



HAL
open science

Bâtiment adaptatif: contribution à la maîtrise des ambiances habitables

Christian Ghiaus

► **To cite this version:**

Christian Ghiaus. Bâtiment adaptatif: contribution à la maîtrise des ambiances habitables. Thermique [physics.class-ph]. La Rochelle Université, 2006. tel-04437632

HAL Id: tel-04437632

<https://hal.science/tel-04437632>

Submitted on 7 Feb 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Université de La Rochelle
UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur

Habilitation à Diriger des Recherches

Bâtiment adaptatif : contribution à la maîtrise des ambiances habitables

Christian Ghiaus

Mémoire soutenu publiquement le 8 décembre 2006 devant le jury composé de :

<i>Président :</i>	Francis Allard,	Professeur des Universités, Université de La Rochelle
<i>Rapporteurs :</i>	Jaques Miriel,	Professeur des Universités, IUT de Rennes
	Claude-Alain Roulet,	Professeur titulaire, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
	Jean-Jacques Roux,	Professeur des Universités, INSA de Lyon
<i>Examineurs :</i>	James Axley,	Professor, Yale University, New Haven
	Christian Inard,	Professeur des Universités, Université de La Rochelle
	Mattheos Santamouris,	Associate Professor, University of Athens

À la mémoire de mon père

Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit n'existeraient pas sans la confiance, l'enthousiasme et les encouragements de Francis Allard qui a créé des conditions idéales de travail dans le laboratoire qu'il dirige, m'a impliqué dans différents projets de recherche et m'a incité à réaliser ce manuscrit. Ce projet a également été développé grâce à Christian Inard dont la rigueur intellectuelle, l'efficacité et la sincérité m'ont rassuré.

Les opinions pertinentes des rapporteurs Jacques Miriel, Claude-Alain Roulet et Jean-Jacques Roux m'ont révélé de nouveaux points de vue et m'ont ouvert des perspectives de recherche.

James Axley, qui ne cesse de m'impressionner par ses connaissances et la limpidité de sa pensée, m'a appris au cours de longues discussions à douter et à remettre en question les "évidences". Mattheos Santamouris, avec tact et gentillesse, m'a révélé les différences culturelles ainsi que l'humanisme des sciences exactes.

Les collègues avec qui j'ai travaillé dans le cadre de programmes de recherche nationaux ou internationaux ont beaucoup contribué à l'intégration de mes études dans des projets importants. Sans être exhaustif, je souhaite mentionner tout particulièrement, par ordre chronologique, Alain Gazeau, Fabrice Caïni, Servando Alvarez, Maria Kolokotroni, Mario Germano, Chrissa Georgakis, Fergus Nicol, Mike Wilson, Frank Tillenkamp, Nicolas Heijmans, Eduardo Maldonado, Manuela Almeida, Gerard Guarracino, Denia Kolokotsa, Jörg Schlenger, Helmut Müller et Helena Coch.

Ces travaux ont été réalisés dans l'ambiance sérieuse et détendue, de collaboration et d'amabilité qui caractérise notre laboratoire. Tout spécialement, Rafik Belarbi, Patrice Joubert, Patrice Blondeau, Ouali Amiri, Karim Limam, Amina Meslem, Etienne Wurz et Karim Ait-Mokhtar m'ont montré leur amitié et m'ont aidé à me sortir des dédales de la langue française.

Je dois ma formation initiale à Constantin Ionescu, qui a été le premier à me guider vers la recherche ; Sorin Larionescu, qui a contribué à ma formation comme chercheur ; Florea Chiriac, qui m'a aidé à m'ouvrir vers l'international ; Iolanda Colda, qui m'a mis en contact avec le monde francophone.

Ma famille proche m'a soutenu et a été près de moi malgré la distance. Tout particulièrement, mon épouse a comblé ma vie.

À tous, je vous remercie de tout mon cœur.

Avant propos

Ce document décrit principalement les activités de recherches que j'ai menées et encadrées depuis la soutenance de ma thèse de doctorat en 1996 au sein du Mechanical and Nuclear Engineering Department, Kansas State University, USA, et du Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment de l'Université de La Rochelle.

J'ai effectué mes recherches dans le domaine de la physique du bâtiment, plus particulièrement dans la maîtrise des ambiances habitables en appliquant la théorie du contrôle. La modélisation utilisée est basée sur les lois physiques et la représentation de l'information incertaine et vague qui est spécifique pour l'habitat construit. Ces travaux de recherches ont été menés en équipe et financés, dans la grande majorité, par des contrats nationaux et européens.

