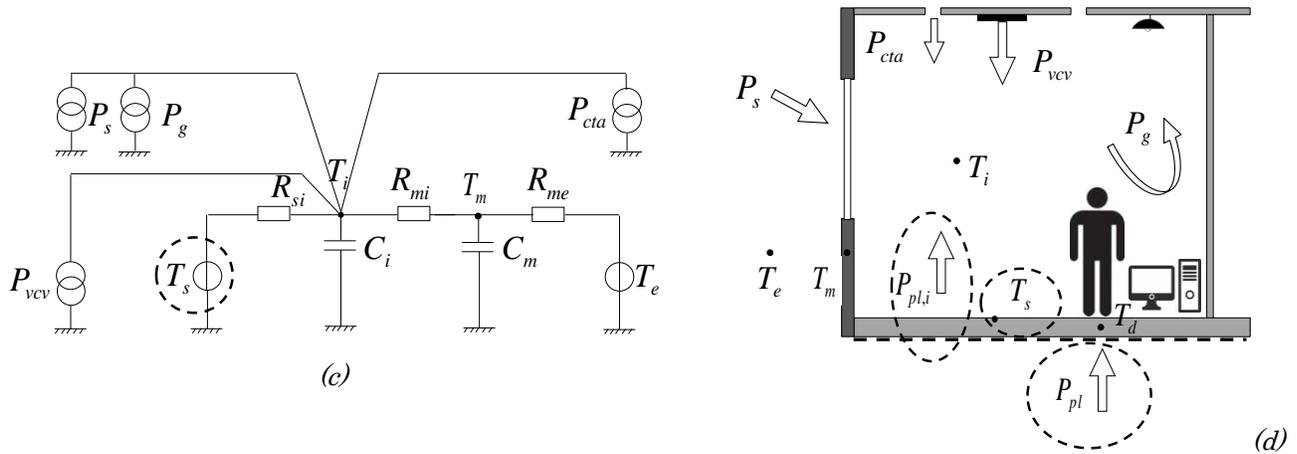


Figure 79 - Modélisation de la salle SYNERGI, Modèle A (a), Modèle B (b), Modèle C (c) et représentation schématique (d)

4.2.1. Analyse de sensibilité

Les méthodes d'analyse de sensibilité sont des outils très utiles pour la modélisation et la simulation numérique. Elles permettent de savoir quelles sont les entrées ou paramètres du modèle qui ont le plus d'effet sur la sortie de celui-ci. Elles permettent également de regarder les effets et les éventuelles interactions. L'intérêt de telles méthodes pour ces travaux est de pouvoir améliorer l'identification en fixant la valeur des paramètres peu influents. Des erreurs peuvent également être détectées par ce biais. En effet, si à la suite de l'analyse de sensibilité un paramètre est identifié comme influent alors qu'il est connu comme ne l'étant pas dans la réalité, alors le modèle est erroné.

L'identification est d'autant plus efficace que le nombre de paramètres à identifier est petit. Ainsi, il peut être intéressant de fixer à leur valeur initiale les paramètres peu influents sur la sortie du modèle en utilisant l'analyse de sensibilité. Pour cela, une analyse de sensibilité est menée pour les modèles A, B et C. Dans le cas présent, c'est l'impact des paramètres de capacité et de résistance sur la variation de température intérieure qui est étudié.

Il existe plusieurs méthodes pour faire de l'analyse de sensibilité, elles peuvent être regroupées en trois grandes familles (Iooss [138], Saltelli et al. [139]) :

- analyse de sensibilité locale : les variations de la sortie du modèle sont étudiées lorsque les paramètres varient localement autour d'une valeur initiale. Les interactions ne sont pas prises en compte puisque les paramètres varient un à un. On parle aussi de méthodes OAT pour « Once at A Time »
- analyse de sensibilité globale : elle prend en compte les interactions en utilisant la décomposition de la variance (Castaings [140]). Pour chaque paramètre, est évalué le rapport de corrélation entre la variance obtenue pour une valeur de paramètre et la variance totale. Cela conduit à calculer des indices pour chaque paramètre qui sont dits de premier ordre si le

paramètre est étudié seul ou d'ordre n s'il est en interaction avec $n - 1$ autres paramètres. Ces méthodes nécessitent un grand nombre d'expériences et font appel à des méthodes heuristiques. La contribution totale est obtenue en faisant la somme n des indices.

- analyse de sensibilité par screening ou criblage : ces méthodes, qui peuvent aussi être considérées comme des méthodes globales, sont fondées sur la discrétisation des paramètres et consistent à lancer des simulations en faisant varier la valeur des paramètres selon un plan d'expérience défini. Il permet de tester toutes les combinaisons possibles de paramètres et prend donc en compte les effets d'interaction.

Par la suite, le choix est fait d'utiliser une méthode de criblage très répandue : la méthode de criblage de *Morris* [141]. Elle a l'avantage d'être intuitive et le nombre de simulations est raisonnable. De plus, elle prend en compte les interactions. La méthode peut être décrite en six étapes. Ci-dessous, l'exemple pour trois paramètres :

- étape 1 : les paramètres du modèle sont discrétisés en deux valeurs extrêmes qui sont choisies dans l'espace des solutions (**Figure 80**).

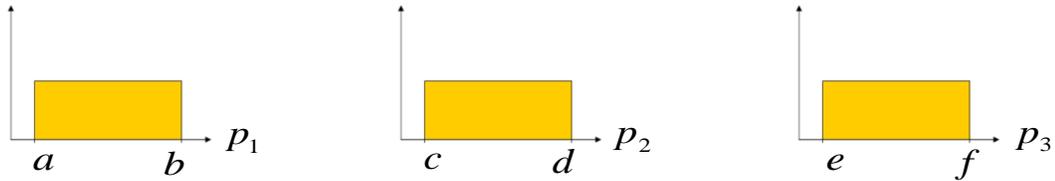


Figure 80 - Discrétisation des paramètres en deux valeurs minimum et maximum

- étape 2 : pour un nombre p de paramètres, création de la matrice M de dimension $n \times p$ du plan d'expérience avec $n = 2^p$ expériences (Eq.30) :

$$M = \begin{pmatrix} a & c & e \\ a & c & f \\ a & d & e \\ a & d & f \\ b & c & e \\ b & c & f \\ b & d & e \\ b & d & f \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{sorties}} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{effets élémentaires}} \begin{matrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ \begin{pmatrix} dY_{15} \\ dY_{26} \\ dY_{37} \\ dY_{48} \end{pmatrix} / & \begin{pmatrix} dY_{13} \\ dY_{24} \\ dY_{57} \\ dY_{68} \end{pmatrix} / & \begin{pmatrix} dY_{12} \\ dY_{34} \\ dY_{56} \\ dY_{78} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{Eq.30})$$

- étape 3 : la sortie du modèle Y_i est calculée pour chaque expérience n_i et permet de calculer l'effet élémentaire dY_{ij} d'un changement de paramètre entre les deux expériences i et j correspondantes.

- étape 4 : pour chaque paramètre est calculé l'effet élémentaire moyen μ et l'écart type σ (Eq.31)

$$\begin{cases} \mu = \frac{2}{N} \sum dY_{ij} \\ \sigma = \sqrt{\frac{2}{N} \sum (dY_{ij} - \mu)^2} \end{cases} \quad (\text{Eq.31})$$

Si la valeur de l'effet moyen est importante alors la sortie est sensible aux variations du paramètre considéré. Si l'écart type est important cela veut dire que l'effet du paramètre considéré dépend de la valeur des autres paramètres (interactions) ou des entrées (non-linéarité).

- étape 5 : le graphe $\sigma = f(\mu)$ est tracé ce qui permet de classer l'influence que chaque paramètre dans trois catégories (**Figure 81**).
- étape 6 : les paramètres sont classés du plus influent au moins influent sur un histogramme en fonction de la distance à l'origine du point correspondant sur le graphe $\sigma = f(\mu)$.

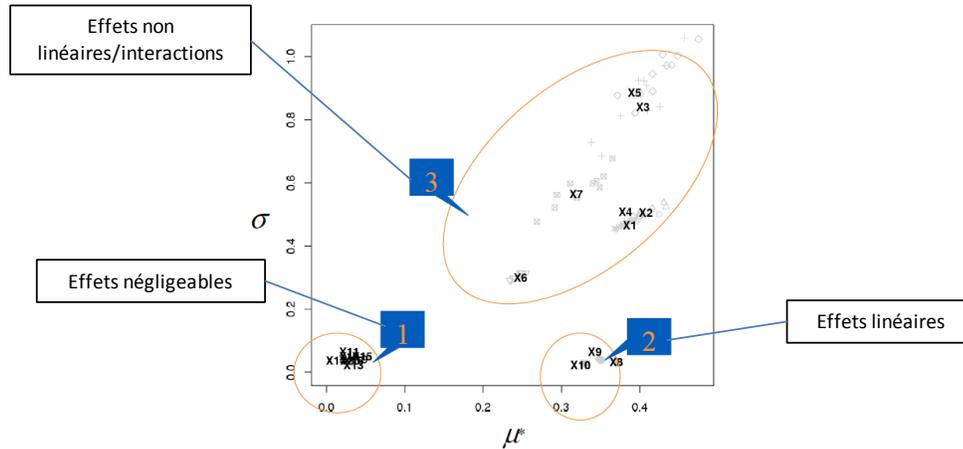


Figure 81 - Nature de l'influence des paramètres selon leur position sur le graphe $\sigma=f(\mu)$ (Iooss [142])

L'analyse de sensibilité par la méthode de Morris est réalisée pour les modèles A, B et C à partir des données d'entrée de la campagne 1. Les résultats sont présentés ci dessous (**Figure 82**). Pour les modèles A et B la capacité thermique de la dalle apparaît comme le paramètre le plus influent car ce composant est sollicité par l'action du plancher chauffant dont la contribution au bilan thermique est majeure. L'importance du paramètre R_{si} pour le modèle C se justifie de la même manière. L'analyse de sensibilité fait apparaître la capacité thermique de l'air C_i comme de moindre importance mais cela est dû à la dominance de la contribution de la dalle et ne doit pas être considérée comme peu influente. En revanche, pour les trois modèles les paramètres C_m et R_{me} ne sont pas influents ce qui s'explique par le fait que le bâtiment est isolé par l'intérieur et que la masse thermique des murs est séparée de celle de l'air. La résistance thermique R_{me} étant celle du béton des murs extérieurs, sa valeur est très faible comparée à celle de l'isolant et donc également peu impactante dans sa plage de variation considérée. Ces deux paramètres peuvent donc être fixés à leur valeur de condition initiale.

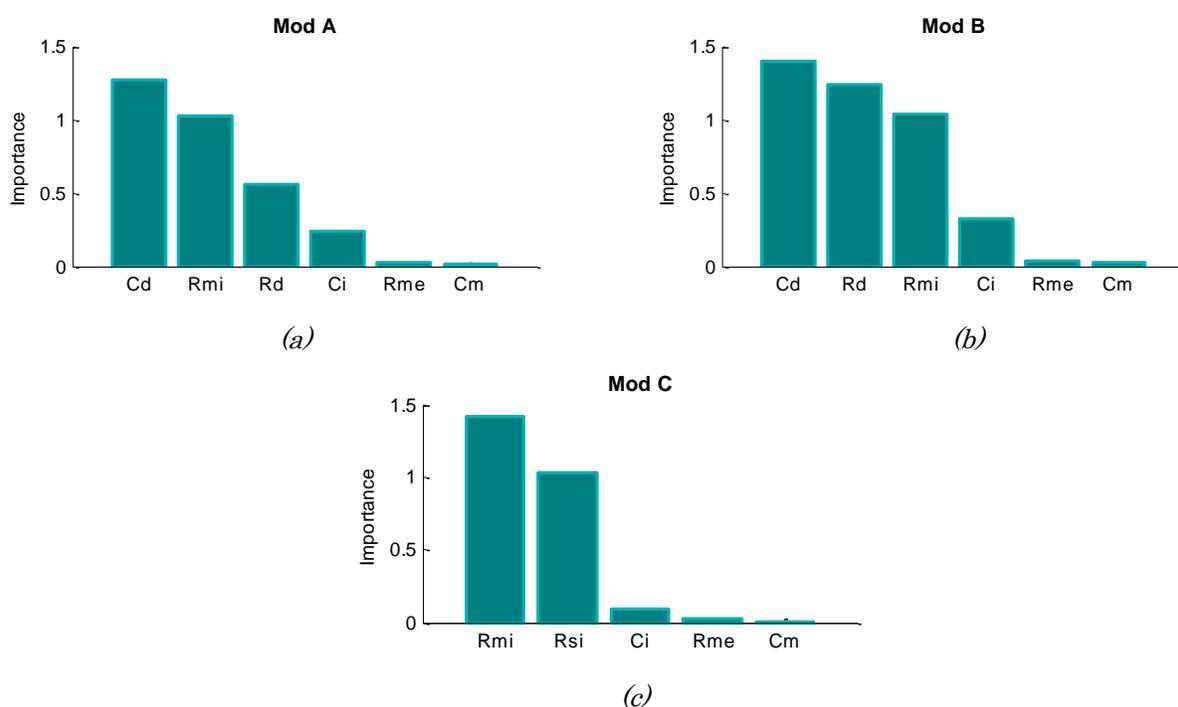


Figure 82 - Classement des paramètres par ordre d'importance avec la méthode de Morris pour les modèles A (a), modèle B (b) et modèle C (c)

4.2.2. Choix des paramètres initiaux et des conditions initiales

Comme mentionné à la partie 1.2, l'ensemble des paramètres initiaux $p_{i,0}$ définissant la solution initiale x_0 doivent être cohérents pour que l'optimisation se fasse correctement. Ils sont déterminés à

partir de la connaissance a priori des composants du bâtiment mais sont incertains car basés sur des données qui peuvent ne pas correspondre exactement au bâtiment. De même, le modèle simplifié est lui aussi incomplet par définition. Les paramètres initiaux sont donc calculés à partir des données du CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) fournit lors de l'appel d'offre. L'algorithme d'identification cherche le meilleur jeu de paramètres de proche en proche dans un intervalle défini. Il est donc nécessaire de définir pour chaque paramètre des bornes minimum et maximum. Pour cela un coefficient k_i est associé à chaque paramètre p_i de façon à définir l'intervalle de recherche $[p_{i,\min} : p_{i,\max}]$ autour de la valeur initiale $p_{i,0}$ (Eq.29) :

$$\begin{cases} p_{i,\min} = p_{i,0} / k_i \\ p_{i,\max} = p_{i,0} \times k_i \end{cases} \quad (\text{Eq.29})$$

Il y a des incertitudes externes et internes au modèle : les incertitudes externes correspondent aux données d'entrée et les incertitudes internes aux hypothèses de simplification du modèle. Ainsi l'intervalle de recherche est volontairement assez large et peut ne pas correspondre à une réalité physique.

Les conditions initiales de température $X(0)$ sont choisies à partir des données mesurées à $t = 0$. La justesse du jeu de conditions initiales dépend donc de l'incertitude de mesure. Une rapide étude est menée à partir du modèle B pour déterminer dans quelle mesure le choix de la condition initiale est impactant sur la sortie du modèle (**Figure 83**). Il apparaît clairement que seule la température initiale de la dalle a un impact significatif sur la sortie puisqu'elle représente la majeure partie de l'inertie de la pièce et qu'elle est sollicitée quand le plancher chauffant fonctionne. Cette valeur doit donc être choisie avec soin. Pour la température d'air ou des murs, l'effet d'initialisation est de quelques heures (12h pour l'air).

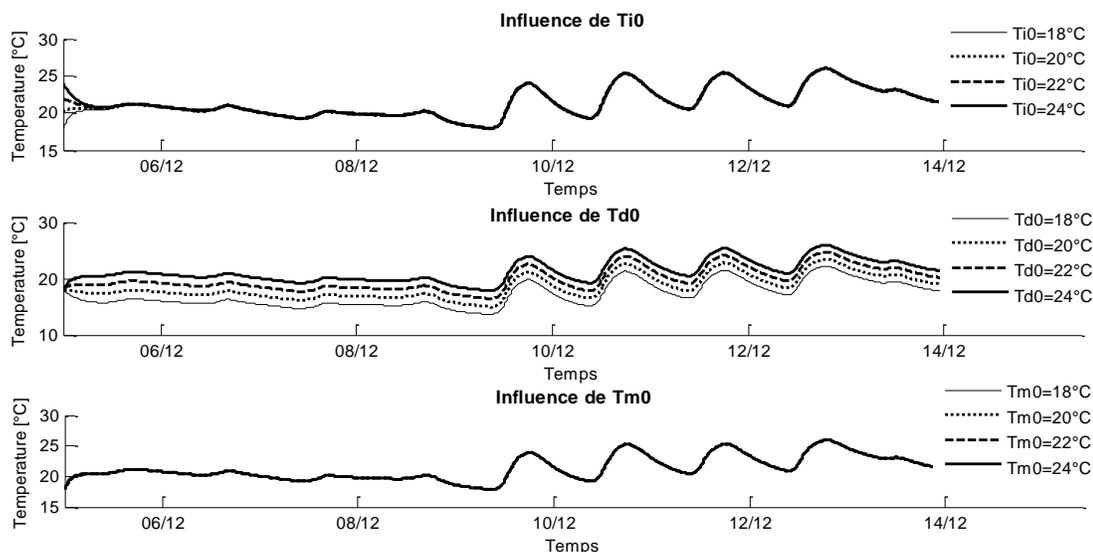


Figure 83 - Influence de la condition initiale sur le modèle - Application au modèle B

Paramètre P_i	valeur initiale $P_{i,0}$	unité	coefficient k_i	condition initiale $X(0)$	valeur			unité
					campagne 1	campagne 2	campagne 3	
C_i	7.10^5	[J/K]	100	$T_{i,0}$	21	24	20	[°C]
C_d	7.10^6		100					
C_m	1.10^8		1	$T_{d,0}$	20	22	20	
R_{mi}	2	10						
R_{me}	0,01	[m ² .K/W]	1	$T_{m,0}$	8	20	8	
R_d / R_{si}	0,14		10					

Tableau 14 - Jeu de paramètre initial et conditions initiales

Les conditions initiales ainsi que les valeurs des coefficients k_i sont donnés dans le **Tableau 14**. Les valeurs choisies sont volontairement grandes et peuvent conduire à des valeurs très éloignées du sens physique. Elles ont été déterminées par expériences successives en réduisant progressivement les valeurs des coefficients k_i et en s'arrêtant quand la qualité du modèle se dégrade. Les paramètres C_m et R_{me} sont fixés ($k_i = 1$) suite à l'analyse de sensibilité détaillée à la section précédente.

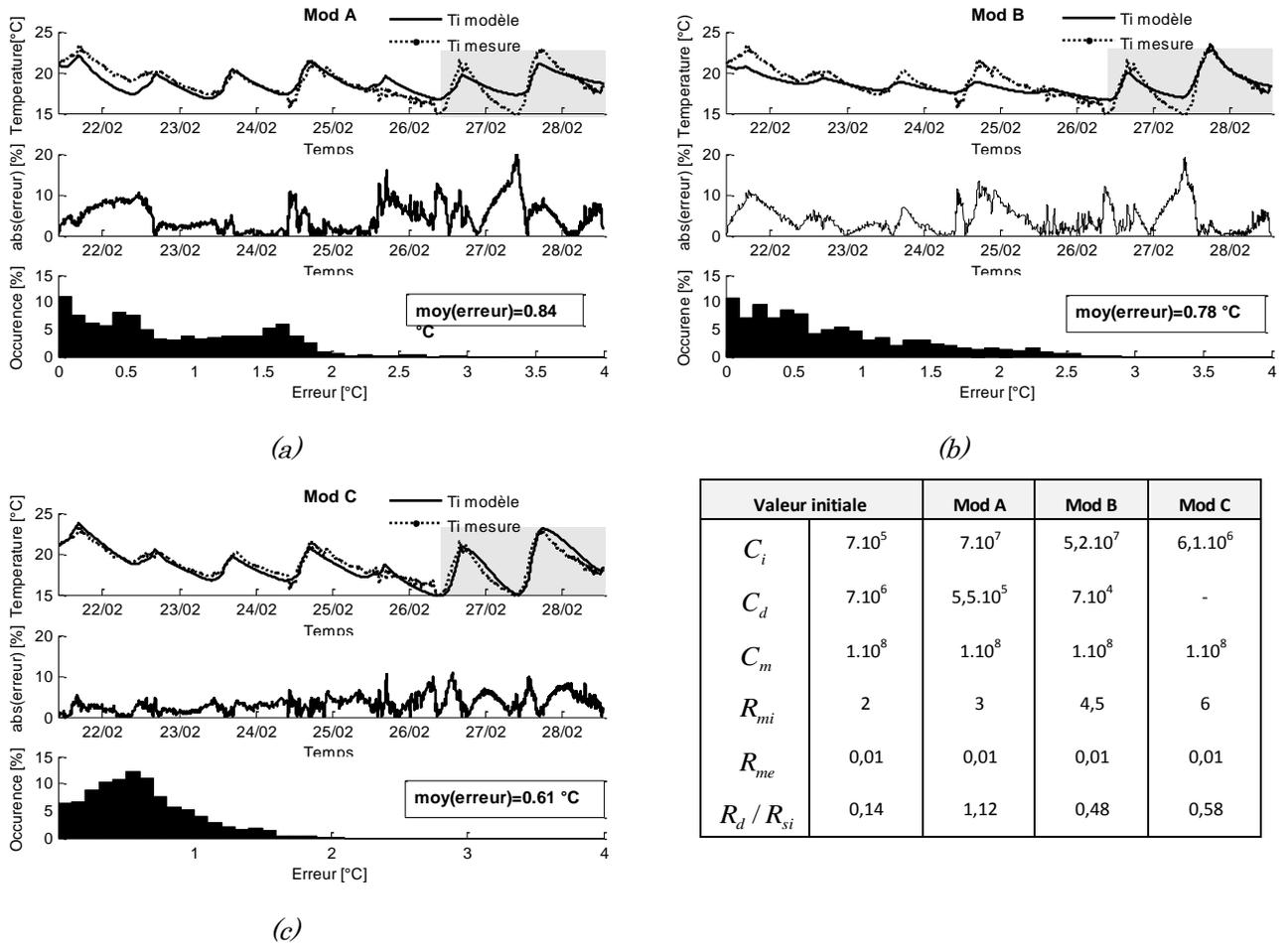
4.3. Résultats

La procédure d'identification est appliquée aux trois modèles RC du bâtiment démonstrateur à partir de la campagne 1. Pour le modèle A (**Figure 84a**), le modèle B (**Figure 84b**) et le modèle C (**Figure 84c**), la température intérieure du modèle (la sortie) est tracée avec la température intérieure mesurée ainsi que l'erreur relative et la distribution de celle-ci. Les valeurs des paramètres identifiés sont relevées et comparées aux valeurs de paramètres initiaux (**Tableau 15**).

Le modèle A est fiable pour la période d'évolution libre (périodes non grisées) mais ne suit pas la dynamique mesurée lors des deux échelons (périodes grisées). Le modèle B présente le comportement inverse, il suit bien la dynamique des deux derniers jours mais moins bien en période d'évolution libre. Le modèle C est le mieux corrélé aux mesures ; que le bâtiment soit en évolution libre ou sollicité par le plancher chauffant. Dans les trois cas l'erreur moyenne est inférieure à 1°C.

La comparaison entre les valeurs initiales et identifiées montre d'une part que les paramètres sont difficiles à estimer à partir de la connaissance physique du bâtiment. En effet comme cela a déjà été souligné par *Mangematin et al.* [143]; les capacités en jeu correspondent à une inertie apparente puisque toute la masse ne participe pas aux variations de températures. Ainsi les capacités thermiques identifiées peuvent être plus faibles que celles estimées par analyse physique. De même *Zhao et al* [144] ont démontré

que la capacité thermique d'un plancher chauffant ne dépend pas uniquement des propriétés des matériaux et de l'épaisseur mais aussi de la distribution du champ de température qui est lié à la position des tuyaux (espacement, profondeur). D'autre part, les valeurs identifiées diffèrent également entre les modèles et ne correspondent pas nécessairement à une réalité physique du fait de la difficulté à lier des données mesurées à des concepts physiques (Fumo [145]).



	Valeur initiale	Mod A	Mod B	Mod C
C_i	$7 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^7$	$5,2 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^6$
C_d	$7 \cdot 10^6$	$5,5 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$	-
C_m	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
R_{mi}	2	3	4,5	6
R_{me}	0,01	0,01	0,01	0,01
R_d / R_{si}	0,14	1,12	0,48	0,58

Figure 84 - Résultats de l'identification à partir de la campagne 1 pour les modèles A (a), modèle B (b) et modèle C (c)

Tableau 15 - Jeu de paramètres optimal pour chacun des modèles et pour la campagne 1

Ces modèles devant servir au contrôle, ce sont les écarts au moment des sollicitations à contrôler qui sont déterminants. En conséquence, le modèle A ne peut être éligible au contrôle en l'état. La représentation du plancher chauffant par une seule résistance et une seule capacité ne permet pas de modéliser toute la dynamique du plancher chauffant. Si l'on choisi de contrôler le plancher chauffant par la mesure des températures entrée/sortie, une description plus fine du plancher est peut-être nécessaire

(résistances-capacités supplémentaires). Le modèle B semble satisfaisant pour le contrôle tout comme le modèle C qui présente les meilleurs résultats car la dynamique du plancher est contenue dans la mesure de température de surface. En conclusion de cette première approche d'identification par la mesure : le modèle est d'autant plus précis que la mesure associée est proche de la variable à contrôler. Il s'agit maintenant de voir dans quelle mesure les sollicitations utilisées influent sur la qualité d'identification.

4.4. Identification et sollicitations

La qualité de l'identification dépend également de la richesse des sollicitations. En effet, il est nécessaire d'identifier les paramètres quand ils sont fortement sensibles : c'est-à-dire quand le ratio de variation paramètre/sortie est faible. Pour cela la procédure d'identification est faite pour le modèle B avec les campagnes de mesures 2 et 3 dont les sollicitations sont différentes de la campagne 1 où seule la dalle du plancher est sollicitée. Lors de la campagne 2 le plancher chauffant n'est pas utilisé, la pièce est seulement soumise à un scénario de ventilation nocturne (sollicitation de l'air) pendant trois nuits. Pour la campagne 3 le plancher chauffant et la ventilation nocturne sont utilisés alternativement (sollicitation directe de la dalle de plancher et de l'air).

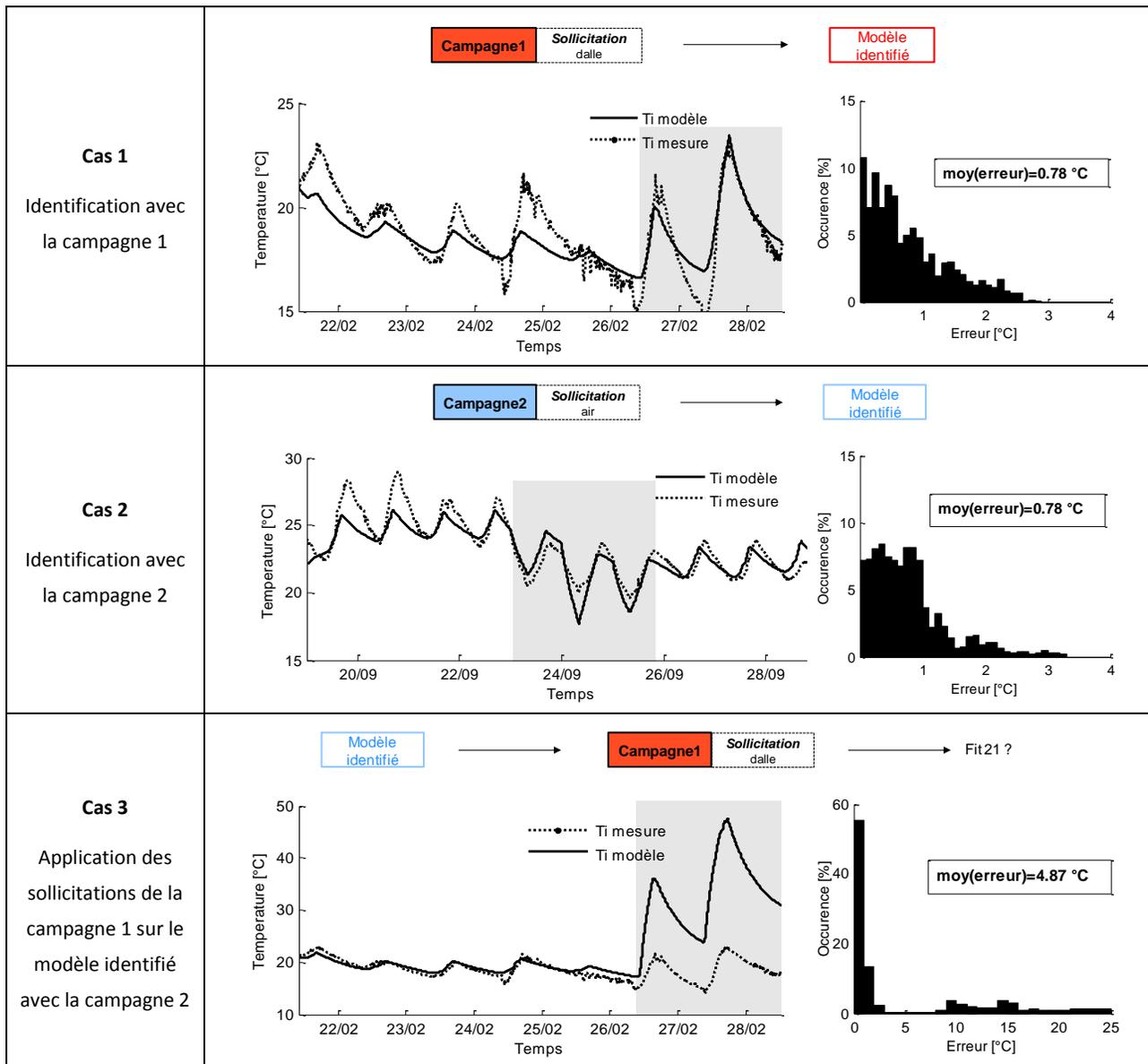
Dans un premier temps, le modèle B est identifié à partir des campagnes 1 et 2, puis l'application des sollicitations de la campagne sur laquelle il n'a pas été identifié est opérée afin d'observer si le modèle reste correct. Dans un second temps le modèle B est identifié sur la campagne de mesure 3 qui est la plus riche en sollicitation puis les sollicitations des campagnes 1 et 2 sont appliquées à ce modèle pour voir si l'identification à partir de sollicitations plus riches permet de meilleurs résultats.

Pour chaque cas, l'évolution de la température au cours du temps ainsi qu'un diagramme de répartition de l'erreur absolue sont tracés. La période à contrôler (systèmes actifs) est grisée, l'erreur moyenne est également calculée. Les résultats sont donnés dans le **Tableau 16** et la valeur des paramètres identifiés (cas 1, cas 2, cas 5) sont présentés à l'**annexe D**.

Lorsque la sollicitation est faite uniquement sur le plancher (cas 1), la période à contrôler est décrite correctement par le modèle. En revanche le modèle suit moins bien pour la partie évolution libre (C_i trop faible). L'échelon de puissance sur le plancher excite un grand nombre de fréquences alors qu'en évolution libre ce sont les sollicitations extérieures qui excitent le nœud d'air via les apports solaires principalement. Avec la campagne 2, seul l'air est sollicité par les apports solaires et surtout la ventilation nocturne. Le modèle décrit convenablement l'ensemble de la période de mesure (cas 2).

Pour les cas 3 et cas 4, les sollicitations appliquées sont différentes de celles utilisées pour l'identification. Pour le cas 3, le modèle est totalement inadapté car l'inertie de la dalle qui constitue la quasi-totalité de l'inertie du bâtiment est sous-évaluée. Cela s'explique par le fait que le modèle ait été identifié avec une sollicitation sur l'air, or seule une partie de la masse de la dalle intervient dans le stockage/déstockage de la chaleur contenue dans l'air ambiant. Cette inertie dite « apparente », correspondant à une petite couche, et explique que la valeur de la capacité de la dalle du plancher C_d identifiée soit faible et que le modèle diverge complètement quand il est soumis à des échelons de puissance de l'ordre de 10 kW. Pour le cas 4, le modèle est identifié avec une sollicitation sur le plancher

donc il répond de manière inadaptée aux sollicitations sur l'air. Cependant l'erreur est bien moins grande que le cas 3 car le plancher sollicite quand même indirectement l'air. Les cas 3 et cas 4 démontrent que l'identification n'est efficace que lorsque les sollicitations sont similaires à celles utilisées lors de l'identification, autrement dit le modèle ne peut pas reproduire correctement ce qu'il n'a pas appris lors de la phase d'identification ce qui explique les erreurs des cas 3 et 4.



<p>Cas 4</p> <p>Application des sollicitations de la campagne 2 sur le modèle identifié avec la campagne 1</p>	<p>Modèle identifié → Campagne2 Sollicitation air → Fit12 ?</p> <p>Temperature [°C] vs Temps (20/09 to 28/09)</p> <p>Legend: \cdots Ti mesure, — Ti modèle</p> <p>Occurrence [%] vs Erreur [°C]</p> <p>moy(erreur)=1.71 °C</p>
<p>Cas 5</p> <p>Identification avec la campagne 3</p>	<p>Campagne3 Sollicitation dalle+air → Modèle identifié</p> <p>Temperature [°C] vs Temps (06/12 to 14/12)</p> <p>Legend: — Ti modèle, \cdots Ti mesure</p> <p>Occurrence [%] vs Erreur [°C]</p> <p>moy(erreur)=0.46 °C</p>
<p>Cas 6</p> <p>Application des sollicitations de la campagne 1 sur le modèle identifié avec la campagne 3</p>	<p>Modèle identifié → Campagne1 Sollicitation dalle → Fit31 ?</p> <p>Temperature [°C] vs Temps (22/02 to 28/02)</p> <p>Legend: \cdots Ti mesure, — Ti modèle</p> <p>Occurrence [%] vs Erreur [°C]</p> <p>moy(erreur)=1.41 °C</p>
<p>Cas 7</p> <p>Application des sollicitations de la campagne 2 sur le modèle identifié avec la campagne 3</p>	<p>Modèle identifié → Campagne2 Sollicitation air → Fit32 ?</p> <p>Temperature [°C] vs Temps (20/09 to 28/09)</p> <p>Legend: \cdots Ti mesure, — Ti modèle</p> <p>Occurrence [%] vs Erreur [°C]</p> <p>moy(erreur)=1.13 °C</p>

Tableau 16 - Résultats des identifications successives en termes de dynamique et de répartition des erreurs modèle/mesure

Il est à noter que des conclusions similaires sont présentes dans le travail de thèse de *Faggianelli* [146] portant sur la modélisation d'un bâtiment à l'aide d'un modèle RC léger pour piloter la ventilation naturelle. Le modèle est notamment identifié par rapport à un modèle de référence EnergyPlus et des tests de robustesse du modèle sont effectués. Le premier test consiste à identifier le modèle sur une période sans gains internes et à regarder son comportement sur le reste de la séquence avec gains internes. Il observe des erreurs supérieures de 2°C alors qu'elles sont de 0,07°C en moyenne sur la période d'identification. L'auteur démontre que l'ajout de charges internes dans la période d'identification permet d'améliorer la robustesse du modèle.

Dans un second temps, l'auteur identifie le modèle sur une séquence de deux mois en présence de ventilation naturelle (fenêtres ouvertes), il est ensuite appliqué au reste de la séquence qui comprend un mois sans ventilation (fenêtres fermées) suivi d'un mois avec ventilation naturelle. Il apparaît clairement que le modèle diverge pendant la séquence sans ventilation pour ensuite retrouver une dynamique semblable quand la ventilation naturelle est à nouveau permise. La fiabilité du modèle dépend fortement des sollicitations de la période d'identification.

L'utilisation de la campagne 3 pour identifier le modèle B donne des résultats très satisfaisants (cas 5) puisque l'erreur moyenne est inférieure à 0,5°C. La procédure des cas 3 et 4 est répétée mais cette fois-ci pour le modèle identifié avec la campagne 3 considérée comme la plus riche. Dans le cas 6 ce sont les sollicitations de la campagne 1 qui sont appliquées, le modèle est toujours inadapté mais l'erreur moyenne est de 1,4°C contre 4,9°C dans le cas 3. De même dans le cas 7 ce sont les sollicitations de la campagne 2 qui sont utilisées, le modèle donne des résultats meilleurs que le cas 4 puisque l'erreur moyenne passe de 1,7°C à 1,1°C, bien que la dynamique obtenue ne soit pas correcte.

Ceci a permis de démontrer que la campagne de mesure 3 permet de meilleurs résultats mais que la précision obtenue n'est pas suffisante pour du contrôle qui demande des écarts inférieurs au degré. Avec un modèle de cet ordre il est difficile d'être robuste aux différentes sollicitations qui correspondent aux équipements à piloter. Si par exemple on souhaite contrôler la ventilation nocturne pour du rafraîchissement en été, alors une unique identification n'est pas possible. Il sera alors nécessaire re-identifier le modèle ou de le compléter : une capacité pour le plancher n'est peut-être pas suffisante ou elle est mal placée.

4.5. Niveau de modélisation du plancher chauffant

La partie 4.3 a démontré que les modèles B et C donnaient des résultats convenables car la mesure de température de surface permet de s'affranchir de la modélisation du plancher. Cependant, à terme il est primordial que le modèle à embarquer dans le contrôleur intègre une modélisation du plancher car c'est la puissance injectée au niveau du plancher qui est commandée par l'ouverture de la vanne trois voies. Seul le modèle A modélise le plancher chauffant par une résistance et une capacité mais c'est également pour ce modèle que les résultats sont les moins bons. La littérature montre que les modèles à deux ou trois capacités fonctionnent pour du contrôle quand le chauffage se fait par des systèmes réactifs sollicitant directement l'air (radiateur électrique, VCV, split-PAC) mais avec un système capacitif les modèles sont plus détaillés.

Il paraît donc judicieux de regarder si une description plus fine de la partie du modèle correspondant au plancher chauffant permet d'obtenir un modèle global plus robuste. Plusieurs travaux cherchant à modéliser le comportement d'un plancher chauffant utilisent un modèle plus détaillé qu'un seul couple résistance-capacité. Les travaux de *Liu et al.* [147] sur la modélisation simplifiée d'un plancher rafraichissant en béton font intervenir un modèle avec dix capacités et détaillent les échanges entre les tubes et le béton (**Figure 85**). Dans les travaux de *Lehmann et al.* [102] un bâtiment complet ainsi que ses systèmes sont modélisés à partir d'une analogie électrique. La partie plancher chauffant comprend autant de résistances que de couches de matériaux et trois capacités (**Figure 86**).

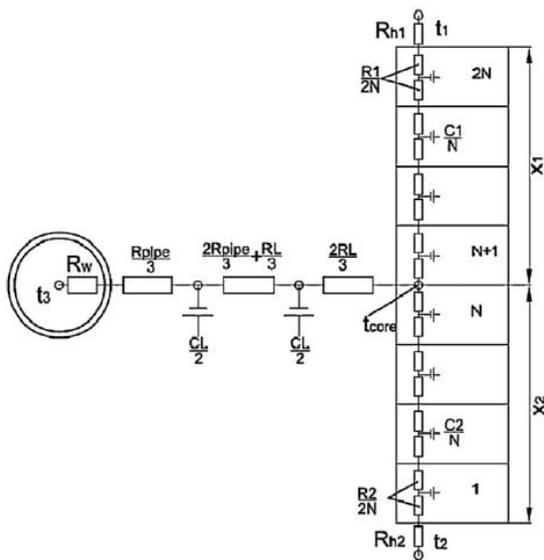


Figure 85 - Modélisation par analogie électrique d'un plancher chauffant faite par *Liu et al.*

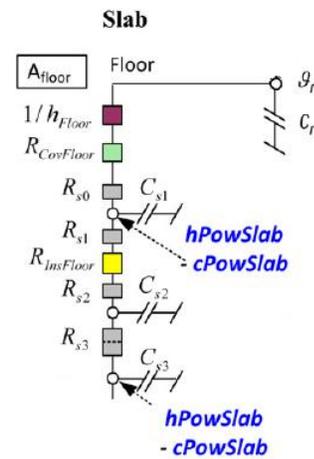


Figure 86 - Partie du modèle proposé par *Lehmann et al.* correspondant au plancher chauffant

En s'appuyant sur ces travaux, cinq modèles de plancher chauffant sont proposés allant d'un niveau de détail élevé à un niveau très simplifié afin d'observer si l'ajout de complexité permet un gain significatif d'efficacité du modèle. Le modèle A_{pl} détaille toutes les couches du plancher et comprend donc quatre capacités. Le modèle $A2_{pl}$ ne considère pas la capacité de la dalle de béton sous l'isolant, les pertes vers la pièce du dessous sont prises en compte par une seule résistance R . Avec le modèle B_{pl} le plancher chauffant est décrit par deux capacités et pour le modèle $B2_{pl}$ les pertes vers la pièce du dessous sont négligées. Enfin le modèle C_{pl} correspond à la façon dont le plancher était modélisé précédemment (dans le modèle A) avec un seul couple résistance-capacité (**Tableau 17**).

Modèle	Schéma électrique équivalent	Schéma en coupe
Mod A _{pl} détaillé		
Mod A2 _{pl} détaillé		
Mod B _{pl} simplifié		
Mod B2 _{pl} simplifié		
Mod C _{pl} minimaliste		

Tableau 17 - Modèles proposés pour le plancher chauffant

Le modèle est identifié à partir des résultats de la campagne 3, les termes entourés en violet sur les schémas sont ceux imposés (données mesurées) et l'identification s'effectue par rapport à la température de surface (entourée en rouge) elle aussi mesurée avec le dispositif infrarouge. Ces modèles sont comparés

dans le domaine temporel et fréquentiel. Les équations d'état correspondantes sont présentées à l'annexe C.

4.5.1. Analyse temporelle

La sortie T_s des cinq modèles est comparée à la température de surface mesurée. Les résistances superficielles sont fixées à 0,14 m².K/W pour contraindre l'identification sur les éléments du plancher. Les résultats sont présentés sur la **Figure 87** et les valeurs des paramètres identifiés sont données à l'**annexe D**. Le modèle se rapprochant le plus de la dynamique mesurée est le modèle B2_{pl} qui présente une erreur maximale et moyenne inférieure aux autres modèles proposés (**Tableau 18**). L'amélioration est néanmoins minime puisque les résultats sont équivalents au modèle C_{pl} qui ne comprend qu'une capacité thermique. L'étude temporelle, réalisée pour des conditions d'entrées donnée, ne va pas dans le sens d'un ajout de terme de capacité dans la description du plancher chauffant. Une analyse fréquentielle est alors effectuée à la partie suivante pour vérifier si la conclusion est la même pour des entrées différentes.

Modèle	A _{pl}	A2 _{pl}	B _{pl}	B2 _{pl}	C _{pl}
erreur maximale [°C]	2,6	2,7	2,7	1,7	1,8
erreur moyenne [°C]	0,39	0,55	0,52	0,03	0,02

Tableau 18 - Comparaison des modèles avec la mesure en terme d'erreur maximale et d'erreur moyenne

4.5.2. Analyse fréquentielle

Une problématique majeure lors de toute modélisation est de déterminer l'ordre du modèle. L'analyse fréquentielle permet de regarder la réponse des modèles en fonction de la fréquence des sollicitations. Pour cela, il faut écrire le modèle d'état sous forme de fonction de transfert en utilisant la transformation de Laplace (Eq.32). Ainsi chaque sollicitation est reliée au terme source par une fonction de transfert (Eq.33) (**Figure 88**). Les travaux de *Naveros et Ghiaus* [148] décrivent une méthode utilisant la réponse fréquentielle pour choisir l'ordre d'un modèle décrivant les transferts thermiques dans une paroi légère. Ce modèle doit être identifié à partir de données mesurées sur une paroi placée dans une cellule de test. Des modèles d'ordre faible (trois nœuds de température) et d'ordre élevé (100 nœuds) sont proposés. Ils sont écrits sous forme de modèle d'état puis transformés en fonction de transfert. Le critère de sélection se fait à partir de la réponse fréquentielle des différents modèles. Le modèle d'ordre le plus faible peut être choisi si la différence de réponse fréquentielle est négligeable ou inférieure à l'erreur de mesure. Ils déterminent également dans quelle gamme de fréquence les modèles sont équivalents et permet de choisir l'ordre du modèle selon l'application temporelle souhaitée.