Le document décrit également mes activités d'enseignement et administratives effectuées au sein de l'Université Technique de Construction de Bucarest, Roumanie, et de l'Université de La Rochelle.

Table des matières

1	CURRICULUM VITAE	7
1.1	Activités de recherche.....	9
1.1.1	Résumé des activités de recherche.....	9
1.1.1.1	Etudes doctorales à l'Université de Delft, Pays Bas et à l'Université Technique de Construction de Bucarest, Roumanie (1991-1996).....	9
1.1.1.2	Recherches post doctorales à l'Université de Kansas, Etats Unis (1997-1998).....	9
1.1.1.3	Recherches post doctorales à l'Université de La Rochelle, France (depuis 1998)	10
1.1.2	Projets de recherche	12
1.1.2.1	Recherche financée par la Commission Européenne.....	12
1.1.2.2	Recherche financée par la Banque Mondiale	14
1.1.2.3	Recherche dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie.....	14
1.1.2.4	Recherche financée par des organismes nationaux.....	14
1.1.3	Ecole internationale d'été - conférencier invité.....	15
1.1.4	Encadrement	16
1.1.4.1	Doctorants.....	16
1.1.4.2	Mastère.....	16
1.1.5	Rapporteur de thèse	16
1.1.6	Prix et distinctions	16
1.2	Enseignement	17
1.3	Activité administratives et responsabilités collectives.....	19
1.3.1	Université de La Rochelle.....	19
1.3.2	Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment.....	19
1.3.3	Département de Génie Civil et Mécanique, Université de La Rochelle.....	19
1.3.4	Coordination de projets.....	19
1.3.5	Revue internationale	19
1.3.6	Conférences internationales.....	19
1.3.7	Sociétés savantes.....	19
2	SYNTHESE DES ACTIVITES DE RECHERCHE	21
2.1	Prédiction des pics d'ozone et son transfert dans les bâtiments.....	27
2.1.1	Prédiction des pics d'ozone.....	27
2.1.1.1	Introduction.....	27
2.1.1.2	Méthode	28
2.1.1.2.1	Données météorologiques et de concentration en ozone.....	29
2.1.1.2.2	Analyse des variables explicatives	29
2.1.1.2.3	Méthode de classification	33
2.1.1.2.4	Critères de performance	36
2.1.1.3	Résultats et discussions.....	39
2.1.1.4	Conclusion	41
2.1.2	Transfert d'ozone de l'extérieur à l'intérieur.....	43
2.1.2.1	Introduction.....	43
2.1.2.2	État de l'art.....	44
2.1.2.3	Modélisation	46

2.1.2.3.1	Méthode expérimentale.....	47
2.1.2.3.2	Modélisation.....	51
2.1.2.3.3	Modèle obtenu.....	54
2.1.2.4	Validation du modèle.....	56
2.1.2.5	Conclusion.....	58
2.1.2.6	Remerciements.....	59
2.1.3	Références.....	59
2.2	Estimation du potentiel de chauffage, de ventilation et de climatisation	63
2.2.1	Estimation expérimentale de la courbe de charge par régression robuste.....	63
2.2.1.1	Introduction.....	63
2.2.1.2	Relation entre la température extérieure et les déperditions des bâtiments.....	65
2.2.1.3	Estimation de la consommation énergétique en utilisant la courbe de charge.....	67
2.2.1.4	Conditions d'application et limites de la régression ordinaire.....	69
2.2.1.5	Régression robuste de la courbe de chauffe basée sur le graphique quantile - quantile.....	71
2.2.1.6	Conclusion.....	73
2.2.2	Température en évolution libre dans l'estimation de la performance énergétique des bâtiments.....	74
2.2.2.1	Introduction.....	74
2.2.2.2	Équivalence entre les méthodes dynamiques et la courbe de charge.....	75
2.2.2.3	Relation entre la courbe de chauffe et la température en évolution libre.....	79
2.2.2.4	Évaluation de la performance énergétique en utilisant la température en évolution libre.....	81
2.2.2.5	Conclusion.....	82
2.2.3	Température d'évolution libre et adéquation climatique des systèmes.....	83
2.2.3.1	Introduction.....	83
2.2.3.2	Méthode.....	84
2.2.3.2.1	Température en évolution libre.....	84
2.2.3.2.2	Confort adaptatif.....	86
2.2.3.2.3	Domaines de chauffage, de ventilation et de climatisation.....	86
2.2.3.2.4	Fréquence de distribution de degré – temps pour.....	87
2.2.3.2.5	Distribution des fréquences de degrés – temps pour le tirage thermique.....	89
2.2.3.3	Interprétation des résultats.....	90
2.2.3.4	Données climatiques.....	92
2.2.3.5	Conclusions.....	93
2.2.3.6	Remerciements.....	93
2.2.4	Références.....	94
2.3	Contrôle automatique des systèmes	97
2.3.1	Identification de type "boîte grise" des centrales de traitement d'air.....	97
2.3.1.1	Introduction.....	97
2.3.1.2	Banc expérimental.....	102
2.3.1.3	Identification des paramètres des modèles des capteurs de température et d'humidité.....	103
2.3.1.4	Identification des paramètres des modèles de batteries.....	106
2.3.1.4.1	Modèle de la batterie électrique.....	106
2.3.1.4.2	Modèle de la batterie de refroidissement.....	108
2.3.1.4.3	Modèles discrets des batteries.....	113
2.3.1.4.4	Identification des paramètres des modèles "boîte grise".....	114
2.3.1.5	Identification des paramètres du modèle de l'humidificateur.....	115
2.3.1.6	Sorties secondaires.....	116

2.3.1.7	Protocole expérimental et discussion des résultats.....	117
2.3.1.8	Validation du modèle.....	119
2.3.1.9	Conclusion.....	120
2.3.2	Diagnostic des défauts des climatiseurs basés sur le graphe de liaison.....	122
2.3.2.1	Introduction.....	122
2.3.2.2	Diagnostic des défauts basé sur le graphe de liaison qualitatif.....	123
2.3.2.2.1	Graphe de liaison.....	124
2.3.2.2.2	Graphe de liaison qualitatif.....	126
2.3.2.2.3	Forme discrète des équations du graphe de liaison.....	128
2.3.2.2.4	Types d'équations du graphe de liaison qualitatif.....	129
2.3.2.2.5	Évaluation du graphe de liaison qualitatif.....	129
2.3.2.3	Diagnostic des défauts d'un dispositif réel de climatisation.....	131
2.3.2.4	Conclusion.....	137
2.3.2.5	Remerciements.....	138
2.3.3	Contrôle flou des ventilo-convecteurs.....	139
2.3.3.1	Introduction.....	139
2.3.3.2	Identification des modèles flous.....	140
2.3.3.3	Modèle flou de type Sugeno.....	144
2.3.3.4	Algorithme de contrôle flou.....	146
2.3.3.5	Conclusion.....	148
2.3.3.6	Remerciements.....	149
2.3.4	Références.....	150

3 PROJET DE RECHERCHE..... 161

3.1 Contrôle et diagnostic des défauts des équipements techniques du bâtiment distribués géographiquement.....161

3.2 Définition et vérification des performances des bâtiments à faible consommation énergétique.....163

4 LISTE DE PUBLICATIONS..... 165

4.1 Articles dans des revues internationales à comité de lecture.....165

4.2 Chapitres dans des ouvrages collectifs internationaux.....166

4.3 Ouvrages scientifiques.....166

4.4 Actes des congrès internationaux avec comité de lecture.....166

4.5 Articles dans des revues nationale à comité de lecture.....169

4.6 Actes des congrès nationaux.....170

4.7 Ouvrages pédagogiques.....171

1 Curriculum vitae

Ingénieur d'études et de recherche, Université de La Rochelle

Date et lieu de naissance	Adresse personnelle	Adresse professionnelle
29 Juin 1959, Bucarest, Roumanie	41 Résidence Albatros 17, rue Paul Emile Victor 17000 La Rochelle	LEPTAB, Université de La Rochelle Av. M. Crépeau, 17000 La Rochelle Tél. : 05 4645 7259 Fax : 05 4645 8241 E-mail : cghiaus@univ-lr.fr
Nationalité Française		
Etat civil Marié		

Cursus universitaire

1996	Docteur de l' <i>Université Technique de Constructions de Bucarest, Roumanie</i>
1998	Analyste-programmeur - <i>Institut Central d'Informatique, Bucarest</i>
1984	Ingénieur en Génie Civil , <i>Université Technique de Constructions de Bucarest</i>

Bourses de recherche doctorale et post-doctorale

1998-1999	Bourse post-doctorale de la Région Poitou-Charentes , <i>Université de La Rochelle</i>
1997-1998	Bourse de recherche post-doctorale Fulbright , <i>Kansas State University, Etats Unis</i>
1994-1995	Bourse doctorale NUFFIC , <i>Technische Universiteit Delft, Pays Bas</i>