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) + DU(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} px(p) = Ax(p) + Bu(p) \\ y(p) = Cx(p) + Du(p) \end{cases} \quad (\text{Eq.32})$$

$$H_i(p) = \frac{y_i(p)}{u_i(p)} = BC(pI - A)^{-1} + D \quad (\text{Eq.33})$$

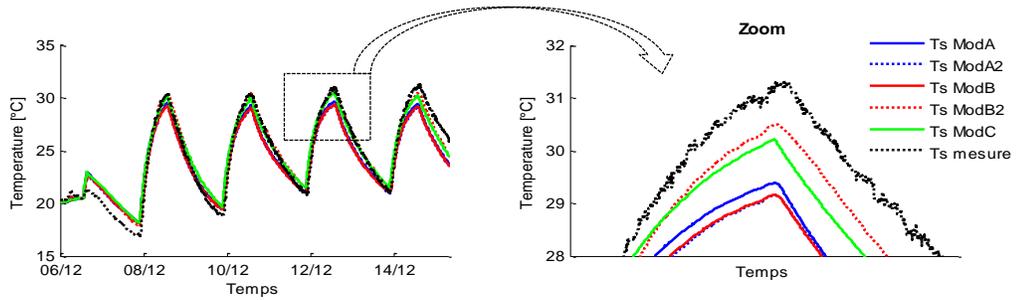


Figure 87 - Evolution de la température de surface pour les cinq modèles de plancher

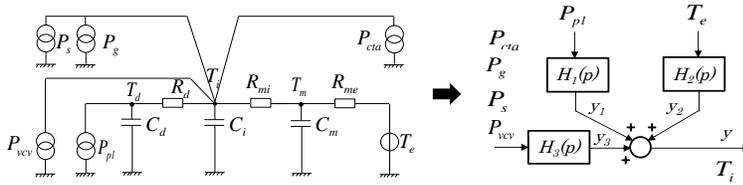


Figure 88 - Passage du modèle d'état à la fonction de transfert

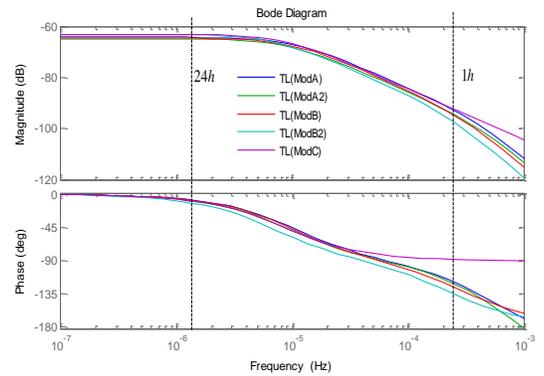


Figure 89 - Diagramme de Bode des modèles de plancher chauffant

L'analyse fréquentielle est complémentaire de l'analyse de sensibilité. En effet, l'analyse de sensibilité permet d'observer les paramètres du modèle tandis que l'analyse fréquentielle conduit à examiner les entrées. Certaines fréquences de sollicitations peuvent faciliter l'identification de paramètre, par exemple les valeurs de résistances sont mieux identifiées avec des sollicitations basses fréquences correspondant à des constantes de temps longues proches du régime permanent. Inversement les sollicitations hautes fréquences sont utiles pour identifier les capacités.

La réponse fréquentielle des cinq modèles de plancher est présentée sur la **Figure 89**. Leur réponse est similaire dans la période temporelle d'intérêt (1h-24h) et conforte la conclusion de l'analyse temporelle. Le modèle C_{pl} est donc gardé par la suite. Cela démontre ainsi qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter une deuxième capacité à la partie du modèle correspondant au plancher.

4.6. Obtention d'un nouveau modèle

La partie 4.5 a permis de démontrer qu'une seule capacité pour la partie plancher chauffant du modèle est suffisante. Néanmoins, la partie 4.4 suggère que le modèle semble incomplet. Afin d'y remédier, un nouveau modèle E est créé afin de tenter de mieux saisir la dynamique mesurée lors des campagnes de mesures (**Figure 90**). Le plancher chauffant est donc toujours décrit par un seul couple résistance-capacité mais un deuxième couple résistance-capacité (R_{si2}/C_{m2}) est ajouté au nœud d'air pour prendre en compte l'inertie des murs intérieurs et celle du plancher lorsque celui-ci n'est pas sollicité. En effet, le coefficient d'échange est différent entre un cas été (campagne 2) et un cas hiver (campagne 1 et 3), ainsi le modèle E est équivalent au modèle A mais avec deux valeurs de résistances superficielles. De plus cela permet de différencier le coefficient d'échange entre les parois intérieures et l'air (R_{si2}) et le coefficient d'échange entre le plancher sollicité et l'air (R_{si}) car le gradient de température augmente l'échange de chaleur. Son modèle d'état est donnée à l'**annexe C**.

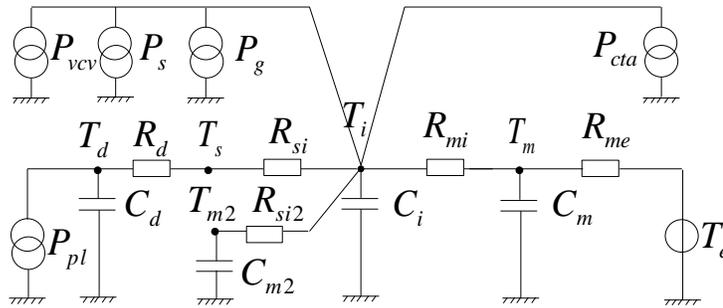


Figure 90 - Schéma électrique équivalent du modèle E

Au-delà d'un certain nombre de paramètres, l'algorithme peine à identifier et trouve un jeu de paramètre qui fait office de compromis entre toutes les dynamiques. Ce problème n'est donc pas forcément lié au modèle directement mais plutôt à la procédure d'identification. Une tentative d'identification séparée a donc été menée et consiste à identifier séparément deux sous modèles correspondant à la partie plancher (identification sur T_s) et à la partie enveloppe (identification sur T_i) du modèle E. Les résultats ne sont pas concluants mais la procédure est néanmoins détaillée à l'**annexe E**.

Il s'agit également de voir si les difficultés d'identification peuvent provenir de la valeur de la résistance superficielle R_{si} . En effet, ce paramètre est important puisqu'il permet le lien entre le plancher et l'air de la pièce qui est la variable de contrôle. Lors des identifications précédentes, la résistance thermique R_{si} qualifiant les échanges convectif et radiatif, est une valeur constante. Cela est une approximation car en réalité le coefficient d'échange h_{si} , qui est l'inverse de la résistance R_{si} , varie avec l'écart de température entre la surface d'échange et l'air ambiant. Il faut donc déterminer si la prise en compte de cette variation présente un intérêt en terme de qualité du modèle où si une valeur constante est suffisante. Le coefficient

d'échange global h_{si} peut être décomposé en un coefficient d'échange convectif $h_{c,si}$ et radiatif $h_{r,si}$ (Eq.34) :

$$\phi_{air-paroi} = h_{si}(T_{paroi} - T_{air}) = h_{c,si}(T_{paroi} - T_{air}) + h_{r,si}(T_{paroi} - T_{air}) \quad (\text{Eq.34})$$

Ce coefficient d'échange dépend des conditions intérieures (distribution de la température, des gains internes). De nombreuses recherches ont été menées sur le sujet. Les travaux de *Jayamaha et al.* [120] introduisent une méthode pour mesurer le coefficient d'échange convectif avec une approximation linéaire. D'autres travaux comme ceux de *Gilani et al.* [149] utilisent des valeurs constantes définies dans la norme *ISO 6946* [150] et que l'on retrouve dans les règles de calcul Th-U de la réglementation thermique. La valeur préconisée est de 10 W/m².K. Une autre étude de *Karlsson et Hagentoft* [101] sur la modélisation d'un plancher chauffant pour le contrôle prédictif emploie une valeur constante égale à 8,3 W/m².K. Le papier de *Cigler et al.* [151] sur l'utilisation d'un contrôleur prédictif pour améliorer l'indice de confort PMV/PPD comprend la modélisation des échanges thermiques entre les vêtements et l'air ambiant : une valeur constante est utilisée pour des écarts de températures inférieurs à 6°C, au-delà des erreurs significatives sont constatées et le coefficient d'échange par convection est alors calculé à partir de l'Eq.35 :

$$h_{c,si} = 2,38 \cdot \Delta T^{0,25} \quad (\text{Eq.35})$$

Une formule similaire est utilisée par *Achterbosch et al.* [152] pour le coefficient d'échange convectif de parois verticales et horizontales (Eq.36) :

$$h_{si} = h_{c,si} + h_{r,si} = 1,59 \cdot \Delta T^{0,33} + 4,8 \quad (\text{Eq.36})$$

Le papier de *Awbi et al.* [153] portant sur la mesure du coefficient d'échange par convection pour des surfaces chauffées démontre également que les variations de sa valeur ne sont significatives que pour des grands écarts de température (**Figure 91**). Pour terminer, *Liu et al.* [147] présentent une synthèse des valeurs utilisées dans la littérature pour des parois chauffées (**Tableau 19**).

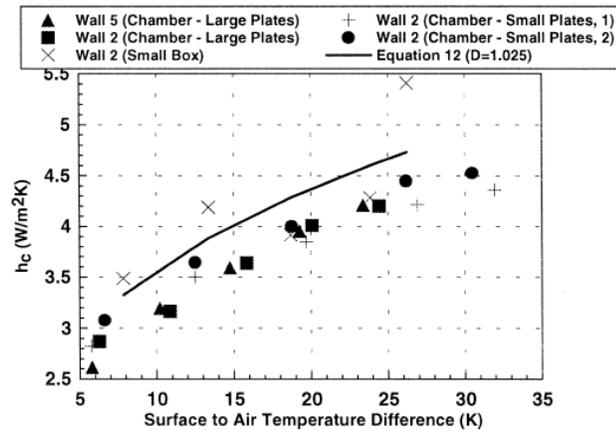


Figure 91 - Comparaison de données mesurées au niveau de plaques chauffantes dans différentes configuration [153]

Equation ou valeur [W/m ² .K]	Référence	Commentaires
$h_{c,si} = 2,13 \cdot \Delta T^{0,31}$	<i>Min et al.</i> [154]	$\Delta T = 5 - 8^{\circ}\text{C}$, $h_{c,si} = 3,5 - 4,1$
$h_{c,si} = \frac{2,175}{D^{0,076}} \cdot \Delta T^{0,308}$	<i>Awbi et al.</i> [153]	$\Delta T = 5 - 8^{\circ}\text{C}$, $h_{c,si} = 3,2 - 3,7$ $D = 5\text{m}$
$h_{c,si} = 5,3$	BS EN 1264-5 [155]	$h_{si} = 10,8$
$h_{c,si} = 5,5$	<i>Olosen</i> [156]	$h_{si} = 11$

Tableau 19 - Coefficient d'échange convectif pour un plancher chauffant

Lorsque le coefficient d'échange n'est pas constant, il est souvent décrit comme une fonction du type $a \cdot \Delta T^b$. Afin de voir si la prise en compte de la variabilité du coefficient d'échange est nécessaire, trois simulations sont réalisées pour la campagne 3 et avec le modèle E :

- **cas 1** : le coefficient d'échange global est identifié comme une constante (Eq.37) :

$$R_{si} = \frac{1}{h_{si}} = \frac{1}{cste} \quad (\text{Eq.37})$$

- **cas 2** : le coefficient d'échange global est variable et les paramètres a et b sont identifiés (Eq.38) :

$$R_{si} = \frac{1}{h_{si}} = \frac{1}{a \cdot \Delta T^b} \quad (\text{Eq.38})$$

- **cas 3** : le coefficient d'échange convectif est variable et la formule de *Min et al.* est utilisée, le coefficient d'échange radiatif est constant et vaut 5 W/m².K (Eq.39) :

$$R_{si} = \frac{1}{h_{si}} = \frac{1}{5 + 2,13 \cdot \Delta T^{0,31}} \quad (\text{Eq.39})$$

Les résultats pour les trois cas sont données ci-dessous (**Figure 92**). La valeur constante est identifiée à une valeur de 9,4 W/m².K. Le cas 2 présente plus de variabilité dans la valeur du coefficient global en fonction de l'écart de température par rapport à la formule de Min et al. Cependant quelle que soit la formule utilisée, l'incidence en termes de qualité du modèle est faible puisque les écarts constatés sont au maximum de 0,2°C. L'utilisation d'une valeur constante parait donc suffisante et le modèle E a priori peut être proposé pour l'identification.

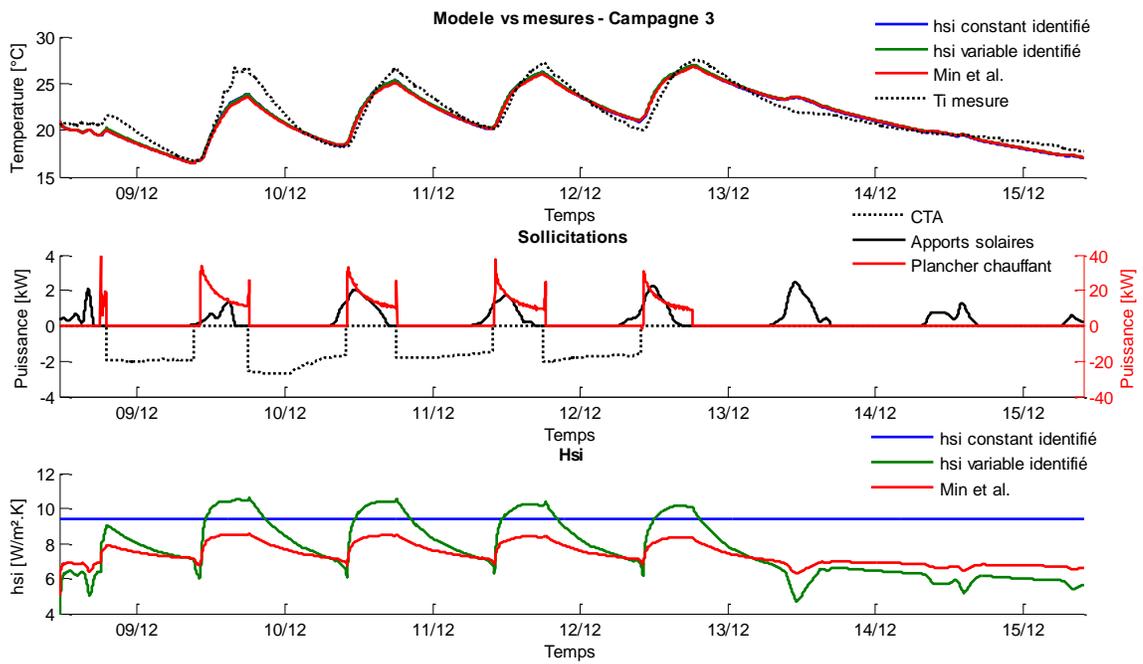


Figure 92 - Influence du coefficient d'échange global sur l'identification pour la campagne 3

La Figure 93 illustre la façon dont l'erreur évolue avec la complexité du modèle. Si le modèle est trop simple, une grande partie des phénomènes physiques ne sont pas décrits et le modèle ne peut reproduire le comportement réel. Inversement, si le modèle est trop complexe alors c'est l'identification qui pose problème. Pour améliorer la qualité du modèle, une voie d'étude intéressante consiste à orienter l'identification, c'est-à-dire à rajouter de la connaissance au modèle.

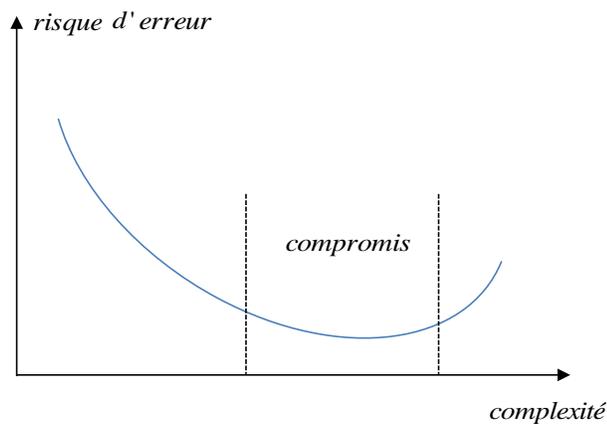


Figure 93 - Evolution du risque d'erreur en fonction de la complexité du modèle

4.7. Orienter l'identification

Pour orienter l'identification trois voies sont possibles :

- fixer un paramètre à une valeur physique connue : cependant comme vu précédemment, la simplicité du modèle fait que certains paramètres peuvent être identifiés à une valeur qui ne correspond pas à la valeur attendue théoriquement,
- identifier par rapport à d'autres grandeurs mesurées pour contraindre le modèle : lorsque l'identification se fait sur une seule variable et que des paramètres sont corrélés, il est possible d'obtenir une dynamique correcte avec des valeurs aberrantes car la solution conduit à un optimum local,
- identifier les paramètres lorsque ceux-ci sont les plus sensibles en fonction de la richesse des sollicitations.

Ces deux dernières voies sont traitées dans les parties 4.7.1 et 4.7.2.

4.7.1. Par la mesure

Il a été démontré précédemment qu'avec le modèle A, l'identification n'est pas idéale. L'information de la température de surface T_s est alors ajoutée dans le modèle. Pour le contrôle cette mesure ne sera pas disponible mais les mesures qui servent pour l'identification en phase d'apprentissage peuvent ne pas être les mêmes que celles utilisées pendant la phase d'exploitation.

La procédure d'identification est menée pour la campagne 3 en identifiant par rapport à la température intérieure et celle de surface. Ainsi la fonction utilisée est (Eq.40) :

$$deviation = \sum_{t=0}^N (T_{i\text{mod},n} - T_{i,n})^2 + (T_{s\text{mod},n} - T_{s,n})^2 \quad (\text{Eq.40})$$

Les résultats obtenus sont présentés dans la **Figure 95** et comparés aux résultats obtenus lorsque le modèle E est seulement identifié par rapport à la température intérieure (**Figure 94**).

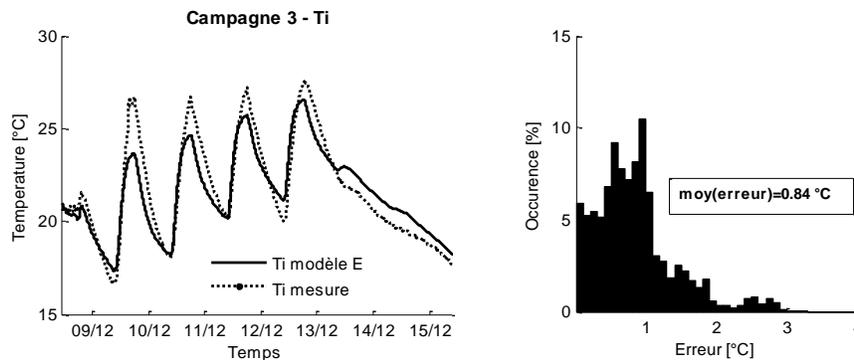


Figure 94 - Identification du modèle E par rapport à la température intérieure (T_i)

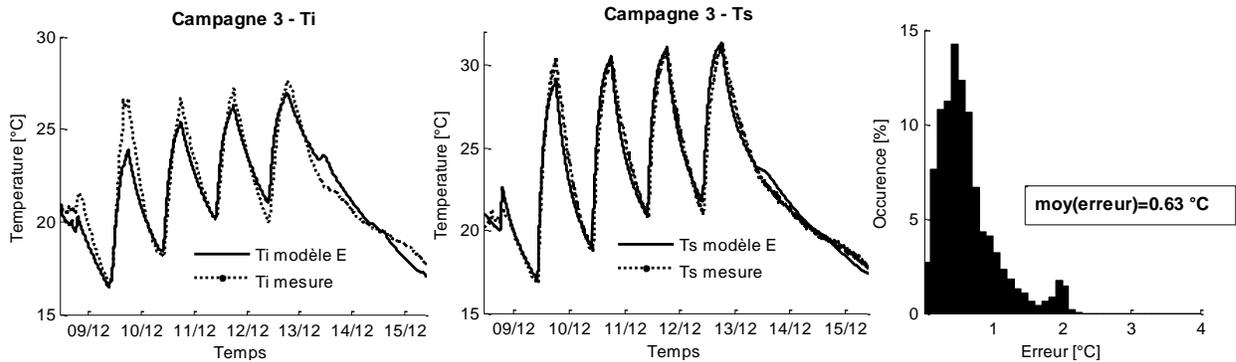


Figure 95 - Identification du modèle *E* par rapport à la température intérieure (T_i) et de surface du plancher (T_s)

L'ajout de la température de surface permet d'améliorer l'identification puisque l'erreur moyenne est plus faible et la dynamique plus proche de celle mesurée. Les valeurs des paramètres sont données à l'annexe D.

4.7.2. Par la richesse des sollicitations

Un paramètre est d'autant plus facile à identifier que son influence est grande relativement aux sollicitations utilisées. On peut citer les travaux de thèse de *Bontemps* [157]. Des expérimentations ont été menées pendant quatre mois sur des cellules test en alternant des périodes de chauffage et des périodes d'évolution libre. L'analyse de sensibilité a montré une forte dépendance aux sollicitations expérimentales. Pour chacune des trois campagnes de mesures, une analyse de sensibilité est alors conduite afin de déterminer les paramètres les plus influents. Cette analyse de sensibilité se fait par rapport aux effets sur la température intérieure, la température de surface et les deux ensemble. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 20**.

L'analyse de sensibilité permet de montrer plusieurs aspects :

- un plus grand nombre de paramètres sont sensibles à la campagne 3 ce qui confirme qu'elle est bien la plus riche,
- quelque soit la campagne il y a globalement cinq paramètres sensibles et quatre paramètres peu sensibles,
- les paramètres les plus sensibles de la campagne 1 sont C_i et R_{mi} ,
- les paramètres les plus sensibles de la campagne 2 sont C_{m2} et C_d ,
- les paramètres les plus sensibles de la campagne 3 sont C_d , R_{mi} , C_{m2} , C_i et R_{si} .

Le terme C_i n'est pas sensible sur la campagne 2 car c'est l'air qui est sollicité via la ventilation nocturne, c'est pourquoi son inertie est invisible. Pour identifier C_i , il est nécessaire d'utiliser la campagne 1 ou 3. La campagne 2 permet d'identifier la partie paroi mais pas les systèmes. Ainsi il est préférable d'identifier seulement C_{m2} sur cette campagne et C_d sur la campagne 3.

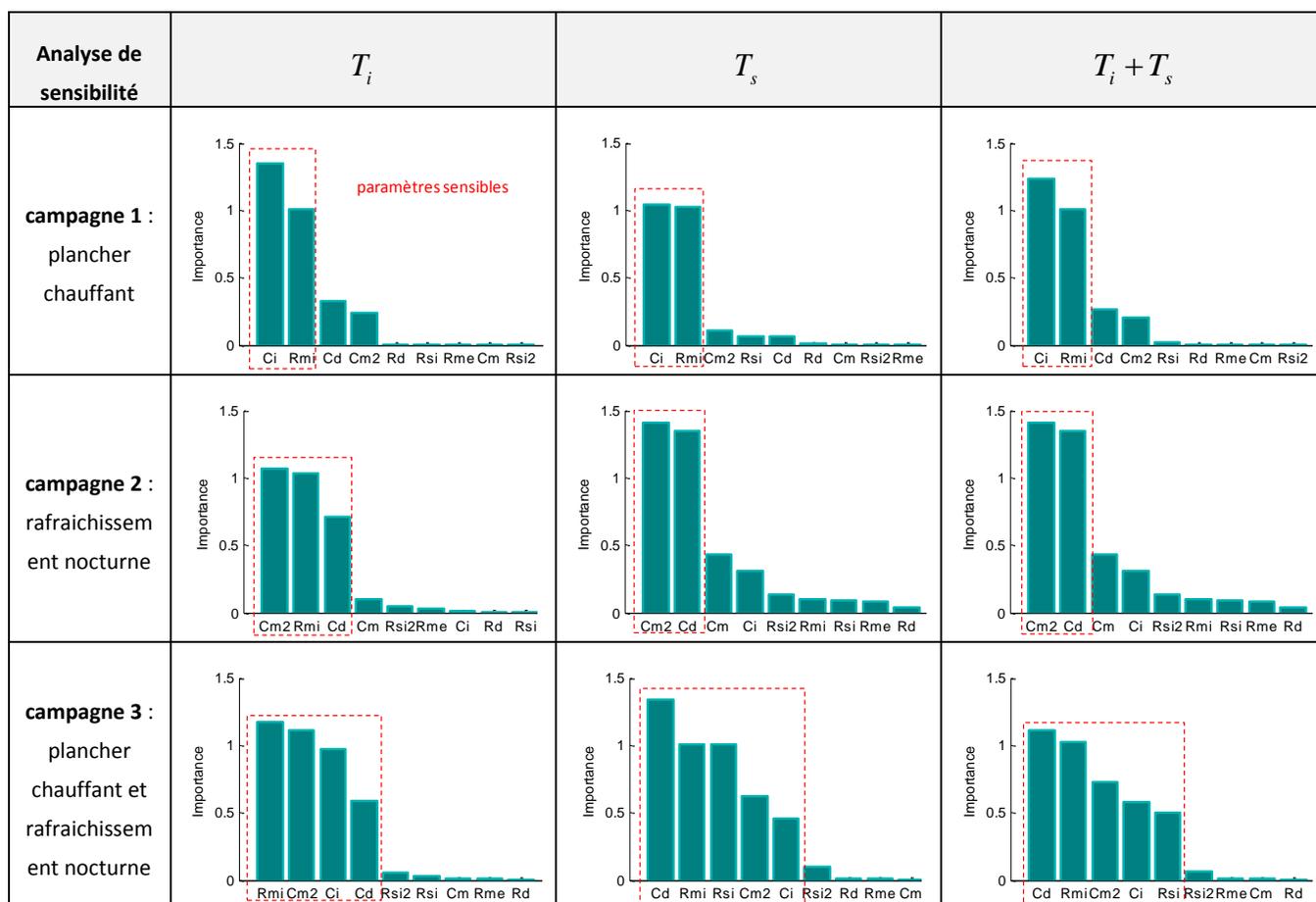


Tableau 20 - Identification avec l'analyse de sensibilité

Pour montrer l'intérêt d'identifier les paramètres au regard de l'analyse de sensibilité, trois simulations sont réalisées avec le modèle E et pour la campagne 3 :

- **cas 1** : tous les paramètres du modèle sont identifiés,
- **cas 2** : seuls les cinq paramètres les plus influents sont identifiés, les autres paramètres sont fixés à leur valeur initiale,
- **cas 3** : les paramètres sont identifiés à partir des autres campagnes de mesures en fonction de leur sensibilité. Les paramètres C_i et R_{mi} sont identifiés avec la campagne 1, C_{m2} avec la campagne 2, C_d et R_{si} avec la campagne 3. L'ensemble des paramètres identifiés est ensuite appliqué à la campagne 3 pour effectuer une comparaison avec les cas 1 et 2.

La **Figure 96** démontre que l'analyse de sensibilité améliore sensiblement la qualité du modèle puisque l'identification des paramètres les plus influents (cas2) permet de réduire l'erreur et que l'identification par morceaux avec l'analyse de sensibilité (cas3) abouti à une erreur moyenne de 0,34°C. Les valeurs des paramètres du cas 3 sont retenues par la suite présentées dans le **Tableau 21**.

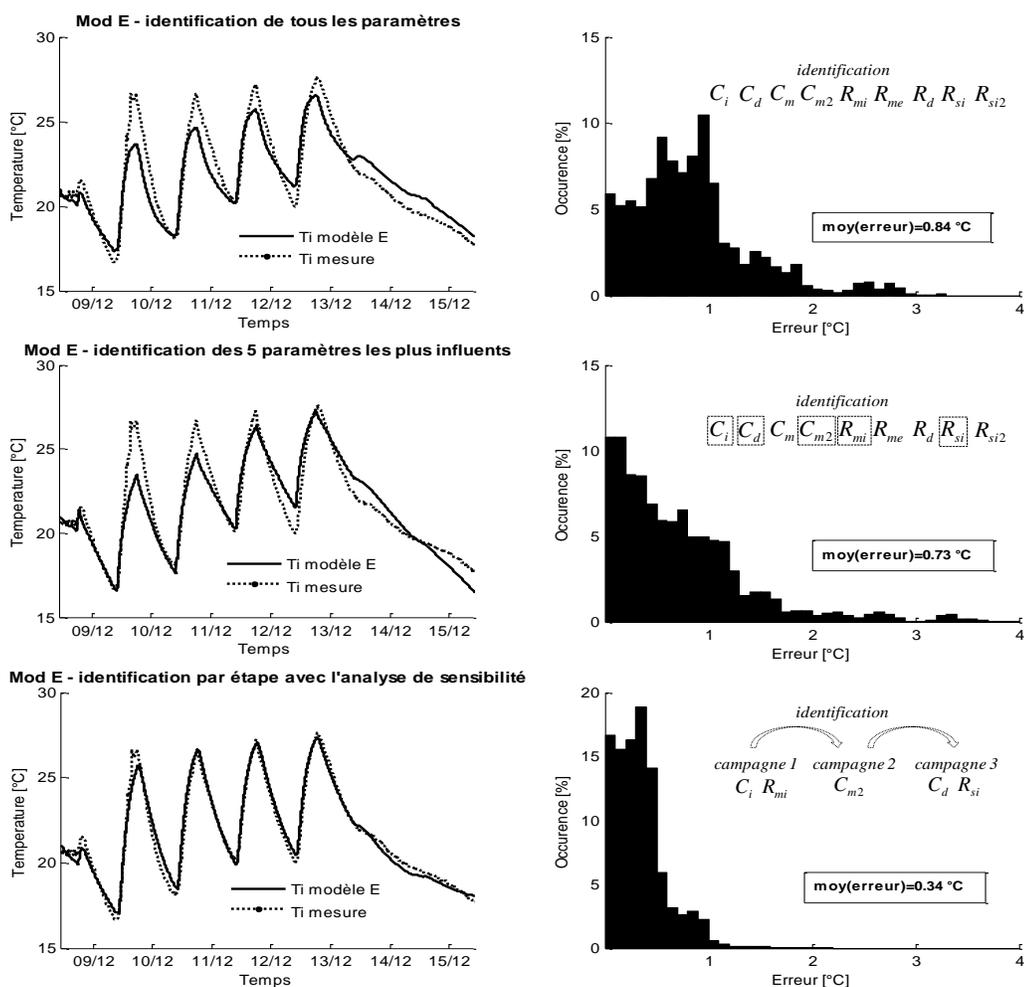


Figure 96 - Identification par étape au regard de l'analyse de sensibilité

paramètres	C_i	C_d	C_m	C_{m2}	R_{mi}	R_{me}	R_d	R_{si}	R_{si2}
unité	[J/K]				[m ² .K/W]				
valeur initiale	7.10^5	7.10^6	1.10^8	1.10^7	2	0,01	0,03	0,14	0,14
valeur identifiée	$3,8.10^7$	$4,4.10^6$	1.10^8	$2,1.10^8$	1,8	0,01	0,03	0,06	0,14

Tableau 21 - Valeurs retenues pour le modèle E

Ce jeu de paramètres final fait clairement apparaître que les valeurs de résistances thermiques a priori peuvent être utilisées pour l'obtention d'un modèle fiable puisque que les écarts avec les valeurs identifiées sont faibles. Seule la résistance superficielle R_{si} présente un écart important. Elle traduit l'échange entre la dalle du plancher chauffant et l'air qui est la contribution dominante à l'élévation de température intérieure dans la pièce d'étude utilisée pour ces travaux. En revanche, les capacités thermiques sont très

difficiles à évaluer et les valeurs initiales calculées par analyse physique ne peuvent être exploités directement pour la validation d'un modèle léger. En effet les valeurs de capacités thermiques identifiées ne sont pas physiquement cohérentes puisque la valeur identifiée pour l'air intérieur est 54 fois supérieure à la valeur a priori et 21 fois pour la capacité thermique des murs intérieurs. D'une part les capacités thermiques réellement mises en jeu dans le bilan thermique correspondent à des capacités thermiques apparentes. D'autre part l'utilisation d'un modèle léger implique un report de dynamique ou un effet de compensation sur d'autres paramètres pour les phénomènes physiques non pris en compte à cause de la simplification. Néanmoins, cela a permis d'établir une méthode permettant de trouver un modèle fiable à partir de données mesurées dont la validation est proposée à la section suivante.

4.8. Validation du modèle

4.8.1. Sur des sollicitations différentes

Jusqu'à présent, les modèles sont identifiés et testés sur une même campagne de mesure. A partir de l'identification du cas 3, l'objectif est d'analyser la réponse du modèle E à des sollicitations nouvelles. Pour ce faire, une quatrième campagne de mesure est menée. Elle s'est déroulée du 05/05/2015 au 08/06/2015 et comprend 29 jours d'évolution libre suivit de trois jours de sollicitations où le plancher est chauffé de 10h à 18h avec une température de consigne de 40°C. La consigne est volontairement élevée du fait que la campagne de mesure ait eu lieu au printemps et que la température extérieure était de 25°C en moyenne la journée. Les trois jours de sollicitations sont suivis de deux jours de régime libre (Figure 97 et Figure 98).

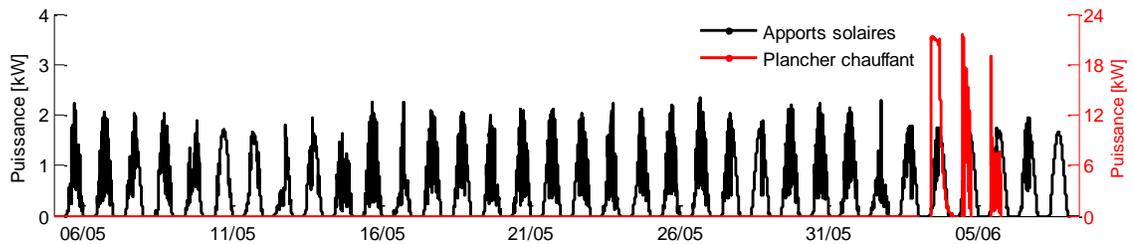


Figure 97 - Sollicitations de la campagne 4

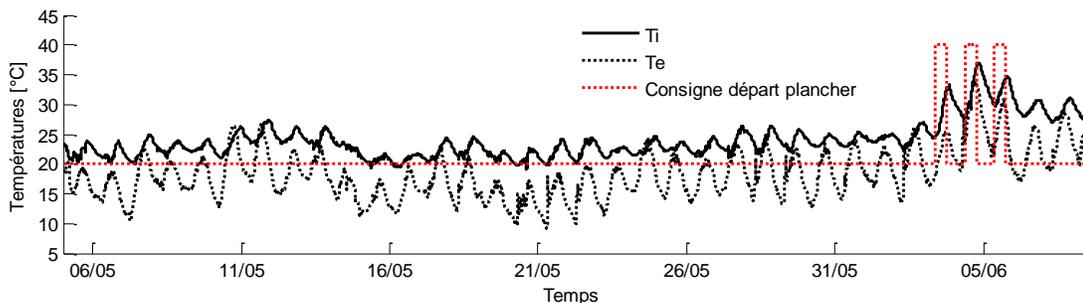


Figure 98 - Données mesurées lors de la campagne 4

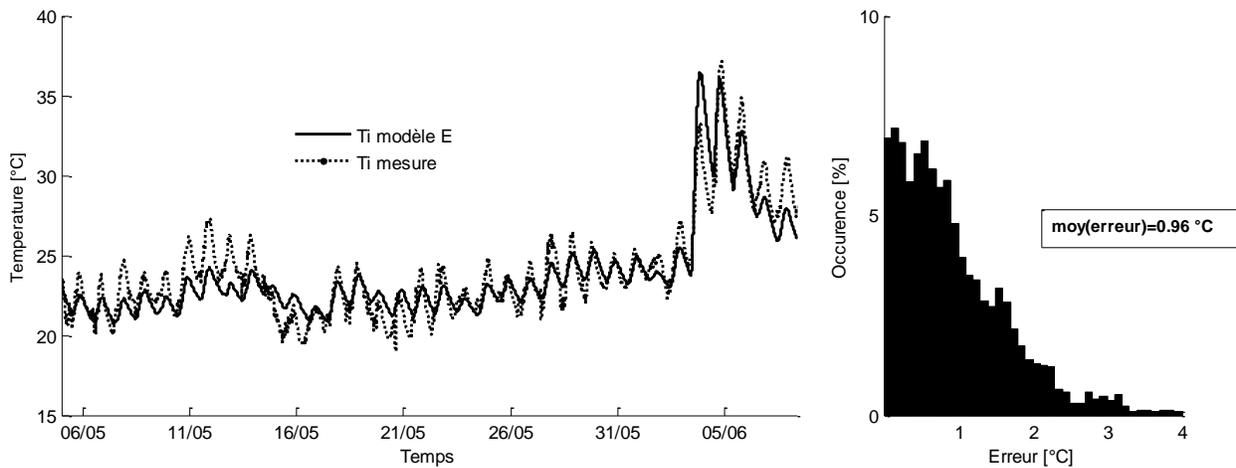


Figure 99 - Réponse du modèle E avec la campagne 4

L'application du modèle E identifié dans le cas 3 sur cette campagne donne des résultats convenables puisque l'erreur moyenne est en deçà de 1°C et que la dynamique suit bien celle mesurée excepté lors de la première montée en température (Figure 99).

4.8.2. Dans des conditions de fonctionnement normales avec tous les systèmes

Une cinquième campagne de mesure est menée entre le 20/11/2015 et le 18/12/2015 en conditions normales faisant intervenir les trois systèmes :

- le plancher chauffant fonctionne en journée de 8h à 10h du lundi au vendredi pendant les trois premières semaines de la campagne. La température de départ du plancher est calculée avec une loi d'eau, le reste du temps la pompe est éteinte et l'eau ne circule pas : la température mesurée correspond alors à la température de l'eau à l'arrêt dans le tuyau au niveau du local non chauffé attendant à la salle SYNERGI,
- pendant les trois derniers jours de la campagne les ventilo-convecteurs sont allumés avec une consigne de 22°C,
- pendant les trois derniers jours le bâtiment est occupé par des étudiants introduisant des gains internes liés à l'occupation et la CTA fonctionne également pour le renouvellement d'air.

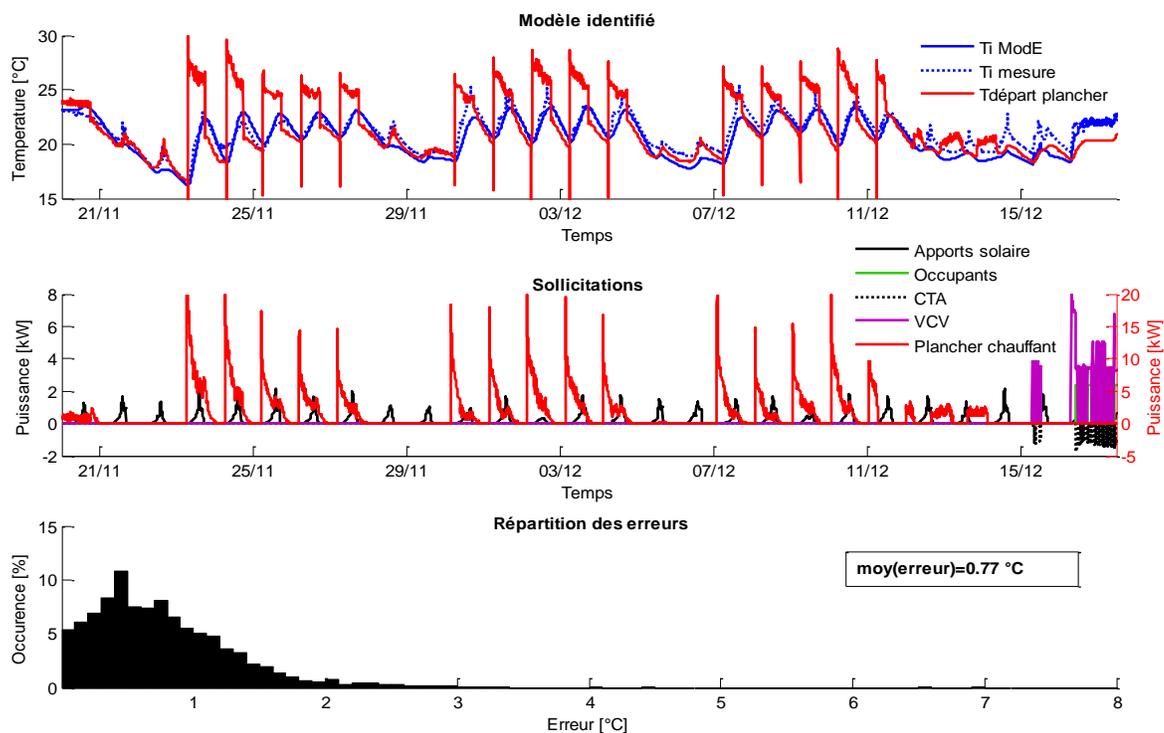


Figure 100 - Réponse du modèle E avec la campagne 5

La **Figure 100** indique que la réponse du modèle E est correcte sur l'ensemble de la campagne de mesure, que ce soit pour l'utilisation du plancher seul, pour la prise en compte de l'effet des ventilo-convecteurs ou des perturbations engendrées par l'arrivée d'occupants. Le modèle est en phase avec la mesure de la grandeur d'intérêt, il peut donc reproduire correctement l'effet des systèmes ou des perturbations à venir de façon à anticiper l'action sur le plancher chauffant.

4.9. Modèle candidat pour le contrôleur prédictif

Les travaux présentés précédemment ont permis de générer de la connaissance grâce aux campagnes de mesures à partir desquelles le modèle E a été identifié. Le modèle à embarquer dans le contrôleur doit être légèrement modifié car sur l'installation réelle c'est la température de départ du plancher qui est la grandeur commandée. Ainsi dans cette version finale du modèle E, le terme de puissance relié au nœud de température est remplacé par une température imposée T_{dp} et une résistance R_d représentant la demi-épaisseur de la dalle du plancher (**Figure 101**).

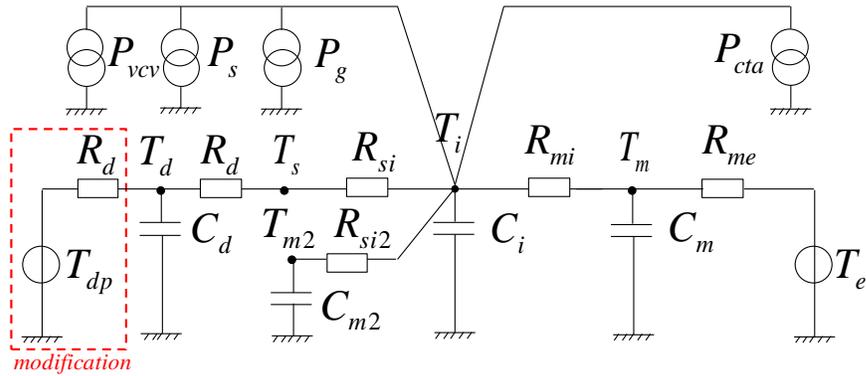


Figure 101 - Modèle E final candidat au contrôle

Pour valider la modification du modèle E pour le contrôle, une simulation est effectuée à partir des campagnes 3 et 5 en injectant non plus la puissance calculée mais la température d'entrée du plancher mesurée également lors de chaque campagne. Pour vérifier le comportement en évolution libre, la partie de la campagne 4 où le plancher est éteint (avant le 05/05/2015) est utilisée. Les résultats démontrent que cette modification ne dégrade pas les performances du modèle puisque l'erreur reste faible pour chacune des trois campagnes correspondant à des sollicitations différentes (Figure 102). Le modèle E final candidat au contrôle est donc robuste.

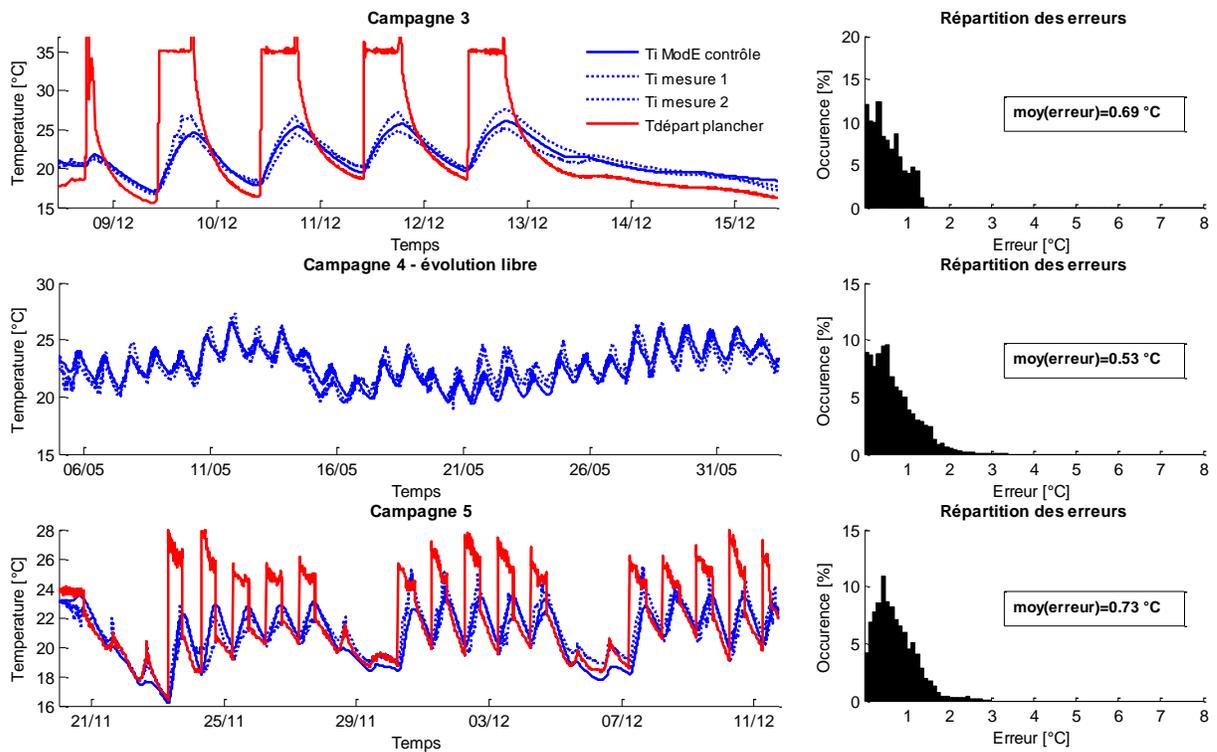


Figure 102 - Validation de la modification du modèle E pour le contrôle

Résumé

L'originalité consiste à identifier un modèle par rapport à des données mesurées in situ et non des données provenant de la sortie d'un modèle de référence. Les incertitudes sur les données d'entrée et les perturbations non prises en compte constituent un verrou scientifique. Un modèle fiable candidat au contrôle est obtenu par amélioration successive : en détaillant la partie correspondant au plancher chauffant, en utilisant la mesure de la température de surface et en portant une attention particulière sur la richesse des sollicitations au regard de l'analyse de sensibilité.