Activités pédagogiques et de recherche

Depuis 1998	Ingénieur d'études et de recherche, Université de La Rochelle, France <i>Laboratoire d'étude des phénomènes de transfert appliqués au bâtiment (LEPTAB),</i> <ul style="list-style-type: none">• Recherche : initiation, coordination et réalisation de projets de recherche• Enseignement : en licence et maîtrise (environ 100 h eq. TD/an)• Co-encadrement : 3 thèses en cours, 4 mastères recherche
1997-1998	Fulbright Senior Research Fellow, Kansas State University, Etats Unis <i>Department of Mechanical and Nuclear Engineering</i> <ul style="list-style-type: none">• Recherche post-doctorale. Contrôle intelligent des ambiances habitables.
1994-1995	Chercheur NUFFIC, Technische Universiteit Delft, Pays Bas <i>Faculté de Génie Mécanique, Laboratoire de maîtrise des ambiances intérieures</i> <ul style="list-style-type: none">• Recherche doctorale. Contrôle intelligent des ambiances habitables.
1996-1998	Maître de Conférences 1993-1996 Maître Assistant 1989-1993 Assistant <i>Université Technique de Constructions de Bucarest, Roumanie</i>

Appartenance aux organisations professionnelles internationales

Depuis 2005	Comité éditorial de la revue <i>Energy and Building</i>, Elsevier , membre
Depuis 2004	International Solar Energy Society , membre n° 0410543

Autres activités

Depuis 2000	Membre des comités de lecture des revues : Energy and Buildings, Solar Energy, HVAC&R Research
2004	Editeur Natural Ventilation in the Urban Environment, Earthscan, 2005
2000-2004	Coordonnateur du projet européen URBVENT (FP5)
1986-1989	Ingénieur d'études , Institut de recherche technologique pour l'industrie (Roumanie)
1984-1986	Ingénieur , Frigotehnica S.A. (Roumanie)

Publications et communications

-
- 15 articles dans des revues internationales à comité de lecture
 - 9 chapitres dans des ouvrages collectifs internationaux
 - 32 communications dans des congrès internationaux
 - 20 articles dans des revues nationales à comité de lecture
 - 17 communications dans des congrès nationaux

1.1 Activités de recherche

1.1.1 Résumé des activités de recherche

Note : Cette synthèse fait uniquement référence aux publications parues dans des revues internationales et dans des ouvrages collectifs internationaux (v. 4 Liste des publications)

Mes activités de recherche s'articulent autour du concept de *bâtiment adaptatif*, à savoir des bâtiments qui répondent dynamiquement aux sollicitations extérieures et intérieures dans le but d'assurer la qualité de l'air et le confort dans les ambiances habitables. L'adaptation est réalisée grâce à la maîtrise des phénomènes de transfert de masse et d'énergie à travers l'enveloppe et, quand ce potentiel devient insuffisant, par l'appui de systèmes techniques (chauffage, ventilation et climatisation). Pour que l'enveloppe et les systèmes techniques agissent en synergie en tenant compte du caractère stochastique des excitations et des effets d'accumulation, un contrôle intelligent est nécessaire.

1.1.1.1 Etudes doctorales à l'Université de Delft, Pays Bas et à l'Université Technique de Construction de Bucarest, Roumanie (1991-1996)

Dans le cadre de ma recherche doctorale réalisée au Laboratoire de Maîtrise de l'Ambiance Intérieure de l'Université Technique de Delft et à l'Université Technique de Construction de Bucarest (UTCB), je me suis intéressé aux systèmes thermiques du bâtiment considérés comme des procédés contrôlés. Constatant les limites des approches classiques basées sur le premier principe de la thermodynamique, je me suis penché sur les méthodes de « soft-computing » notamment les réseaux neuro-flous. J'ai développé, au moyen d'outils numériques et de techniques d'intelligence artificielle, des modèles de comportement dynamique des systèmes tels que le réseau de distribution de chaleur de la ville de Bucarest, les appareils ventilo-convecteurs ou les bâtiments. Ces travaux ont été effectués avec la société néerlandaise Biddle, producteur de ventilo-convecteurs, et la Régie Autonome de Distribution de l'Energie Thermique (RADET) de Bucarest, Roumanie.

Ce travail a donné lieu à la publication de plusieurs articles (v. Liste des publications) :

- revues internationales *Energy and Buildings* [RI 11], *Solar Energy* [RI 12], *Buildings and Environment* [RI 15] ;
- actes de congrès internationaux [CI 27] [CI 28] [CI 29] [CI 30] [CI 31] [CI 32].

1.1.1.2 Recherches post doctorales à l'Université de Kansas, Etats Unis (1997-1998)

Mon travail post doctoral effectué à l'université de Kansas, financé par une bourse Fulbright, s'articule autour de deux principaux axes :

- la modélisation dynamique des systèmes thermo - hydrauliques en utilisant les graphes de liaison «*bond graphs*» ;
- le diagnostic des défauts des centrales de conditionnement d'air à l'aide de raisonnements qualitatifs utilisant les graphes de liaison.

Ce travail a été mené dans le cadre de l'annexe 34 de l'Agence Internationale de l'Energie "Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance – The Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings". Les résultats ont été publiés dans la revue internationale *Energy and Buildings* [RI 14].

1.1.1.3 Recherches post doctorales à l'Université de La Rochelle, France (depuis 1998)

A l'Université de La Rochelle, mes recherches ont concerné principalement l'interaction entre le bâtiment et le microclimat urbain :

- 1) la prévision du niveau de pollution et le transfert des polluants de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments,
- 2) le potentiel d'adaptation du bâtiment en utilisant la ventilation naturelle,
- 3) la gestion intelligente des bâtiments.

Ces recherches, menées dans le cadre de projets nationaux et internationaux, ont donné suite à quatre thèses à l'Université de La Rochelle et ont été en relation avec deux autres thèses, à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et à l'Université d'Athènes.

Dans le cadre du contrat de recherche *Prédictions des pics d'ozone en régime de brise avec l'Association pour la surveillance de la qualité de l'air en Poitou-Charentes*, j'ai développé une méthode de prédiction basée sur l'analyse discriminante. J'ai adapté la classification par l'analyse discriminante pour la classification floue. Les résultats ont été publiés dans (v. Liste des publications) :

- revue internationale *Atmospheric Environment* [RI 7] ;
- actes de congrès internationaux [CI 5].

Ces travaux ont donné suite à une thèse financée par l'ADEME, *Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire : recherche de moyens de prédiction et de protection*, soutenue par V. Iordache à Université de La Rochelle en janvier 2003. Dans le cadre de ce contrat de recherche, j'ai contribué à la description basée sur la logique floue de la relation entre la concentration extérieure et intérieure en polluants en fonction de la perméabilité du bâtiment. Les résultats ont été publiés dans la revue *Building and Environment* [RI 6].

Ces recherches sur la pollution ont été intégrées au projet européen URBVENT *Natural Ventilation in Urban Environment* dont le sujet principal était l'influence du milieu urbain sur l'adaptation du bâtiment en utilisant la ventilation naturelle. La pollution, le bruit et la réduction de la vitesse du vent ont un impact sur le potentiel d'application de la ventilation naturelle. J'ai initié et coordonné ce projet avec le professeur Francis Allard. Ses résultats ont été publiés dans un ouvrage collectif, *C. Ghiaus, F. Allard (eds.), Natural Ventilation in the Urban Environment ISBN 1844071294, Earthscan, London, UK, 2005* [OS 1].

Le projet URBVENT a généré deux thèses. La thèse de M. Germano de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (soutenu en janvier 2006) sur le potentiel de la ventilation naturelle en utilisant une estimation quantitative et un raisonnement qualitatif. Le travail a donné lieu aux publications suivantes (v. Liste des publications) :

- revue *International Journal of Ventilation* [RI 8] ;
- actes de congrès internationaux [CI 1], [CI 9], [CI 14], [CI 17] ;
- chapitre dans l'ouvrage collectif [OI 5].

La thèse de C. Georgakis, sur l'étude du vent et de la température dans les rues canyons, a été la deuxième thèse liée au projet URBVENT. Les résultats de ces recherche ont été publiés dans (v. Liste des publications) :

- revue *Building and Environment* [RI 6]
- actes de *International Conference Passive and Low Energy Cooling for Built Environment PALENC* [CI 1]

Mes activités de recherche dans le projet URBVENT ont également porté sur le développement d'une méthodologie d'évaluation du potentiel d'applicabilité de la ventilation naturelle. La spécificité de la méthodologie consiste en son approche statistique : le climat est représenté par la distribution des fréquences d'apparition de la température extérieure ; le bâtiment est décrit par la différence de température entre la température en évolution libre et la température extérieure ; le critère de confort prend en compte l'adaptation des occupants. L'avantage de cette méthode est que les trois paramètres qui influencent la consommation énergétique (le climat, le bâtiment et le confort) sont découplés. Ces recherches ont été publiés dans (v. Liste des publications) :

- revues internationales *Energy and Buildings* [RI 9] et *Solar Energy* [RI 5]
- congrès internationaux [CI 11] [CI 12] [CI 13] [CI 19]
- ouvrage collectif international [OI 5]

L'idée d'utiliser la température en évolution libre a été reprise dans le projet européen EULEB *European Low Energy Buildings*. J'ai étendu son applicabilité aux régimes de chauffage et de climatisation [RI 4] et j'ai développé une procédure robuste d'estimation de la température en évolution libre à partir de mesures réalisées par les systèmes de gestion technique du bâtiment. Les résultats ont été publiés dans la revue *Energy and Buildings* [RI 2].