5. Conclusions

Il n'est pas aisé d'identifier un modèle par rapport à des mesures in situ. De nombreux travaux sur l'identification ont été menés mais bien souvent le modèle est identifié non pas en fonction des mesures mais par rapport à la sortie d'un modèle de conception jugé fiable et décrivant correctement le système réel. Dans ce cas il est possible de connaître exactement les sollicitations puisque ce sont les entrées du modèle de référence. Dans le cas présent les sollicitations sont déduites de la mesure et forcément bruitées, de même la variable d'intérêt est également mesurée et entachée d'erreurs qui nuisent à l'identification. Cela se vérifie sur la température intérieure mesurée puisque dans le bâtiment démonstrateur, deux sondes de températures, pourtant disposées à quelques centimètres d'écart, présentent des résultats bien différents avec des écarts supérieurs à 2°C (**Figure 103**). Les modèles de conception peuvent néanmoins être utiles, il est par exemple possible de s'en servir pour initialiser un modèle léger ou estimer des fonctions de transfert. Notamment dans le chapitre suivant, où un modèle de conception est utilisé pour établir une relation entre les gains solaires à l'intérieur d'une pièce et la donnée d'ensoleillement extérieur.

La partie 4 montre qu'il est difficile pour des modèles simples de décrire avec justesse des réponses à des sollicitation différentes. La conclusion est qu'un modèle doit être propre au système à contrôler et qu'il est illusoire de vouloir un modèle simple et unique qui puisse décrire correctement le bâtiment et l'ensemble de ses systèmes. Si plusieurs systèmes doivent être pilotés alors deux voies sont possibles : procéder régulièrement à des ré-identifications en ligne ou complexifier le modèle.

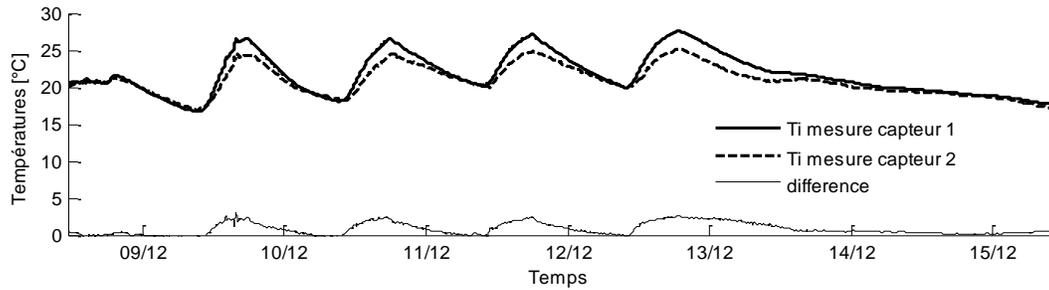


Figure 103 - Différences relevées entre deux capteurs de température intérieure

Dans le cas présent c'est l'apport de puissance du plancher chauffant qui doit être contrôlé. Il faut donc disposer d'un modèle précis pour les périodes de chauffage. En dehors de celles-ci il peut y avoir un décalage entre le modèle et la réalité qui doit cependant rester raisonnable. Il est notamment essentiel de pouvoir déterminer quand le chauffage est nécessaire pour estimer le moment de relance à environ 10 minutes près. Le modèle E répond aux critères et est donc utilisé pour le contrôle au chapitre suivant.

Chapitre IV : Contrôle optimal et anticipatif

Ce chapitre propose de démontrer s'il existe un intérêt au contrôle anticipatif d'un plancher chauffant. Une première partie expose les techniques de régulation classiques utilisées pour un plancher chauffant puis une deuxième partie est consacrée à la présentation d'un état de l'art du contrôle anticipatif dans le bâtiment en général et pour les planchers chauffants en particulier. La troisième partie présente la mise en œuvre de la boucle de contrôle complète sur le bâtiment démonstrateur SYNERGI de façon à pouvoir tester in situ le pilotage anticipatif et le comparer à deux régulations classiques de référence. Le matériel utilisé, les grandeurs mesurées et les logiques de contrôle sont présentés. Enfin la quatrième partie expose les résultats obtenus en comparant les deux stratégies de contrôle de référence et anticipative en simulation sur une saison de chauffe et in situ afin de conclure sur l'intérêt d'une telle installation.

1. Techniques de régulations classiques pour les systèmes capacitifs

Du fait de leurs inerties, les systèmes capacitifs conviennent aux grandes surfaces et sont généralement mis en œuvre sur des niveaux entiers. Dans le cadre de ces travaux, l'intérêt est porté sur le plancher chauffant qui est le système capacitif le plus répandu. Ils sont apparus dans les années 1960 pour les logements collectifs mais de mauvaises pratiques ont conduit à un désintérêt pour les raisons suivantes :

- absence d'isolant sous les tubes et transfert de chaleur important vers les pièces du dessous,
- température d'eau élevée causant des problèmes de circulation sanguine, hétérogénéité de températures,
- trop forte inertie et impossibilité de contrôler,
- surchauffes localisées et en mi-saison,
- apparition de fuites liées à l'utilisation de tuyaux métalliques éprouvés par la dilatation thermique.

Ces problèmes furent résolus avec l'utilisation de tubes non métalliques, d'isolation de la dalle, de l'emploi de chapes adaptées et de la parution du DTU 65.8 [158] en 1993 servant de règles de l'art pour encadrer la mise en œuvre des planchers chauffants. Bien que la tendance s'inverse à nouveau avec les bâtiments basses consommations, les installations de chauffage utilisant le vecteur eau a été délaissé pendant longtemps au profit du chauffage électrique (**Figure 104**) avec l'apparition sur le marché de planchers chauffants électriques. Depuis une dizaine d'années, les planchers chauffants sont plébiscités avec l'apparition de chaudières basses températures particulièrement adaptées aux températures limitées de ce système. De plus, il est possible de réaliser des planchers rafraîchissants grâce à l'emploi de pompes à chaleur réversibles.

Un plancher chauffant peut être utilisé :

- **seul** : il est réglé pour assurer une température de confort la journée avec un ralenti la nuit, ce cas de figure concerne surtout les logements individuels,

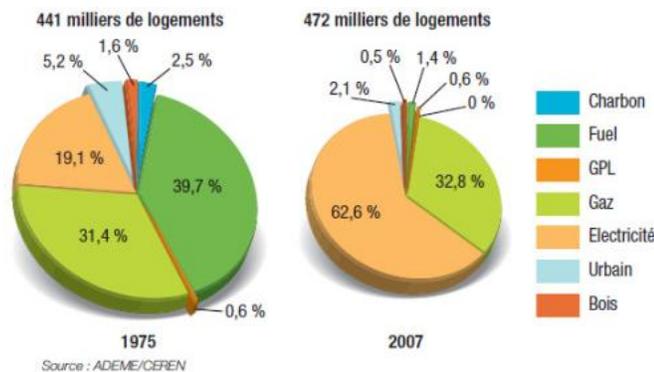


Figure 104 - Evolution des parts de marché des énergies dans les logements neufs

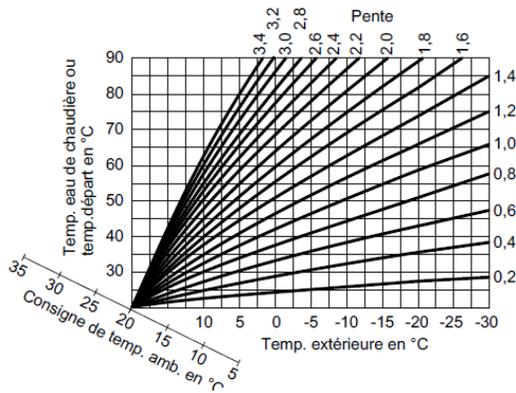


Figure 105 - Loi d'eau

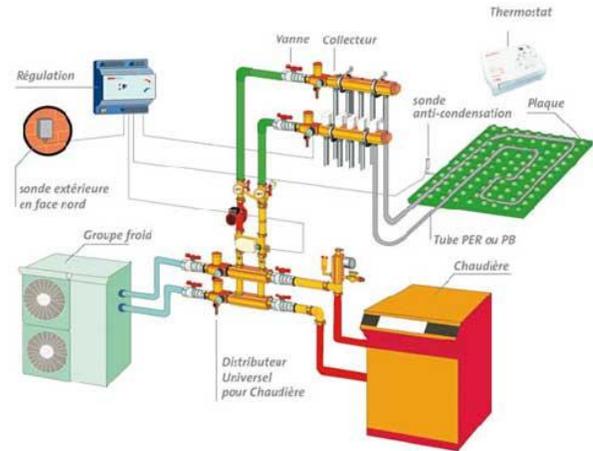


Figure 106 - Installation typique de plancher chauffant [159]

- **avec un système d'appoint** : il est paramétré pour assurer une température de confort de base qui correspond également au ralenti de nuit, en journée le système de chauffage d'appoint assure la montée en température.

Un plancher chauffant ne peut pas être commandé classiquement par un thermostat du fait de son inertie. En effet, les variations de température nécessitent plusieurs heures pour être prises en compte et assurer un feedback basé sur la réactivité des mesures temporelles d'élévation/diminution de température intérieure. C'est un système performant mais délicat à régler. La puissance d'un plancher chauffant est modulée en fonction des conditions extérieures en utilisant une « loi d'eau » ou « courbe de chauffe » qui donne la correspondance entre la température de départ du plancher et la température extérieure (Figure 105). Le but est de compenser la chaleur perdue par l'enveloppe qui dépend directement de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. Ainsi, la température de départ du plancher varie en permanence. Les déperditions évoluent de façon quasi linéaires avec l'écart de température et une courbe de chauffe a l'allure d'une droite dont la pente et l'origine dépendent des caractéristiques de l'enveloppe, du confort souhaité et du dimensionnement du plancher. Plus la température extérieure est basse et plus la température de départ est élevée. La pente de la loi d'eau permet de définir l'augmentation du nombre de degrés de température de départ pour un degré de baisse de la température extérieure. La loi d'eau dépend également de l'inertie du bâtiment qui est classée sur une échelle de un à dix, une maison ossature bois aura un niveau d'inertie autour de trois tandis qu'une maison en briques pleines aura une inertie autour de huit. Cette régulation est donc fondée sur une mesure en continu de la température extérieure. Une installation de plancher chauffant à eau (Figure 106) comporte les éléments suivants :

- **une chaudière**, une pompe à chaleur ou un réseau de chaleur pour produire l'eau chaude alimentant le plancher chauffant, éventuellement un groupe froid dans le cas d'un plancher rafraîchissant,
- **un réseau de tubes** positionné sous la dalle du plancher et dans lequel circule l'eau chaude pour

transmettre la chaleur à la pièce. Cette dalle est isolée par le dessous pour limiter les déperditions. La chape peut être composée de ciment ou anhydrite qui offre une plus forte résistance aux variations de températures et enrobe mieux les tubes. La chape anhydrite, moins dense que le béton classique a une inertie moindre.

- **des collecteurs** ou « nourrices » d'où partent et arrivent les différentes boucles d'eau,
- **une vanne trois voies** qui ajuste la température de départ du plancher par mélange de l'eau provenant de la chaudière et de celle de retour du plancher.
- **une pompe** ou « circulateur » qui assure le déplacement de l'eau dans le plancher chauffant,
- **un dispositif de sécurité** qui limite la température de départ puisque celle-ci doit être au maximum de 50°C conformément au DTU 65.8 afin d'éviter que la température de surface au sol ne dépasse 28°C pour prévenir des problèmes de circulation sanguine quand l'écart de température entre le haut et le bas du corps est important. Il s'agit d'un thermostat de sécurité qui coupe l'alimentation de la pompe au-delà d'une température fixée.
- **une sonde de température extérieure** placée au nord sous abri pour s'approcher au mieux de la température d'air sans l'influence du rayonnement solaire et qui permet de calculer la température d'eau en fonction des conditions climatiques réelles,
- **une sonde de température intérieure** aussi appelée « commande déportée » est souvent nécessaire pour faire une correction d'ambiance et prendre en compte les apports gratuits (occupants, solaires) que la sonde extérieure ne peut mesurer,
- **un régulateur** qui ajuste la température de départ de l'eau en fonction de la mesure de la température extérieure via la loi d'eau, cette modulation se fait par action sur la position de la vanne trois voies. Avec la mesure de température intérieure, la régulation peut couper le circulateur si la consigne est atteinte ou alors effectuer une correction par abaissement temporaire de la loi d'eau. Avec l'inertie du plancher, la température intérieure va osciller lentement autour de la consigne.

La régulation peut se faire de quatre façons avec une sonde de température extérieure en associant au besoin une sonde d'ambiance :

- **sonde extérieure seule** : la température de départ est régulée seulement en fonction de la température extérieure, elle suit la tendance inverse à la température extérieure et ignore les éventuels apports solaires ou l'arrivée d'occupants. Il y a donc un grand risque de surchauffe (**Figure 107a**) et il est très difficile de choisir une courbe de chauffe qui satisfasse aux critères de confort toute l'année.
- **sonde extérieure et thermostat d'ambiance on/off** : la température de départ est toujours régulée en fonction de la température extérieure mais quand la sonde d'ambiance détecte un dépassement de la consigne, le circulateur est coupé et le plancher se décharge thermiquement. La température varie donc lentement autour de la consigne du fait de l'inertie (**Figure 107b**) et correspond aux besoins de l'occupant.
- **sonde extérieure et thermostat d'ambiance chronoproportionnel** : le principe est le même que précédemment sauf que le thermostat d'ambiance est chronoproportionnel, c'est-à-dire qu'il est

basé sur des cycles d'une certaine durée. Plus la mesure est loin de la consigne plus le temps d'allumage du circulateur est important, quand la mesure se rapproche de la consigne, la proportion du temps d'allumage diminue ce qui permet une régulation plus douce et une montée plus lente (Figure 107c).

- **sonde extérieure et thermostat d'ambiance modulant** : la température de départ est régulée par rapport à la température extérieure et intérieure, la sonde d'ambiance agit toujours sur le circulateur mais surtout, elle modifie la loi d'eau lorsque la mesure se rapproche de la consigne dans le sens d'une réduction de la température d'entrée (Figure 107d). Cette modulation supplémentaire permet de réaliser des économies d'énergie par abaissement de la température de départ.

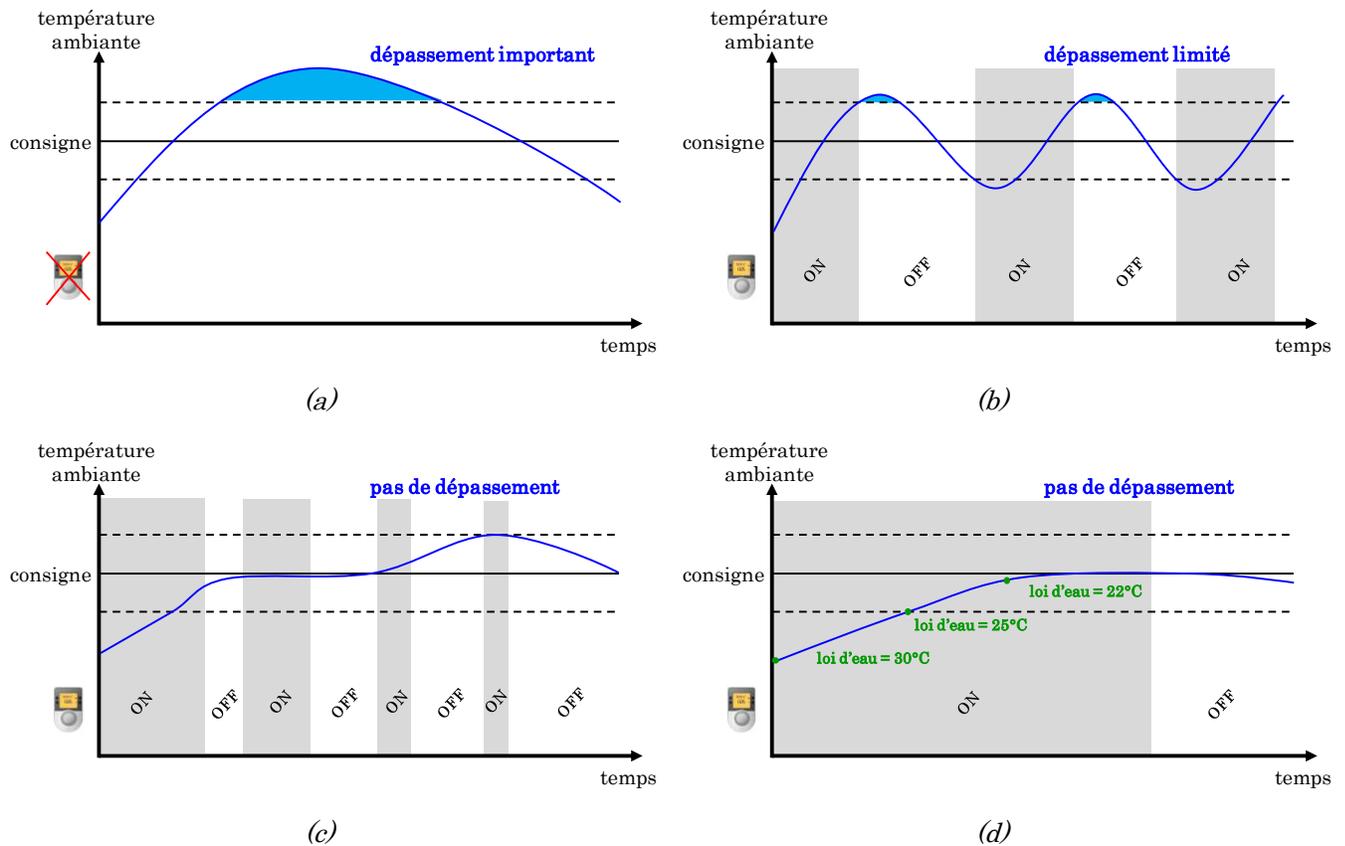


Figure 107 - Principe de fonctionnement de la régulation d'un plancher chauffant à la relance avec sonde extérieure seule (a), sonde extérieure et thermostat d'ambiance on/off (b) sonde extérieure et thermostat d'ambiance chronoproportionnel (c), sonde extérieure et thermostat d'ambiance modulant (d) [160]

Il est difficile de trouver des statistiques pour chiffrer le taux de pénétration des planchers chauffants dans le bâtiment, la très grande majorité sont employés dans le secteur résidentiel. Une étude du syndicat national des fabricants de composants et de systèmes intégrés de chauffage (COCHEBAT) révèle que 40%

des maisons neuves sont équipées d'un plancher chauffant. Ce système est techniquement bien éprouvé et réputé pour le confort avec la notion de « chaleur douce ». De plus ce système de chauffage est discret puisque les tuyaux sont noyés dans la dalle et apportent un gain esthétique apprécié des maîtres d'ouvrages. Un label CERTITHERM a été créé afin de garantir la performance des planchers chauffants et vérifier qu'ils répondent à la RT2012 et à la norme NF EN 1264 [161] sur les exigences d'efficacité énergétique.

Ces systèmes ont démontré leur efficacité lorsque les réglages sont appropriés, néanmoins le pilotage se fait à partir de mesures en temps réel et n'est pas capable d'anticiper l'évolution future du bâtiment. Le potentiel d'un tel système peut donc encore être amélioré.

Résumé

Un plancher chauffant est régulé en température à travers une loi d'eau qui établit la relation linéaire entre la température de départ et la température extérieure mesurée à l'aide d'une sonde et reliée à la régulation. Une sonde d'ambiance permet de prendre en compte les apports internes pour éviter les surchauffes et améliorer le confort.

2. Le contrôle prédictif dans le bâtiment

Actuellement, le contrôle prédictif n'est pas utilisé dans le domaine du bâtiment bien qu'il fasse l'objet d'un nombre croissant de publications scientifiques. La régulation du chauffage se fait par l'utilisation de lois de commande préprogrammées et définies par l'utilisateur. Pour les bâtiments à occupation intermittente, les heures d'arrêt et de relance sont généralement fixes. Le suivi de consigne est souvent assuré par des systèmes réactifs tandis que les systèmes capacitifs sont principalement régulés en fonction de la température extérieure. En effet, ces systèmes sont difficiles à réguler du fait du décalage temporel entre l'envoi de la commande et la réponse sur le système. En contrôle boucle fermée on parle de « temps mort » et de « temps d'équilibrage ». Pour le pilotage des équipements de chauffage dans le bâtiment on parle de « temps de relance ». Une régulation qui prend en compte ce temps de relance par anticipation de l'occupation et des conditions extérieures peut permettre de mieux gérer les consommations d'énergie d'un système ayant une inertie importante. Les contrôleurs prédictifs sont adaptés aux systèmes ayant un grand nombre d'entrées avec des contraintes sur les entrées et les sorties et dont les objectifs varient avec le temps : c'est le cas du système bâtiment.

2.1. Principe

Le MPC (Model Predictive Control) est une technique de contrôle fondée sur l'optimisation d'un problème contraint. Les sollicitations contrôlables et les sorties sont prédites par un modèle de façon à respecter un objectif décrit par une fonction. Les réglages d'un contrôleur classique peuvent être effectués en amont à partir d'un modèle du système à contrôler mais celui-ci ne sert plus en phase d'exploitation. Avec un contrôleur prédictif le modèle est au cœur de la logique de contrôle. Il prédit le comportement du

système à contrôler et choisit une trajectoire optimale. Un feedback est assuré en répétant cette procédure à chaque pas de temps. Un contrôleur de ce type comprend :

- **un modèle de prédiction** : ce modèle décrit le comportement thermique du bâtiment soumis aux sollicitations contrôlables et non contrôlables,
- **une consigne** : température intérieure souhaitée,
- **des contraintes** : puissance maximale disponible, taux de montée en puissance,
- **des perturbations** : prévisions des sollicitations non contrôlables (météo, occupation),
- **une fonction coût** : contrainte sur la température intérieure (critère de confort) et sur la consommation d'énergie (critère économique).

Au préalable, il faut donc choisir un modèle et définir une fonction objectif. Ces choix ne sont pas indépendants puisque le modèle est conditionné par l'objectif attendu. De même, la taille du modèle dépend de l'application temporelle, du pas de temps d'action et des entrées/sorties. Comme spécifié par *Kouvaritakis et Cannon* [162], la commande prédictive est basée sur la prédiction, l'optimisation et le principe d'horizon fuyant. La séquence de sortie du modèle Y_k est prédite par la simulation à chaque pas de temps k avec un modèle (Eq.41) ayant pour entrée un vecteur U_k contenant les m sollicitations commandables à optimiser $U_{c|k}$ et les n sollicitations non commandables prévues $U_{nc|k}$ (Eq.42) pour un horizon de prédiction correspondant à p fois la période d'échantillonnage (Eq.43).

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + BU_k \\ Y_k = CX_k + DU_k \end{cases} \quad (\text{Eq.41})$$

$$BU_k = B_c U_{c|k} + B_{nc} U_{nc|k} \quad (\text{Eq.42})$$

$$U_k = \begin{bmatrix} u_{1,c|k} & & u_{m,c|k} & & u_{1,nc|k} & & & & u_{n,nc|k} \\ u_{1,c|k+1} & & u_{m,c|k+1} & & u_{1,nc|k+1} & & & & u_{n,nc|k+1} \\ \vdots & \dots & \vdots & & \vdots & \dots & & & \vdots \\ u_{1,c|k+p-1} & & u_{m,c|k+p-1} & & u_{1,nc|k+p-1} & & & & u_{n,nc|k+p-1} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.43})$$

La rétroaction est assurée en optimisant les sollicitations commandables de façon à minimiser une fonction coût au pas de temps k sur un horizon p (Eq.44 et Eq.45) et qui dépend des sorties du modèle :

$$J_k = J_{y|k} + J_{u|k} + J_{\Delta u|k} \quad (\text{Eq.44}) \quad \left\{ \begin{array}{l} J_{y|k} = \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^p \frac{W_{i,j}^y}{S_{i,j}^y} \cdot (r_{j|k+i} - y_{j|k+i})^2 \\ J_{u|k} = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \frac{W_{i,j}^u}{S_{i,j}^u} \cdot (u_{j|k+i} - u_{j, \text{target}|k+i})^2 \\ J_{\Delta u|k} = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \frac{W_{i,j}^{\Delta u}}{S_{i,j}^{\Delta u}} \cdot (u_{j|k+i} - u_{j|k+i-1})^2 \end{array} \right. \quad (\text{Eq.45})$$

Le terme $J_{y|k}$ permet que les n_y sorties y du modèle suivent leurs consignes respectives r supposées connues. Le terme $J_{u|k}$ s'assure que les n_u grandeurs de commande u restent dans leur intervalle u_{target} contraint par l'utilisateur. De même, le terme $J_{\Delta u|k}$ contraint la variation de la commande entre deux pas de temps comme défini par l'utilisateur. Des poids w^y , w^u et $w^{\Delta u}$ sont attribués respectivement aux différentes sorties, commandes et variations de commande. Les scalaires s^y , s^u et $s^{\Delta u}$ permettent de respecter l'homogénéité entre des grandeurs qui peuvent ne pas toutes être de la même nature. Les contraintes sur les variables de sortie, les commandes et la variation de commande sont exprimées avec l'Eq.46 :

$$\begin{cases} \underline{U} \leq U_k \leq \overline{U} \\ \underline{\Delta U} \leq \Delta U_k \leq \overline{\Delta U} \\ \underline{Y} \leq Y_k \leq \overline{Y} \end{cases} \quad (\text{Eq.46})$$

La fonction coût dépend de $U_{c|k}$ et la commande optimale notée $U_{c|k}^*$ est déterminée en minimisant J_k (Eq.47) :

$$U_{c|k}^* = \arg \min J_k \quad (\text{Eq.47})$$

La commande u_c envoyée à l'actionneur correspond au premier élément $u_{c|k}^*$ de la commande optimale $U_{c|k}^*$ (Eq.48) et le procédé d'optimisation par minimisation de la fonction coût est répété au pas de temps suivant avec le même horizon de prédiction qui se déplace suivant le principe d'« horizon fuyant » ou « receding horizon » (**Figure 108**).

$$u_c = u_{c|k}^* \quad (\text{Eq.48})$$

Le choix du pas de temps d'échantillonnage T_{sample} dépend de l'application souhaitée. Une période d'échantillonnage faible permet de mieux rejeter les perturbations inconnues. Cependant sa valeur est aussi fonction de la dynamique du modèle puisque plus la période d'échantillonnage devient petite, plus l'effort de calcul est grand. Il faut donc faire un compromis entre la performance souhaitée et la puissance de calcul. Avec une petite période d'échantillonnage il est également plus difficile d'étendre l'horizon de contrôle m car le processeur doit optimiser $m * T_{sample}$ opérations. L'horizon de contrôle correspond au nombre de périodes d'échantillonnage sur laquelle la commande est optimisée à chaque pas de temps. Plus m est petit et plus le temps de calcul est réduit et la commande stable. Le choix de l'horizon de contrôle est le plus important et dépend également de la dynamique de réponse supposée du système. Pour l'horizon de prédiction, la valeur de p ne doit pas être trop petite au risque de rendre le contrôle instable et de perdre l'aspect prédictif.

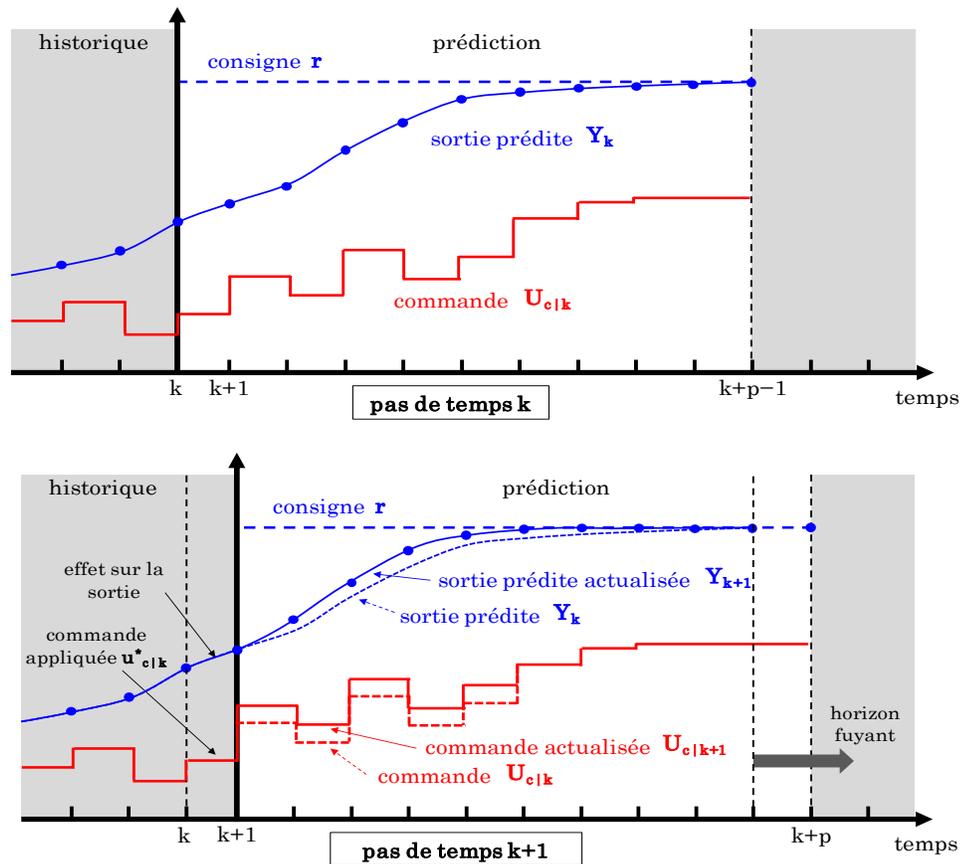


Figure 108 - Fonctionnement d'un contrôleur MPC où $m = p$ et principe d'horizon fuyant

2.2. Etat de l'art

Le contrôle prédictif permet d'optimiser un problème contraint comme c'est le cas de tous les systèmes réels qui ont des limites physiques, environnementales ou économiques. Il peut être utilisé pour l'aérospatial, la métallurgie et jusque dans le domaine de l'économie et de la finance [163].

Le concept d'horizon fuyant a été introduit par *Propoi* [164] en 1963 mais la première utilisation d'un contrôleur MPC en temps réel dans l'industrie remonte à 1979 où des ingénieurs de la société Shell ont développé l'outil Dynamic Matrix Control (DMC) pour piloter un réacteur catalytique [165,166]. Ces contrôleurs ont connu un succès grandissant dans le domaine de la chimie et notamment dans le secteur de la pétrochimie et des pâtes et papiers [167]. En 1987 *Cutler et Hawkins* [168] ont mis en œuvre un MPC comprenant cinq variables de commandes à optimiser pour piloter quatre variables de contrôle alors que jusqu'à présent, la plupart des systèmes n'avaient qu'une variable de sortie. En chimie, la majorité des systèmes sont multivariables et contraints, ce qui a motivé le développement des MPC très bien adaptés à ces cas. Aujourd'hui, c'est l'une des techniques de contrôle avancée la plus utilisée dans l'industrie. Une étude menée en 1999 auprès des leaders du secteur (Aspentech, Honeyweel, Adersa, MDC, Invensys) a recensé 4600 installations pilotées par un MPC. La majorité de ces applications se font toujours dans le

secteur de la pétrochimie puisque c'est le domaine avec la plus grande pénétration (**Figure 109**). Une autre étude menée en 2005 par les Etats-Unis démontre que l'utilisation de contrôleurs MPC dans l'industrie est en progression et que de nouveaux secteurs tels que l'agroalimentaire ou l'industrie pharmaceutique s'approprient ces techniques de contrôle (**Figure 110**). De plus un sondage effectué dans cette même étude révèle que ceux qui utilisent déjà un contrôleur MPC voient leur utilisation augmenter.

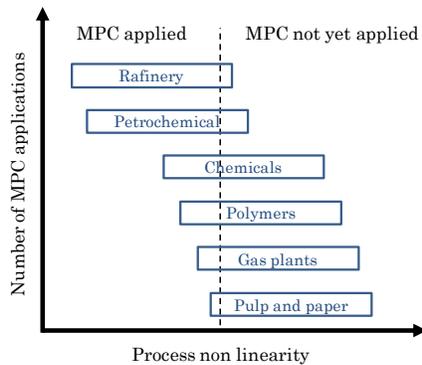


Figure 109 - Résultats du recensement effectué en 1999 [169]

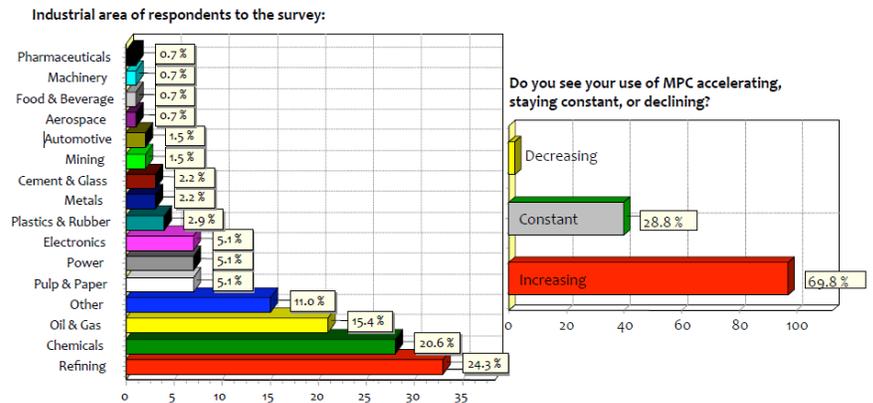


Figure 110 - Résultat de l'étude effectuée en 2005 et réponse au sondage

Dans le domaine du bâtiment, l'un des tout premiers papiers concernant le contrôle adaptatif est celui de *Landau* [170] en 1979 sur l'identification de la dynamique de bâtiment à occupation intermittente afin de déterminer le temps de relance. Ces méthodes ont ensuite été appliquées par *Bloomfield et Fisk* [171] pour développer un contrôleur on/off optimal qui anticipe le démarrage et l'arrêt du système de chauffage dont le suivi de consigne en occupation est assuré par un contrôleur PI. En 1992, *Bénard et al.* [172,173] présentent une étude proche de la nôtre avec l'utilisation d'un modèle RC pour analyser les avantages du contrôle optimal sur le bâtiment. Ils soulignent déjà que l'intérêt dépend de l'inertie du système et du bâtiment à contrôler puisque dans leurs travaux, deux bâtiments l'un d'inertie faible et l'autre d'inertie importante sont comparés. Ils concluent que les capacités thermiques doivent être choisies de façon à correspondre aux constantes de temps associées à la fenêtre de contrôle et qu'il n'est pas nécessaire de chercher un modèle valable pour toutes les échelles de temps. Dans le cas où un contrôleur prédictif serait utilisé à plusieurs échelles (pièce, bâtiment, ensemble de bâtiments), un modèle différent devra être utilisé pour chaque échelle de contrôle. Ces travaux montrent également que la qualité du contrôle dépend fortement de la qualité des mesures effectuées sur site pour l'identification du modèle et le contrôle temps réel. Enfin, ils précisent qu'un moyen simple et efficace d'introduire le contrôle prédictif dans le bâtiment sans modification majeure est l'utilisation d'un contrôleur PID dont la consigne varie et est calculée par un optimiseur prédictif. Le contrôle prédictif ne se limite pas au chauffage puisque des travaux traitent également du refroidissement [174,175] ou de la ventilation [176]. Le **Tableau 22** recense des travaux notables traitant du contrôle prédictif du chauffage dans le bâtiment.

Auteur	Année	Système	Modèle	Contrôle du confort	Simulation / expérimental	Stratégie comparée	Gain MPC	réf
Bénard et al.	1992	chauffage direct et par plancher	modèle 7R2C/4R2C	intervalle de température	simulation	-	-	[172] [173]
Kummert et al.	2000	radiateur à eau	modèle 25R10C	intervalle de température	simulation et expérimental	loi d'eau	économie 9%	[177]
Kolokotsa et al.	2008	ventilo-convecteurs	approche bilinéaire	consigne	simulation et expérimental	-	stabilité	[178]
Freire et al.	2008	chauffage direct	ARMAX	température PMV air humide	simulation	-	amélioration du confort et économie d'énergie	[3]
Morosan et al.	2010	convecteur électrique	ARX	température de consigne	simulation	on/off PI	confort amélioré 37% économie 13%	[179]
Eynard	2010	résistance chauffante	modèle linéarisé	température de consigne	simulation	PID	économie 4%	[116]
Hazyuk et al.	2012	chauffage direct	modèle d'état (RC)	température de confort minimale	simulation	-	-	[180]
Privara et al.	2012	plafond rayonnant	modèle d'état	température de consigne	simulation	-	-	[181]
Cigler et al.	2012	plafond rayonnant	TRNSYS Type56	PMV	simulation	loi d'eau	économie 10-15%	[151]
Cigler, Tomáško et al.	2013	plafond rayonnant	modèle d'état	intervalle de température	simulation	-	-	[182]
Petersen et Wieck Bundgaard	2013	chauffage direct	IDbuild	intervalle de température	simulation	-	fort potentiel d'économie	[183]
Bacha et al.	2013	chauffage électrique et appareils ménagers	modèle 5R1C	intervalle de température	simulation	scénario de consigne	économie 1€/jour en électricité	[105]

Quintana et Kummer	2013	système de chauffage solaire	TRNSYS	-	simulation	-	réduit la consommation d'électricité et d'énergie fossile économie 4%	[184]
Hasan et al.	2014	chauffage direct électrique	modèle d'état	intervalle de température	simulation	PID	économie 5%	[185]
Artiges et al.	2014	radiateur électrique	modèle adjoint	température de consigne	simulation	-	-	[186]

Tableau 22 - Bibliographie présentant une application de contrôle prédictif pour le chauffage

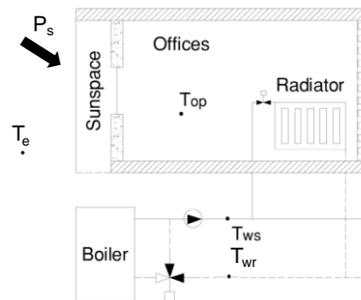


Figure 111 - Bâtiment modélisé par Kummer et al.

Il est intéressant de citer les travaux de *Kummert et al.* [177] qui ont observé le comportement d'un contrôleur prédictif sur un bâtiment réel en faisant une validation croisée en simulation. Le bâtiment expérimental est une maison solaire passive où les apports importants entraînent un risque de surchauffe qui peut être anticipé. Dans ce type de bâtiment le recours au chauffage est faible et la part relative des gains internes augmente ce qui rend essentiel l'estimation de l'effet de ces perturbations par le modèle. Le double intérêt d'un contrôleur MPC est d'augmenter le confort tout en réduisant les coûts. Dans ces travaux la variable de contrôle est la température de départ dans le circuit des radiateurs, la variable contrôlée est la température opérative (Figure 111). Le pas de temps est de 15 minutes. La procédure de contrôle s'effectue en quatre étapes dans la même logique que ce qui est réalisé sur le démonstrateur SYNERGI hormis l'étape 2 puisque le modèle est identifié en amont et non à chaque pas de temps :

- **étape 1** : à chaque pas de temps l'état du système (T_{op} , T_{wr}) et les sollicitations (T_{ws} , T_e , P_s) sont mesurés,
- **étape 2** : ces valeurs sont envoyées pour l'identification du modèle et un filtre de Kalman permet de construire l'état initial du modèle. Les prévisions des perturbations sont utilisées pour prédire la sortie du modèle au pas de temps suivant,
- **étape 3** : la commande de température de départ est optimisée par minimisation de la fonction coût,

- **étape4** : un PID permet le suivi du plan optimal contenant les consignes de T_{ws} .

Le modèle associé est un modèle RC d'ordre 10 où la chaleur des radiateurs est directement transmise à l'air (réactif). L'état initial du modèle doit être estimé à chaque optimisation puisque tous les états ne sont pas mesurés, ils sont reconstruits à l'aide du filtre de Kalman à l'étape 2. La fonction coût comprend un terme économique et un terme de confort qui est fonction de l'indicateur PPD (Predicted Percentage Dissatisfied). Les prévisions correspondent aux conditions du jour précédent comme c'est souvent le cas quand des prévisions ne sont pas disponibles. Le temps d'optimisation à chaque pas de temps sur les 24 prochaines heures est de 40 secondes. La validation expérimentale s'effectue en comparant le contrôle prédictif à un contrôleur conventionnel avec une loi d'eau et des robinets thermostatiques : les résultats indiquent un gain économique de 9%. L'auteur précise qu'il est difficile d'estimer le confort avec un seul indicateur et que son évaluation est un sujet en lui-même. Le papier de *Kolokotsa et al.* [178] propose également une comparaison expérimentale et en simulation. Le contrôleur prédictif ne se limite pas au chauffage et agit sur quatre commandes pour satisfaire aux objectifs de confort et d'économie d'énergie. Le vecteur d'état est composé de la température, de l'humidité relative, du taux de CO₂ et du niveau d'éclairage, sur l'ensemble desquels des contraintes sont appliquées. Le vecteur des sollicitations contrôlables comprend la commande d'ouverture des fenêtres, celle des volets, de l'allumage des ventilo-convecteurs en mode chaud ou froid et la commande du système d'éclairage. Le pas de temps est de 10 minutes et les résultats sont concluants. *Morosan et al.* [179] ont également recours à un pas de temps de 10 minutes pour le chauffage d'un bâtiment à occupation intermittente par convecteurs électriques. Ils se servent d'un modèle ARX avec un horizon de prédiction de 10h. Trois cas sont étudiés pour un bâtiment multizones (**Figure 112**) :

- une approche décentralisée avec un contrôleur MPC par zone, l'influence des autres pièces est considérée comme des perturbations non prévisibles,
- une approche centralisée avec un contrôleur MPC pour l'ensemble des zones : le MPC utilise un modèle couplé qui exploite pour chaque pièce les prédictions des pièces voisines,
- une approche distribuée avec un contrôleur MPC par zone mais qui communiquent entre eux de telle sorte que l'influence des autres pièces est une perturbation prévisible.

La régulation distribuée présente les meilleurs résultats avec une puissance de calcul moindre en améliorant le confort de 36,7% et en diminuant la consommation de 13,4%. Ces travaux soulignent également l'importance du choix de la fonction coût en illustrant le cas où le poids de la contrainte sur la réduction d'économie d'énergie est fort par rapport au poids de la contrainte de confort. Dans cette situation il y a bien anticipation de la montée et de la descente de la consigne (points a et d) mais au détriment du confort en début (point b) et à la fin (point c) de la période d'occupation (**Figure 113**).

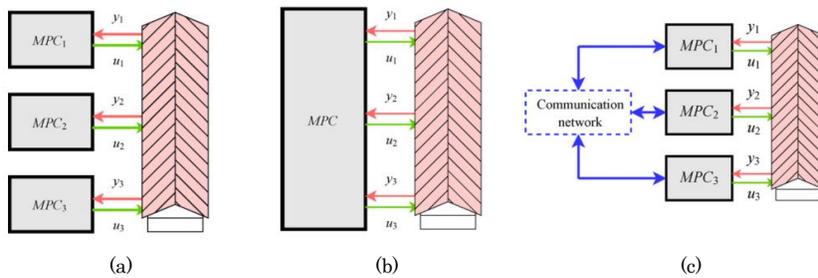


Figure 112 - Approches : décentralisées (a), centralisée (b), distribuée (c) utilisées par Morosan et al.

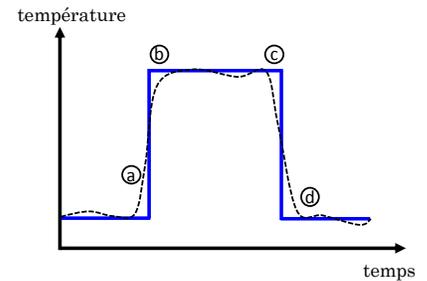


Figure 113 - MPC avec une fonction coût classique [179]

Dans les travaux de thèse de *Eynard* [116], deux systèmes de chauffage sont contrôlés, un premier est alimenté en énergie fossile et piloté par le MPC pour limiter son utilisation, tandis que le second qui sert d'appoint est approvisionné en énergie renouvelable et est piloté par un régulateur PID. L'économie obtenue par rapport à un pilotage classique est de 4%. Pour estimer la performance du contrôleur il a recours à un profil de consigne préconisé par la norme *NF EN ISO 13790* [187] avec un ralenti de nuit en semaine et un réduit plus important le week-end (Figure 114). Trois critères sont utilisés pour comparer les modes de contrôle : la part d'énergie renouvelable consommée, la qualité de régulation par la variance entre la température de consigne et la température moyenne de zone et un critère global égal à la différence entre les deux premiers indices.

Contrairement au secteur industriel, le contrôle avancé de la température dans le bâtiment n'est pas très répandu car l'effet d'un mauvais contrôle n'est pas facilement détectable. Le domaine du bâtiment gaspille beaucoup d'énergie du fait d'un mauvais contrôle mais son potentiel est très grand. Habituellement, les systèmes de chauffage ont seulement une température de consigne comme objectif de confort mais dans le cas d'occupation intermittente le but n'est pas simplement d'assurer un suivi de consigne mais de l'optimiser dans un intervalle de confort. Le MPC est peu utilisé dans le bâtiment car il nécessite d'importants moyens de calcul. Cependant, avec l'essor de l'informatique et de la domotique cela est maintenant possible. Les travaux de *Hazyuk et al.* [180] portant sur un bâtiment monozone permettent de démontrer qu'il est difficile de contrôler un système utilisant le vecteur eau. En effet, la relation entre la commande et la sortie du système est non linéaire, la température de consigne varie instantanément alors que la température d'air intérieur varie lentement. Le MPC doit calculer le flux qui permet d'atteindre le confort en temps voulu avec une énergie minimale (Figure 115).

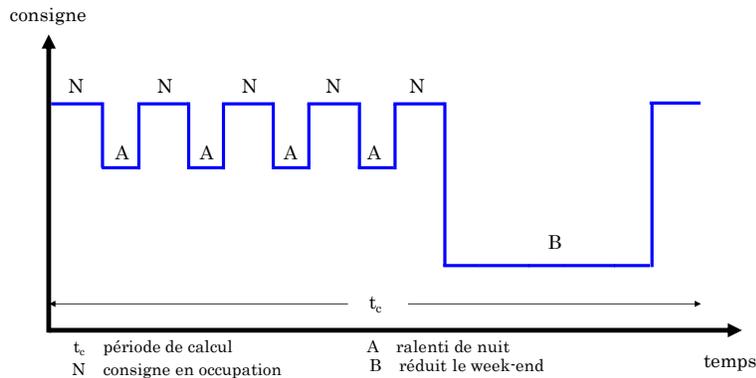


Figure 114 - Séquence de consigne de température préconisée par Norme NF EN ISO 13790

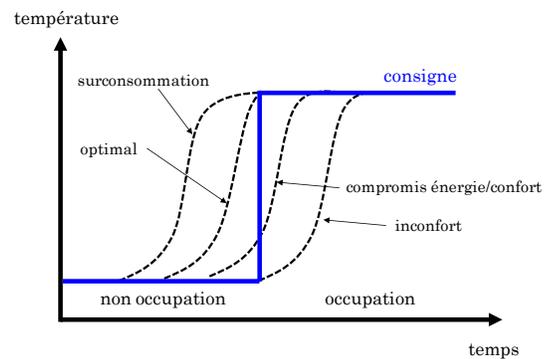


Figure 115 - Type de relance selon les contraintes de confort et de coût

Dans le cadre du projet *Opticontrol* [40], trois papiers ont été réalisés. Celui de *Privara et al.* [181] décrit une méthode pour trouver un modèle avec le moins de paramètres possibles tout en ayant une qualité satisfaisante de prédiction et un sens physique. Ils précisent que les modèles d'ordre trop faible limitent le potentiel d'économie et à l'inverse les modèles trop complexes entraînent des problèmes de capacité de calcul. Il est à noter l'utilisation d'un modèle adjoint par *Artiges et al.* [186] qui permet de réduire le temps de calcul. Il faut donc trouver un compromis comme démontré au chapitre III. Le papier de *Cigler et al.* [151] utilise l'indice de confort PMV/PPD et obtient une réduction de 10 à 15% de la consommation d'énergie par rapport à un contrôleur sans anticipation. Le papier de *Cigler, Tomáško et al.* [182] présente le développement d'un outil pour rendre les contrôleurs MPC plus accessibles pour les ingénieurs et permettre de réaliser des tests afin de trouver les meilleurs réglages. Cet outil appelé BuildingLAB dispose de deux interfaces selon le public : une interface simple « easy to use manager » pour démontrer l'intérêt auprès de décideurs et une interface avancée « engineering » permettant d'accéder à des paramètres avancés. L'outil est validé expérimentalement et en simulation.

La qualité des prévisions météorologiques est importante pour le contrôle. Classiquement lorsque les prévisions ne sont pas disponibles ce sont les données du jour précédent qui sont utilisées. Les travaux de *Petersen et Wieck Bundgaard* [183] étudient l'effet de l'incertitude des prévisions sur le contrôle, 24 bâtiments sont testés en climat tempéré pour les années 2010 et 2011. Ils diffèrent par l'orientation, l'inertie, la surface vitrée et le type de vitrage. Ils concluent que malgré les incertitudes, le contrôle prédictif démontre un potentiel important d'économie d'énergie. Le contrôle peut également prendre en compte les contraintes sur la production d'énergie, le travail de *Bacha et al.* [105] fait intervenir un bâtiment démonstrateur qui intègre un panneau solaire photovoltaïque. La fonction coût à minimiser dépend du coût de l'autoconsommation, du coût de revente sur le réseau et du coût d'achat de l'électricité quand la production solaire n'est pas suffisante. En plus de réaliser des économies de chauffage, les choix effectués par le contrôleur permettent d'économiser 1€ d'électricité par jour. Le système de contrôle est organisé en trois couches : la couche anticipative où sont générés les plans de commande optimale, la couche réactive qui applique la commande optimale tant que les contraintes de confort sont assurées et

dans le cas contraire déclenche le système d'appoint pour y remédier. La dernière couche, est la couche matérielle ou « device layer » qui comprend les points de mesures et les actionneurs. Plus récemment en 2014, *Hasan et al.* [185] ont simulé un contrôleur prédictif sur un bâtiment multizone équipé d'un système de chauffage électrique par pièce. La fonction coût dépend de l'occupation et du prix de l'électricité. Le but est de décaler le chauffage aux périodes creuses (22h-10h). En occupation, l'intervalle de confort se situe entre 18°C et 22°C, hors occupation la température de consigne est de 15°C. Les gains solaires sont considérés comme une sollicitation incontrôlable et la température extérieure est prédite. L'horizon de prédiction est de 24h et la commande des radiateurs électriques est discrétisée en trois valeurs (on/off/50%). Des priorités sont établies entre les zones puisque celles qui sont les plus éloignées de la consigne sont chauffées en premier. Le pas de temps de simulation est de 5 minutes alors que le pas de temps de contrôle est de 30 minutes. Ils ont démontré que pour un système réactif et avec un bâtiment à faible inertie, le contrôle prédictif n'a pas d'intérêt en comparaison d'un simple PID. En revanche dans une configuration à forte inertie, une économie d'énergie de 5% est réalisée.

2.3. Contrôle anticipatif pour des planchers chauffants

Pour le contrôle de systèmes par un contrôleur prédictif, seuls quelques papiers traitent du cas particulier des planchers chauffants (**Tableau 23**). Comme précisé par *Chen* [188] qui a montré l'intérêt du MPC pour des planchers chauffants électriques, les systèmes de contrôle classiques ne peuvent compenser l'effet du déphasage et ne s'adaptent pas aux changements de dynamique provoqués par le chauffage intermittent. Les travaux de *Cho et Zaheer-Uddin* [189] étudient le contrôle du plancher chauffant en simulation et expérimentalement dans deux chambres tests comprenant 28 capteurs par pièce. En l'absence de prévisions météorologiques, un modèle de prévisions est utilisé et permet d'estimer la température extérieure future. Le logiciel TRNSYS est utilisé et le modèle du bâtiment est décrit par une fonction polynomiale de la température extérieure. Le contrôle MPC est comparé à une programmation par scénario horaire (**Tableau 24**) sur une séquence de trois jours d'hiver et indique une économie d'énergie de 20% et de plus faibles variations de température.

Auteur	Année	Modèle	Fonction à minimiser	Contrôle du confort	Simulation / expérimental	Stratégie comparée	Gain MPC	réf
Chen	2002	fonctions de transfert	confort coût	température de consigne	simulation et expérimental	on/off PI	contrôle le plus stable	[188]
Cho et Zaheer-Uddin	2003	fonction polynômiale	confort coût	intervalle de température	simulation et expérimental	scénario + PID	économie 10-20%	[189]
Privara et al.	2010	modèle d'état	confort coût	température de consigne	simulation	on/off PID loi d'eau	économie 17-29%	[190]

Verhelst et al.	2011	système d'équations différentielles ordinaires	confort coût	température de consigne	simulation	loi d'eau + PID	économie 5%	[191]
Karlsson et Hagentoft	2011	Building Physics Toolbox modèle 2R2C	confort	intervalle de température	simulation	moyenne mobile	intérêt pour du chauffage intermittent	[101]
Candanedo et Athienitis	2012	Energyplus fonctions de transfert	confort coût	température de consigne	simulation	PID	intérêt pour du couplage solaire thermique et plancher chauffant	[136]
Sourbron et al.	2013	modèle 4R2C	confort coût	intervalle de température	simulation	scénario + PID	économie 7%	[103]
Berthou	2013	modèle 6R2C	confort coût puissance	intervalle de température	simulation	scénario	économie 5%	[60]
Li et al.	2015	modèle 8R4C	confort coût	intervalle de température	simulation	PID	couplage solaire thermique/plancher chauffant : économie 17%	[192]

Tableau 23 - Publications traitant de contrôle anticipatif pour un plancher chauffant

Minimum outdoor air temperature	Operating time	Total (h)
$T \leq -10 \text{ }^\circ\text{C}$	3:00–7:00, 10:00–12:00, 17:30–21:30	10.0
$-10 < T \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}$	3:00–6:00, 10:00–12:00, 17:30–20:30	8.0
$-5 < T \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	3:00–5:30, 10:00–11:30, 17:30–20:00	6.5
$0 < T \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	3:00–5:30, 17:30–20:00	5.0
$5 < T \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$	3:00–5:00, 17:30–19:00	3.5
$10 < T \leq 15 \text{ }^\circ\text{C}$	3:00–5:00	2.0
$T > 15 \text{ }^\circ\text{C}$	–	–

Tableau 24 - Programmation horaire en fonction de la température extérieure [189]

Dans les travaux de *Privara et al.* [190], c'est un plafond radiant qui est utilisé mais le principe est le même qu'un plancher chauffant. Le bâtiment simulé comprend huit étages. Le contrôle MPC avec un horizon de 24h est comparé à trois stratégies de gestion : un régulateur on/off, une régulation par loi d'eau

(weather-compensated) qui contrôle la température de départ par ajustement d'une vanne trois voies et un PID où la température de l'eau est ajustée en fonction de l'écart à la consigne. Une économie d'énergie de 29% est réalisée avec le MPC par rapport à la loi d'eau avec des oscillations en température moins fortes et plus proches du confort (**Figure 116**).

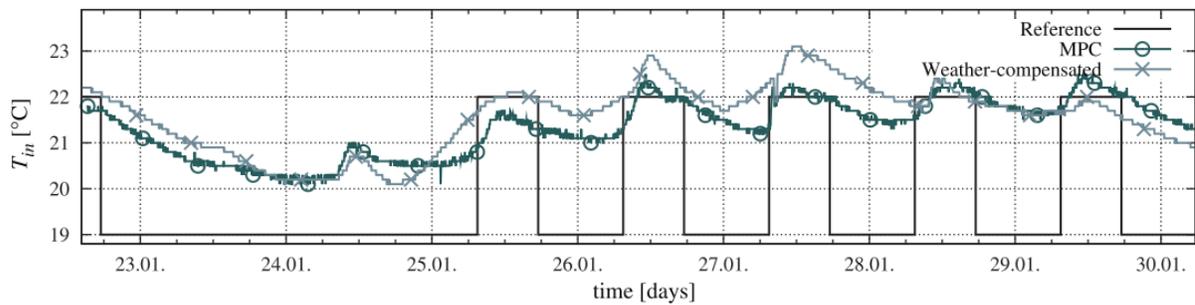


Figure 116 - Contrôle du plancher chauffant par un MPC et une loi d'eau [190]

Dans le cas de *Verhelst et al.* [191] le plancher chauffant est approvisionné en eau par une pompe à chaleur dont le compresseur est alimenté en électricité. Une loi d'eau est bien adaptée et efficace pour assurer le confort mais ne permet pas d'exploiter la capacité thermique de la dalle afin de réduire les coûts. C'est pour cette raison que le MPC est nécessaire. Les auteurs soulignent que les systèmes réactifs sont souvent électriques avec le système de tarification horaire ce qui explique pourquoi beaucoup de publications portent sur la réduction du pic de puissance appelée sur le réseau. L'horizon de prédiction est également de 24h avec un pas de temps de 30 minutes ce qui fait 48 séquences à optimiser. Son utilisation se traduit par une économie de 5% de l'énergie dépensée par le compresseur. Les travaux de *Lee et al.* [193] portant sur la régulation horaire de planchers chauffants confirment qu'un MPC est bien plus efficace. Dans la publication de *Karlsson et Hagetoft* [101] le plan optimal se fait sur la puissance injectée au plancher, cette puissance optimale est ensuite transformée en une température d'entrée correspondante. L'avantage est que l'autorégulation est permise car la puissance dépend de l'écart de température entre l'aller et le retour d'eau du plancher (régulation en température) et la mesure de la température de retour permet de compenser les erreurs de prévisions.

Le plancher chauffant est alimenté par un panneau solaire thermique dans les travaux de *Candanedo et Athienitis* [136] et Li et al. [192]. Le modèle de bâtiment simplifié est obtenu à partir d'un modèle détaillé, une seule pièce très vitrée et bien isolée est étudiée. La comparaison entre le MPC et une régulation PID est effectuée en utilisant Matlab/Simulink, les résultats sont concluants pour le bâtiment testé. Le papier de *Sourbron et al.* [103] s'intéresse à l'influence des incertitudes sur la qualité du contrôle prédictif dans le cas d'un plancher chauffant couplé à des ventilo-convecteurs en appoint. La qualité du contrôle décroît avec les incertitudes : erreur de mesure, erreur de prédiction et erreur du modèle. L'impact de ces erreurs est évalué sur la base de trois critères que sont l'énergie consommée par le plancher, celle par les ventilo-convecteurs et le confort. Les auteurs mettent en avant le potentiel du couplage entre un

système lent et rapide mais mettent en garde sur les paramètres importants. Ainsi la température initiale du plancher est primordiale. Le travail de thèse de *Berthou* [60] compare trois stratégies d'optimisation :

- optimisation de la relance : il considère que le prix de l'énergie est constant et l'optimisation se fait sur la valeur de la température de réduit de façon à minimiser l'énergie consommée tout en permettant le confort thermique à l'arrivée des occupants, cette stratégie permet jusqu'à 20% d'économie d'énergie,
- optimisation tarifaire : le prix de l'énergie varie et le pilotage du chauffage est anticipé de façon à stocker la chaleur aux heures où le prix de l'énergie est bas. Le gain économique s'élève à 8%,
- optimisation de la puissance : l'optimisation cherche à assurer le confort en limitant la puissance maximale, avec cette stratégie la puissance maximale appelée est réduite de 50%.

La bibliographie confirme, par la simulation ou expérimentalement, que le contrôle prédictif est la technique la plus intéressante comparativement aux techniques classiques pour des climats tempérés (fortes variations de températures) et des bâtiments/systèmes avec une certaine inertie.

Résumé

Le contrôle prédictif est une technique avancée basée sur la simulation des sorties futures par un modèle assurant la rétroaction. Ces méthodes ont été développées vers 1970 pour l'industrie pétrochimique où la plupart des procédés ont des constantes de temps longues. Le MPC est bien adapté aux systèmes multivariables comme c'est le cas pour le bâtiment où il n'est pour l'instant appliqué qu'en recherche et développement. La bibliographie démontre un potentiel intéressant notamment lorsque l'inertie du système bâtiment est importante.

3. Stratégies de gestion et mise en application de la boucle de contrôle complète sur la plateforme de démonstration SYNERGI

Les modèles identifiés à l'aide des campagnes de mesures doivent être utilisés dans un contrôleur prédictif à modèle interne. La stratégie est d'exploiter au maximum le plancher chauffant en déterminant le moment de la relance. Les ventilo-convecteurs sont utilisés en appoint le moins possible car plus coûteux et moins performants pour le confort au vu de leurs vitesses d'air élevées. Le contrôle anticipatif est comparé à deux stratégies de gestion de référence couramment utilisées. Elles correspondent à deux façons de régler le ralenti : dans la première il est assuré par les ventilo-convecteurs tandis que le plancher garantit une température de base en permanence avec une loi d'eau. Dans la seconde, c'est le plancher qui assure le confort en occupation. Un scénario de fonctionnement du plancher permet de définir des périodes de ralenti et des périodes d'occupation avec une heure de relance fixée. Ainsi trois stratégies de gestion sont étudiées pour le plancher chauffant :

- **contrôleur de référence 1** : loi d'eau uniquement,
- **contrôleur de référence 2** : ralenti de nuit et relance fixe,
- **contrôleur anticipatif** : pilotage déterminé par le contrôleur MPC.

L'intérêt du contrôleur prédictif pour la salle de conférence de la plateforme SYNERGY est vérifié par la simulation et l'expérimentation à la partie 4.

3.1. Contrôleur de référence avec loi d'eau uniquement

La plateforme SYNERGI fait partie d'un bâtiment d'enseignement de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Bordeaux et est donc occupée par des étudiants et des enseignants pendant l'année scolaire. Pour piloter le bâtiment au quotidien, une gestion technique du bâtiment est déjà en place. Ce système de régulation qui sera nommé « par défaut » comprend également des capteurs, des actionneurs et une interface de gestion. Le premier contrôleur de référence correspond à la régulation par défaut. Le plancher chauffant est régulé par une loi d'eau de façon à assurer une température de base d'environ 16°C pendant toute la saison de chauffe. En occupation, ce sont les ventilo-convecteurs en appoint qui régulent la température de la pièce (**Figure 117**). Il n'y a aucune anticipation.

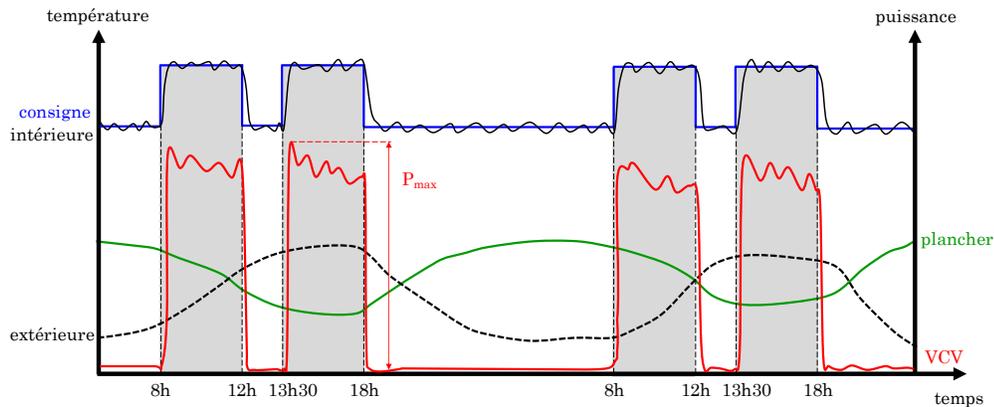


Figure 117 - Principe du premier contrôleur de référence

3.1.1. Plancher chauffant

La loi d'eau peut être ajustée via l'interface de gestion (**Figure 118**) en modifiant les valeurs de température de départ pour quatre températures extérieures. La loi d'eau est réglée de façon à assurer en permanence une température de base qui correspond au réduct nocturne. Ainsi la pompe du plancher chauffant est programmée pour fonctionner en continu (**Tableau 25**). La puissance délivrée par le plancher dépend uniquement de la température extérieure : elle augmente la nuit et diminue la journée sans tenir compte des périodes d'occupation. L'eau chaude provient du réseau de chaleur de l'Université et la température de départ est ajustée par action sur la vanne trois voies montée en mélange (**Figure 38**) et pilotée par un PID auto-adaptatif.

Un régulateur PID utilise une action de régulation proportionnelle, intégrale et dérivée qui repose sur le calcul de l'erreur $\varepsilon(t)$ entre la sortie mesurée $\tilde{y}(t)$ et la consigne $r(t)$:

- la régulation proportionnelle calcule la commande en multipliant l'erreur par un gain K_p , quand la valeur de ce gain augmente la précision est améliorée mais la stabilité diminue,

- la régulation intégrale calcule la commande en intégrant l'erreur et en la divisant par un gain K_i , l'augmentation de ce gain réduit l'erreur statique mais diminue la stabilité et provoque des dépassements,
- la régulation dérivée calcule la commande en dérivant l'erreur et en la multipliant par un gain K_d , cela conduit à améliorer la stabilité et permet d'atteindre plus rapidement la consigne.

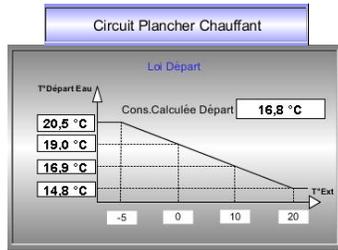


Figure 118 - Réglage de la loi d'eau sur le logiciel de supervision par défaut

	00:00	06:00	12:00	18:00	23:59
Lundi	Marche	Marche	Marche	Marche	Marche
Mardi	Marche	Marche	Marche	Marche	Marche
Mercredi	Marche	Marche	Marche	Marche	Marche
Jeudi	Marche	Marche	Marche	Marche	Marche
Vendredi	Marche	Marche	Marche	Marche	Marche
Samedi			Marche		
Dimanche			Marche		

Tableau 25 - Programmation de la pompe du plancher chauffant pour le premier contrôleur de référence

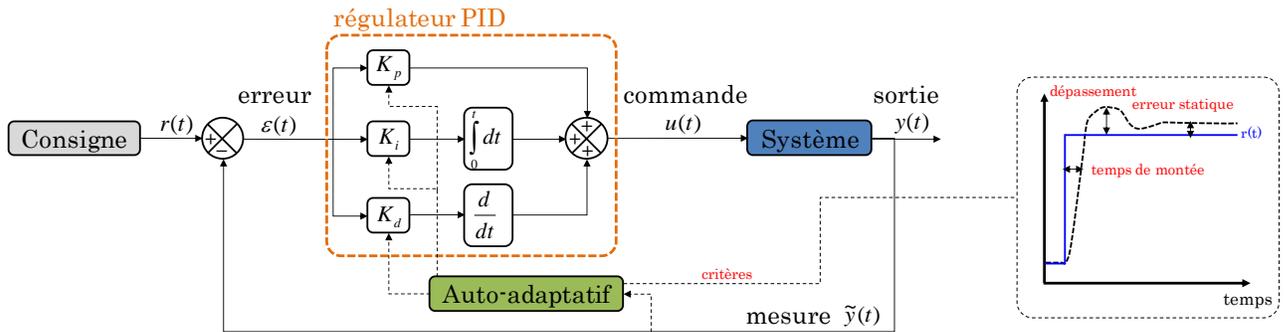


Figure 119 - Principe de fonctionnement d'un PID auto-adaptatif

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{Eq.49})$$

La combinaison des trois régulations (Eq.49) permet de conjuguer les avantages de chacun et offre une régulation satisfaisante pour peu que les réglages adéquats soient trouvés. Il existe plusieurs méthodes pour fixer les différentes valeurs de gains (Nyquist, Broïda, Ziegler-Nichols [194]) mais les réglages peuvent également se faire à la main de façon empirique. La spécificité d'un PID auto-adaptatif est que les valeurs K_p , K_i et K_d s'ajustent automatiquement. Les gains sont modifiés à partir de l'analyse de la sortie mesurée $\tilde{y}(t)$ du système jusqu'à obtenir le comportement souhaité en terme de temps de montée, de dépassement et d'erreur statique (Figure 119). Ces logiques basées sur des méthodes heuristiques sont propres à chaque fabricant et tiennent généralement du secret industriel. L'effet du PID auto-adaptatif qui

permet la régulation de la température de départ du plancher chauffant est visible sur la **Figure 120**. Dans ce cas de figure la consigne qui suivait une loi d'eau est forcée à 35°C à 9h25 et les valeurs de gains s'ajustent jusqu'à 12h où la température se stabilise. Un PID auto-adaptatif a une période d'apprentissage et réagit plus vite lorsque les changements de consigne se font de façon régulière comme en semaine. Quand la consigne change de façon imprévue il faut plus de temps au régulateur pour assurer le suivi de consigne. Ce phénomène est notamment visible le lundi matin où le temps de stabilisation lors de la relance du chauffage est plus grand que les autres jours de la semaine du fait du ralenti le week-end.

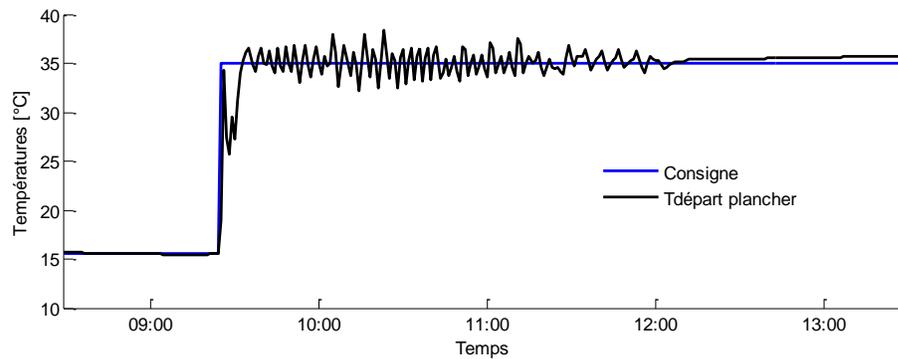


Figure 120 - *Suivi de consigne avec un PID auto-adaptatif*

3.1.2. Ventilo-convecteurs

Les ventilo-convecteurs jouent le rôle de système d'appoint en période d'occupation avec une température de consigne de 20°C qui est définie dans l'interface de gestion. Normalement une commande murale permet aux occupants de moduler via une molette la température par un décalage de la consigne entre +3°C et -3°C. Pour pouvoir comparer les stratégies entre elles et s'affranchir des modifications de l'utilisateur, le décalage de la consigne est forcé à une valeur nulle (**Figure 121**). La batterie chaude du ventilo-convecteur est alimentée en eau par le réseau de chaleur et une vanne trois voies (**Figure 37**) assure une température d'entrée de 35°C avec une régulation de type chronoproportionnelle. Les périodes d'occupations sont définies par un planning via l'interface de gestion (**Tableau 26**). Il est considéré que la salle est occupée en semaine de 8h à 12h et de 13h30 à 18h. Le suivi de consigne se fait par action sur la vitesse de soufflage des ventilo-convecteurs comme détaillé à la partie 2.1.2 du chapitre II. La rétroaction est effectuée par la mesure de la température intérieure au niveau du boîtier de commande mural et correspond au capteur 2 sur la **Figure 40**.

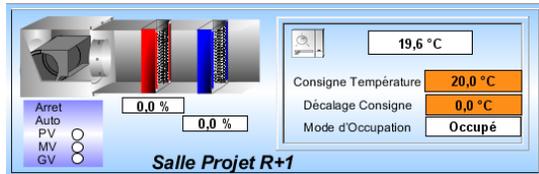


Figure 121 - Réglage de la consigne et forçage du décalage des VCV

	00:00	06:00	12:00	18:00	23:59
Lundi	Inoccupé	Occupé	Ino	Occupé	Inoccupé
Mardi	Inoccupé	Occupé	Ino	Occupé	Inoccupé
Mercredi	Inoccupé	Occupé	Ino	Occupé	Inoccupé
Jeudi	Inoccupé	Occupé	Ino	Occupé	Inoccupé
Vendredi	Inoccupé	Occupé	Ino	Occupé	Inoccupé
Samedi	Inoccupé				
Dimanche	Inoccupé				

Tableau 26 - Programmation de l'occupation pour les VCV

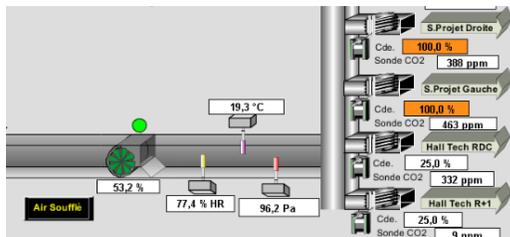


Figure 122 - Forçage de la CTA avec la supervision par défaut

	00:00	06:00	12:00	18:00	23:59
Lundi	Arrêt	Marche	Marche	Arrêt	Arrêt
Mardi	Arrêt	Marche	Marche	Arrêt	Arrêt
Mercredi	Arrêt	Marche	Marche	Arrêt	Arrêt
Jeudi	Arrêt	Marche	Marche	Arrêt	Arrêt
Vendredi	Arrêt	Marche	Marche	Arrêt	Arrêt
Samedi	Arrêt				
Dimanche	Arrêt				

Tableau 27 - Programmation de la pompe du plancher chauffant pour le second contrôleur de référence

3.1.3. Centrale de traitement d'air

La centrale de traitement d'air double flux permet de préchauffer l'air neuf provenant de l'extérieur à partir de la chaleur récupérée sur l'air extrait de la pièce. Elle est prise en compte par une puissance négative puisque l'air est soufflé à une température inférieure à celle de la pièce. Normalement l'ouverture des volets est commandée par la mesure du taux de CO₂ mais pour les besoins de l'étude, l'ouverture des volets est forcée à 100% (Figure 122) selon le même planning que les ventilo-convecteurs.

3.2. Contrôleur de référence avec ralenti de nuit et relance fixe

La régulation par défaut est également utilisée pour le deuxième contrôleur de référence. Ce contrôleur correspond à une autre stratégie fréquemment utilisée. Le plancher chauffant est cette fois sollicité en fonction de l'occupation avec une relance fixe (Figure 123) définie par l'utilisateur. Hors occupation, l'inertie du plancher permet une descente en température lente pour rester au dessus de la température de base et au besoin les ventilo-convecteurs s'allument si la température descend en dessous de 16°C hors occupation. Le fonctionnement de la centrale de traitement d'air et des ventilo-convecteurs est le même que la première régulation de référence. En revanche, le fonctionnement du plancher chauffant est maintenant asservi à un planning par contrôle de l'allumage de la pompe : en semaine il est allumé toute la journée de 6h à 18h avec une relance anticipée de 2h par rapport à l'occupation prévue à 8h le matin. Pour tenir compte de la décharge thermique du week-end, le plancher chauffant est lancé encore une heure plus tôt, à 5h le lundi matin (Tableau 27). Lorsqu'il est allumé, la température de départ est calculée par rapport à

une loi d'eau dont le réglage est modifié pour assurer une température d'environ 20°C dans la salle. Quand le plancher chauffant est éteint, la pompe ne tourne pas et le capteur indique en réalité la température d'eau à l'arrêt dans le tuyau dont la température est environ également à celle de l'atelier adjacent à la salle de conférence SYNERGI. L'intérêt de cette stratégie par rapport à la première est de mieux exploiter l'inertie du plancher pour minimiser l'utilisation des ventilo-convecteurs. Un aspect anticipatif peut être considéré dans cette stratégie puisque le plancher chauffant est relancé en amont des périodes d'occupation. Cependant, cette relance est fixe et ne dépend pas des conditions extérieures puisqu'elle est basée sur l'expérience du gestionnaire.

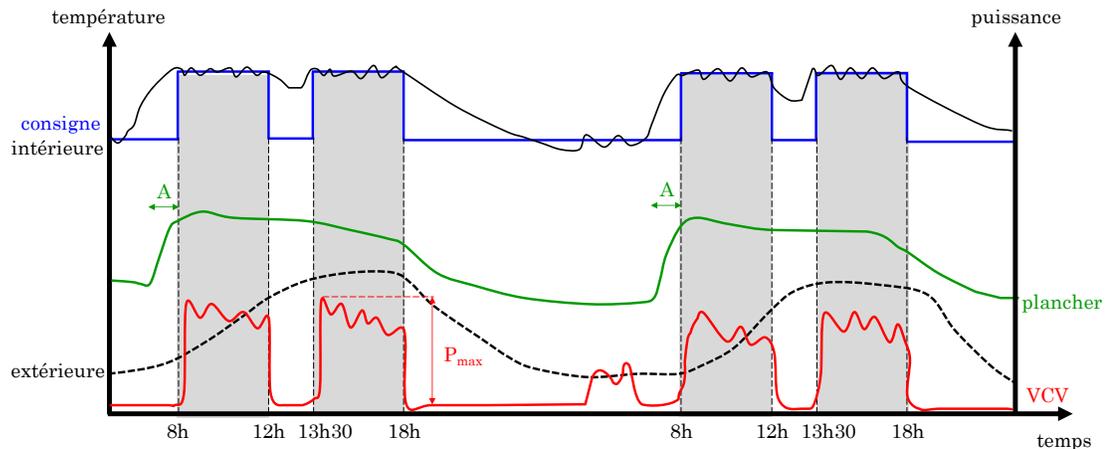


Figure 123 - Principe du second contrôleur de référence

3.3. Contrôleur anticipatif

Cette partie présente la structure de contrôle complète qui a été pensée pour la mise en place du pilotage prédictif. Jusqu'alors, le système de gestion par défaut (capteurs, actionneurs, supervision) a été utilisé pour les campagnes de mesures réalisées pour l'identification des modèles au chapitre III et pour les deux contrôles de référence. Afin de pouvoir modifier l'emplacement des capteurs et avoir la main sur toute la chaîne de gestion, de l'instrumentation additionnelle a été ajoutée en partenariat avec la société Deltadore. Pour ce qui est du contrôle prédictif, une box dialoguant avec un optimiseur a été mise en place avec la société Vesta-System. La **Figure 124** présente l'architecture générale de l'installation :

- un ensemble de **capteurs** est mis en place en parallèle de ceux existants, ils permettent de connaître l'état du bâtiment à chaque instant (température), les conditions extérieures (température, ensoleillement) et l'action des occupants (présence, ouvertures des fenêtres/portes),
- des **actionneurs** déjà présents pour le système de régulation par défaut permettent d'agir sur les systèmes : vanne trois voies pour le plancher chauffant, volets pour la CTA et relais pour les ventilo-convecteurs (vitesses de soufflage, mode chaud/mode froid),
- une **box** (**Figure 125**) centralise les informations des capteurs et envoie les commandes aux actionneurs. Elle assure la couche réactive du contrôle directement mais aussi la couche anticipative par application de la commande optimale du plancher chauffant reçue de

l'optimiseur à distance,

- un **optimiseur ou scheduler** à distance reçoit les informations des capteurs via la box, traite ces données et calcule la séquence de commande optimale (température de départ du plancher) qui est envoyée vers la box puis à l'actionneur (régulateur PID de la vanne trois voies).
- une **clé ou dongle USB** permet de recevoir les données provenant des capteurs, la communication se fait via le protocole propriétaire X2D ou X3D pour les capteurs les plus récents, une routine interne permet de rendre compatible ce protocole avec la box,
- des **boîtiers Modbus** assurent la communication entre la box et les actionneurs qui sont commandés en 0-10V ou binaire,
- un **switch Ethernet** permet l'envoi des données aux actionneurs via une **passerelle Ethernet** et le protocole Modbus TCP/IP. Il permet également la communication entre la box sur le terrain et l'optimiseur à distance,
- des **borniers de connexion** (Figure 126) permettent aux actionneurs de recevoir soit les commandes provenant de la supervision par défaut soit celles du contrôleur prédictif. Cela permet de comparer les stratégies et de remettre rapidement le bâtiment en fonctionnement normal par un simple branchement lorsque les essais sur le contrôle prédictif sont terminés.

Le scheduler Vesta-System intègre le modèle E identifié à la partie 4 du chapitre III.

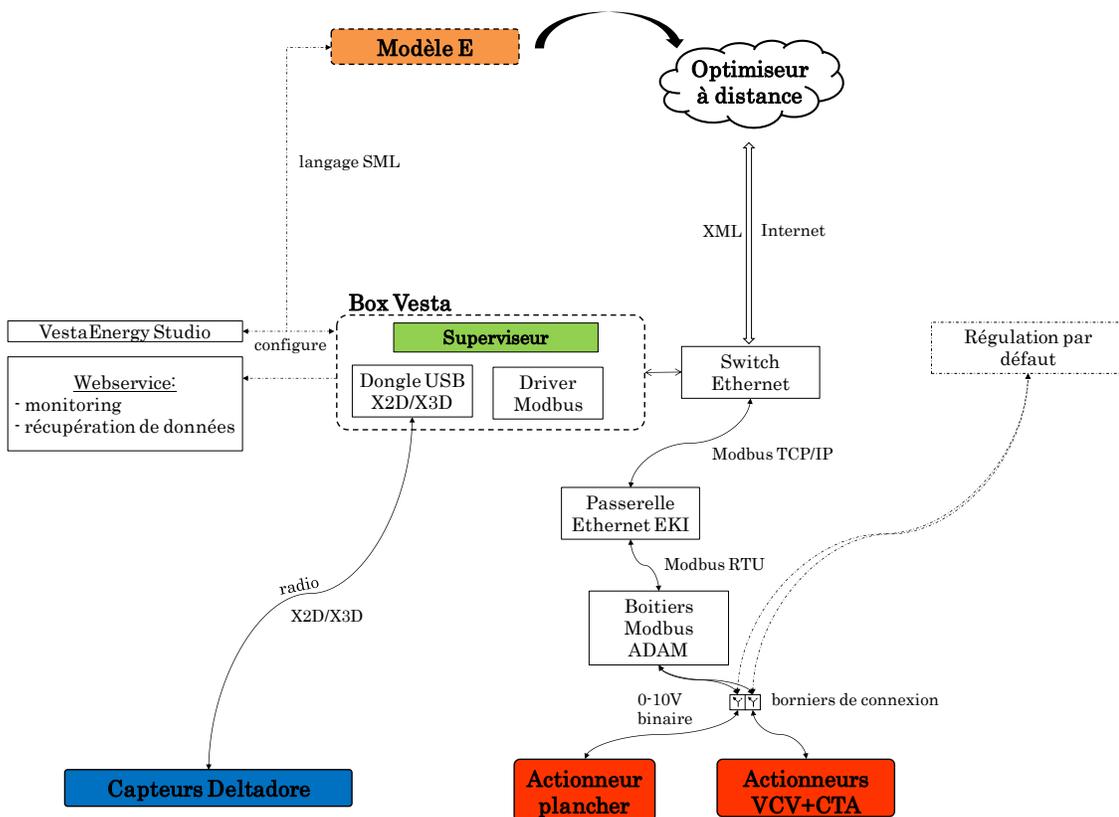


Figure 124 - Architecture de la chaîne de contrôle pour la plateforme SYNERGI

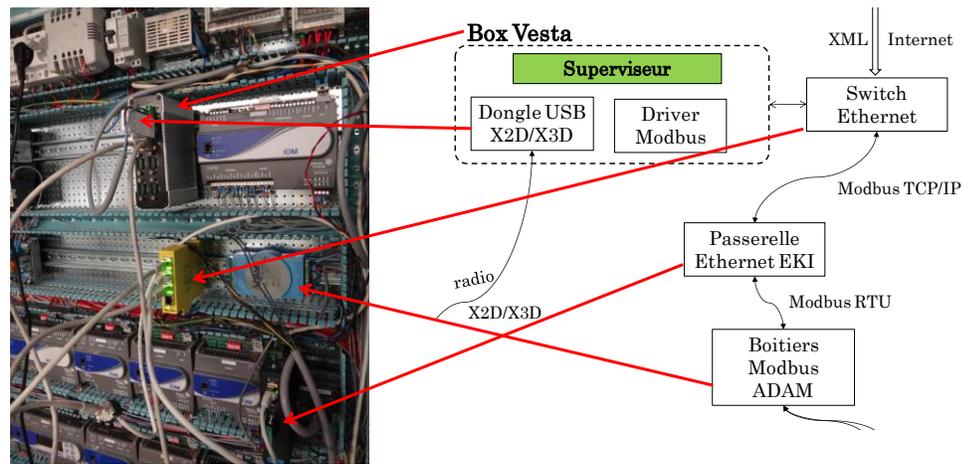


Figure 125 - Photographie de l'installation au niveau de l'armoire électrique

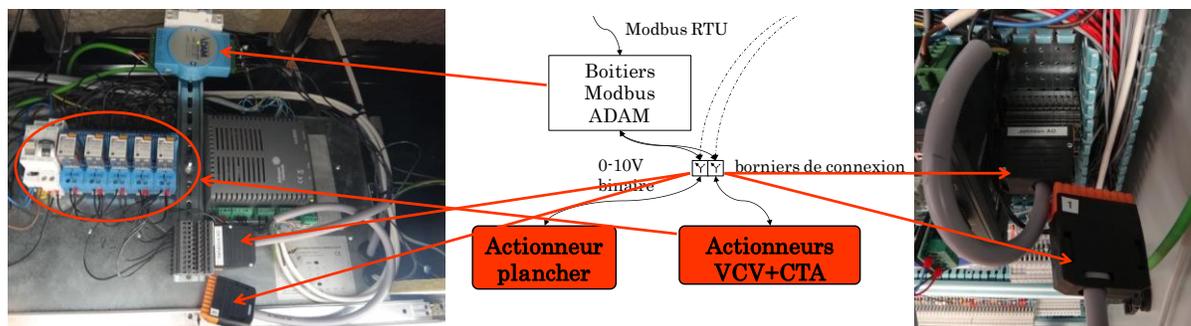


Figure 126 - Photographie de l'installation au niveau des actionneurs des ventilo-convecteurs

Comme précisé par Bénard et al. [172, 173], les techniques de contrôle basées sur la programmation et l'intelligence logicielle font face à de nombreux freins de la part des constructeurs et des utilisateurs à cause des changements de pratiques que cela demande et de l'évolution du savoir-faire par rapport aux méthodes actuelles. Ce qui est mis en place sur la plateforme SYNERGI correspond à la façon la plus simple d'introduire le contrôle optimal sans changer fondamentalement l'installation. En effet, le contrôle se fait par un régulateur PID classique dont la consigne provient d'une optimisation réalisée par un calculateur à distance.

3.3.1. Données mesurées et actions sur les systèmes

a. Capteurs et actionneurs

Du matériel Deltadore est installé sur la plateforme pour mesurer les grandeurs d'intérêt, les actionneurs sont ceux déjà installés sur la plateforme (Tableau 28 et Figure 127).

	Instrumentation	entrée(I)/sortie(O) analogique(A)/binaire(B)	Qté	Symbole sur plan	Matériel	Photo
Capteurs	détecteur d'ouverture	BI	7	■	mini cox	
	capteur de flux solaire	AI	2	■	SE 2000	
	sonde de température extérieure	AI	1	●	STE	
	température intérieure	AI	9	●	Tybox 5100 modifiée	
	température de réseau (plancher chauffant)	AI	2	●	ref : 6090002	
	détecteur de mouvements	BI	2	↘	IRSX	
Superviseur	Box	-	1	BOX	Vestabox	
Actionneurs	vanne 3 voie plancher chauffant	AO	1	V3V	Johnson Control VA-7746-1001	
	vanne 3 voie batterie chaude/froide VCV	BO	2	VCVva	Johnson Control VA-7071-23	
	vitesses du ventilateur VCV	BO	3	VCVvi	relais TUC0311	
	volets bouches CTA double flux	AO	2	CTA	Belimo LM24A-SR	

Tableau 28 - Capteurs et actionneurs



Figure 127 - Placement des capteurs

Certains capteurs servent directement au contrôle alors que d'autres ne sont installés qu'à titre informatif pour expliquer un éventuel comportement inattendu. C'est notamment le cas des détecteurs d'ouverture qui sont placés sur la porte d'entrée donnant sur le couloir, sur la porte de secours conduisant à l'extérieur, sur la porte permettant l'accès à l'atelier non chauffé et sur chacune des quatre fenêtres. De même, des capteurs de température sont disposés dans les pièces adjacentes à la salle SYNERGI de façon à faire des corrélations en cas d'ouverture de porte par exemple. Trois capteurs de température sont disposés pour tenter de tenir compte des hétérogénéités dans le volume de la salle SYNERGI. La sonde de température extérieure est placée en toiture au dessus de l'atelier à l'abri du rayonnement solaire. Les trois capteurs de flux solaire sont disposés sur un mat de mesure et orientés dans les directions sud, ouest et est. Ils mesurent le flux hémisphérique solaire global. Les températures de départ et de retour du plancher chauffant sont mesurées par deux sondes de température de contact placées entre le tuyau en cuivre et la gaine isolante. Deux capteurs de mouvements situés dans les coins opposés permettent de détecter l'occupation pour la mise en route des ventilo-convecteurs et la centrale de traitement d'air. Le choix est fait d'utiliser des capteurs sans fil pour faciliter la pose, cependant il faut s'assurer que la communication de tous les capteurs est possible malgré les obstacles (murs, cloisons). Pour certains bâtiments l'implantation des capteurs peut être délicate et nécessiter l'utilisation de « répéteurs » pour reporter le signal d'un capteur éloigné. Il est à noter l'existence du projet de recherche Community Retrofit through Sustainable Technology [195] où un outil a été développé pour modéliser le réseau de capteurs sans fils et déterminer la configuration optimale en minimisant le nombre de répéteurs. Dans notre

situation la box reçoit les données des capteurs par onde radio via le dongle USB avec une portée de 30m. Après plusieurs essais la box est placée dans le bureau adjacent à la salle SYNERGI.

b. Interfaçage avec VestaEnergy Studio

Le réseau de capteurs et d'actionneurs est configuré à l'aide du logiciel VestaEnergy Studio qui est un logiciel d'aide à la décision pour le pilotage de systèmes énergétiques et qui sert donc également à définir les lois de pilotage réactives et anticipatives. Dans un premier temps, l'architecture des capteurs est définie dans l'outil en positionnant virtuellement les capteurs et actionneurs sur un plan suivant le découpage des pièces du bâtiment. Ensuite une sélection du type de protocole de communication (X2D/X3D pour les capteurs, Modbus pour les actionneurs) est opérée suivie de la synchronisation qui permet de vérifier que les données sont bien reçues. Pour finir, les capteurs sont placés sur site. Une vérification de la bonne réception de l'ensemble des informations des capteurs est réalisée. Ces données sont ensuite visibles et récupérables via un webservice.