Concernant l'étude des ambiances intérieures, j'ai travaillé sur la localisation du point de détachement des jets de paroi en utilisant le traitement des images. J'ai contribué au développement d'une méthode de reconnaissance de la forme du jet sur des images digitales prise à grande vitesse, méthode basée sur la corrélation spatiale avec la forme d'un jet idéal. Les résultats ont été publiés dans :

- la revue *Journal of Flow Visualization and Image Processing* [RI 13] ;
- les actes de congrès internationaux [CI 25] [CI 20].

Mes travaux sur la modélisation des ambiances intérieures en considérant l'hypothèse des champs de vitesse fixe ont été repris par A. Sempey dans une thèse sous la direction de C. Inard, thèse pour laquelle j'assure le co-encadrement. Le but de la thèse est de définir les critères qui permettent de considérer le champ de vitesse fixe et de réduire la dimension du modèle.

J'ai continué mes travaux sur le contrôle intelligent en m'occupant de l'optimisation du point statique de fonctionnement des systèmes non-linéaires multivariés [RI 10]. Une approche plus globale des bâtiments intelligents basée sur l'analyse multicritère a été abordée dans le projet européen Smart Accelerate. Les travaux sur la gestion intelligente des bâtiments ont été repris par A. Chicinas dans sa thèse que je co-encadre avec C. Inard.

1.1.2 Projets de recherche

1.1.2.1 Recherche financée par la Commission Européenne

- 2005-2006** EULEB *European Low Energy Buildings*, contrat EIE/04/172/S07.38667, financé dans le programme Intelligent Energy Europe – SAVE
- 2002-2004** SMART ACCELERATE *Acceleration of Smart Buildings Technologies and Market Penetration*, contrat SAVE 2002-094,
- 2000-2004** URBVENT *Natural ventilation in urban areas - Potential assessment and optimal facade design*, contrat NNE5-2000-00238 financé dans le 5^{ème} programme-cadre de RTD,
- 1999-2003** SOLVENT *Development of strategies for the efficient use of solar and passive ventilation in urban buildings*, contrat XVII/4.1030/Z/99-225, financé dans le programme ALTENER II.

Description des projets

- 2005-2006** EULEB *European Low Energy Buildings*, contrat EIE/04/172/S07.38667, financé dans le programme Intelligent Energy Europe – SAVE
Fiche de présentation : <http://www.euleb.info/>

Ce projet fourni aux architectes et aux ingénieurs européens des informations concernant les solutions utilisées dans des bâtiments publics exemplaires de point de vue architectural et énergétique. Vingt cinq bâtiments publics de haute qualité environnementale seront présentés sur un CD qui sera distribué en 150'000 exemplaires. Les équipes participantes sont Universität Dortmund, Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur, coordonnateur du projet (Allemagne), London Metropolitan University, LEARN (RU), Università degli Studi di Firenze, ABITA (Italie), Université de La Rochelle, LEPTAB (France), Universitat Politècnica de Catalunya (Espagne), Fédération Européenne des Associations de Chauffage et de Climatisation, REHVA.

Ma contribution dans ce projet consiste dans le développement d'une méthode d'évaluation des performances énergétiques des bâtiments, la sélection et la présentation des études de cas françaises. Des résultats ont été publiés dans deux articles dans la revue *Energy and Buildings* ([RI 2] et [RI 4]).

- 2002-2004** SMART ACCELERATE *Acceleration of Smart Buildings Technologies and Market Penetration*, contrat SAVE SMART ACCELERATE 4.1031/Z/02-094
Fiche de présentation : <http://www.ibuilding.gr/>

Un bâtiment intelligent fournit un environnement productif et efficace en optimisant ses quatre composantes de base : la structure, les systèmes, les services et le management. Ce thème a été traité dans le cadre du projet SMART ACCELERATE avec pour partenaires l'Université Technique de Crète (Grèce), l'Université Nationale d'Athènes (Grèce), Building Research Establishment (RU), Techem Service Aktiengesellschaft & Co. KG (Allemagne), l'Agence Nationale Italienne pour les Nouveaux Technologies, Energie et Environnement (Italie) et l'Université de La Rochelle (France).