3.3.2. Modèle interne

Le modèle interne sert pour le contrôle prédictif du plancher afin de fournir un plan optimal de consigne de température de départ au régulateur PID de la vanne trois voies (**Figure 128**).

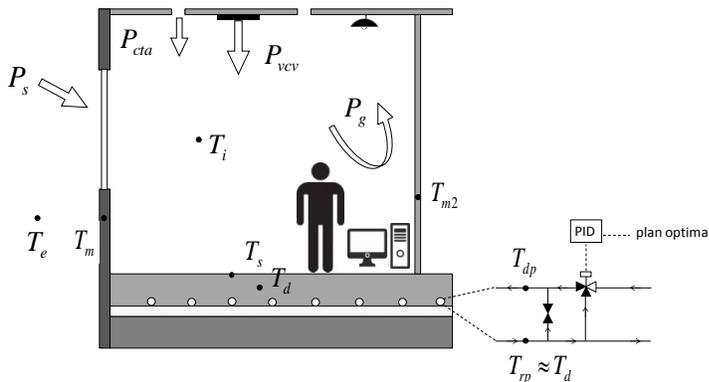


Figure 128 - Représentation schématique

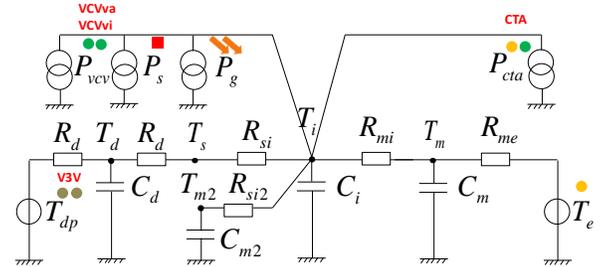


Figure 129 - Modèle E modifié et mesures associées pour le contrôle

a. Utilisation des mesures dans le modèle

Les entrées du modèle candidat sont calculées à partir des données mesurées en temps réel par les capteurs présentés à la section précédente (**Figure 129**) :

- plancher chauffant : température de départ T_{dp} imposée au niveau du plancher, la puissance est ensuite calculée avec les mesures de température sur le tuyau aller et retour du plancher, le débit et la capacité de l'eau sont des constantes connues (Eq.50) :

$$P_{pl} = \dot{m}C_p (T_{dp} - T_{rp}) \quad (\text{Eq.50})$$

- le terme P_g correspond aux apports liés aux occupants (P_{occ}) éventuellement présents dans la salle, aucun appareils électriques n'est considéré puisque cette salle est habituellement dédiée aux projets en groupe qui ne nécessitent pas d'ordinateurs. Le nombre d'occupants est connu et cette puissance est conditionnée par le détecteur de présence (Eq.51) :

$$P_g = n \times P_{occ} \quad (\text{Eq.51})$$

- le terme P_{vcv} correspond aux ventilo-convecteurs, le terme T_{vcv} est la température de l'air soufflé par les ventilo-convecteurs et est mesurée par un capteur de température placé dans la grille de soufflage (**Figure 130**), le débit \dot{m} dépend de la vitesse de soufflage (Eq.52) :

$$P_{vcv} = \dot{m} C_p (T_{vcv} - T_i) \quad (\text{Eq.52})$$

- le terme P_{cta} correspond à l'effet de la centrale de traitement d'air qui peut se traduire par une puissance de chauffage si l'air extérieur est à une température supérieure à la température de l'air intérieur (cas estival), ou une puissance de refroidissement si l'air extérieur est à une température inférieure à l'air ambiant (cas hivernal). Le terme eff représente l'efficacité de l'échangeur (Eq.53) :

$$P_{cta} = (1 - eff) \times \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (\text{Eq.53})$$

- la température extérieure T_e est mesurée par la sonde extérieure,
- le terme P_s correspond aux apports solaires entrants par les vitrages. Son calcul est détaillé à la partie suivante.

Les autres capteurs ne sont présents qu'à titre informatifs et ne servent pas directement dans le modèle.



Figure 130 - Capteur de température placé au niveau de la grille de reprise d'un VCV

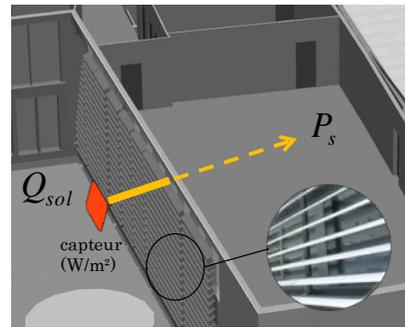


Figure 131 - Atténuation des apports solaires par les brises soleil

b. Hypothèse simplificatrice pour les apports solaires

Dans le modèle E, le terme P_s traduit l'effet des apports solaires entrants par les vitrages de la façade ouest et transmis au nœud d'air. Pour calculer ce terme, un capteur de flux solaire orienté ouest sur le mat de mesure, donne le flux solaire global incident sur la paroi en W/m^2 . Pour connaître la part de cette énergie qui entre effectivement dans la pièce il est nécessaire de pouvoir modéliser l'effet des brises soleil. L'objectif est d'essayer la méthode employée par *Karlsson et Hagentoft* [101] qui consiste simplement à utiliser un coefficient de réduction égal à la fraction de l'énergie incidente qui traverse l'ensemble brises soleil+vitrage. Cela revient donc à trouver un vitrage dont le facteur solaire est équivalent à la combinaison de l'atténuation due aux brises soleil et au vitrage réel dont le facteur solaire est de 0,56. Pour déterminer la valeur de ce coefficient, le modèle de conception réalisé avec Pleiades+COMFIE décrit à la partie 3.2 du chapitre III est utilisé. Une première simulation annuelle avec le fichier météo d'Agen est réalisée dans la configuration réelle avec brises soleil et vitrage de facteur solaire égal à 0,56. Le fichier de résultat permet de récupérer les gains solaires annuels au pas de temps horaire $P_s(t)$. Une deuxième simulation annuelle est réalisée en enlevant les brises soleil et en fixant le facteur solaire des vitrages à 1 (**Figure 131**). De cette façon les gains solaires contenus dans le fichier de résultats correspondent au flux solaire incident sur la façade ouest $Q_{sol}(t)$. La valeur du facteur solaire équivalent $\alpha(t)$ est obtenue en divisant le flux solaire incident par les gains solaires. Le calcul de cette valeur est réalisé seulement lorsque le flux solaire incident est supérieur à 100 W pour éviter d'avoir des valeurs aberrantes ou une erreur due à une division par 0. Les résultats montrent ainsi que selon le jour de l'année et l'heure de la journée, ce coefficient varie entre 0,05 et 0,27 puisque l'effet des brises soleil dépend de la hauteur du soleil. Le choix est assumé d'une valeur moyenne de 0,14 pour fixer le facteur solaire (**Figure 132**).

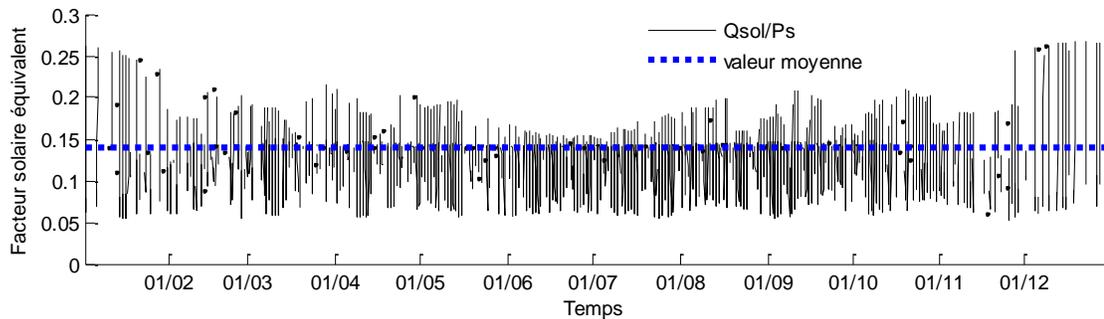


Figure 132 - Calcul du facteur solaire équivalent pour la prise en compte des brises soleil

Afin de vérifier cette hypothèse simplificatrice une simulation est réalisée avec le modèle E en période estivale (juillet/août) où l'influence des apports solaires est dominante contrairement à l'hiver où la contribution des apports solaires est moindre en comparaison de la puissance du plancher chauffant. Cette simulation prend en entrée soit les apports solaires calculés par le modèle de conception avec brises soleil, soit ceux calculés avec l'hypothèse simplificatrice sans brises soleil et avec un vitrage de facteur solaire 0,14.

Les écarts obtenus sont très faibles (<2%) et ne justifient donc pas l'emploi d'un modèle d'apports solaires plus complexe (**Figure 133**). De plus, cela est en accord avec la philosophie de départ d'utiliser de la modélisation très simplifiée. Les apports solaires sont donc calculés comme une fraction du flux solaire incident Q_{sol} mesurée sur la façade ouest vitrée (Eq.54).

$$P_s = \alpha \times Q_{sol} \quad (\text{Eq.54})$$

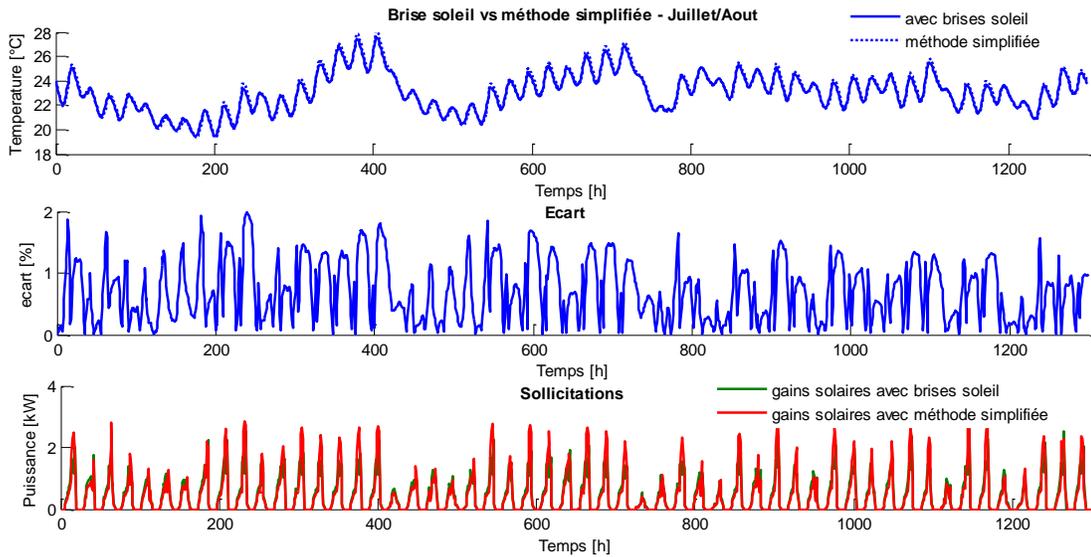


Figure 133 - Validation de la méthode du facteur solaire équivalent

c. Implémentation du modèle dans VestaEnergy Studio

Le modèle qui sert au contrôle prédictif est également implémenté via le logiciel VestaEnergy Studio et est écrit en langage SML. Il permet d'établir la connexion entre la commande optimale en sortie du modèle et l'actionneur du plancher chauffant. Le modèle ne peut pas être directement intégré avec le formalisme du modèle d'état et doit être réécrit sous forme linéarisée. La température de sortie est fonction des autres températures et ne doit pas être reliée directement à une capacité pour des questions de convergence propres à l'outil. Pour cela, un nœud de température T_{air} et une résistance très faible R_{air} égale à 1.10^{-5} m².K/W relié au nœud d'air T_i ayant une capacité thermique C_i , sont rajoutés. Ainsi, un modèle qui reste strictement équivalent au modèle E identifié pour le contrôle et validé à la partie 3.3.2.a est obtenu. Le détail des calculs pour la linéarisation du modèle est donné à l'**annexe F**.

Dans VestaEnergy Studio des « blocs » sont assemblés pour créer un modèle et sont regroupés dans une « composition » (**Figure 134**) qui traduit uniquement la partie anticipative du contrôle. Le bloc « weather » fourni les prévisions météorologiques pour le site de Mérignac (aéroport de Bordeaux), il alimente les blocs correspondant aux modèles du bâtiment et de la centrale de traitement de l'air avec la prévision de

température extérieure et le bloc de calcul d'apports solaires avec la prévision du rayonnement solaire. Le bloc « presence » permet de définir les plages horaires d'occupation (valeur 0 pour inoccupation et 1 en occupation). Il alimente le bloc de la centrale de traitement d'air, celui des apports des occupants et également le bloc qui génère les consignes de température. Le plan optimal de température de départ du plancher est calculé à partir d'une contrainte sur la température d'air intérieur avec le bloc « intervalconstraintprofile » et d'une contrainte de minimisation de l'énergie consommée par le plancher chauffant avec les blocs « Ppl », « power2energy » et « minimize ».

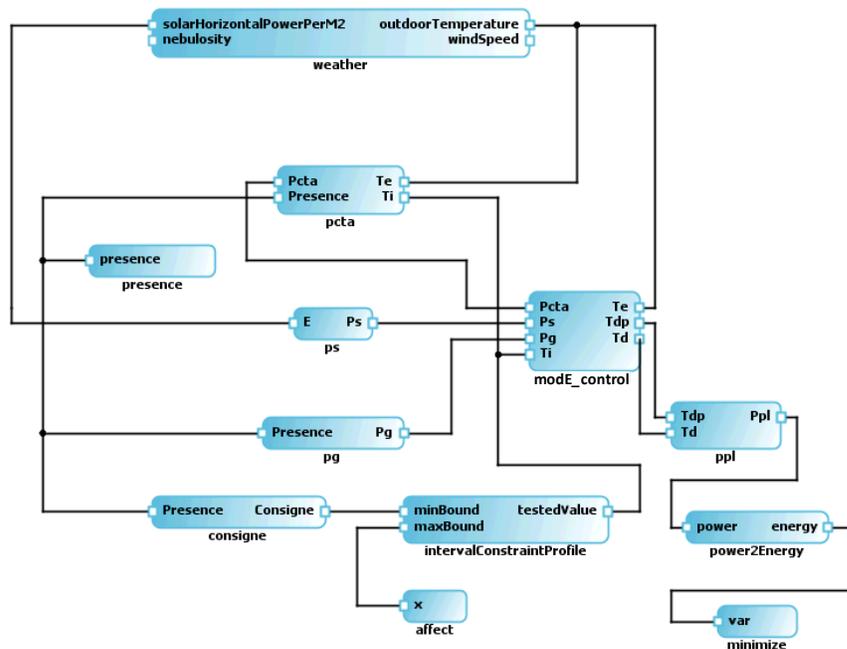
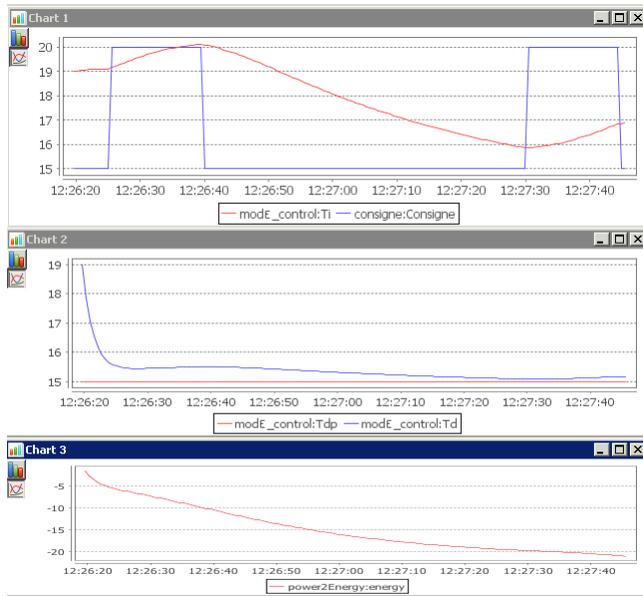
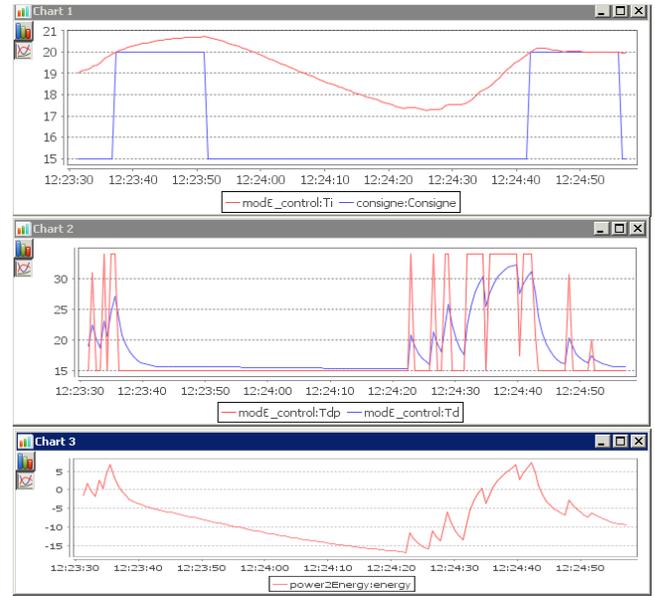


Figure 134 - Composition du modèle de contrôle prédictif dans l'outil VestaEnergy Studio

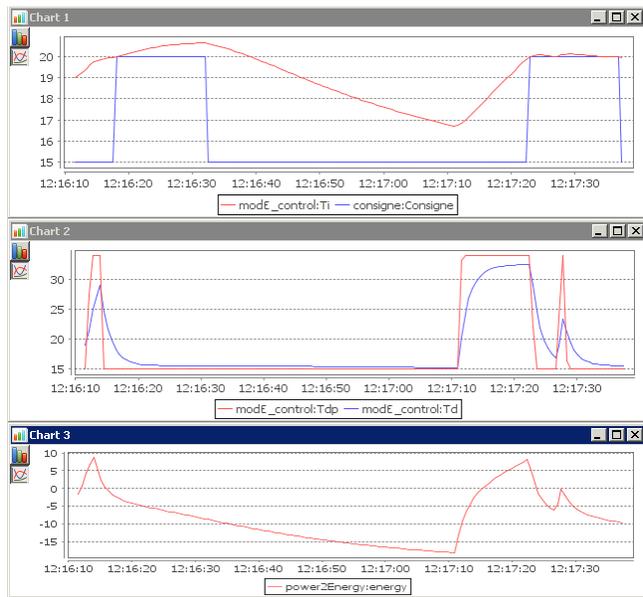
Pour vérifier le fonctionnement de l'optimiseur, des tests sont réalisés pour générer des plans de commande optimale en temps réel, les résultats sont donnés **Figure 135**. Pour ce cas là uniquement, la température de départ du plancher peut varier entre 15°C et 35°C. Dans le premier cas, seule la minimisation de l'énergie est appliquée, il n'y a pas de contrainte sur la température intérieure. Le résultat est celui attendu : la température de départ de consigne reste à sa valeur minimale de 15°C et l'élévation en température est uniquement due aux apports et à la température extérieure. Dans le deuxième cas, c'est l'inverse, il n'y a pas de minimisation de l'énergie mais la température intérieure est contrainte à la valeur de consigne. Cette fois-ci une anticipation de la commande est observée puisque la température de départ du plancher augmente pour assurer la température minimale de consigne. Le troisième cas correspond à la composition de la **Figure 134** mise en œuvre pour le contrôle prédictif. La contrainte se fait à la fois sur la consommation d'énergie et la température intérieure. Le plan optimal est alors modifié puisque la température minimale de consigne est assurée avec une sollicitation moindre du plancher chauffant.



(a)



(b)



(c)

Figure 135 - Tests de génération de plan de commande optimale. Minimisation de l'énergie uniquement (a), température intérieure contrainte uniquement (b), minimisation de l'énergie et température intérieure contrainte (c)

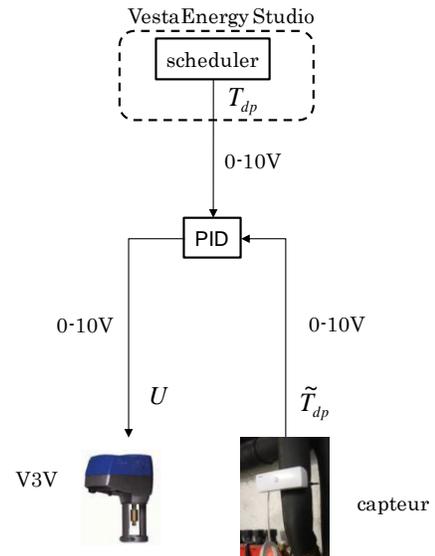


Figure 136 - Contrôleur PID externe pour application du plan optimal

Dans le logiciel, la commande optimale T_{dp} en sortie de la composition est ensuite connectée à l'actionneur correspondant à la vanne trois voies et traduit cette température en un signal 0-10V qui sert de consigne au régulateur PID de la vanne trois voies. Avec la régulation par défaut, le PID était interne au logiciel de supervision ce qu'il n'est pas possible de faire avec l'outil VestaEnergy Studio en l'état de développement actuel. Ainsi, pour les besoins du projet un régulateur PID « externe » acceptant en entrée et en sortie un signal 0-10V, a donc été installé (**Figure 136**).

3.3.3. Logique de contrôle

La stratégie de gestion de chauffage est d'utiliser le plancher chauffant en base et les ventilo-convecteurs en appoint. Le plancher chauffant est un système capacitif (temps de réponse long) alors que les ventilo-convecteurs sont des systèmes réactifs (effet rapide). Le pilotage du plancher s'effectue par contrôle anticipatif à partir des prévisions alors que celui des ventilo-convecteurs et de la centrale de traitement d'air se fait en réactif avec les mesures en temps réel. L'anticipation s'opère par rapport à l'occupation prévue et aux conditions extérieures. Ainsi le temps de relance est variable (**Figure 137**) et optimisé selon la météo prévue et le passé thermique de la pièce.

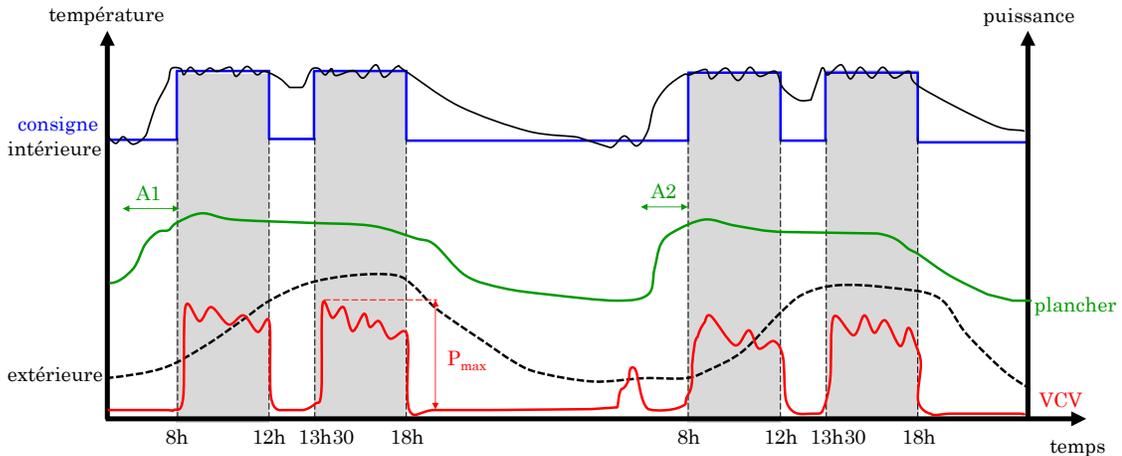


Figure 137 - Principe du contrôleur anticipatif

a. Anticipatif - Plancher chauffant

La partie anticipative concerne le pilotage du plancher chauffant uniquement. L'acquisition des données mesurées se fait au pas de temps 10 minutes et l'horizon de prédiction est de 24h. Dans notre cas le plancher chauffant est alimenté en eau chaude par un réseau de chaleur fonctionnant avec des chaudières gaz, le prix de l'énergie est donc le même quelque soit l'heure. Le rôle du scheduler est de déterminer la séquence optimale de température de départ T_{dp} (la commande) du plancher pour des scénarios pertinents qui auront été identifiés au préalable par la simulation.

La température de départ est une variable continue (Eq.55) :

$$T_{dp} \in [20^{\circ}\text{C}; 25^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Eq.55})$$

Le plan optimal est déterminé avec une contrainte sur le confort et le coût :

- confort : la température intérieure est contrainte avec le bloc « intervalconstraintprofile » qui permet de définir des bornes de températures et donc un intervalle de confort I_{conf} , la température maximale est constante et fixée à 30°C avec le bloc « affect ». La température minimale de confort varie en fonction de l'occupation, elle est de 20°C en occupation et 16°C hors occupation comme pour les deux contrôleurs de référence.
- coût : la puissance du plancher chauffant est calculée à partir du modèle avec l'Eq.50 en supposant que la température de retour du plancher est égale à la température de la dalle T_d ce qui a été vérifié expérimentalement. L'énergie correspondante est calculée et minimisée avec le bloc « minimize ».

Ainsi cela revient à minimiser la fonction coût suivante sur l'horizon de prédiction (Eq.56) où J_{conf} est une évaluation du confort et J_{eco} une évaluation du coût tel que (Eq.57) :

$$J = \int_{t_0}^{t_{horiz}} J_{conf}(t) \cdot dt + \int_{t_0}^{t_{horiz}} J_{eco}(t) \cdot dt \quad (\text{Eq.56})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{conf} = \begin{cases} (T_i - T_{confort,max})^2 & \text{si } T_i \geq T_{confort,max} \\ (T_i - T_{confort,min})^2 & \text{si } T_i \leq T_{confort,min} \\ 0 & \text{si } T_i \in I_{conf} \end{cases} \\ J_{eco} = P_{pl} \end{array} \right. \quad (\text{Eq.57})$$

b. Réactif - Ventilo-convecteurs

Les ventilo-convecteurs servent à la partie réactive du contrôle si des évènements imprévus surviennent et que le confort n'est pas acceptable au moment de l'occupation, par exemple :

- occupation non prévue,
- apport du plancher chauffant insuffisant du fait d'une baisse inattendue de la température extérieure,
- ouverture de fenêtres ou de portes.

Ils sont commandés en temps réel en fonction des données des capteurs et se mettent en marche uniquement s'il y a détection de présence sur au moins l'un des deux capteurs. Les conditions de fonctionnement sont présentées ci-après (Eq.58) :

$$\begin{cases} \text{si } T_{confort,min} - 1^{\circ}C \leq T_i \leq T_{confort,min} + 1^{\circ}C & \text{petite.vitesse} \\ \text{si } T_{confort,min} - 3^{\circ}C \leq T_i \leq T_{confort,min} - 1^{\circ}C & \text{moyenne.vitesse} \\ \text{si } T_i \leq T_{confort,min} - 3^{\circ}C & \text{grande.vitesse} \end{cases} \quad (\text{Eq.58})$$

c. Réactif - Centrale de traitement d'air

Le fonctionnement de la centrale de traitement d'air est le même que pour les deux contrôleurs de référence. La centrale de traitement de l'air fonctionne tous les jours de la semaine de 9h à 18h et assure le renouvellement d'air de tout le bâtiment. Afin de ne pas perturber la ventilation dans les autres pièces que SYNERGI, seuls les volets qui contrôlent l'arrivée d'air de la plateforme SYNERGI sont pilotés.

Le fonctionnement de la centrale de traitement de l'air est asservi à la détection de présence (Eq.59) :

$$\begin{cases} \text{pas.de.détection.de.présence.} = \text{ouverture.volets} : 20\% \\ \text{détection.de.présence.} = \text{ouverture.volets} : 100\% \end{cases} \quad (\text{Eq.59})$$

Pour les ventilo-convecteurs et la centrale de traitement d'air, il y a une temporisation de 15 minutes au niveau de la détection de présence pour éviter les cycles courts.

Résumé

Deux contrôles de référence utilisent le système de régulation par défaut déjà présent sur le bâtiment et correspondent à deux façons de réaliser un ralenti. Le premier contrôle consiste à se servir du plancher chauffant en base en permanence et les ventilo-convecteurs en appoint, le second propose une approche anticipative basée sur un planning fixe de relance du plancher. Pour le contrôle prédictif une boucle de régulation complète est mise en place de façon à fournir un plan optimal de température de consigne au contrôleur PID de la vanne trois voies qui régule la température de départ du plancher. Cela fait intervenir un optimiseur dans lequel sont définies les logiques de régulations anticipatives et réactives en utilisant le modèle E et les capteurs additionnels installés sur site.

4. Comparaison des stratégies de contrôle pour la plateforme SYNERGI

Le déploiement expérimental du contrôleur anticipatif n'a pas pu être mené à terme car la boucle de contrôle a été opérationnelle après la fin de l'hiver 2015/2016 dû à des retards de développement interne au logiciel pour envoyer le plan de commande optimal au PID externe (**Figure 136**). Néanmoins, les plans de commande sont bien générés en temps réel et peuvent être exploités pour conclure quant au potentiel d'un tel contrôleur. Ainsi, la méthodologie suivante est adoptée : dans un premier temps les trois stratégies de contrôle présentées à la partie 3 sont comparées en simulation sur une saison de chauffe complète et pour trois météo différentes. Les campagnes expérimentales sont ensuite menées sur la plateforme de démonstration sur des séquences d'un mois. Pour le contrôleur prédictif, les plans de

commandes optimales sont générés mais non envoyés à l'actionneur c'est pourquoi la réponse thermique expérimentale du bâtiment n'a pu être observée contrairement aux deux contrôleurs de référence. Ainsi, dans un deuxième temps une comparaison semi-empirique est effectuée, c'est-à-dire que c'est la réponse thermique du modèle soumis aux séquences de commandes expérimentales pour les trois contrôleurs qui est observée. Pour finir, les résultats purement expérimentaux des deux contrôleurs de référence sont comparés à ceux obtenus par la simulation et la méthode semi-empirique afin d'appuyer les conclusions obtenues pour le contrôleur prédictif avec ces deux approches (**Figure 138**). La comparaison des stratégies de contrôle se fait à partir de critères détaillés à la partie suivante.

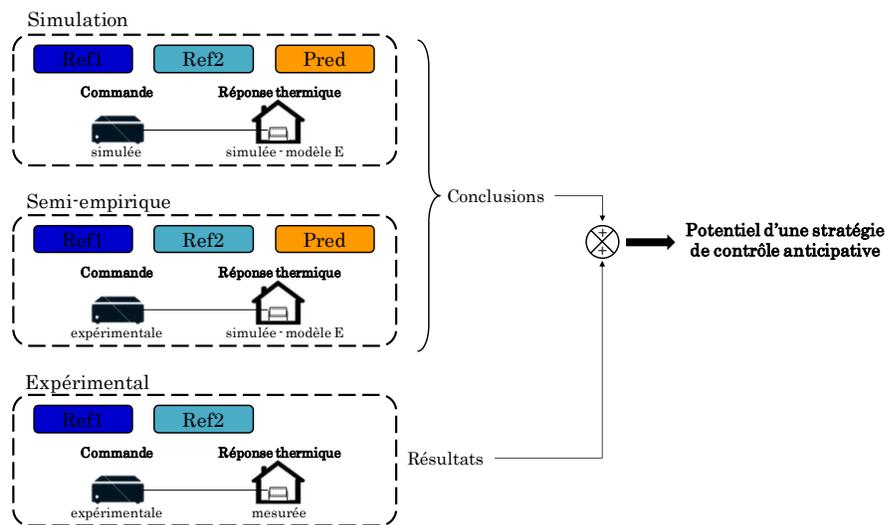


Figure 138 - Méthodologie employée pour montrer un intérêt au contrôle prédictif

4.1. Critères d'évaluation

Les stratégies de contrôle sont comparées sur la base des consommations d'énergie utile et du confort. Dans chaque cas la consommation d'énergie utile du plancher, celle des ventilo-convecteurs et totale sont calculées en intégrant les puissances respectives.

L'évaluation du confort est une chose plus délicate et constitue un sujet en lui-même. La littérature distingue deux types d'approche pour l'évaluation du confort :

- l'approche dite rationnelle ou analytique qui ne prend pas en compte les possibilités de l'occupant,
- l'approche dite adaptative où l'occupant est acteur de son confort et capable de mener des actions.

Les méthodes rationnelles sont les plus répandues dans la littérature étant donné qu'elles sont plus simples à calculer. La norme *NF EN 15251* [196] propose deux méthodes d'évaluation à partir du calcul de la température opérative qui est une moyenne arithmétique entre la température d'air et la température de surface comme décrit par la norme *ISO 7726* [197]. La première consiste à calculer le pourcentage de

temps où la température opérative est en dehors d'une plage de confort. Cette méthode se retrouve notamment dans les référentiels pour la certification Haute Qualité Environnementale (HQE) notamment. La deuxième méthode est celle des degrés-heures où l'écart par rapport aux bornes est pris en compte par un facteur de pondération qui permet de pénaliser les forts écarts. Une autre méthode rationnelle très connue est celle de *Fanger* [198] basée sur le calcul de deux indices : PMV (Predicted Mean Vote) et PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). L'indice PMV associe le bilan thermique à une note de confort entre +3 et -3 et le PPD est calculé à partir de l'indice PMV, il traduit le taux d'insatisfaction pour une ambiance thermique donnée. De la même manière que pour la température opérative, le confort peut être calculé comme un pourcentage de temps en dehors d'une plage de valeur de PMV/PPD ou utiliser également un facteur de pondération. Cette définition du confort est décrite dans la norme ISO 7730 [199]. Les travaux de *Mochida et al.* [200] peuvent être cités puisqu'ils proposent une méthode d'évaluation en temps réel de l'indice de confort PMV. De même dans les travaux de *Freire et al.* [3], l'indice PMV est utilisé dans la fonction coût du contrôleur qui doit contraindre la valeur du PMV entre $-0,5$ et $+0,5$. Pour finir, *Zhou et al.* [201] introduisent l'indice PMV comme facteur de pénalité du confort dans un problème d'optimisation.

Les méthodes adaptatives sont plus complexes puisqu'il s'agit de modéliser la réponse de l'occupant à une situation d'inconfort. En effet comme précisé par *Bonte* [2] : « *le principal facteur influençant les actions des occupants visant à maintenir le confort thermique est le confort thermique lui-même* ». On parle aussi de « thermorégulation comportementale ». Ainsi, dans ses travaux le comportement de l'occupant appelé « agent » est modélisé par réseau de neurones [202,203]. Le corps humain échange avec l'ambiance et des processus internes au corps humain permettent de réguler sa température. Quand les conditions thermiques sont telles que ces processus ne suffisent plus, l'Homme est amené à changer son comportement et interagit avec son environnement [204]. Deux types d'actions sont possibles dans une approche orientée agent : actions sur le métabolisme (vêtue, position, boisson) et actions sur l'environnement (ouvertures, changement de consigne, occultations, ventilation).

Le confort est une notion très subjective qui ne se limite pas à la température puisque l'acoustique, l'éclairage et la qualité de l'air sont également déterminants. Une étude bibliographique menée par *Shaikh et al.* [205] sur les articles traitant du confort dans le bâtiment montre que les indices de confort utilisés dépendent à 48% de la thermique, 21% du visuel, 18% de la qualité de l'air et 6% de l'humidité. Une étude réalisée par *Mettetal* [206] démontre aussi que la sensation de confort dépend de l'âge. Enfin comme souligné par *Nicol et Humphreys* [207] des facteurs d'ordre psychologiques ne sont pas négligeables tel que le fait de savoir si le chauffage est allumé, la décoration et la couleur de la pièce ou la possibilité ou non donnée à l'occupant de moduler son ambiance.

Il est difficile d'utiliser les indices de Fanger pour évaluer le confort dans un but de contrôle optimal puisqu'ils dépendent de l'habillement et du métabolisme qui ne sont pas des données mesurables. Dans sa thèse, *Vorger* [208] conclut que les modèles rationnels sont fiables pour les bâtiments à l'ambiance contrôlée comme c'est le cas ici, en revanche ils le sont moins pour du confort d'été sans climatisation avec de la ventilation naturelle. La méthode rationnelle la plus utilisée dans les papiers traitant du contrôle optimal est celle du taux d'inconfort par rapport à un intervalle de température, elle est employée par *Ghiaus* [209], *Sourbron* [210] et *Gweder et al.* [211] pour le contrôle de planchers et de plafonds chauffants.

Ainsi, le choix est fait d'avoir recours à un taux d'inconfort en période d'occupation dont l'intervalle de confort est situé entre 19°C et 23°C puisque ces deux valeurs sont les plus fréquentes dans la littérature traitant du confort en saison hivernale.

4.2. Simulation

Des simulations sont réalisées dans l'environnement Simulink afin d'étudier le comportement de chacune des stratégies sur une saison de chauffe complète, démontrant l'intérêt d'un tel contrôleur pour le bâtiment étudié. Simulink est un environnement graphique qui permet de modéliser des systèmes dynamiques. Cet outil a été développé dans les années 1990 pour le domaine de l'automatique afin de modéliser des lois de commande et de tester le comportement de régulateurs. Il s'est ensuite enrichi avec d'autres domaines de l'ingénierie. Il permet de modéliser des systèmes linéaires et non linéaires, à temps discret ou continu. Il est également possible de générer du code dans d'autres langages à partir de Simulink pour une intégration dans un procédé réel. De plus, son architecture est ouverte puisqu'il est possible d'intégrer à un modèle Simulink, des éléments codés dans un langage différent de MATLAB (Fortran, C++).

Les deux contrôleurs de référence ainsi que le contrôleur prédictif décrit à la partie 3 sont simulés. Une capture d'écran de chacun des modèles Simulink est présentée à l'**annexe G**. Le rôle de chaque bloc y est identifié. Ici l'usage du modèle est double. Dans le cas des contrôleurs de référence il modélise la réponse du bâtiment aux sollicitations et dans le cas du contrôleur prédictif il joue également le rôle du modèle interne pour générer le plan de commande optimal envoyé ensuite à ce même modèle.

4.2.1. *Contrôleur de référence avec loi d'eau uniquement*

a. Modélisation dans l'environnement Simulink

Le modèle E validé au chapitre III est utilisé comme modèle du bâtiment et est alimenté par les blocs correspondant aux termes sources. Le prévisionnel d'occupation permet de calculer la consigne et vient également alimenter le bloc de calcul de la puissance de la centrale de traitement d'air, des gains liés aux occupants et des ventilo-convecteurs dont le fonctionnement dépend de l'occupation. Un ensemble de blocs permet de décrire la logique de contrôle des ventilo-convecteurs dont la vitesse varie en fonction de l'écart à la consigne. Pour le plancher chauffant la puissance est modulée avec la loi d'eau et un ensemble de blocs permet d'effectuer un bouclage lorsque la température de retour du plancher est supérieure à la consigne de la loi d'eau, ce qui correspond à la fermeture de la vanne trois voies. D'autres blocs permettent de calculer les puissances et l'énergie consommée par les systèmes ainsi que d'évaluer le confort.

b. Détermination de la loi d'eau

Pour cette stratégie de contrôle la loi d'eau doit être réglée pour assurer une température de base de 16°C environ. La loi d'eau sert à compenser les déperditions dont la variation est approximativement proportionnelle à l'écart de température intérieur-extérieur. Ainsi il s'agit d'une droite dont l'équation peut être déterminée par seulement deux points. Pour déterminer ces deux points, le modèle E est utilisé en choisissant deux conditions de régime permanent, respectivement -5°C et 10°C comme température

extérieure. Dans chacun des deux cas une simulation sur un mois est effectuée afin de trouver la température de départ de plancher qui permet d'atteindre le régime permanent de 16°C pour la température intérieure (Figure 139).

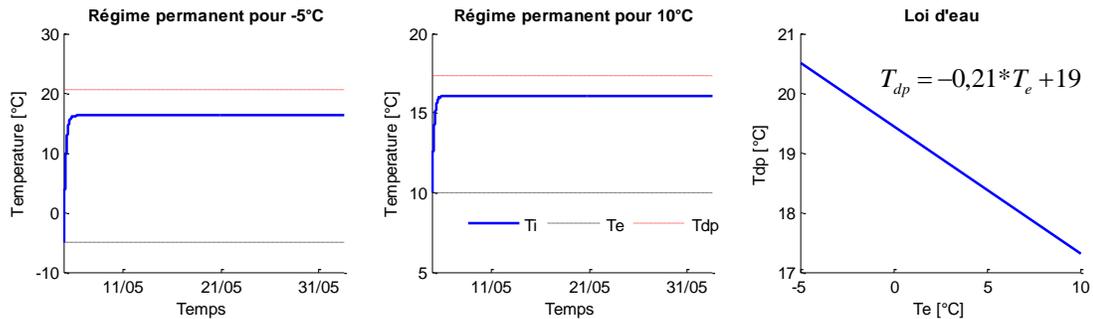


Figure 139 - Détermination de la loi d'eau pour le contrôleur de référence 1

4.2.2. Contrôleur de référence avec ralenti de nuit et relance fixe

a. Modélisation dans l'environnement Simulink

La modélisation est similaire au premier contrôleur de référence à ceci près que la loi d'eau est modifiée et qu'un bloc supplémentaire est rajouté afin de réaliser la programmation horaire du plancher chauffant selon le planning présenté à la partie 3.

b. Détermination de la loi d'eau

La loi d'eau est modifiée de façon à assurer une température intérieure d'environ 20°C. La méthode utilisée est la même que précédemment (Figure 140).

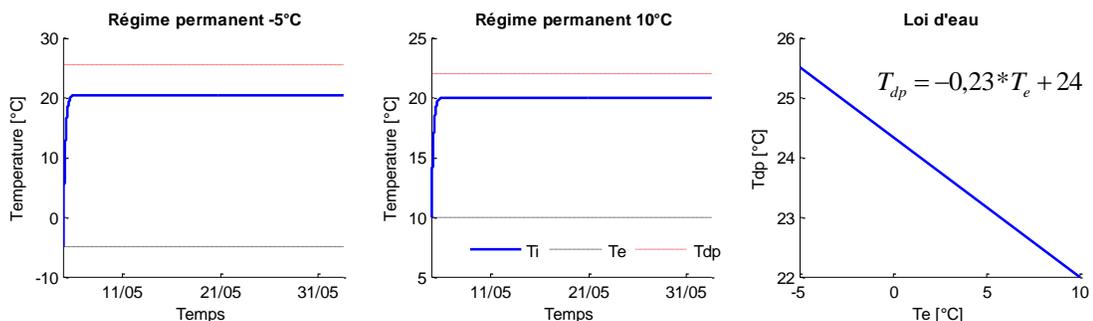


Figure 140 - Détermination de la loi d'eau pour le contrôleur de référence 2

4.2.3. Contrôleur anticipatif

Le modèle est identique au contrôleur de référence 1 sauf que la température de départ du plancher n'est plus asservie à une loi d'eau mais contrôlée par le plan optimal généré par le contrôleur à modèle interne qui reçoit en entrée :

- les prévisions de perturbations non contrôlées (measured disturbance) : apports solaires, occupants, température extérieure et puissance de la centrale de traitement d'air,
- la prévision de consigne liée à l'occupation future (reference),
- la mesure de la variable contrôlée T_i provenant de la sortie du modèle (measured output).

Le bloc MPC est configuré au préalable à l'aide de la toolbox « Model Predictive Control [212] » et reproduit le contrôleur prédictif décrit à la partie 2.1 de ce chapitre. Le modèle E est défini comme étant le modèle interne ainsi que le nombre de perturbations et de sollicitations commandables. Les ventilo-convecteurs sont considérés comme des perturbations non contrôlables et non mesurées (unmeasured disturbance) puisqu'ils n'interviennent pas dans la boucle prédictive mais uniquement en appoint dans la partie réactive. Seule la température intérieure en sortie du modèle interne est une sortie mesurée (**Figure 141**). L'horizon de prédiction est le même que l'horizon de contrôle et égal à 24h comme pour l'optimiseur Vesta, ce qui est en accord avec une grande partie de la littérature. L'intervalle de contrôle est fixé à 10 minutes et l'horizon de prédiction est donc égal à 144 intervalles. La température de départ du plancher est contrainte entre 20°C et 25°C avec un taux de montée et de descente fixé à $\pm 1^\circ\text{C}$ par intervalle. La toolbox permet d'effectuer des tests avant d'implémenter le MPC dans le bloc Simulink correspondant. Dans le cas suivant le comportement du MPC est simulé pour un changement de consigne de 16°C à 21°C assuré par le plancher chauffant pour une température extérieure de 8°C et les autres termes de puissance sont fixés à une valeur nulle. Cela permet de vérifier le comportement anticipatif du plancher chauffant dont la température de départ augmente avant le changement de consigne (**Figure 142**).

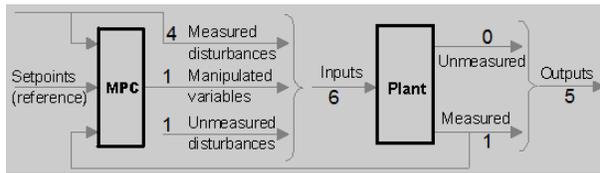


Figure 141 - Paramétrage du MPC avec la toolbox MPC

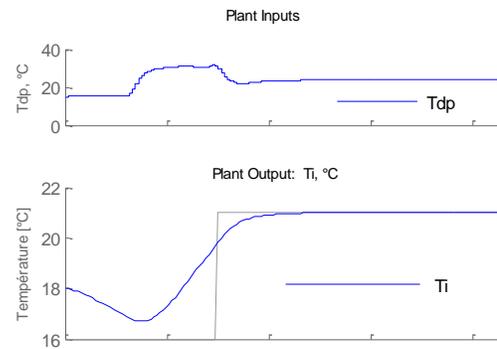


Figure 142 - Simulation du comportement du contrôleur prédictif avec la toolbox MPC

4.2.4. Scénarios d'occupation et conditions extérieures utilisés

Les trois stratégies de contrôle sont simulées sur une saison de chauffe du 05/10 au 29/04. La salle est occupée tous les jours de la semaine de 8h à 12h et de 13h30 à 18h. Le bâtiment est inoccupé pendant deux semaines lors des vacances de Noël du 19/12 au 02/01 et une semaine lors des vacances scolaires de février du 20/02 au 27/02. Les simulations sont effectuées à partir de fichiers météo normalisés au format .TRY qui sont réalisés par la base de données climatique Meteonorm [213] à partir de l'agrégation de données

réelles sur plusieurs années. Pour observer la dépendance du contrôle à la rigueur climatique, trois fichiers météos sont utilisés pour chacun des trois contrôleurs :

- Agen : climat tempéré avec ensoleillement important et des hivers doux,
- Clermont-Ferrand : mélange d'un climat océanique et continental, l'ensoleillement est moyen et les hivers sont froids et secs,
- Strasbourg : caractérisé par des hivers froids et vigoureux,

Ces trois climats peuvent être comparés sur une base mensuelle en terme de température moyenne et d'ensoleillement. Il s'agit de données annuelles moyennées sur cinq ans (2011-2015) [214]. Les caractéristiques sont énoncées ci-dessus. Sur une année, deux grandeurs peuvent être comparées : les degrés jours unifiés (DJU) qui traduisent la rigueur du climat et le nombre d'heures d'ensoleillement annuel (**Figure 143**). Ces données sont issues de Météo France [215] et sont des moyennes établies sur 30 ans (1951-1980) pour les DJU et 20 ans pour l'ensoleillement (1991-2010). Le climat d'Agen est le plus doux avec des DJU annuels faibles et un ensoleillement élevé. Inversement le climat de Strasbourg est le plus rude avec des DJU élevés et un ensoleillement plus faible, Clermont-Ferrand constitue un intermédiaire entre les deux.

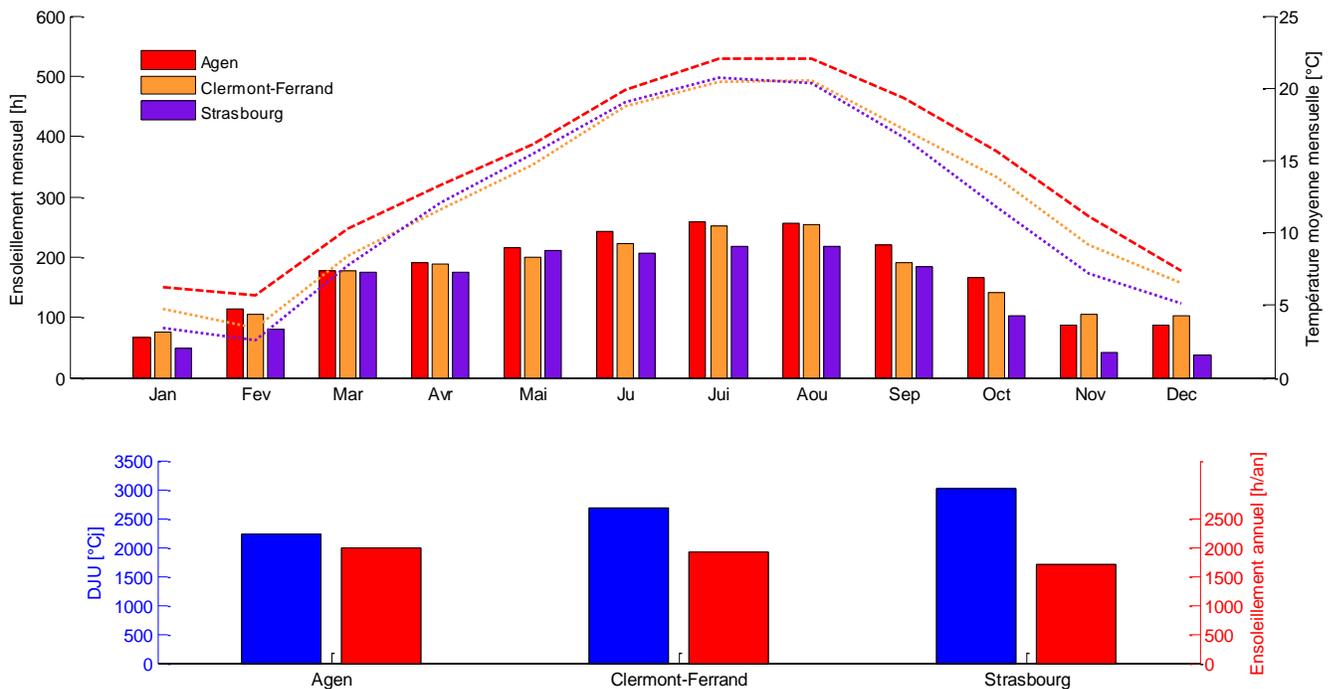


Figure 143 - Température moyenne et ensoleillement mensuel moyennés sur 5 ans (haut), DJU et ensoleillement annuel pour les trois villes (bas)

4.2.5. Analyse des résultats

La **Figure 144** permet de comparer les différents critères d'évaluation pour chacun des trois sites. Les différences de conditions climatiques n'entraînent pas de changements significatifs entre les trois stratégies en terme de consommation, de confort ou de ratio d'utilisation des deux systèmes. L'utilité du contrôle prédictif en climat tempéré est donc avérée. La simulation de chacune des trois stratégies de contrôle sur une saison de chauffe complète permet d'établir les conclusions suivantes :

- du point de vue de la consommation énergétique, le contrôleur prédictif est le plus performant devant le contrôleur de référence 1 (-34%) puis le contrôleur de référence 2 (-41%) qui est le plus énergivore,
- du point de vue du confort le contrôleur prédictif est également le plus intéressant suivi par le deuxième contrôleur de référence dont le taux d'inconfort est également faible. Pour le premier contrôleur de référence le taux d'inconfort est au dessus de la valeur de 10% préconisée dans le référentiel HQE (maximum de 13,3% pour Strasbourg).

Le pilotage prédictif permet donc une amélioration significative sur les deux tableaux : énergétique et confort. L'intérêt du travail de simulation sur une saison de chauffe complète est également de pouvoir regarder à quels moments se situent les économies d'énergie. Pour cela, une moyenne mensuelle sur les trois climats de la consommation d'énergie est établie ce qui permet de calculer le gain énergétique mensuel du contrôle prédictif par rapport aux deux autres stratégies de référence (**Figure 145**). Il apparaît que la stratégie prédictive offre toujours les meilleurs résultats notamment aux mois d'octobre, mars et avril. La **Figure 145** met en évidence l'efficacité du contrôle prédictif en intersaison. Sur les périodes d'octobre-novembre et de mars-avril le gain relatif est plus élevé (45% en moyenne) que pendant les mois les plus froids de l'hiver (décembre-février) avec un gain moyen de 25%. Le gain absolu est relativement constant sur toute la saison de chauffe et en hiver (décembre-février) l'intérêt est d'autant plus marqué que les températures sont basses comme au mois de janvier. Sur l'ensemble de la saison de chauffe (octobre-avril) 60% de l'économie est réalisée en intersaison et 40% en plein hiver.

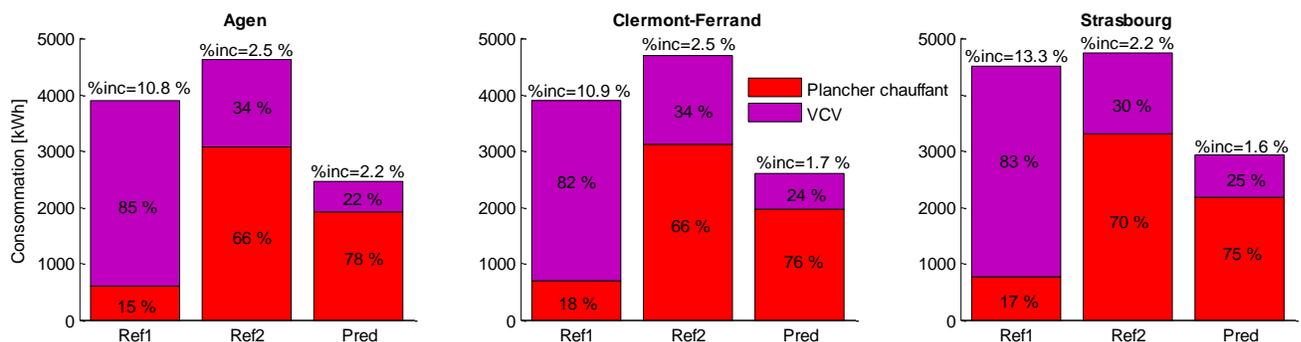


Figure 144 - Comparaison interclimat des stratégies de contrôle

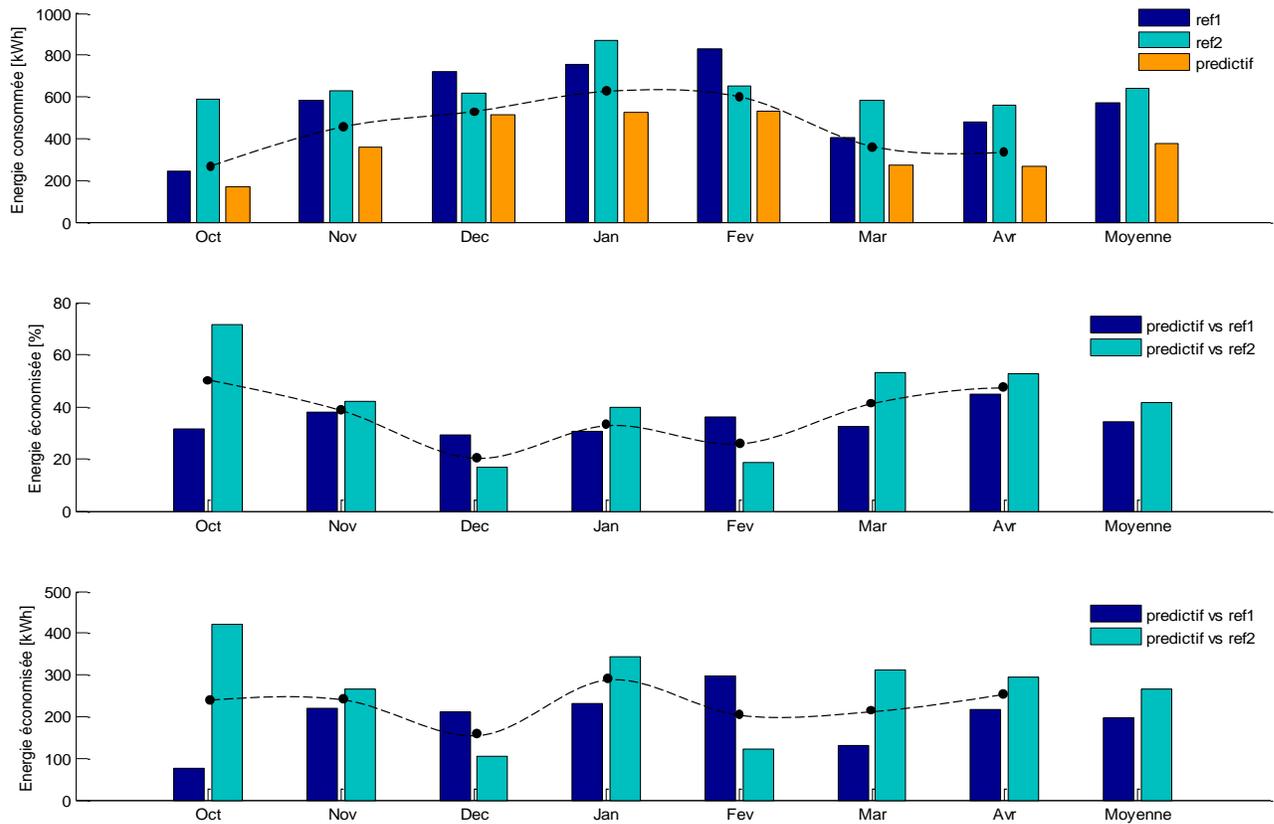


Figure 145 - Moyenne sur les trois climats des consommations d'énergie utile mensuelles et répartition des économies relatives (%) et absolues (kWh) réalisées avec le contrôle prédictif

La **Figure 146** permet d'étudier en détail le fonctionnement de chaque contrôleur sur une semaine froide représentative du mois de janvier et une semaine en intersaison au mois de novembre. Pour ces deux semaines, cinq graphes sont tracés : évolution de température intérieure, puissance appelée sur le plancher chauffant et les ventilo-convecteurs, prévisions de température intérieure et d'apports internes ainsi que les critères d'évaluations d'énergie et de confort.

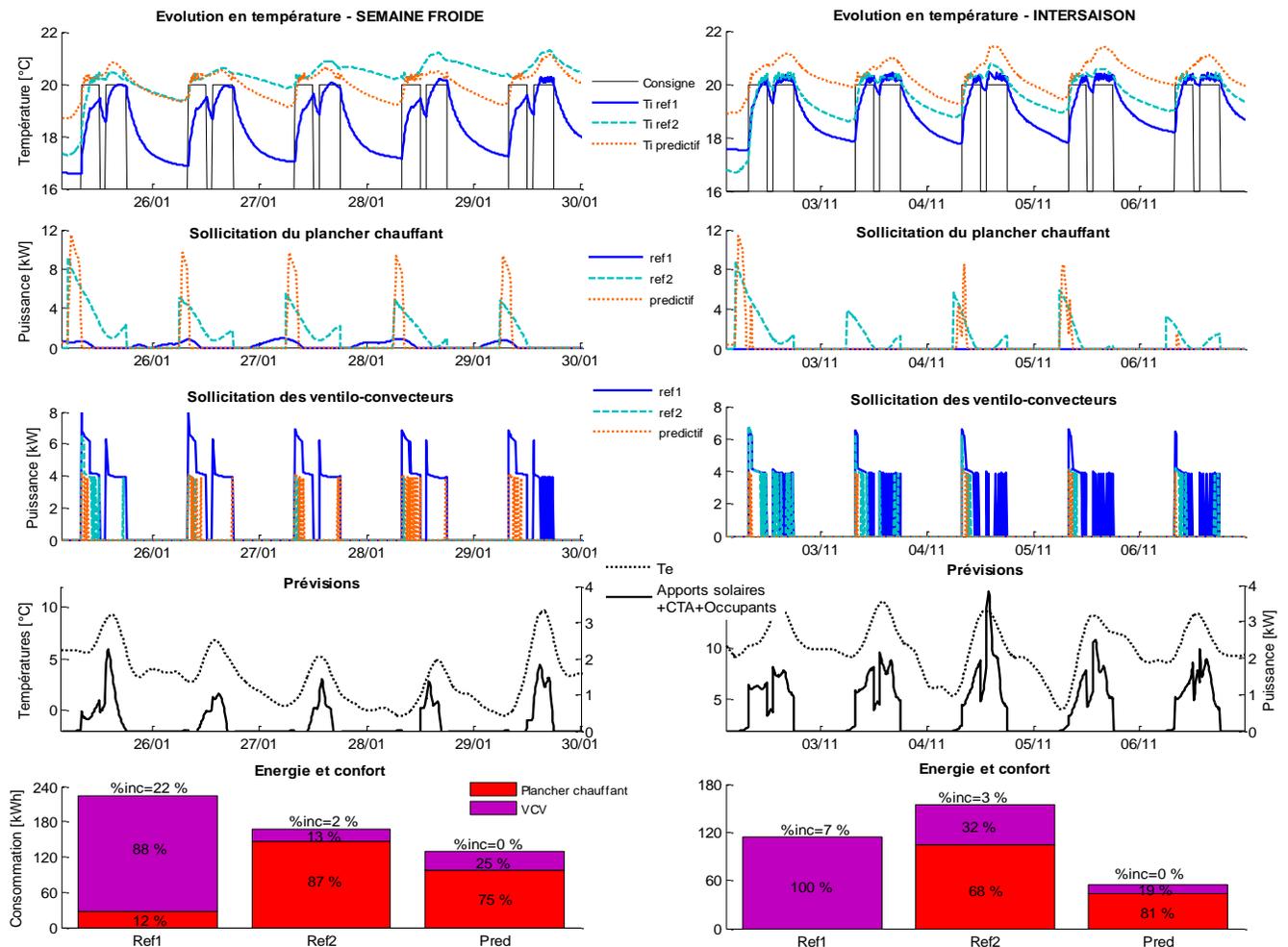


Figure 146 - Focus sur le comportement des trois types de contrôleurs pour une semaine froide et une semaine en intersaison

Pour la semaine la plus froide, le contrôleur de référence 1 présente un taux d'inconfort élevé (22%). La puissance du plancher chauffant pilotée par la loi d'eau n'est pas suffisante et le retard de l'effet des ventilo-convecteurs qui s'enclenchent en début d'occupation provoque des heures d'inconfort en début de journée comme le montre le graphe des évolutions en température. Les ventilo-convecteurs sont fortement sollicités avec un ratio de 88%. Le contrôleur de référence 2 a tendance à surchauffer le bâtiment ce qui entraîne logiquement une augmentation des dépenses énergétiques mais réduit le taux d'inconfort (2%). Cette fois-ci c'est le plancher chauffant qui a un ratio d'utilisation de 87%. Le contrôleur prédictif aboutit aux meilleures performances. Pour cette semaine le gain du contrôleur prédictif est de 43% par rapport au contrôleur de référence 1 et de 24% par rapport au contrôleur de référence 2. La dépense énergétique est donc moindre pour un confort amélioré (ref1) ou équivalent (ref2). Ce gain énergétique s'explique par l'anticipation des apports de chaleur. Le graphe des puissances appelées pour le plancher chauffant démontre que le démarrage du plancher chauffant se fait environ au même moment entre le contrôle

prédictif et celui de la référence 2. En revanche, le contrôleur prédictif réalise une charge plus importante du plancher et se coupe en milieu de matinée en anticipation des apports solaires notamment. Le contrôleur de référence 2 anticipe uniquement la relance mais pas les conditions extérieures. La stratégie optimale qui émane du contrôleur prédictif pourrait permettre d'affiner le contrôleur de référence 2 pour s'approcher de son comportement avec une charge important en matinée uniquement.

En intersaison les températures sont plus douces et le contrôleur de référence 1 n'utilise que les ventilo-convecteurs pour contrôler l'ambiance puisque la température de départ calculée à partir de la température extérieure est faible. Comme pour la semaine froide, un taux d'inconfort plus élevé que les autres stratégies (7%) est constaté avec une température de confort atteinte en cours de matinée. La loi d'eau du contrôleur de référence 2 paraît plus adaptée en intersaison puisque la température intérieure augmente moins qu'en semaine froide, le taux d'inconfort est également réduit (3%) mais la consommation d'énergie utile reste plus élevée que le contrôleur de référence 1. Le contrôleur prédictif permet de se passer du plancher chauffant quand les journées ne sont pas suffisamment froides comme celles du 03/11 et du 06/11. Il minimise l'utilisation du plancher et des ventilo-convecteurs. Pour cette semaine d'intersaison, le gain du contrôleur prédictif est de 53% par rapport au contrôleur de référence 1 et de 65% par rapport au contrôleur de référence 2. Ainsi le potentiel d'économie d'énergie relative est supérieur en intersaison. En revanche, en valeur absolue le contrôleur prédictif permet une économie relativement constante tout au long de la saison de chauffe.

4.2.6. *Robustesse du contrôle prédictif et erreurs de prévision*

Le bloc Simulink correspondant au contrôleur prédictif utilisé pour la simulation est alimenté par les prévisions météorologiques supposées exactes. En réalité les conditions extérieures estimées 24h en avance divergent des conditions effectives sur site au moment présent. D'une part, les prévisions météorologiques sont des estimations basées sur des modèles complexes décrivant les évolutions en température et qui comprennent une certaine incertitude quant aux sorties. D'autre part la résolution spatiale de ces modèles ne permet pas d'établir une prévision au cas par cas pour chaque bâtiment dont le comportement est pourtant corrélé aux conditions extérieures à son emplacement réel. Certains phénomènes météorologiques locaux peuvent entraîner des écarts importants sur de faibles distances (orage, îlot de chaleur, nébulosité). Dans notre cas les prévisions sont données pour la commune de Mérignac où est implanté l'aéroport de Bordeaux Métropole situé à environ 8km à vol d'oiseau. Deux simulations sont réalisées pour le mois de février afin de comparer la robustesse du contrôleur face aux erreurs de prédictions :

- la première simulation fait intervenir le flux solaire et la température extérieure prédite à 24h pour le site de Mérignac,
- la seconde utilise en entrée du modèle le flux solaire et la température extérieure mesurée avec les capteurs sur site.

Les résultats sont présentés pour la troisième semaine qui est la plus froide (**Figure 147**). Le graphique de comparaison entre les prévisions et la mesure sur site, indique que les prévisions sont assez fiables avec des écarts faibles sur la température extérieure et le rayonnement solaire. De fait les erreurs de prévision

n'engendrent pas de grandes différences sur la température intérieure en sortie du modèle et le contrôleur prédictif mis en place sur la plateforme SYNERGI peut être qualifié de robuste.

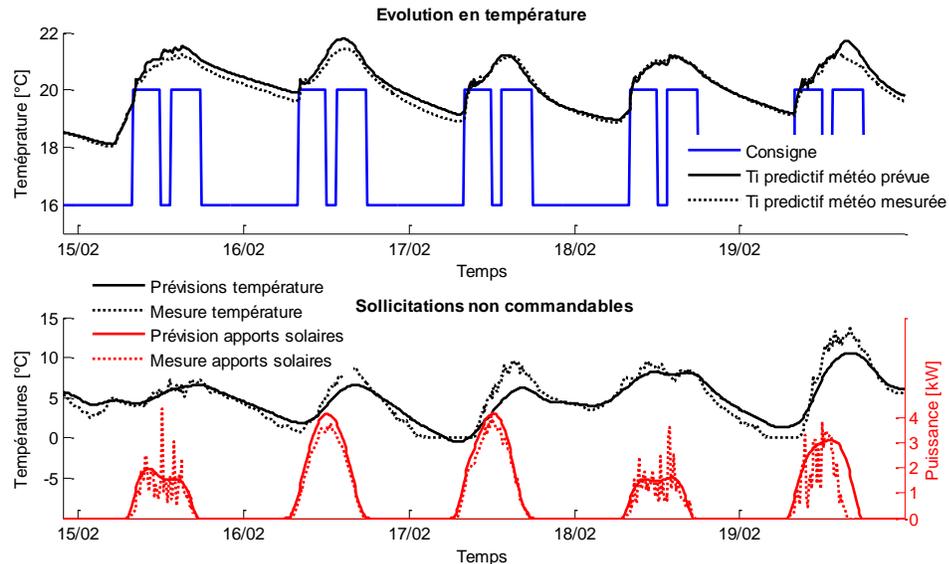


Figure 147 - Robustesse du modèle aux erreurs de prévision

4.3. Semi-empirique

La méthode semi-empirique permet d'observer la réponse du modèle E de la salle de SYNERGI à des sollicitations expérimentales afin de pouvoir comparer les stratégies de gestion sur un cas réel. Pour cela, les sollicitations commandables et non commandables sont récupérées lors des campagnes de mesures correspondant au déploiement de chacun des contrôleurs.

Pour rappel, les trois stratégies de gestion sont étudiées pour le plancher chauffant sont :

- **contrôleur de référence 1** : loi d'eau uniquement,
- **contrôleur de référence 2** : ralenti de nuit et relance fixe,
- **contrôleur anticipatif** : pilotage déterminé par le contrôleur MPC.

La première stratégie de référence a été appliquée sur un mois, du 19/12/2015 au 22/01/2016 (**Figure 148**). La consommation d'énergie utile totale sur la période est de 848 kWh avec respectivement 160 kWh pour le plancher chauffant et 688 kWh pour les ventilo-convecteurs. Le taux d'inconfort est de 10,6%.

La seconde stratégie de référence a également été appliquée sur un mois, du 23/01/2016 au 21/02/2016 (**Figure 149**). La consommation d'énergie utile totale sur la période est de 1096 kWh avec respectivement 783 kWh pour le plancher chauffant et 313 kWh pour les ventilo-convecteurs. Le taux d'inconfort est de 2,3%.

Pour la stratégie prédictive, les séquences de consigne de température de départ optimales et les prévisions météos sont récupérées toutes les 48h entre le 11/04/2016 et le 06/05/2016 via l'interface du

logiciel VestaEnergy Studio par l'envoi de fichiers .csv. Faute d'être transmis au bâtiment réel, ces données sont injectées en entrée du modèle E afin d'estimer la réponse du bâtiment avec le plancher seul. Le fonctionnement des ventilo-convecteurs est ensuite déduit de l'écart entre la réponse en température intérieure et la consigne selon l'Eq.58. Puis, une nouvelle simulation est lancée avec le plan optimal pour le plancher et l'ajout de la puissance des ventilo-convecteurs calculée précédemment pour estimer un taux d'inconfort. Les résultats sont présentés à la **Figure 150**. Comme l'évolution de la température intérieure provient de la sortie du modèle, la mesure est moins bruitée que les deux autres campagnes expérimentales. De plus la campagne ayant eu lieu à la fin de la saison de chauffe dans des conditions de température clémentes, les systèmes de chauffage sont moins sollicités en comparaison des campagnes pour les contrôleurs de référence 1 et 2. La consommation d'énergie utile totale sur la période est de 220 kWh avec respectivement 181 kWh pour le plancher chauffant et 39 kWh pour les ventilo-convecteurs. Le taux d'inconfort est de 1,1%.

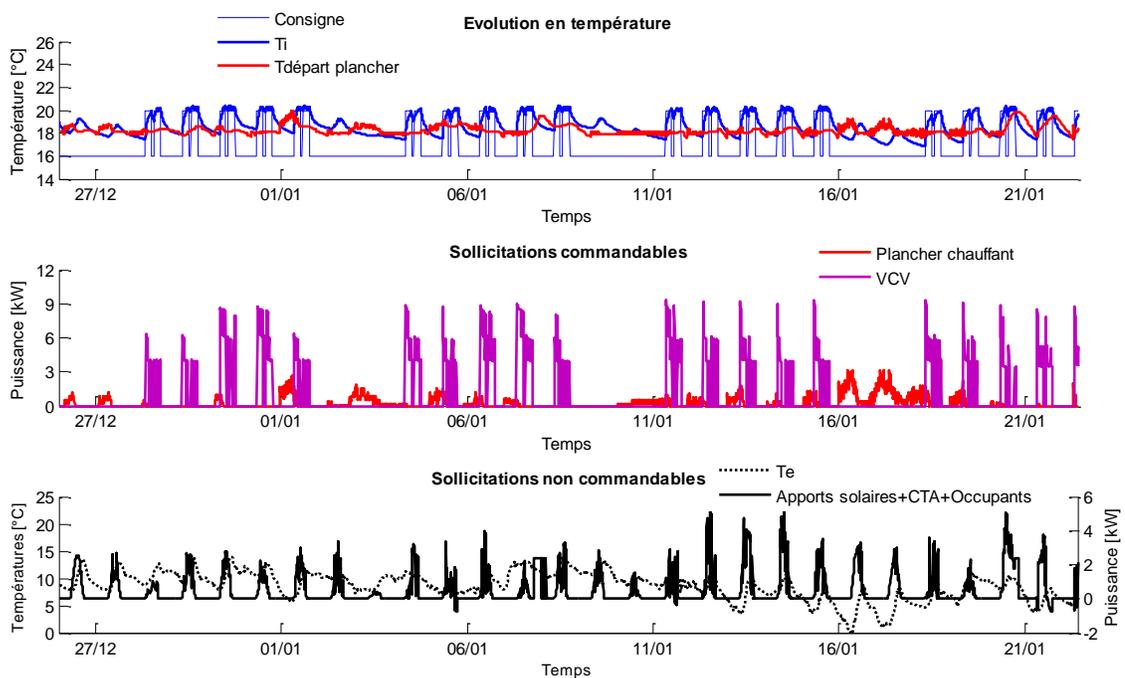


Figure 148 - Résultats semi-empiriques du premier contrôleur de référence

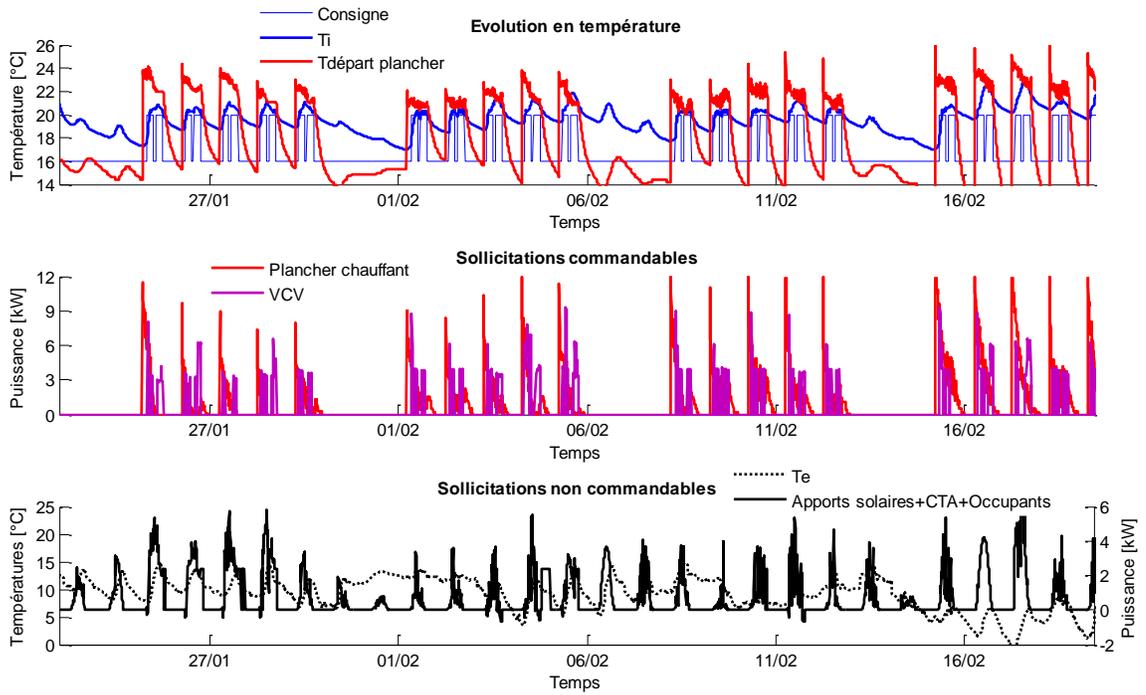


Figure 149 - Résultats semi-empiriques du second contrôleur de référence

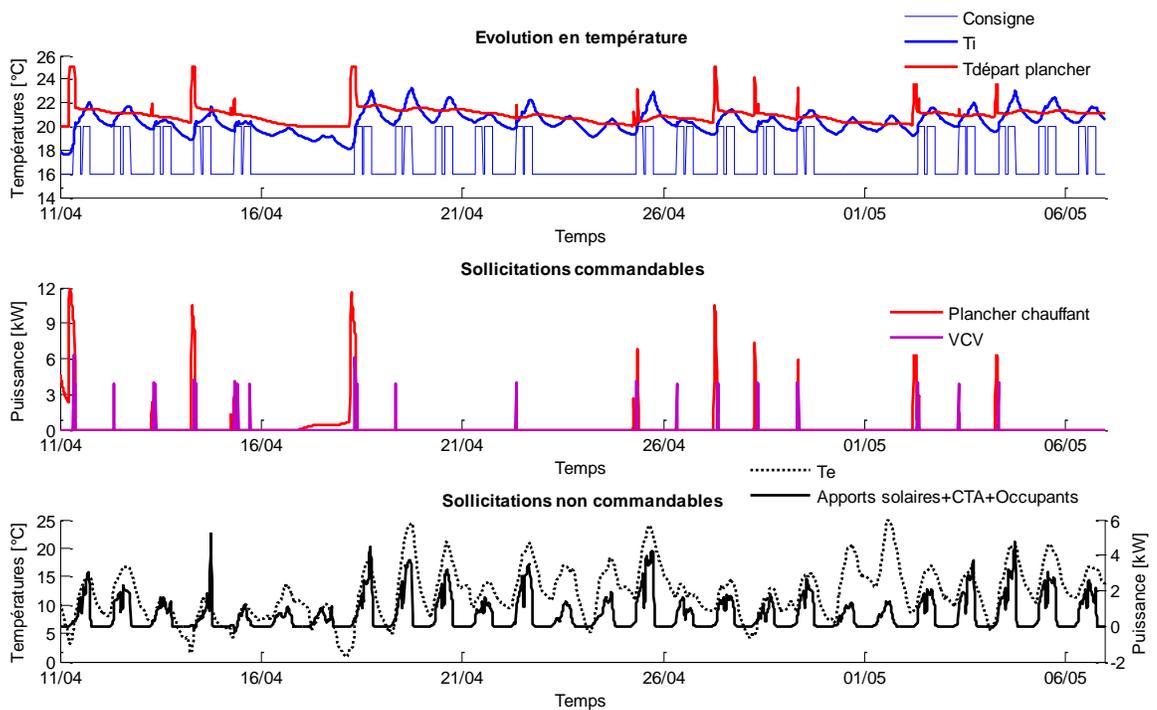


Figure 150 - Résultats semi-empiriques du contrôleur prédictif

4.3.1. Correction climatique entre les campagnes

Les résultats semi-empiriques et expérimentaux en termes de consommation d'énergie utile ne sont pas directement comparables étant donné que les conditions extérieures et intérieures ne sont pas identiques. Elles diffèrent de part la température extérieure et les apports (solaires, occupants, centrale de traitement d'air). Ainsi, deux corrections doivent être apportées aux résultats en prenant la campagne du premier contrôleur de référence comme base de calcul :

- correction sur les apports : une intégration de la somme des puissances générées par les apports solaires, les occupants et la centrale de traitement d'air permet de calculer la part d'énergie des apports sur chacune des campagnes (Eq.60). Un surplus d'apports gratuits diminue d'autant l'énergie à apporter par le système de chauffage. Ainsi la différence d'apports avec le premier contrôleur de référence est rajoutée à la consommation initiale.

$$A = \int_0^t (P_s(t) + P_{cta}(t) + P_g(t)) \cdot dt \quad (\text{Eq.60})$$

- correction sur la rigueur climatique : les déperditions thermiques sont approximativement proportionnelles à l'écart de température intérieur-extérieur. Une méthode pour comparer la rigueur climatique consiste à calculer les degrés-heures qui correspondent à la somme des écarts entre la température intérieure de consigne et la température extérieure horaire moyenne (Eq.61). Le ratio des degrés-heures avec le premier contrôleur de référence permet de définir un facteur correctif de majoration ou minoration des déperditions thermiques des deux autres campagnes.

$$Dh = \sum_{h=0}^n T_{consigne_h} - \left(\frac{T_{\max,h} - T_{\min,h}}{2} \right) \quad (\text{Eq.61})$$

Le besoin en énergie utile est égale aux déperditions D auxquelles sont soustraits les apports (Eq.62) :

$$E_{tot,init} = D - A \quad (\text{Eq.62})$$

La correction sur la rigueur climatique permet de calculer une déperdition corrigée D^* à partir du ratio de degrés-heures. Celle sur les apports s'effectue en rajoutant la différence d'apports avec le premier contrôleur de référence (Eq.63). La consommation d'énergie utile corrigée est notée E_{tot} .

$$\begin{cases} E_{tot} = D^* - A + (A - A_{ref1}) \\ D^* = D * \frac{Dh_{ref1}}{Dh} \\ D = E_{tot,init} + A \end{cases} \quad (\text{Eq.63})$$

La consommation d'énergie utile totale corrigée E_{tot} est donc déterminée suivant le calcul de l'Eq.64 et la répartition de la consommation entre le plancher chauffant E_{pl} et les ventilo-convecteurs E_{vcv} est conservée après correction.

$$\begin{cases} E_{tot} = (E_{tot,init} + AI) * \frac{Dh_{ref1}}{Dh} - AI_{ref1} \\ E_{pl} = \frac{E_{pl,init}}{E_{tot,init}} * E_{tot} \\ E_{vcv} = \frac{E_{vcv,init}}{E_{tot,init}} * E_{tot} \end{cases} \quad (Eq.64)$$

4.3.2. Analyse des résultats

Les résultats du calcul des degrés-heures ainsi que la somme des apports sont présentés à la **Figure 151** et permettent de calculer les consommations d'énergie utile corrigées. La répartition des consommations d'énergie utile entre le plancher chauffant et les ventilo-convecteurs est présentée sous forme d'histogramme cumulé à la **Figure 152**.

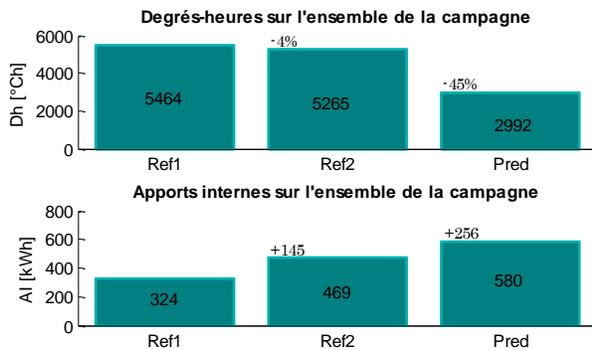


Figure 151 - Degrés-heures et apports pour effectuer la correction climatique

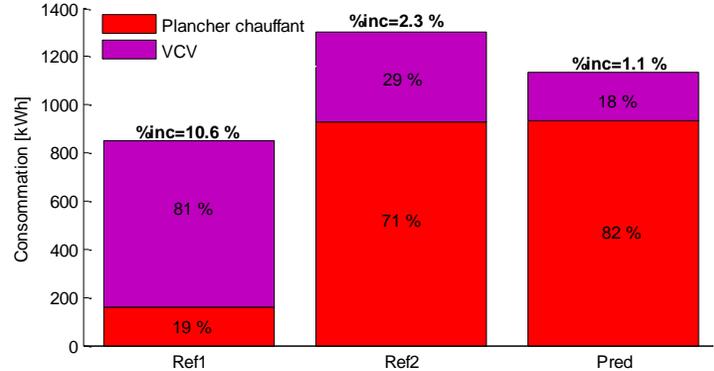


Figure 152 - Consommations énergétiques corrigées et taux d'inconfort pour la méthode semi-empirique

La première stratégie de référence où le plancher est utilisé en chauffage de base et les ventilo-convecteurs en appoint est la plus défavorable du point de vue du confort. Les heures d'inconfort en occupation surviennent essentiellement au moment de la relance du matin. Les ventilo-convecteurs ne sont pas suffisants pour atteindre la consigne, cela est particulièrement visible lors de la troisième semaine qui est la plus froide et où la température de confort minimale de 19°C n'est atteinte qu'en milieu ou en fin de matinée (**Figure 148**).

La stratégie de relance à heure fixe (référence 2) est la moins intéressante d'un point de vue énergétique mais permet une amélioration relative du confort qui passe de 10,6% à 2,3%, en deçà de la valeur symbolique de 10% qui est notamment utilisée dans le référentiel HQE. Cette stratégie ignore les prévisions météo et la relance est donc effectuée trop tôt ou trop tard. Le plancher est nettement plus sollicité puisqu'il représente 71% des consommations contre 19% avec le premier contrôleur de référence.

Le contrôleur prédictif sollicite au maximum le plancher chauffant avec un taux d'utilisation de 82%. La **Figure 150** démontre que la stratégie optimale consiste à charger thermiquement le plancher lors des jours les plus froids en amont de la période d'occupation. Ensuite c'est l'inertie de la dalle qui permet une décroissance lente en température et les ventilo-convecteurs interviennent sporadiquement si l'optimiseur juge que la relance du plancher n'est pas justifiée. Finalement, le plancher chauffant est utilisé seulement le matin lorsque la température extérieure descend en dessous de 10°C. L'anticipation des apports est également bien observée la journée du 25/04/2016 puisque l'appel de puissance du plancher est moindre en comparaison des autres jours (27, 28 et 29 par exemple) dont les apports sont plus faibles. Le contrôle prédictif se justifie en intersaison. Il permet un haut niveau de confort (1,1%) pour une consommation énergétique modérée. Elle est inférieure à celle du deuxième contrôleur de référence mais supérieure à celle du premier dont la faible valeur est permise par un confort dégradé. Ce résultat est cohérent avec la philosophie du contrôle prédictif consistant à faire un compromis entre confort et consommations énergétique.

Pour appuyer les résultats obtenus en simulation et de façon semi-empirique, les résultats expérimentaux des contrôleurs de référence 1 et 2 sont analysés dans la partie suivante.

4.4. Expérimental

Il est rappelé que pour la partie purement expérimentale, seules les deux stratégies de référence sont étudiées pour le plancher chauffant :

- **contrôleur de référence 1** : loi d'eau uniquement,
- **contrôleur de référence 2** : ralenti de nuit et relance fixe.

Les résultats doivent permettre de conclure quand à la validité des conclusions établies par l'analyse des simulations et de la méthode semi-empirique.

4.4.1. Résultats pour les deux stratégies de référence

La première stratégie de référence a été appliquée sur un mois, du 19/12/2015 au 22/01/2016 (**Figure 153**) et la seconde a également été appliquée sur un mois, du 23/01/2016 au 21/02/2016 (**Figure 154**). Les consommations d'énergies sont les mêmes entre la méthode semi-empirique et expérimentale puisque ce sont les puissances mesurées qui sont utilisées dans les deux cas. En revanche, la réponse thermique est ici mesurée expérimentalement et la valeur de l'indice de confort qui dépend de l'évolution de température intérieure est différente.