Ma principale contribution a été la rédaction du chapitre 2 du manuel en collaboration avec le Prof. C. Inard (<http://www.ibuilding.gr/handbook/chapter2.pdf>)

2000-2004 URBVENT *Natural ventilation in urban areas - Potential assessment and optimal facade design*, contrat NNE5-2000-00238 financé dans le 5^{ème} programme-cadre de RTD,
Fiche de présentation : <http://perso.univ-lr.fr/cghiaus/urbvent/>

Ce projet a étudié l'influence du milieu urbain sur le potentiel de rafraîchissement par la ventilation naturelle. Les partenaires dans ce projet ont été : Université de La Rochelle (France) – coordinateur, Université Nationale d'Athènes (Grèce), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), Axima Lab (Suisse), Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (Belgique), University of North London (RU), Instituto de Engenharia Mecânica (Portugal), CNRS – DR07 (France), Building Research Establishment (RU).

Mes contributions dans ce projet ont été :

- la coordination, en collaboration avec le Prof. F. Allard, de la proposition et du projet
- la participation dans le développement d'une méthodologie d'évaluation du potentiel de la ventilation naturelle
- la préparation, en collaboration avec le Prof. F. Allard, de la publication de l'ouvrage de synthèse des résultats C. Ghiaus, F. Allard (éditeurs). *Natural Ventilation in the Urban Environment* ISBN 1844071294, Earthscan, London, UK, 2005

1999-2003 SOLVENT *Development of strategies for the efficient use of solar and passive ventilation in urban buildings*, contrat XVII/4.1030/Z/99-225, financé dans le programme ALTENER II.
Fiche de présentation : <http://dea.brunel.ac.uk/solvent/>

Ce projet fournit des informations sur l'application de la ventilation solaire et passive dans les bâtiments situés en milieu urbain. Les partenaires de ce projet ont été Brunel University (RU), Université Nationale d'Athènes (Grèce), Building Research Establishment (RU), Université de La Rochelle (France) et Association de Investigation y Cooperation Industrial de Andalicia (Espagne).

Mon principal apport à ce projet a consisté à faire une synthèse sur l'environnement urbain et sa relation avec le potentiel de rafraîchissement en utilisant la ventilation naturelle.

1.1.2.2 Recherche financée par la Banque Mondiale

1997-1998 Computer aided design, Grant 48 du Conseil National pour le Financement du Enseignement Supérieur (CNFIS) Roumanie, financé par la Banque Mondiale

Cette subvention a été accordée pour le développement d'un Centre de Conception Assisté par Ordinateur. J'ai été l'initiateur et le coordonnateur de ce centre.

1.1.2.3 Recherche dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie

1997-2001 *Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings* International Energy Agency Energy, Conservation in Building and Community Systems Annex 34

Fiche de présentation : <http://www.ecbcs.org/annexes/annex34.htm>

Ma participation dans ce projet, au sein de l'équipe de TNO (Pays Bas), a consisté à effectuer le diagnostic des défauts des centrales de traitement d'air en utilisant le graphe de liaison qualitatif.

1.1.2.4 Recherche financée par des organismes nationaux

1999-2002 *Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire – Recherche de moyens de prédiction et de protection*, Convention no. 99.04.054 entre l'ADEME et l'Université de La Rochelle dans le cadre de Programme de Recherche Interorganisme pour une Meilleure Qualité de l'Air à l'Echelle Locale PRIMEQUAL-PREDIT

Fiche de présentation : http://www2.environnement.gouv.fr/actua/COMINFOS/dosdir/DIRPPR/air/pollu_recherche.htm

Ce projet s'est déroulé en deux phases :

- expérimentale : différents polluants atmosphériques (O₃, NO_x, SO₂, CO₂, particules) ont été mesurés simultanément à l'extérieur et à l'intérieur de six écoles de typologie différente
- modélisation : les transferts des polluants à l'intérieur des bâtiments en fonction de leurs perméabilités et de leurs usages ont été modélisés en utilisant la logique floue.

Mon apport a consisté dans la définition du projet, du protocole expérimental et de la méthodologie de modélisation.

1999-2000 *Développement d'un système de prévision des points de pollution par l'ozone sur l'agglomération Rochelaise à l'aide de réseaux de neurones et étude de*

l'influence océanique, Convention entre l'Association régionale pour la mesure de la qualité de l'air en Poitou-Charentes (AREQUA) et l'Université de La Rochelle no. 99.04.054.