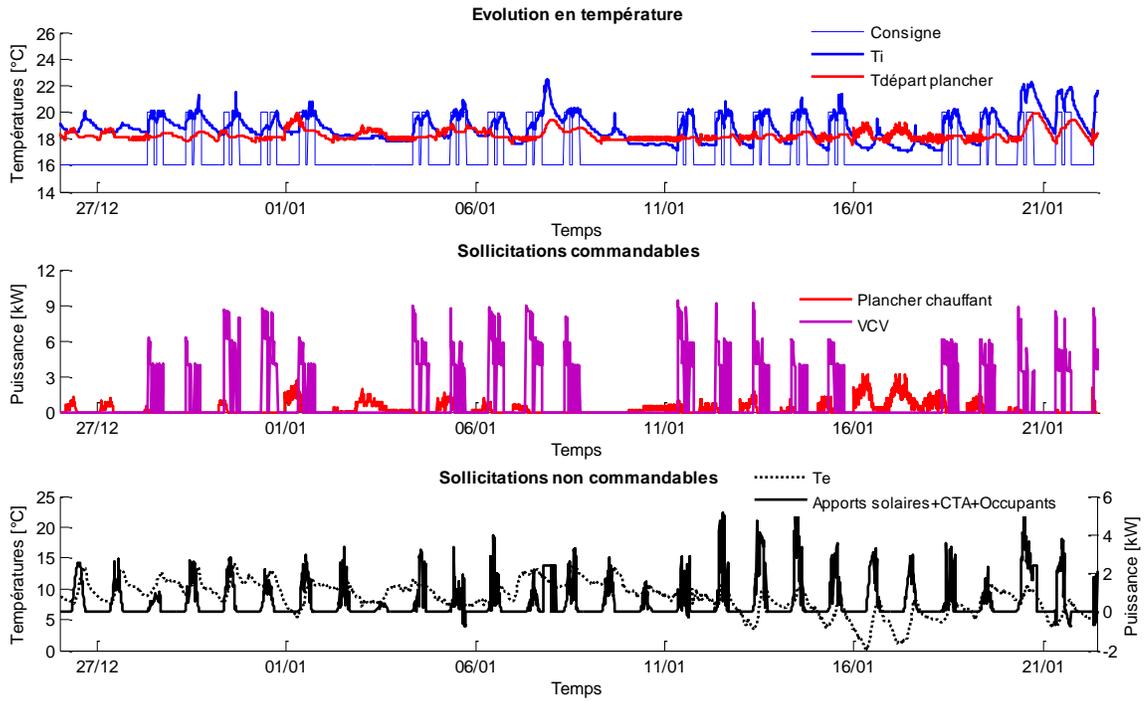


Figure 153 - Résultats expérimentaux du premier contrôleur de référence

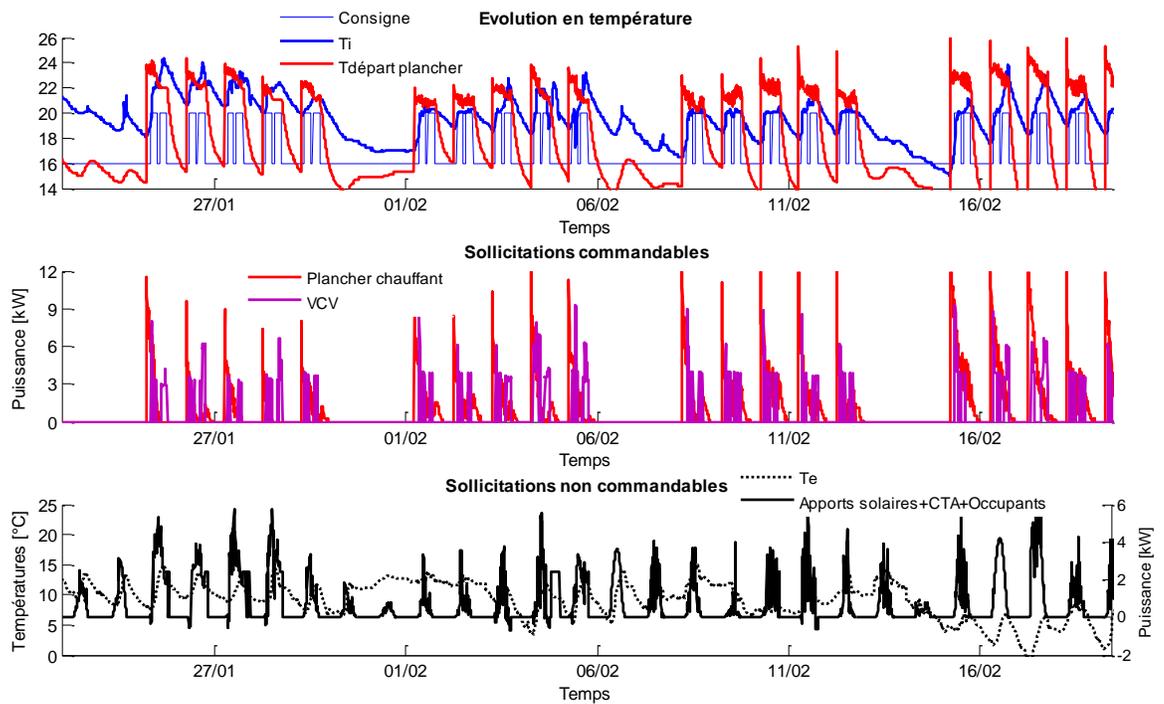


Figure 154 - Résultats expérimentaux du second contrôleur de référence

Visuellement, l'évolution de température intérieure paraît proche de la dynamique observée avec la méthode semi-empirique. La comparaison est effectuée à la partie suivante.

4.4.2. *Comparaison avec la simulation et la méthode semi-empirique*

Une étape de validation est effectuée à partir des résultats expérimentaux des contrôleurs de référence 1 et 2 afin d'appuyer les conclusions obtenues pour le contrôleur prédictif avec la simulation et la méthode semi-empirique. La comparaison est faite pour chaque contrôleur et leur campagne correspondante :

- **contrôleurs de référence 1 et 2** : comparaison entre la simulation, l'approche semi-empirique et celle purement expérimentale,
- **contrôleur prédictif** : comparaison entre la simulation et l'approche semi-empirique.

Pour la simulation, les sollicitations non commandables mesurées lors des campagnes de chaque contrôleur sont injectées comme données d'entrée du modèle Simulink associé : température extérieure, apports solaires ainsi que l'apport des occupants et de la CTA à partir de l'occupation réelle déduite avec les capteurs de présence. Les résultats sont comparés en terme d'évolution en température, de puissance appelée, de répartition des consommations énergétiques corrigées et de taux d'inconfort. L'ensemble de ces résultats est présenté à la **Figure 155**. Pour plus de clarté les graphes d'évolution en température sont présentés pour la semaine la plus froide de chaque campagne. Pour les graphes des puissances appelées, un focus est établi sur les trois jours les plus significatifs de cette semaine.

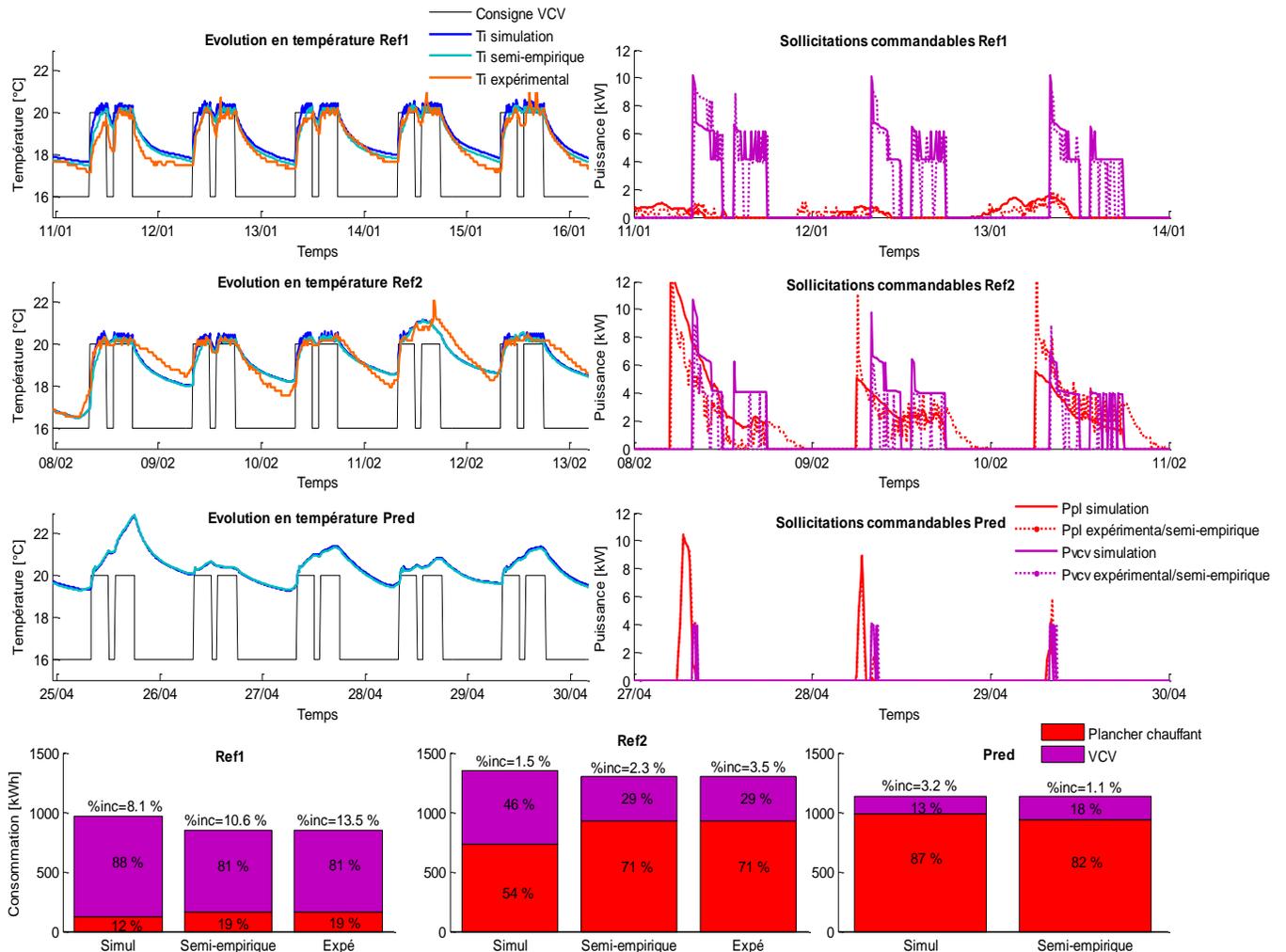


Figure 155 - Comparaison entre la simulation et l'expérimentation

Le premier contrôleur de référence est correctement simulé puisque les écarts sont faibles pour toutes les grandeurs comparées. Une légère sur-utilisation des ventilo-convecteurs (88%) est observée par rapport à l'expérimentation (81%) ce qui justifie la différence de 14% sur la consommation d'énergie totale et le taux d'inconfort un peu plus faible. Néanmoins, il est compliqué d'obtenir de meilleurs résultats qui sont principalement conditionnés par la fiabilité du modèle étudié au chapitre III et dont la précision était difficilement améliorable. Les taux d'inconfort calculés sont également semblables puisque les évolutions de la température intérieure sont proches pour les trois méthodes.

Le second contrôleur de référence présente plus de différences, il y a également une surconsommation des ventilo-convecteurs en simulation (46% contre 29%) qui, comme pour le premier contrôleur de référence, peut être dû au retard entre l'action et la mesure avec le capteur mural en expérimentation alors qu'en simulation l'effet est instantané. De plus la molette de réglage des ventilo-convecteurs a pu être modifiée sans connaissance de notre part (pas de possibilité de geler la commande du mode dérogation) et

gène une incertitude quant au niveau d'utilisation réel des ventilo-convecteurs. Cela semble confirmé par les écarts observés au niveau des puissances de ventilo-convecteurs en simulation et expérimentale. Dans l'expérimentation les ventilo-convecteurs sont moins utilisés en comparaison de la simulation. De plus, hors occupation la température chute plus vite expérimentalement alors qu'elle reste proche de 19°C dans les autres cas. Ainsi lors de la relance le confort est atteint moins rapidement ce qui explique le taux d'inconfort légèrement plus élevé pour l'expérimentation (3,5%). Cependant, les résultats pour ce contrôleur sont corrects puisque les puissances appelées restent similaires.

Le contrôleur prédictif est correctement simulé avec des écarts très faibles (1137 kWh contre 1130 kWh) puisque le plan de commande optimal expérimental est proche de celui généré en simulation. Il est donc cohérent que les résultats soient proches ce qui est particulièrement visible avec l'évolution en température. Il est à noter que le contrôleur prédictif simulé aboutit à la même stratégie que le plan de commande expérimental, à savoir, effectuer une charge thermique du plancher avant la relance lors des jours les plus froids. Ainsi, même s'il y a des écarts dû aux erreurs de modélisation et à une incertitude relative quant à l'utilisation des ventilo-convecteurs, les conclusions avancées à la partie simulation et semi-empirique peuvent être validées.

4.5. Potentiel des stratégies de contrôle anticipatives

Les trois contrôleurs présentés ont d'abord été comparés en simulation sur une saison de chauffe puis de façon semi-empirique sur le bâtiment expérimental pour une période d'un mois chacun. Après une étape de correction climatique, la comparaison s'est faite sur la base de trois indicateurs : consommation d'énergie des deux systèmes, ratio d'utilisation et taux d'inconfort. Les observations sont confortées par l'expérimentation :

- sur une saison de chauffe complète et pour trois climats : le contrôleur prédictif démontre les meilleures performances sur les indicateurs avec une situation de confort équivalente ou améliorée, la consommation d'énergie peut être réduite de 30 à 40%.
- la répartition mensuelle des économies d'énergie fait apparaître un gain relatif plus marqué en intersaison (45%) par rapport aux deux contrôleurs de référence, il est de 25% en moyenne sur les mois d'hiver,
- le gain absolu est d'autant plus grand que le climat est rude.

Les conclusions présentées à partir des performances observées pour le contrôleur prédictif ne sont permises que sous trois conditions essentielles :

- disposer d'un modèle léger mais robuste reproduisant la dynamique de réponse du bâtiment aux sollicitations commandables et non commandables,
- d'élaborer une stratégie d'optimisation adaptée au travers de la fonction coût et du paramétrage du contrôleur prédictif,
- connaître les conditions intérieures et extérieures futures avec l'utilisation de prévisions fiables.

Ce chapitre fait donc la démonstration pour un cas particulier qu'est la plateforme SYNERGI du potentiel d'économies réalisables à l'aide du contrôle prédictif.

Conclusions et perspectives

Ces travaux se sont intéressés, pour un cas d'étude particulier, au gisement d'économie d'énergie que peut représenter un pilotage fin des équipements de chauffage. La diminution des dépenses énergétiques par le système de gestion du chauffage s'effectue généralement pour les bâtiments à occupation intermittente, par un réduit de la température de consigne. Cette variabilité implique des périodes d'arrêt et de relance. Seule une technique de pilotage optimale peut permettre un suivi de consigne sans surconsommation ni dégradation du confort. Ce travail de thèse proposait d'estimer le potentiel de l'une de ces techniques fondées sur l'anticipation des sollicitations intérieures et extérieures futures.

La combinaison de différents domaines de compétence (thermique, automatique, métrologie) pour une application de contrôle déployée sur un bâtiment réel, constitue un retour d'expérience significatif avec la mise en place d'une structure de contrôle complète. Ces travaux ont été réalisés avec une approche de thermicien du bâtiment via l'utilisation de modèles basés sur une analyse physique.

Un contrôleur prédictif nécessite le recours à un modèle interne du bâtiment qui reproduit correctement la réponse de celui-ci aux différentes sollicitations afin d'assurer la rétroaction dans une logique de contrôle en boucle fermée. Pour être compatible avec du contrôle temps réel, le modèle se doit d'être léger. Pour cela, l'utilisation d'un modèle a priori construit sous forme réduite est préconisé. Afin d'identifier les modèles, trois campagnes de mesures ont été réalisées avec un même protocole de mesure faisant intervenir un dispositif de infrarouge pour relever la température de surface du plancher chauffant. Chaque campagne sollicite différemment le plancher et l'air de la salle de façon à étudier la qualité de l'identification selon les données d'entrée. Trois modèles ont ensuite été proposés à partir des mesures disponibles, ils diffèrent dans leur façon de prendre en compte l'effet du plancher chauffant sur la température d'air qui est la variable à piloter.

Une maquette de bâtiment échelle réduite a permis de mener des tests préliminaires sur la qualité de l'identification en s'affranchissant de campagnes de mesures longues. L'algorithme des points intérieurs est utilisé pour trouver le jeu de paramètres qui minimise l'écart entre le modèle et les mesures. Cette

méthode a été éprouvée avec la maquette utilisée comme outil d'expérimentation rapide pour la thermique du bâtiment. Un modèle candidat au contrôle prédictif pour le bâtiment démonstrateur est trouvé en combinant la procédure d'identification avec une analyse de sensibilité. Elle a démontré l'importance du choix des sollicitations lors des campagnes de mesures pour obtenir un échantillon temporel le plus représentatif des périodes à contrôler. La procédure n'implique qu'un petit nombre de capteurs puisque les mesures exploitées sont la température d'air intérieur et extérieur, les températures de soufflage, la température d'entrée d'eau du plancher et la température de surface de la dalle. Cette dernière améliore la connaissance du système introduisant une approche de Contrôle Non Destructif (CND) pour le bâtiment et permettant une caractérisation non intrusive de la dynamique du plancher. Pour le contrôle, cette mesure n'est ensuite plus nécessaire et introduit un jeu minimal de capteurs différent entre l'identification et le contrôle en phase d'exploitation. Dans un futur proche, la mesure de température de surface sera permise par l'arrivée sur le marché de technologies infrarouges à bas coût.

Une boucle de contrôle complète a été imaginée du capteur à l'optimiseur et implémentée pour la stratégie de contrôle prédictive. Elle est comparée en simulation à deux stratégies de référence sur une saison de chauffe complète et pour trois conditions climatiques françaises. Le premier contrôleur de référence se sert du plancher chauffant en base avec une régulation par une loi d'eau et les ventilo-convecteurs sont en appoint. La seconde stratégie de référence anticipe l'occupation par la définition de scénarios basés sur la connaissance future du planning d'occupation pour un démarrage en amont des heures d'arrivées. Le contrôleur prédictif utilise le modèle candidat et permet d'anticiper à la fois l'occupation et les conditions extérieures. Les résultats obtenus ont été comparés en terme de consommation d'énergie, de ratio d'utilisation des deux systèmes et de taux d'inconfort. Pour la comparaison expérimentale, une correction a été effectuée pour tenir compte des différences climatiques (température extérieure et gains solaires). L'intérêt du contrôleur prédictif a été confirmé par l'expérimentation et la simulation sur trois climats avec une économie proche de 40% sur l'ensemble de la saison de chauffe en comparaison des deux autres stratégies de référence. Les gains les plus significatifs étant obtenus en intersaison.

Il est cependant nécessaire de relativiser la valeur des gains pour le contrôleur prédictif puisque ces résultats sont obtenus pour un bâtiment donné mais néanmoins comparés à des stratégies de gestion courantes. De plus, il a été démontré que la performance du contrôleur prédictif est conditionnée par un réglage fin des paramètres du MPC. L'intérêt d'un tel contrôleur est avéré avec une réduction des dépenses énergétiques et une amélioration du confort. Il serait intéressant de déterminer s'il est possible, grâce au contrôle prédictif, de s'affranchir du système d'appoint et de l'incidence du point de vue du confort. En effet, les résultats indiquent que le confort est peu dégradé pour une consommation d'énergie fortement améliorée. Il est également mis avant que le MPC maximise l'utilisation du plancher chauffant et limite les cycles marche/arrêt des ventilo-convecteurs réduisant l'usure de ceux-ci. Ces travaux pourraient être accompagnés d'une étude économique afin d'évaluer un temps de retour sur investissement d'une installation de contrôle complète. Dans leurs travaux, *Privara et al.* [190] estimaient cette durée à deux ans.

Il a été montré que plusieurs stratégies de contrôle peuvent présenter un niveau de confort acceptable mais des consommations énergétiques très différentes allant du simple au double. Bien que l'amélioration des propriétés thermiques de l'enveloppe reste la solution la plus efficace pour réduire la facture énergétique, il est possible d'obtenir des économies importantes sans réaliser de travaux sur l'enveloppe du bâtiment ni en changer les systèmes. C'est donc un moyen d'action intéressant qui vient s'ajouter au panel de solutions existantes en matière d'efficacité énergétique.

La méthode de sélection d'un modèle représentatif basée sur des mesures in situ qui a été présentée aux chapitres II et III n'est pas propre à une application de contrôle prédictive. En effet, elle peut par exemple être utilisée pour du diagnostic de performance dans une démarche de rénovation afin de disposer d'un modèle fiable de l'état l'existant.

Afin de compléter ces travaux, il serait intéressant de reproduire cette étude pour toute une gamme de performance, des bâtiments allant des constructions datant d'avant la première réglementation thermique aux bâtiments contemporains. Ainsi, il serait possible de chiffrer un potentiel à l'échelle d'un parc de bâtiments. Le contrôle prédictif pourrait également être déployé à l'échelle d'un quartier dans une logique de gestion de la demande (effacement de pics d'appel de puissance) ou de tarification dynamique.

Le fait de piloter un système capacitif de façon anticipative, ajoute une difficulté supplémentaire en terme de caractérisation. Cependant cela permet des gains énergétiques accrus dont le potentiel sur un cas d'étude représentatif mené avec des solutions industrielles a été démontré. D'autres études menées dans le cadre du projet PRECISION et en dehors confirment l'intérêt du contrôle anticipatif avec des systèmes de chauffage réactifs et où seule l'inertie du bâtiment entre en jeu. De plus, les stratégies anticipatives peuvent s'appliquer dans une logique de confort d'été : la commande d'un système de climatisation peut se faire en anticipation d'une hausse de température due aux conditions extérieures où à l'arrivée d'occupants. De même, dans le cas d'une climatisation passive par rafraîchissement nocturne il serait possible de commander la centrale de traitement de l'air ou l'ouverture de fenêtres en anticipation des apports solaires prévus le jour suivant. Ainsi, l'installation d'un tel contrôleur se justifierait toute l'année et pourrait faire appel au même modèle qu'il serait en revanche nécessairement de re-identifier. Ces travaux ont montré que la consommation d'énergie pouvait être minimisée par le contrôle prédictif. Cependant, celui-ci peut également servir à optimiser la production en utilisant le contrôle prédictif comme outil de gestion de la production solaire thermique ou photovoltaïque. L'intérêt du contrôle prédictif peut donc être multiple.

La technique de contrôle prédictive présentée est flexible et peut tenir compte d'autres critères selon le modèle et l'écriture de la fonction coût. En effet, il est possible d'intégrer d'autres équations physiques dans le modèle interne au contrôleur afin que le pilotage puisse également s'effectuer sur des contraintes économiques, acoustiques ou physiologiques par exemple. In fine, le potentiel d'un tel contrôleur ne se limite pas au cadre de ces travaux et du pilotage des systèmes de chauffage puisque son application est multi-échelle, multifonction et multicritère.

Références

- [1] International Energy Agency (IEA), Energy in Buildings and Communities Programme, Annex 53: Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation Methods, (2008-2013).
- [2] M. Bonte, Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment. Modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ, Université Toulouse III, (2014).
- [3] R.Z. Freire, G.H.C. Oliveira, N. Mendes, Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings, Energy Build. 40 (2008).
- [4] M.H. Le, S. Ploix, F. Wurtz, Application of an anticipative energy management system to an office platform, Proceedings of BS2013, (2013).
- [5] R. Lepore, C. Renotte, M. Frère, E. Dumont, Energy consumption reduction in office buildings using model-based predictive control, (2013).
- [6] Observations et statistiques du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr, (2012).
- [7] P.D. Morosan, Commande prédictive distribuée. Approches appliquées à la régulation thermique des bâtiments, Supélec, Thèse, (2011).
- [8] Mejri O, Développement de méthodes de diagnostic énergétique des bâtiments, Université de Bordeaux, Thèse, (2011).
- [9] J-M. Jancovici, www.manicore.com, (2016).
- [10] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Electricité nucléaire et consommation d'énergie primaire et finale, DGEC, modifié le 12 juin 2009, (2009).
- [11] Electricité Réseau Distribution France - www.erdf.fr, (2016).
- [12] M.K. Hubbert, Nuclear energy and fossil fuels, Drilling and production practice, American Petroleum Institute, (1956).
- [13] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Chiffres clés du climat, (2015).
- [14] C. Campbell, World Oil Production Forecast to 2050, Association for the Study of Peak Oil and Gas, (2003).
- [15] A. Magnin, <http://sustainabilityillustrated.com/fr/>, (2016).
- [16] IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson,

- R.T. and the Core Writing Team (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, (2001).
- [17] J.R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, NI Barkov, JM Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, et al.. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, (1999).
- [18] M. Zemp, I. Roer, A. Kääb, M. Hoelzle, M. Paul and F. Haeberli, WGMS: Global Glacier Changes: facts and figures, edited by: UNEP, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland: 88 pp, (2008).
- [19] P. René, Les glaciers des Pyrénées françaises - rapport annuel 2009-10, Association MORAINÉ, (2010).
- [20] R. Marti, S. Gascoin, T. Houet, O. Ribière, D. Laffly, T. Condom, et al., Evolution of Ossoue Glacier (French Pyrenees) since the end of the Little Ice Age, *Cryosphere*. 9 (2015).
- [21] IPCC, Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (2013).
- [22] L. SwanG, I. Ugursal, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector : a review of modeling techniques. *Renew Sustain Energy Rev*, (2009).
- [23] Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie, Climat, Air et Energie - Chiffres clés, (2014).
- [24] Journal Officiel de la république Française, Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique, (2005).
- [25] Journal Officiel de la république Française, Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1), (2015).
- [26] Association Négawatt, Manifeste Négawatt - Réussir la transition énergétique, éd Domaines du possible Actes Sud, (2012).
- [27] M. Cosnier, L. Reynier, D. Quenard, C. Pele, J.C. Visier, Proposition d'indicateurs et d'un référentiel définissant la maison à énergie positive, CSTB, EMI/13-XXX/MC/DQ, (2013)
- [28] NF P01-010, Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction, (2004).
- [29] A. M. Butz, Thermo-electric damper-regulator and alarm, US Patent 341092 A, (1886).
- [30] N. Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Paris, (Hermann & Cie) & Camb. Mass. (MIT Press) ISBN 978-0-262-73009-9, (1948).

- [31] NF EN 15232, Performance énergétique des bâtiments - Impact de l'automatisation, de la régulation et de la gestion technique, (2012).
- [32] Journal Officiel de la république Française, Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, (2010).
- [33] H. Bourlès, Systèmes linéaires, de la modélisation à la commande, Ed. Hermès Science, (2006).
- [34] G. Krauss, Bâtiment et energie - Chauffage, document de cours INSA Lyon. (2007).
- [35] Architecture et Climat, La régulation du chauffage dans les établissements scolaires - Fascicule techniques, Ministère de la région Wallonne, (1998).
- [36] J. Richalet, A. Rault, J.L. Testud, J. Papon, Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes, Automatica, (1978).
- [37] D.W. Clarke, C. Mohtadi, P.S. Tuffs, Generalized predictive control-part I. The basic algorithm, Automatica, (1987).
- [38] www.scopus.com, (2015).
- [39] M.Y. Lamoudi, Commande prédictive distribuée pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment, Université de Grenoble, Thèse, (2012).
- [40] D. Gyalistras, Use of Weather and Occupancy Forecasts for Optimal Building Climate Control (OptiControl) - Final report, Swiss Electric Research, (2010).
- [41] D. Sturzenegger, D. Gyalistras, M. Gwerder, C. Sagerschnig, M. Morari & R.S. Smith, Model predictive control of a Swiss office building, Proceedings of the 11th REHVA World Congress Clima, (2013).
- [42] Agence Nationale de la Recherche - Appel à projet Villes et Bâtiments Durables - Du cadre de vie aux systèmes urbains durables. <http://www.agence-nationale-recherche.fr>, (2012).
- [43] Agence Nationale de la Recherche - Programme Villes et Bâtiments Durables - Document scientifique projet PRECISION. <http://www.agence-nationale-recherche.fr>, (2012).
- [44] M. Schumann, Vers une plateforme de modélisation du bâtiment au quartier multi-physiques avec Modelica et Buildsyspro, Présentation école d'été SIMUREX. (2015).
- [45] X. Li, J. Wen, Review of building energy modeling for control and operation, Renew. Sustain. Energy Rev. (2014).
- [46] J. Zhao, K. Poh Lam, B.E. Ydstie, EnergyPlus model-based predictive control (EPMPC) by using Matlab/Simulink and MLE+, Proceedings of BS2013 (2013).
- [47] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang, C.O. Pedersen, et al., EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program, Energy Build. (2001).

- [48] C. Miller, C. Hersberger, M. Jones, Automation of common building energy simulation workflows using Python. Proceedings of BS2013 (2013).
- [49] J.A. Clarke, Energy Simulation in Building Design (2nd ed). Oxford: Butterworth-Heinemann. (2001).
- [50] Y. Liu, Y. Pan, Z. Huang, Simulation-based receding-horizon supervisory control of HVAC system, Proceedings of BS2013 (2013).
- [51] C. Flory-Celini, Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant, Université Lyon 1 Chaude Bernard, Thèse, (2008).
- [52] M. Wetter , W. Zuo , T. Stephane Nouidui, Modeling of heat transfer in rooms in the Modelica « buildings » library, Proceedings of BS2013 (2011).
- [53] G. Plessis, A. Kaemmerlen, A. Lindsay, BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems, (2014).
- [54] J. Bois, L. Mora, E. Wurtz, Energy Saving Analysis of a Solar Combi-system using Detailed Control Algorithm Modeled with Modelica, Energy Procedia, (2015).
- [55] M.J. Jiménez, H. Madsen, Models for describing the thermal characteristics of building components, Build. Environ, (2008).
- [56] C. Ghiaus, Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load, Energy, (2013).
- [57] A.P. Melo, R. Lamberts, D. Cóstola, J.L.M. Hensen, Development of a method to predict building energy consumption through an artificial neural network approach, Proceedings of BS2013, (2013).
- [58] H.R. Khosravani, M. Del Mar Castilla, M. Berenguel, A.E. Ruano, P.M. Ferreira, A Comparison of Energy Consumption Prediction Models Based on Neural Networks of a Bioclimatic Building, (2016).
- [59] C.T. Cheung, K.W. Mui, L.T. Wong, A hybrid simulation approach to predict cooling energy demand for public housing in Hong Kong, Build. Simul, (2015).
- [60] T. Berthou, Développement de modèles de bâtiment pour la prévision de charge de climatisation et l'élaboration de stratégies d'optimisation énergétique et d'effacement, Ecole des Mines de Paris, Thèse, (2013).
- [61] Building Systems Laboratory, BLAST 3.0 Users Manual, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL, (1999).
- [62] F.C. Winkelmann, B.E. Birsall, W.F. Buhl, K.L. Ellington, A.E. Erdem, J.J. Hirsch, S. Gates, DOE-2 Supplement, Version 2.1E, LBL-34947, Lawrence Berkeley National Laboratory, National Technical Information Service, Virginia, Springfield, (1993).

- [63] W. Bernal, M. Behl, T. Xuan Nghiem, R. Mangharam, MLE+: A tool for integrated design and deployment of energy efficient building controls. 4th ACM Workshop on embedded sensing systems for energy-efficiency in buildings, Toronto, (2012).
- [64] H. Zhao, F. Magoulès. A review on the prediction of building energy consumption. *Renew Sustain Energy Rev*, (2012).
- [65] R.E. Kalman, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems 1, (1960).
- [66] S.A. Marschall, An approximate method for reducing the order of a linear system, *Control Engineering*, (1966).
- [67] A. Oulefki, Réduction de modèles thermiques par amalgame modal, Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, Thèse, (1993).
- [68] G.P. Michailesco, Approximation des systèmes complexes par des modèles de dimension réduite, Université Paris XI, Thèse, (1979).
- [69] G.H. Golub, C. Reinsch, Singular value decomposition and least squares solutions, (1970).
- [70] B. Moore, Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability, and model reduction, *IEEE Trans. Automat. Contr*, (1981).
- [71] A. Sempey, Prise en compte du champ thermo-convectif pour le contrôle thermique des espaces habitables, Université de La Rochelle, Thèse, (2007).
- [72] Méthode COMFIE - Cahier d'algorithmes, www.izuba.fr, (2014).
- [73] M. Fernandes, Stratégies pour l'amélioration par le modèle et l'expérience de la gestion de l'énergie et du confort dans le bâtiment, Rapport de stage, ENSEIRB MATMECA, (2014).
- [74] L. Ljung, *System Identification Theory for User*, Ed. Pearson Education, (1987).
- [75] D. Petit, Réduction de modèles de connaissance et identification de modèles d'ordre réduit: application aux processus de diffusion thermique, Université Aix-Marseille 1, Thèse, (1991).
- [76] M. Correvon, *Electronique de puissance - Modélisation thermique des composants de puissance*, cours HES.SO.
- [77] Méthode de calcul Th-BCE 2012, arrêté du 20 juillet 2011, (2011).
- [78] ISO 13790 - Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, (2008).
- [79] R.K. McLaughlin, R.C. McLean, W.J. Bonthron, Heating services design, Ed. Butterworth-Heinemann, (1981).
- [80] F. Lorenz, G. Masy, Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apportée par l'intermittence de chauffage dans les bâtiments. Traitement par différences finies d'un modèle à deux constantes de temps, (1982).

- [81] A.A. Nielsen, B.K. Nielsen, A dynamic test method for the thermal performance of small houses, Proceedings of ACEEE (1984).
- [82] G.G.J. Achterbosch, P.P.G. de Jong, C.E. Krist-Spit, S.F. Van Der Meulen, J. Verberne, The development of a convenient thermal dynamic building model, Energy Build. (1985).
- [83] J.A. Crabb, N. Murdoch, J.M. Penman, A simplified thermal response model, Building Services Engineering Research & Technology, (1987).
- [84] A.K. Athienitis, M. Stylianou, J. Shou, Methodology for building thermal dynamics studies and control applications, ASHRAE Transactions, 96, 839-848, (1990).
- [85] D.A. Coley, J.M. Penman, Simplified thermal response modelling in building energy management. Paper III: Demonstration of a working Controller, Building and Environment, (1995).
- [86] H. Madsen, J. Holst, Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, Energy Build, (1995).
- [87] G. Hudson, C.P. Underwood, A simple building modelling procedure for Matlab/Simulink, Proceedings of BS1999, (1999).
- [88] N. Mendes, G.H.C. Oliveira, H.X. De Araújo, Building thermal performance analysis by using Matlab/Simulink, Proceedings of BS2001, (2001).
- [89] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie, G. Achard, Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy, Energy Build, (2002).
- [90] M.M. Gouda, S. Danaher, C.P. Underwood, Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization, Energy Build, (2002).
- [91] S. Wang, X. Xu, Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification, Energy Build, (2006).
- [92] K. Deng, P. Barooah, P.G. Mehta, S.P. Meyn, Building thermal model reduction via aggregation of states, Proceedings of American Control Conference (ACC), (2010).
- [93] P. Bacher, H. Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, Energy Build, (2011).
- [94] H. Park, N. Martaj, M. Ruellan, R. Bennacer, E. Monmasson, Modeling of a Building System and its Parameter Identification, J Electr Eng Technol, (2013).
- [95] G.A. Faggianelli, A. Brun, E. Wurtz, M. Muselli, Grey-box modelling for naturally ventilated buildings, Proceedings of BS2015, (2015).
- [96] M. García-Sanz, A reduced model of central heating systems as a realistic scenario for analyzing control strategies, Appl. Math. Model, (1997).

- [97] M. Kummert, P. André, Simulation of a model-based optimal controller for heating systems under realistic hypothesis, Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association (IBPSA) Conference, (2005).
- [98] J. Wen, T.F. Smith, Development and validation of online models with parameter estimation for a building zone with VAV system, Energy and Buildings, (2007).
- [99] D.L. Ha, S. Ploix, E. Zamai, M. Jacomino, Realtimes dynamic optimization for demand-side load management, International Journal of Management Science and Engineering Management, (2008).
- [100] C. Ghiaus, I. Hazyuk, Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings, Energy Build, (2010).
- [101] H. Karlsson, C.-E. Hagentoft, Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings, Build. Environ, (2011).
- [102] B. Lehmann, D. Gyalistras, M. Gwerder, K. Wirth, S. Carl, Intermediate complexity model for Model Predictive Control of Integrated Room Automation, Energy Build, (2013).
- [103] M. Sourbron, S. Antonov, L. Helsen, Potential and parameter sensitivity of model based predictive control for concrete core activation and air handling unit, Proceedings of BS2013, (2013).
- [104] J. Hu, P. Karava, Simulation of anticipatory control strategies in buildings with mixed-mode cooling, Proceedings of BS2013, (2013).
- [105] S. Bacha, L. Belhadji, R. Missaoui, S. Ploix, Validation of Building Energy Management Strategy: Application to Home Thermal Zone, Proceedings of the 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, (2013).
- [106] S. Sarabi, S. Ploix, M.H. Le, H.A. Dang, F. Wurtz, Assessing the relevance of reduced order models for building envelop G-SCOP lab, Proceedings of BS2013, (2013).
- [107] J. Leclere, F. Wurtz, E. Wurtz, A low order envelope model for optimised predictive control of indoor temperature: development methodology and calibration with a numerical model, Proceedings of BS2013, (2013).
- [108] Circulaire du 20 janvier 1983 relative à la révision du règlement sanitaire départemental type, JO 25-02-1983 p. NC 2134-2142, (1983).
- [109] E. Foda, K. Siren, Evaluating the thermal comfort performance of heating systems using a thermal manikin with human thermoregulatory control, Indoor Built Environ, (2014).
- [110] ASHRAE handbook 2009 – fundamentals. Energy estimating and modeling methods [chapter19], (2009).
- [111] C. Cornaro, V.A. Puggioni, R.M. Strollo, Dynamic simulation and on-site measurements for energy retrofit of complex historic buildings: Villa Mondragone case study, J. Build. Eng, (2016).

- [112] V. Prodjintono, Contribution à l'économie d'énergie dans le bâtiment : mesure de capacité de stockage dynamique d'une paroi, Université de Bordeaux, Thèse, (2011).
- [113] D. Pajani, Thermographie - Principes et mesures, Dossier Techniques de l'Ingénieur, (2013).
- [114] P.A. Fokaides, S.A. Kalogirou, Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, Appl. Energy, (2011).
- [115] C. Spitz, L. Mora, E. Wurtz, A. Jay, Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house, Energy Build, (2012).
- [116] J. Eynard, Gestion optimale de l'énergie dans un procédé multi-source pour le chauffage de bâtiments, Université de Perpignan Via Domitia, Thèse, (2010).
- [117] B. Paris, J. Eynard, F. Thiery, A. Traoré, M. Polit, T. Talbert, Travaux pratiques sur la gestion énergétique optimale d'un bâtiment EnR. J3eA, 8(HORS S_ ERIE1) :1006-1006, (2009).
- [118] M. Bodart, A. Deneyer, N. Moenssens, Guide précis d'aide à la construction des modèles réduits - Pour utilisation et mesures sous ciel artificiel au CSTC, Centre Scientifique et Technique de la Construction, (2008).
- [119] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance, Energy and Buildings, (2006).
- [120] S.E.G. Jayamaha, N.E. Wijesundera, S.K. Chou, Measurement of the heat transfer coefficient for walls, Building and Environment, (1996).
- [121] C. Luo, B. Moghtaderi, S. Hands, A. Page, Determining the thermal capacitance, conductivity and the convective heat transfer coefficient of a brick wall by annually monitored temperatures and total heat fluxes, Energy and Buildings, (2011).
- [122] C. Peng, Z. Wu, In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, Energy and Buildings, (2008).
- [123] A. Le Mounier, B. Delinchant, S. Ploix, Rapport sur les algorithmes d'estimation paramétrique en ligne pour caractériser les paramètres d'enveloppe, les paramètres des appareils électriques et les paramètres des fonctions de satisfaction représentatives des attentes de confort des occupants, Livrable 3.3.2 du projet PRECCSION, (2013).
- [124] E. Walter, L. Pronzato, Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales, Ed. Masson, (1994).
- [125] L. Ljung, System Identification Theory for User, Ed. Pearson Education, (1987).
- [126] S. Place, Q. Trigallez, Identification pour l'estimation d'état, cours EPFL, (2006).
- [127] A. Le Mounier, B. Delinchant, S. Ploix, Choix de structures de modèles pertinentes pour l'identification des systèmes de gestion d'énergie, Proceedings of IBPSA, (2014).

- [128] P. Segalat, Méthode de points intérieurs et de quasi-Newton, Université de Limoges, Thèse, (2002).
- [129] K.R. Frisch, The logarithmic potential method of convex programming, Technical Report, University Institute of Economics, Oslo, Norway, (1955).
- [130] L.G. Khachiyan, A polynomial algorithm in linear programming, Soviet Mathematics Doklady, (1979).
- [131] N. Karmarkar, A new polynomial-time algorithm for linear programming, Combinatorica, (1984).
- [132] I. Hazyuk, C. Ghiaus, D. Penhouet, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part I – Building modeling, Build. Environ, (2012).
- [133] NF EN 12831, Systèmes de chauffage dans le bâtiment - Méthode de calcul des déperditions calorifiques de base, (2004).
- [134] NF EN ISO 10211 : Ponts thermiques dans les bâtiments - Flux thermiques et températures superficielles – Calculs détaillés, (2008).
- [135] T. Recht, F. Munaretto, P. Schalbart, B. Peuportier, Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif, Ibpsa. (2014).
- [136] J. Candanedo, A. Athienitis, Predictive control of radiant floor heating and solar-source heat pump operation in a solar house, HVAC&R Res, (2011).
- [137] T. Söderström, P. Stoica, System identification. Prentice Hall International, (2001).
- [138] B. Iooss, Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques, Journal de la Société Française de Statistique, (2011).
- [139] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola, Introduction to sensitivity analysis, (2008).
- [140] W. Castaings, Analyse de sensibilité et estimation de paramètres pour la modélisation hydrologique: potentiel et limitations des méthodes variationnelles, Université Joseph Fourier, Thèse, (2007).
- [141] M. Morris, Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, Technometrics, 33:161–174, (1991).
- [142] B. Iooss, Analyse de sensibilité globale de modèles numériques: méthodologie générale et développements récents, Présentation JSO 2012, www-mip.onera.fr/projets/JSO-2012 (2012)
- [143] E. Mangematin, G. Pandraud, D. Roux, Quick measurements of energy efficiency of buildings, Comptes Rendus Physique,(2012).
- [144] K. Zhao, X.H. Liu, Y. Jiang, Dynamic performance of water-based radiant floors during start-up and high-intensity solar radiation, Sol. Energy, (2014).

- [145] N. Fumo, A review on the basics of building energy estimation, *Renew. Sustain. Energy Rev*, (2014).
- [146] G.A. Faggianelli, *Rafraîchissement par la ventilation naturelle traversante des bâtiments en climat méditerranéen*, Université de Corse - Pascal Paoli, Thèse, (2014).
- [147] K. Liu, Z. Tian, C. Zhang, Y. Ding, W. Wang, Establishment and validation of modified star-type RC-network model for concrete core cooling slab, *Energy Build*, (2011).
- [148] I. Naveros, C. Ghiaus, Order selection of thermal models by frequency analysis of measurements for building energy efficiency estimation, *Appl. Energy*, (2015).
- [149] S. Gilani, H. Montazeri, B. Blocken, CFD simulation of temperature stratification for a building space: validation and sensitivity analysis, *Proceedings of BS2013*, (2013).
- [150] ISO 6946 - Composants et parois de bâtiments - Résistance thermique et coefficient de transmission thermique - Méthode de calcul, (2007).
- [151] J. Cigler, S. Prívará, Z. Vána, E. Žáčková, L. Ferkl, Optimization of Predicted Mean Vote index within Model Predictive Control framework: Computationally tractable solution, *Energy Build*, (2012).
- [152] G.G.J. Achterbosch, P.P.G. de Jong, C.E. Krist-Spit, S.F. Van Der Meulen, J. Verberne, The development of a convenient thermal dynamic building model, *Energy Build*, (1985).
- [153] H.B. Awbi, A. Hatton, Natural convection from heated room surfaces, *Energy Build*, (1999).
- [154] T.C. Min, L.F. Schutrum, G.V. Parmelee, J.D. Vouris, Natural convection and radiation in a panel heated room, *ASHRAE Transactions* 62, (1956).
- [155] BS EN 1264-5, Heating and cooling surfaces embedded in floors, ceilings and walls – determination of the thermal output, (2008).
- [156] B.W. Olesen, Radiant floor cooling systems, *ASHRAE Journal* 50, (2008).
- [157] S. Bontemps, *Validation expérimentale de modèles : application aux bâtiments basse consommation*, Université de Bordeaux, Thèse, (2015).
- [158] Norme Française NF P 52-303-1, DTU 65.8 - Exécution de planchers chauffants à eau chaude utilisant des tubes en matériau de synthèse noyés dans le béton, (1993).
- [159] www.xpair.com, (2016).
- [160] <https://elyotherm.fr/>, (2016).
- [161] NF EN 1264-1, Systèmes de surfaces chauffantes et rafraîchissantes hydrauliques intégrées, (2011).
- [162] B. Kouvaritakis and M. Cannon, *Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic*, Springer (2015).

- [163] V. Dombrovskii, T. Obyedko, Model predictive control for constrained systems with serially correlated stochastic parameters and portfolio optimization, *Automatica*, (2015).
- [164] A.I. Propoi, Use of LP methods for synthesizing sampled-data automatic systems. *Automn Remote Control*, 24, 837, (1963).
- [165] C.R. Cutler, B.L. Ramaker, Dynamic matrix control - A computer control algorithm. AIChE National Mtg, Houston, Texas (1979).
- [166] D.M. Prett, R.D. Gillette, Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit. AIChE National Mtg, Houston (1979).
- [167] C.E. García, D.M. Prett, M. Morari, Model predictive control: theory and practice a survey, *Automatica*, (1989).
- [168] C.R. Cutler, R.B. Hawkins, Constrained multivariable control of a hydrocracker reactor. *Proc. Am. Control Conf.*, Minneapolis, Minnesota, pp. 1014-1020, (1987).
- [169] S.J. Qin, T. a Badgwell, A survey of industrial model predictive control technology, *Control Eng*, (2003).
- [170] Y.D. Landau, *Adaptative Control: The Model Reference Approach*, Marcel Dekker Inc., New York, (1979).
- [171] D.P. Bloomfield, D.J. Fisk, The Optimization of Intermittent Heating, *Buildings and Environment*, Vol. 12, pp. 43-55, (1977).
- [172] C. Benard, B. Guerrier, M.-M. Rosset-Louerat, Optimal Building Energy Management: Part I—Modeling, *J. Sol. Energy Eng*, (1992).
- [173] C. Benard, B. Guerrier, M.-M. Rosset-Louerat, Optimal Building Energy Management: Part II—Control, *J. Sol. Energy Eng*, (1992).
- [174] Ma Y, Borrelli F, Hency B, Packard A, Bortoff S. Model predictive control of thermal energy storage in building cooling systems. In: *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*. Shanghai, China, (2009).
- [175] Lee K-H, Braun JE. Model-based demand-limiting control of building thermal mass. *Build Environ*, (2008).
- [176] S. Yuan, R. Perez, Multiple-zone ventilation and temperature control of a single-duct VAV system using model predictive strategy. *Energ Buildings*, (2006).
- [177] M. Kummert, P. André, J. Nicolas, Optimal heating control in a passive solar commercial building, *Sol. Energy*, (2000).
- [178] D. Kolokotsa, a. Pouliezos, G. Stavrakakis, C. Lazos, Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings, *Build. Environ*, (2009).

- [179] P.-D. Moroşan, R. Bourdais, D. Dumur, J. Buisson, Building temperature regulation using a distributed model predictive control, *Energy Build*, (2010).
- [180] I. Hazyuk, C. Ghiaus, D. Penhouet, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part II – Control algorithm, *Build. Environ*, (2012).
- [181] S. Prívvara, Z. Vána, E. Žáčková, J. Cigler, Building modeling: Selection of the most appropriate model for predictive control, *Energy Build*, (2012).
- [182] J. Cigler, P. Tomáško, J. Šíroký, BuildingLAB: A tool to analyze performance of model predictive controllers for buildings, *Energy Build*, (2013).
- [183] S. Petersen, K.W. Bundgaard, The effect of weather forecast uncertainty on a predictive control concept for building systems operation, *Appl. Energy*, (2014).
- [184] H. Quintana, M. Kummert, Potential of model predictive control (MPC) strategies for the operation of solar communities, *Proceedings of BS2013*, (2013).
- [185] O. Alhaj Hasan, D. Defer, I. Shahrour, A simplified building thermal model for the optimization of energy consumption: Use of a random number generator, *Energy Build*, (2014).
- [186] N. Artiges, A. Nassiopoulos, Commande optimale et analyse de sensibilité par méthode adjointe pour l'identification paramétrique de modèles du bâtiment, *Conférence IBPSA France*, (2014).
- [187] ISO 13790, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, (2008).
- [188] T.Y. Chen, Application of adaptive predictive control to a floor heating system with a large thermal lag, *Energy Build*, (2002).
- [189] S.H. Cho, M. Zaheer-Uddin, Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems, *Energy Convers. Manag.*, (2003).
- [190] S. Prívvara, J. Šíroký, L. Ferkl, J. Cigler, Model predictive control of a building heating system: The first experience, *Energy Build*, (2011).
- [191] C. Verhelst, F. Logist, J. Van Impe, L. Helsens, Study of the optimal control problem formulation for modulating air-to-water heat pumps connected to a residential floor heating system, *Energy Build*, (2012).
- [192] S. Li, J. Joe, J. Hu, P. Karava, System identification and model-predictive control of office buildings with integrated photovoltaic-thermal collectors, radiant floor heating and active thermal storage, *Sol. Energy*, (2015).
- [193] Lee J-Y, Yang I-H, Song S-Y, Kim H-S, Kim K-W. A study of the predictive control of the ondol system in apartments. In: *Proceedings of the seventh International Building performance Simulation (IBPSA) Conference*, Kyoto, Japan, (1999).

- [194] P. Maussion, D. Hissel, Vers une méthode de réglage expérimentale des commandes PID floues : Application aux systèmes électromécaniques, EPJ Applied Physics, (1998).
- [195] UE Interreg projet - www.crest-project.eu, (2013).
- [196] NF EN 15251, Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique, (2007).
- [197] ISO 7726, Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de mesure des grandeurs physiques, (1998).
- [198] P.O. Fanger, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, (1970).
- [199] ISO 7730, Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local, (2005).
- [200] A. Mochida, H. Yoshino, T. Takeda, T. Kakegawa, S. Miyauchi, Methods for controlling airflow in and around a building under cross-ventilation to improve indoor thermal comfort. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (2005).
- [201] G. Zhou, M. Krarti, G.P. Henze, Parametric Analysis of Active and Passive Building Thermal Storage Utilization, J. Sol. Energy Eng, (2005).
- [202] M. Bonte, A. Perles, B. Lartigue, F. Thellier, An Occupant Behavior Model Based on Artificial Intelligence for Energy Building Simulation, Proceedings of BS2013, (2013).
- [203] F. Thellier, M. Bonte, B. Lartigue, Sans occupant les bâtiments ne consomment pas d'énergie !, Journées Internationales de La Sociologie de l'Energie, (2012).
- [204] F. Thellier, F. Monchoux, S. Spagnol, M. Bonnis-Sassi, Measurement of Ambient Air Temperature for Evaluation of Human Heat Convective Losses, Measurement, (2009).
- [205] P.H. Shaikh, N.B.M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, T. Ibrahim, A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, Renew. Sustain. Energy Rev, (2014).
- [206] L. Mettetal, La question énergétique dans l'habitat privé : le profil déterminant des ménages, Note rapide, n°476, IAU, Ile-de-France, (2009).
- [207] J.F. Nicol, M. A. Humphreys, New Standards for Comfort and Energy Use in Buildings, Building Research & Information 37 (1): 68–73. doi:10.1080/09613210802611041, (2009).
- [208] E. Vorger, Etude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments, Ecole National Supérieure des mines de Paris, thèse, (2014).

- [209] C. Ghiaus, Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods, *Energy Build*, (2006).
- [210] M. Sourbron, Dynamic thermal behaviour of buildings with concrete core activation, Katholieke Universiteit Leuven, Thèse, (2012).
- [211] M. Gwerder, B. Lehmann, J. Tödtli, V. Dorer, F. Renggli, Control of thermally-activated building systems (TABS), *Appl. Energy*, (2008).
- [212] A. Bemporad, M. Morari, N. Lawrence Ricker, Model Predictive Control Toolbox for use with MATLAB - User's guide version2, (2005).
- [213] Meteonorm Software - <http://www.meteonorm.com>, (2015).
- [214] Association Infoclimat - <http://asso.infoclimat.fr/>, (2016).
- [215] Météo France Publithèque, (2015).

Annexe A

Composition des murs de la salle SYNERGI

mur pignon	Matériaux	épaisseur [cm]	masse volumique [kg/m ³]	conductivité [W/m.K]	résistance thermique [m ² .K/W]	capacité thermique [J/kg.K]
	béton lourd	25	2300	1,75	0,14	920
	PSExp	10	25	0,039	2,56	1380
	lame d'air	1,2	1	0,08	0,15	1000
	placoplatre BA13	1,3	850	0,325	0,04	799
	TOTAL	37,5	-	-	2,89	-

cloison intérieure	Matériaux	épaisseur [cm]	masse volumique [kg/m ³]	conductivité [W/m.K]	résistance thermique [m ² .K/W]	capacité thermique [J/kg.K]
	placoplatre BA13	1,3	850	0,325	0,04	799
	placoplatre BA13	1,3	850	0,325	0,04	799
	lame d'air	1,5	1	0,094	0,16	1000
	placoplatre BA13	1,3	850	0,325	0,04	799
	placoplatre BA13	1,3	850	0,325	0,04	799
TOTAL	6,7	-	-	0,32	-	

mur sur LNC	Matériaux	épaisseur [cm]	masse volumique [kg/m ³]	conductivité [W/m.K]	résistance thermique [m ² .K/W]	capacité thermique [J/kg.K]
	parpaing	20	1300	1,053	0,19	648
	PSExp	10	25	0,039	2,56	1380
	lame d'air	1,2	1	0,08	0,15	1000
	placoplatre BA13	1,3	850	0,325	0,04	799
TOTAL	32,5	-	-	2,94	-	

mur bardage métallique	Matériaux	épaisseur [cm]	masse volumique [kg/m ³]	conductivité [W/m.K]	résistance thermique [m ² .K/W]	capacité thermique [J/kg.K]
	acier inox	0,1	7900	17	0	460
	laine de verre	7,5	12	0,041	1,83	840
	laine de verre	12	12	0,041	2,93	840
	acier inox	0,1	7900	17	0	460
	lame d'air	1,2	1	0,08	0,15	1000
	placoplatre BA13	1,3	850	0,325	0,04	799
	TOTAL	22	-	-	4,95	

plancher	Matériaux	épaisseur [cm]	masse volumique [kg/m ³]	conductivité [W/m.K]	résistance thermique [m ² .K/W]	capacité thermique [J/kg.K]
	béton lourd	12	2300	1,75	0,07	920
	PSExt	2	35	0,029	0,69	1380
	béton lourd	2	2300	1,75	0,01	920
	TOTAL	16	-	-	0,77	-

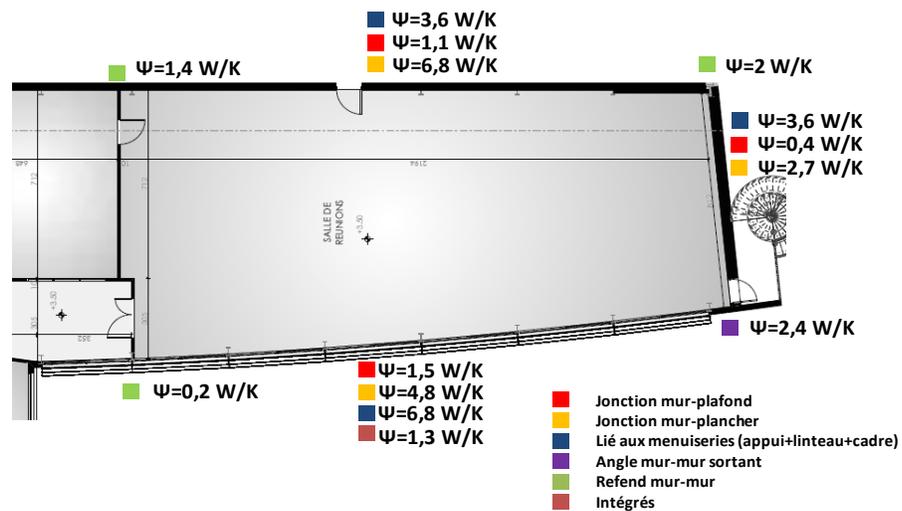
plafond	Matériaux	épaisseur [cm]	masse volumique [kg/m ³]	conductivité [W/m.K]	résistance thermique [m ² .K/W]	capacité thermique [J/kg.K]
	feutre bitumineux	0,5	2300	0,5	0,01	1000
	laine de roche	16	25	0,041	3,9	920
	acier inox	0,1	7900	17	0	460
	lame d'air	1,5	1	0,094	0,16	1000
	laine de verre	1	12	0,041	0,24	840
	TOTAL	19,1	-	-	4,31	-

Caractéristiques des vitrages de la salle SYNERGI

On compte 1 type de menuiseries et 2 types de portes. Les menuiseries sont composées d'un double vitrage et d'un cadre métallique.

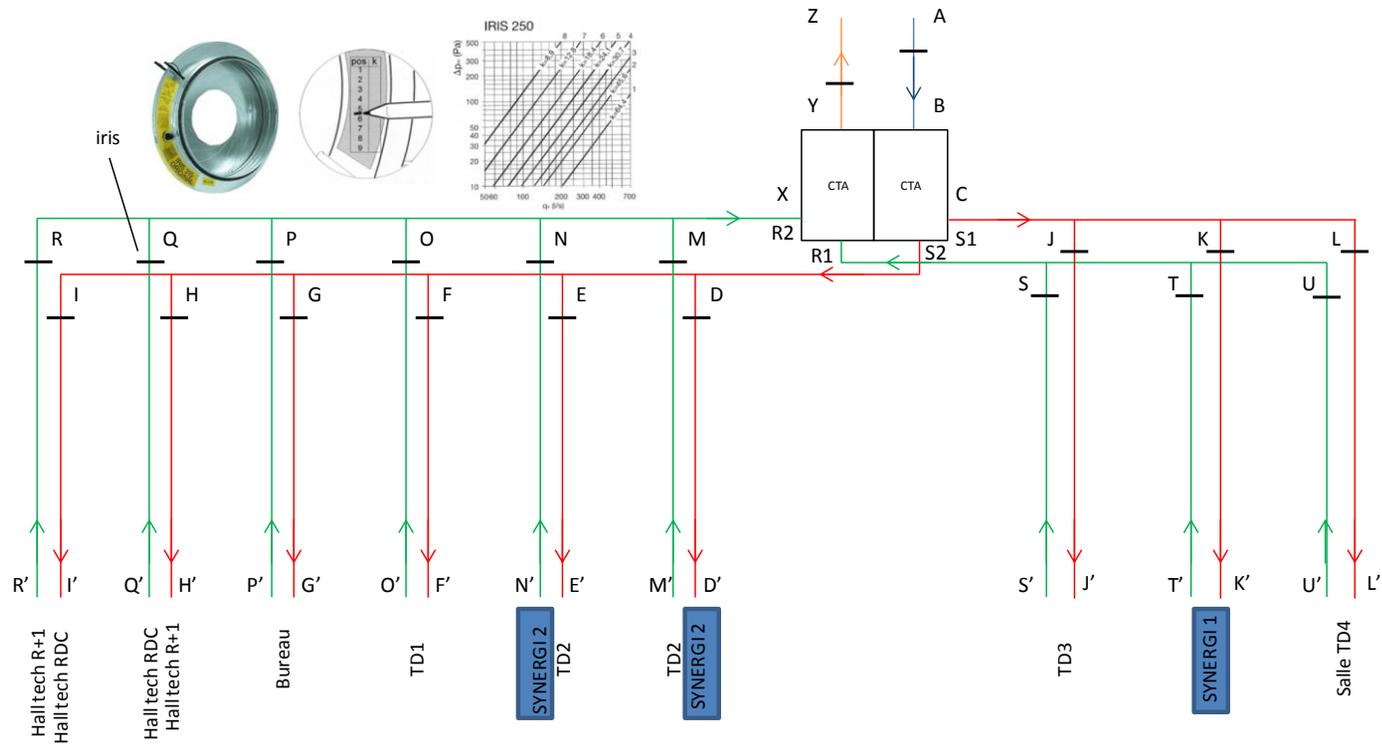
Menuiseries/portes	Dénomination	hauteur	largeur	allège	Uw	facteur solaire
		[m]	[m]	[m]	[W/m ² .K]	[-]
	portes intérieures	2,04	0,83	-	5,0	-
	portes extérieures	2,04	0,83	-	1,5	-
	fenêtre façade ouest	1,8	1,6	0,9	3,4	0,56

Ponts thermiques et coefficients de transmission linéiques de la salle SYNERGI



Annexe B

Equilibrage du circuit aéraulique de la CTA



reglage IRIS après équilibrage																			
AB	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	YZ
5	0	0	3	8	7,7	7,8	6	0	4	0	5	6	8	0	8	5	5	5	5

Annexe C

Modèles d'états associés à la salle SYNERGI

Modèle A

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{T}_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_i} \times \left(\frac{S_m}{R_{mi}} + \frac{S_d}{R_d} \right) & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_d}{R_d} & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_m}{R_{mi}} \\ \frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} & -\frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} & 0 \\ \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{mi}} & 0 & -\frac{S_m}{C_m} \times \left(\frac{1}{R_{mi}} + \frac{1}{R_{me}} \right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{me}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{pl} \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \end{bmatrix} \\ \\ \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{pl} \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Modèle B

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{T}_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_i} \times \left(\frac{S_m}{R_{mi}} + \frac{S_d}{R_d} \right) & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_d}{R_d} & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_m}{R_{mi}} \\ \frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} & -\frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} & 0 \\ \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{mi}} & 0 & -\frac{S_m}{C_m} \times \left(\frac{1}{R_{mi}} + \frac{1}{R_{me}} \right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{me}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{pl,i} \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \end{bmatrix} \\ \\ \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{pl} \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Modèle C

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{T}_i \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_i} \times \left(\frac{S_m}{R_{mi}} + \frac{S_d}{R_{si}} \right) & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_m}{R_{mi}} \\ \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{mi}} & -\frac{S_m}{C_m} \times \left(\frac{1}{R_{mi}} + \frac{1}{R_{me}} \right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_d}{R_{si}} \\ 0 & \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{me}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \\ T_s \end{bmatrix} \\ \\ \begin{bmatrix} T_i \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \\ T_s \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Modèle E

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{T}_i \\ T_s \\ T_d \\ T_m \\ T_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_i} \times \left(\frac{S_m}{R_{mi}} + \frac{S_d}{R_{si}} + \frac{S_d + S_m}{R_{si2}} \right) & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_d}{R_{si}} & 0 & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_m}{R_{mi}} & \frac{1}{C_i} \times \frac{S_d + S_m}{R_{si2}} \\ \frac{S_d}{R_{si}} & -\left(\frac{S_d}{R_{si}} + \frac{S_d}{R_d} \right) & \frac{S_d}{R_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} & -\frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{mi}} & 0 & 0 & -\frac{S_m}{C_m} \times \left(\frac{1}{R_{mi}} + \frac{1}{R_{me}} \right) & 0 \\ \frac{1}{C_{m2}} \times \frac{S_d + S_m}{R_{si2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{m2}} \times \frac{S_d + S_m}{R_{si2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_s \\ T_d \\ T_m \\ T_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} & 0 & 0 & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{1}{C_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_m} \times \frac{S_m}{R_{me}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{pl} \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_i \\ T_s \\ T_d \\ T_m \\ T_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_s \\ T_d \\ T_m \\ T_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{cta} \\ T_e \\ P_{pl} \\ P_{vcv} \\ P_s \\ P_g \end{bmatrix} \end{cases}$$

Modèle d'état de la maquette

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{T}_i \\ T_d \\ T_m \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_i} \times \left(\frac{S}{R_{mi}} + \frac{S}{R_d} + \frac{S'}{R_e} \right) & \frac{1}{C_i} \times \frac{S}{R_d} & \frac{1}{C_i} \times \frac{S}{R_{mi}} & 0 \\ \frac{1}{C_d} \times \frac{S}{R_d} & -\frac{1}{C_d} \times \left(\frac{S}{R_d} + \frac{S'}{R_e} \right) & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_m} \times \frac{S}{R_{mi}} & 0 & -\frac{1}{C_m} \times \left(\frac{S}{R_{mi}} + \frac{S}{R_{me}} + \frac{S'}{R_e} \right) & \frac{1}{C_m} \times \frac{S}{R_{me}} \\ 0 & 0 & \frac{S}{R_{me}} & -\frac{S}{R_{me}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \\ T_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_i} \times \frac{S'}{R_e} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_d} \times \frac{S'}{R_e} & \frac{1}{C_d} & 0 \\ \frac{1}{C_m} \times \frac{S'}{R_e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_e \\ P_{pl} \\ P_{perturb} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_d \\ T_m \\ T_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_e \\ P_{pl} \\ P_{perturb} \end{bmatrix} \end{cases}$$

Modèles d'états associés au plancher

Modèle A_pl

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{T}_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \\ T_{isol/pl} \\ T_{pl} \\ T_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{si}}\right) & \frac{S_d}{R_{d1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d1}} & -\frac{1}{C_{d1}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{d2}}\right) & \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{d2}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} & -\frac{1}{C_{d2}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d2}} + \frac{S_d}{R_{d3}}\right) & \frac{1}{C_{d2}} \times \frac{S_d}{R_{d3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{d3}} \times \frac{S_d}{R_{d3}} & -\frac{1}{C_{d3}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d3}} + \frac{S_d}{R_{isol}}\right) & \frac{1}{C_{d3}} \times \frac{S_d}{R_{isol}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S_d}{R_{isol}} & -\left(\frac{S_d}{R_{isol}} + \frac{S_d}{R_{pl}}\right) & \frac{S_d}{R_{pl}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{pl}} \times \frac{S_d}{R_{pl}} & -\frac{1}{C_{pl}} \times \left(\frac{S_d}{R_{pl}} + \frac{S_d}{R_{pl}}\right) & \frac{1}{C_{pl}} \times \frac{S_d}{R_{pl}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S_d}{R_{pl}} & -\left(\frac{S_d}{R_{pl}} + \frac{S_d}{R_{si2}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \\ T_{isol/pl} \\ T_{pl} \\ T_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{S_d}{R_{si}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{d3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_d}{R_{si2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \\ T_{i2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \\ T_{isol/pl} \\ T_{pl} \\ T_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \\ T_{isol/pl} \\ T_{pl} \\ T_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \\ T_{i2} \end{bmatrix} \end{cases}$$

Modèle A2_pl

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{T}_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{si}}\right) & \frac{S_d}{R_{d1}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d1}} & -\frac{1}{C_{d1}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{d2}}\right) & \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{d2}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} & -\frac{1}{C_{d2}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d2}} + \frac{S_d}{R_{d3}}\right) & \frac{1}{C_{d2}} \times \frac{S_d}{R_{d3}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{d3}} \times \frac{S_d}{R_{d3}} & -\frac{1}{C_{d3}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d3}} + \frac{S_d}{R}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{S_d}{R_{si}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{d3}} & 0 & \frac{1}{C_{d3}} \times \frac{S_d}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \\ T_{i2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \\ T_{d3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \\ T_{i2} \end{bmatrix} \end{cases}$$

Modèle B_pl

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{T}_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{si}}\right) & \frac{S_d}{R_{d1}} & 0 \\ \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d1}} & -\frac{1}{C_{d1}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{d2}}\right) & \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} \\ 0 & \frac{1}{C_{d2}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} & -\frac{1}{C_{d2}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d2}} + \frac{S_d}{R}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{S_d}{R_{si}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{d2}} & 0 & \frac{1}{C_{d2}} \times \frac{S_d}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \\ T_{i2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \\ T_{i2} \end{bmatrix} \end{cases}$$

Modèle B2_pl

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{T}_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{si}}\right) & \frac{S_d}{R_{d1}} & 0 \\ \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d1}} & -\frac{1}{C_{d1}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d1}} + \frac{S_d}{R_{d2}}\right) & \frac{1}{C_{d1}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} \\ 0 & \frac{1}{C_{d2}} \times \frac{S_d}{R_{d2}} & -\frac{1}{C_{d2}} \times \left(\frac{S_d}{R_{d2}}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{S_d}{R_{si}} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{d2}} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_s \\ T_{d1} \\ T_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Modèle C_pl

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{T}_s \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{S_d}{R_d} + \frac{S_d}{R_{si}}\right) & \frac{S_d}{R_d} \\ \frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} & -\frac{1}{C_d} \times \frac{S_d}{R_d} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_s \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{S_d}{R_{si}} \\ \frac{1}{C_d} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} T_s \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_s \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{pl} \\ T_i \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Annexe D

Valeur des paramètres du modèle B pour la partie 4.4 chapitre III

Valeur initiale		Mod B		
		Campagne 1 (cas 1)	Campagne 2 (cas 2)	Campagne 3 (cas 5)
C_i	7.10^5	$5,2.10^7$	$1,1.10^7$	$1,3.10^6$
C_d	7.10^6	7.10^4	$2,3.10^7$	7.10^8
C_m	1.10^8	1.10^8	1.10^8	1.10^8
R_{mi}	2	4,5	8,3	1,6
R_{me}	0,01	0,001	0,001	0,033
R_d	0,14	0,48	1,01	0,15

Valeur des paramètres des modèles de plancher chauffant identifiés avec la campagne 3 pour la partie 4.5.1 chapitre III

Paramètres campagne 3											
Valeur initiale	C_{d1}	C_{d2}	C_{d3}	C_{pl}	R_{d1}	R_{d2}	R_{d3}	R_{pl}	R_{isol} / R	R_{si}	R_{si2}
	2.10^6	2.10^6	2.10^6	5.10^7	0,010	0,010	0,010	0,035	0,7	0,14	0,14
ModA_pl	$1,1.10^7$	$6,5.10^6$	$6,5.10^6$	$2,0.10^6$	0,002	0,002	0,014	0,042	0,9	0,14	0,14
ModA2_pl	$1,9.10^6$	$1,2.10^7$	$7,6.10^6$	-	0,046	0,012	0,013	-	1	0,14	-
ModB	$1,5.10^7$	$7,7.10^6$	-	-	0,027	0,021	-	-	1	0,14	-
ModB2_pl	$2,9.10^6$	$1,5.10^7$	-	-	0,075	0,075	-	-	-	0,14	-
ModC	$2,4.10^7$	-	-	-	0,015	-	-	-	-	0,14	-

Valeur des paramètres du modèle E identifié par rapport à la température intérieure seule (T_i) et par rapport à la température intérieure et celle de surface du plancher (T_i et T_s) à la partie 4.7.1 chapitre III

Valeur initiale		Mod E - campagne 3	
		Identifié par rapport à T_i	Identifié par rapport à T_i et T_s
C_i	7.10^5	$1,7.10^7$	$4,7.10^6$
C_d	7.10^6	$8,8.10^6$	$2,1.10^7$
C_m	1.10^8	$2,7.10^8$	$5,7.10^9$
C_{m2}	1.10^7	7.10^7	$3,6.10^7$
R_{mi}	2	1,7	1,7
R_{me}	0,01	0,03	0,02
R_d	0,03	0,01	0,01
R_{si}	0,14	0,13	0,11
R_{si2}	0,14	0,22	0,34

Annexe E

Identification séparée du modèle E

Le modèle E peut être décomposé en deux sous modèles correspondant respectivement à la partie enveloppe et à la partie plancher chauffant (modèle C_{pl}). Lors des trois campagnes, la température intérieure T_i et de surface de la dalle T_s sont mesurées. On propose d'identifier séparément les deux sous modèles :

- le modèle du plancher est identifié par rapport à T_s
- le modèle bâtiment est identifié par rapport à T_i

De cette façon le problème initial est décomposé en une somme de deux sous-problèmes dont la résolution est indépendante. Dans un second temps les deux sous-modèles identifiés sont réassemblés (**Figure 156**). Le paramètre R_{si} permet le couplage entre les deux modèles puisqu'il est commun aux deux. Les résultats obtenus (**Figure 157**) ne sont pas satisfaisants pour le contrôle puisque l'erreur reste supérieure au degré.

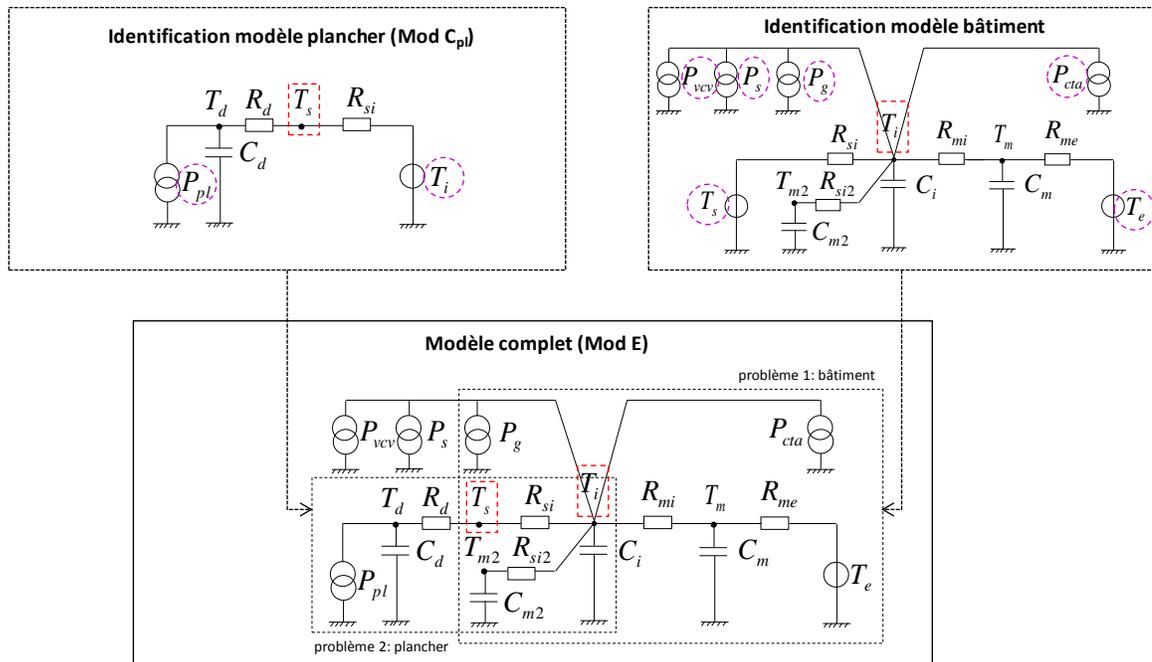


Figure 156 - Identification séparée du modèle E

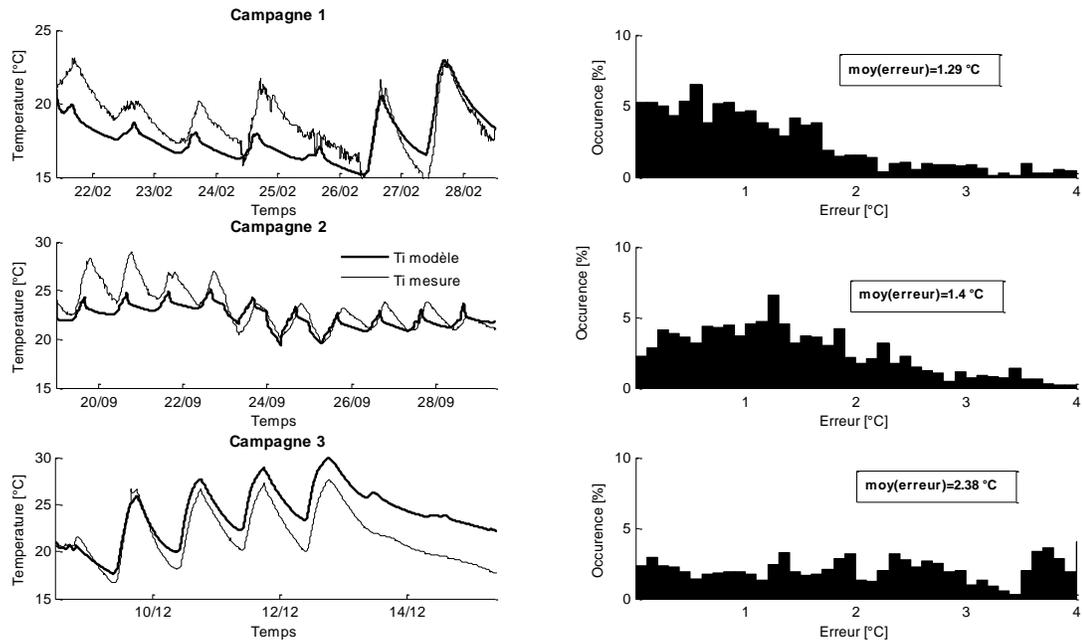


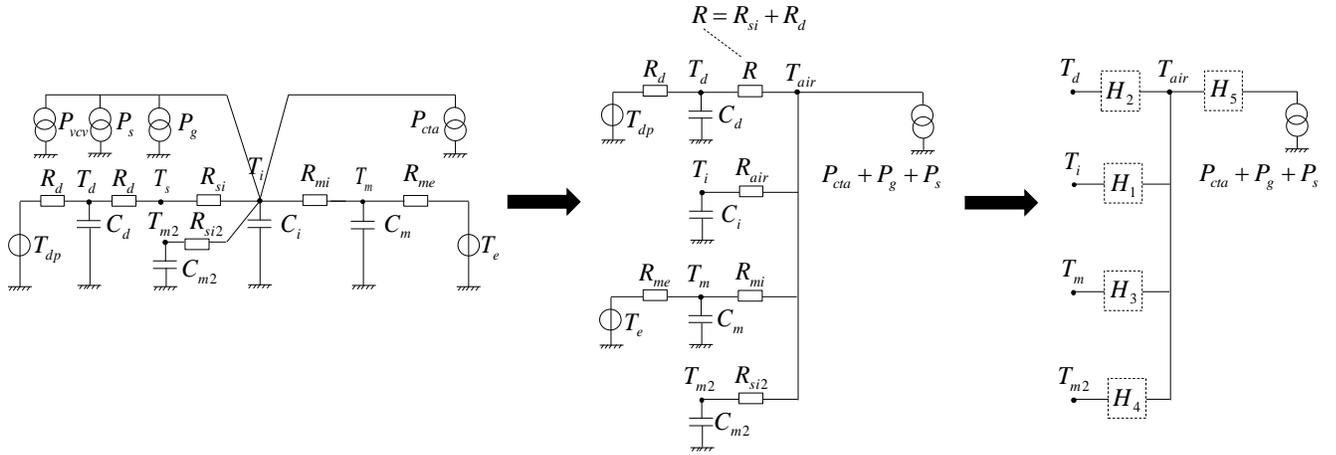
Figure 157 - Résultat pour le modèle E assemblé

Valeur des paramètres du modèle de plancher (Mod C_p) et de bâtiment pour l'assemblage du modèle E

Valeur initiale		Modèle plancher			Valeur initiale		Modèle bâtiment		
		Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3			Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3
C_d	7.10^6	$1,6.10^7$	$5,9.10^6$	$2,2.10^7$	C_i	7.10^5	7.10^6	$1,6.10^6$	7.10^6
R_d	0,03	0,15	0,15	0,04	C_m	1.10^8	4.10^8	$1,8.10^8$	1.10^9
R_{si}	0,14	0,14	0,14	0,14	C_{m2}	1.10^8	1.10^8	$5,1.10^7$	1.10^8
					R_{mi}	2	2,3	6,7	2,8
					R_{me}	0,01	0,01	0,01	0,01
					R_{si}	0,14	0,14	0,14	0,14
					R_{si2}	0,14	0,71	0,71	0,71

Annexe F

Linéarisation du modèle E pour implémentation en langage SML



$$\left\{ \begin{array}{l} T_{air} = H_1 * T_i + H_2 * T_d + H_3 * T_m + H_4 * T_{m2} + H_5 * (P_{cta} + P_g + P_s) \\ \frac{dT_i}{dt} = A_1 * T_i + B_1 * T_d + C_1 * T_m + D_1 * T_{m2} + E_1 * (P_{cta} + P_g + P_s) \\ \frac{dT_d}{dt} = A_2 * T_i + B_2 * T_d + C_2 * T_m + D_2 * T_{m2} + E_2 * (P_{cta} + P_g + P_s) + F_2 * T_{dp} \\ \frac{dT_m}{dt} = A_3 * T_i + B_3 * T_d + C_3 * T_m + D_3 * T_{m2} + E_3 * (P_{cta} + P_g + P_s) + F_3 * T_e \\ \frac{dT_{m2}}{dt} = A_4 * T_i + B_4 * T_d + C_4 * T_m + D_4 * T_{m2} + E_4 * (P_{cta} + P_g + P_s) \end{array} \right.$$

avec

$$H_1 = \frac{RR_{si2}R_{mi}}{R_{denom}} \quad H_2 = \frac{R_{si2}R_{mi}R_{air}}{R_{denom}} \quad H_3 = \frac{RR_{si2}R_{air}}{R_{denom}} \quad H_4 = \frac{RR_{mi}R_{air}}{R_{denom}} \quad H_5 = \frac{RR_{si2}R_{mi}R_{air}}{R_{denom}}$$

$$R_{denom} = R_{si2}R_{mi}R_{air} + RR_{mi}R_{air} + RR_{si2}R_{air} + RR_{si2}R_{mi}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = -\frac{1}{C_i} \left(\frac{1}{R_{air}} - \frac{RR_{si2} R_{mi}}{R_{air} R_{denom}} \right) \\ B_1 = \frac{1}{C_i} * \frac{R_{si2} R_{mi}}{R_{denom}} \\ C_1 = \frac{1}{C_i} * \frac{RR_{si2}}{R_{denom}} \\ D_1 = \frac{1}{C_i} * \frac{RR_{mi}}{R_{denom}} \\ E_1 = \frac{1}{C_i} * \frac{RR_{si2} R_{mi}}{R_{denom}} \end{array} \right.$$

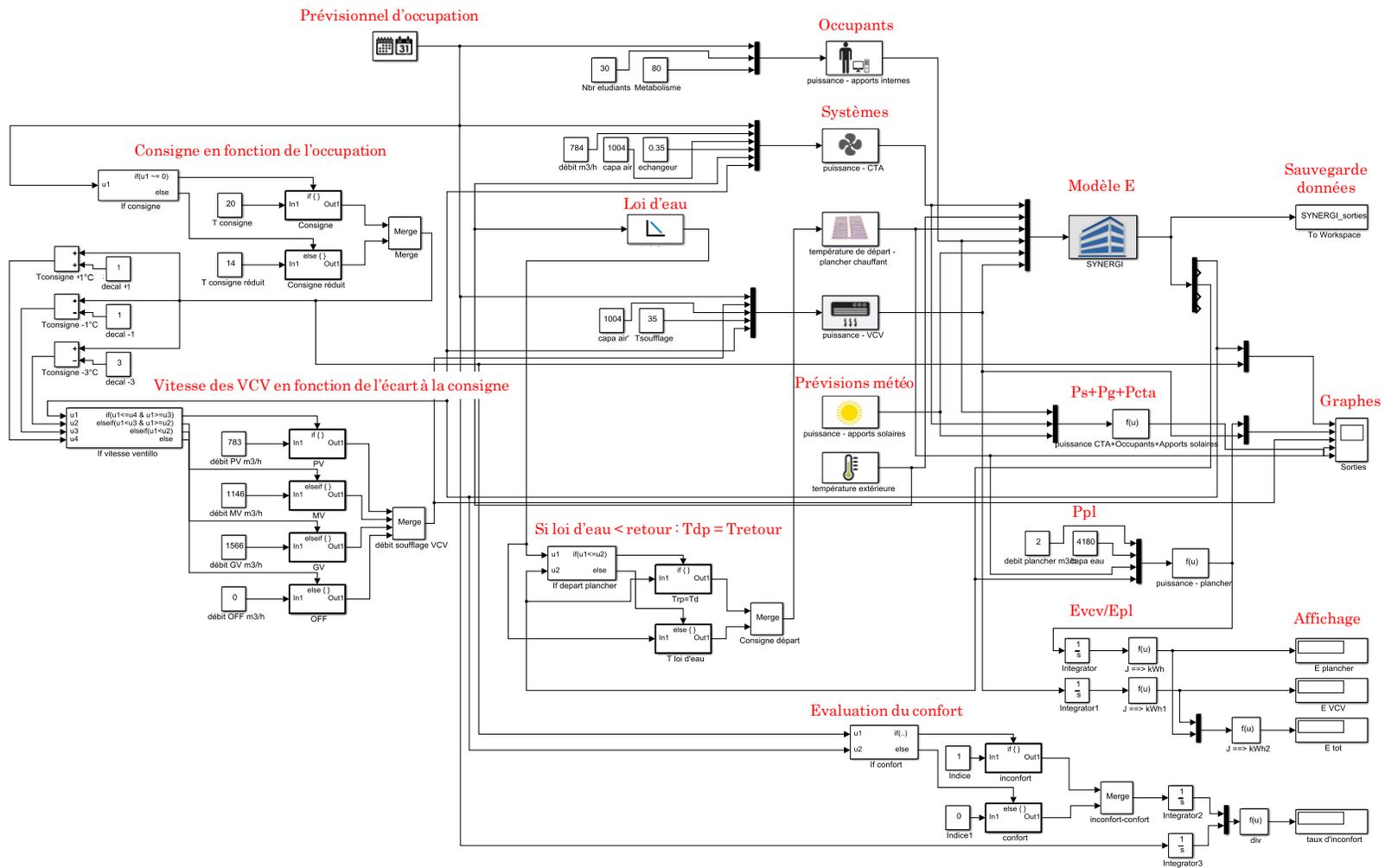
$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = \frac{1}{C_d} * \frac{R_{si2} R_{mi}}{R_{denom}} \\ B_2 = -\frac{1}{C_d} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_d} - \frac{R_{si2} R_{mi} R_{air}}{RR_{denom}} \right) \\ C_2 = \frac{1}{C_d} * \frac{R_{si2} R_{air}}{R_{denom}} \\ D_2 = \frac{1}{C_d} * \frac{R_{mi} R_{air}}{R_{denom}} \\ E_2 = \frac{1}{C_d} * \frac{R_{si2} R_{mi} R_{air}}{R_{denom}} \\ F_2 = \frac{1}{C_d} * \frac{1}{R_d} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_3 = \frac{1}{C_m} * \frac{RR_{si2}}{R_{denom}} \\ B_3 = \frac{1}{C_m} * \frac{R_{si2} R_{air}}{R_{denom}} \\ C_3 = -\frac{1}{C_m} * \left(\frac{1}{R_{mi}} + \frac{1}{R_{me}} - \frac{RR_{si2} R_{air}}{R_{mi} R_{denom}} \right) \\ D_3 = \frac{1}{C_m} * \frac{RR_{air}}{R_{denom}} \\ E_3 = \frac{1}{C_m} * \frac{RR_{si2} R_{air}}{R_{denom}} \\ F_3 = \frac{1}{C_m} * \frac{1}{R_{me}} \end{array} \right.$$

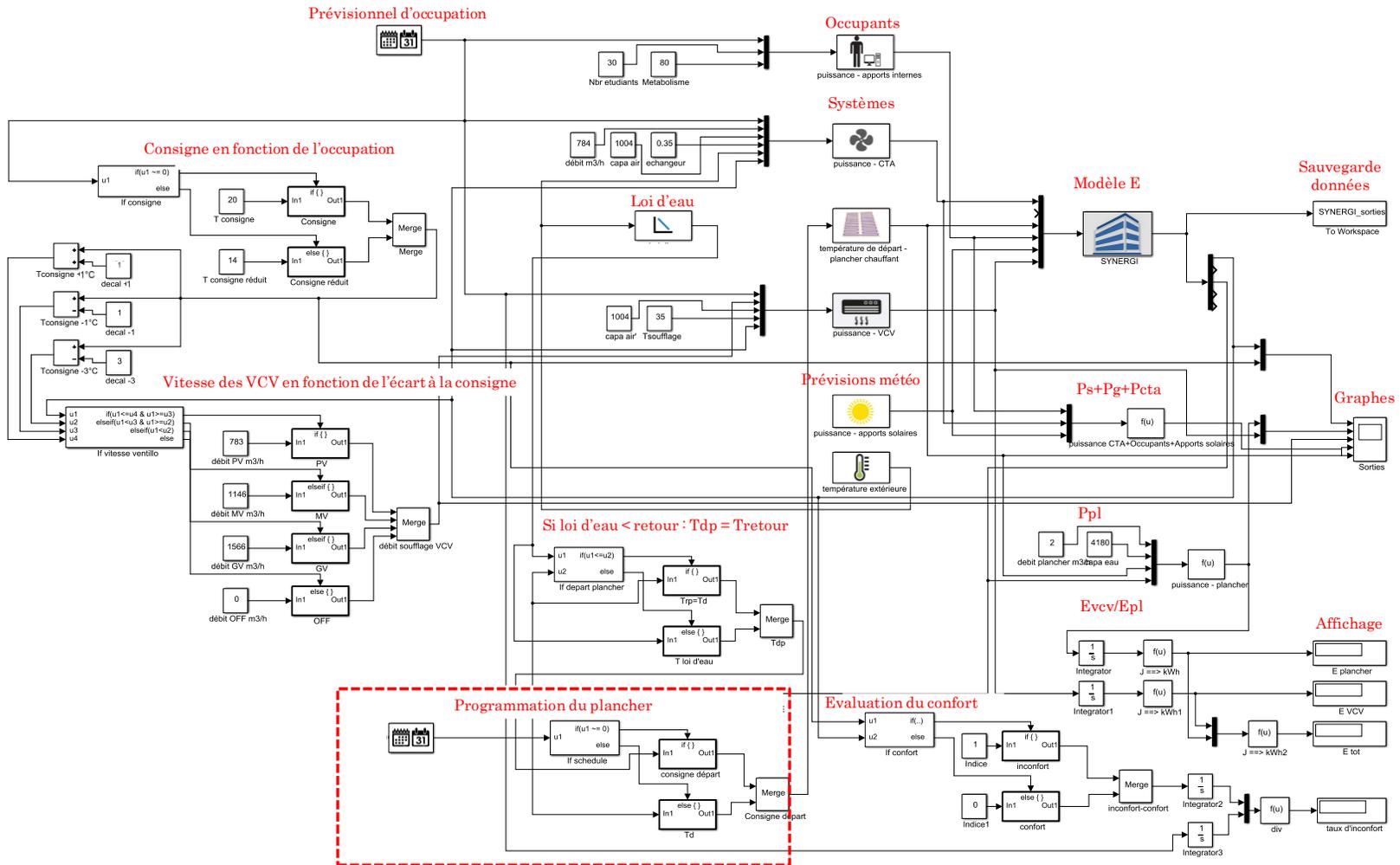
$$\left\{ \begin{array}{l} A_4 = \frac{1}{C_{m2}} * \frac{RR_{mi}}{R_{denom}} \\ B_4 = \frac{1}{C_{m2}} * \frac{R_{mi} R_{air}}{R_{denom}} \\ C_4 = \frac{1}{C_{m2}} * \frac{RR_{air}}{R_{denom}} \\ D_4 = -\frac{1}{C_{m2}} \left(\frac{1}{R_{si2}} - \frac{RR_{mi} R_{air}}{R_{denom}} \right) \\ E_4 = \frac{1}{C_{m2}} * \frac{RR_{mi} R_{air}}{R_{denom}} \end{array} \right.$$

Annexe G

Contrôleur de référence 1 dans l'environnement SIMULINK



Contrôleur de référence 2 dans l'environnement SIMULINK



Contrôleur anticipatif dans l'environnement SIMULINK