Les systèmes d'alerte à la pollution nécessitent la prédiction des pics de pollution. L'ozone est un polluant secondaire, très réactif ce qui fait que la prévision des pics basée sur les lois physico – chimiques soit irréalisable dans l'état actuel des connaissances. L'approche que j'ai abordée a été statistique, basée sur les réseaux neuro-flous et l'analyse discriminante.

Recherche financée par des organismes roumains

1. Etude des solutions d'automatisme pour le traitement thermique des colonnes de distillation. *Partenaire industriel* : Le trust de montage d'outillages chimiques de Bucarest (TMUCB), Bucarest, 1989.
2. L'automatisme de traitement thermique des colonnes de distillation avec des thyristors. *Partenaire industriel* : Le trust de montage d'outillages chimiques de Bucarest (TMUCB), contrat UTCB 56/1988, Bucarest, 1989.
3. Etude de solutions d'automatisme du flux technologique dans les sections de préparation des surfaces. Phase 2 : Documentation d'exécution d'automatisme. *Partenaire industriel* : Le trust des installations et d'automatisme de Bucarest, contrat UTCB 230/1989, Bucarest.
4. Etude d'automatisme flexible d'une ligne de teinture. *Partenaire industriel* : Le trust des installations et d'automatisme de Bucarest, 1989.
5. L'automatisme de la station de mélange. *Partenaire industriel* : Société de Vitrierie de Mediaş, Roumanie, 1989.
6. Etude d'automatisme avec ordinateur industriel du système de pesée. *Partenaire industriel* : Société de Vitrierie de Bucarest, 1990.
7. Etude du système de supervision et des commandes des sous-stations thermiques du réseau de distribution de chaleur de Bucarest. *Partenaire industriel* : Régie autonome de distribution d'énergie thermique du Bucarest (RADET), 1991.
8. Commande technique centralisée avec ordinateur industriel des installations de distribution de chauffage dans la ville avec application aux sous-stations de distribution de chaleur :
 - phase I : Étude paramétriques, 1992.
 - phase II : Réseau de communication pour sous-stations, 1993.
 - phase III : Modèles dynamiques pour les sous-stations, 1994.
 - phase IV : Expériences, 1995.*Partenaire industriel* : Ministère Roumain de la Science et de l'Enseignement, 1992.
9. Etude des systèmes d'acquisition de données et commande automatique des procédés – application aux équipements techniques du bâtiment, contrat UTCB 306B/AA2(B37), *Partenaire industriel* : Ministère de la Recherche et de la Technologie, Bucarest, 1995.

1.1.3 Ecole internationale d'été - conférencier invité

- 2004 Summer Academy for Mediterranean Solar Architecture (SAMSA), organisé par International Solar Energy Society et Università degli studi Roma Tre, Rome 26 juillet – 6 août

1.1.4 Encadrement

1.1.4.1 Doctorants

Période	Doctorant	Sujet	Directeur de thèse	Taux d'encadrement
2005 -	I. Jaffal	Définition et contrôle des performances des bâtiments adaptatifs.	C. Inard	50%
2003 -	A. Sempey	Prise en compte du champ thermo-convectif pour le contrôle thermique des ambiances habitables	C. Inard	50%
2003-2006	A. Chicinas	Commande intelligente des centrales de traitement d'air	C. Inard	50%

1.1.4.2 Mastère

Période	Etudiant	Sujet
2005-2006	F.Maassarani	Gestion techniques des systèmes de chauffage et climatisation
2004 -2005	I. Jaffal	Audit énergétique des bâtiments en utilisant les systèmes de gestion technique du bâtiment
2004-2005	I. Jimenez	Estimation du potentiel de rafraîchissement par ventilation

1.1.5 Rapporteur de thèse

2006 Carolina Ganem, Réhabilitation environnementale des enveloppes des bâtiments, ETSAB, Université Polytechnique de Catalogne, Barcelone, Espagne

1.1.6 Prix et distinctions

1997 Fulbright Senior Researcher Award

2005 Best paper award, Passive and Low energy Cooling for the Built Environment, PALENC, Santorini, Grèce, 19-21 mai 2005

1.2 Enseignement

J'ai débuté mes activités d'enseignement en tant qu'assistant à l'Université Technique de Construction de Bucarest en 1989. Je suis resté en poste dans cette université jusqu'au 1998 après avoir été successivement Maître–Assistant puis Maître de Conférences. Durant cette période, mes principales thématiques de d'enseignement ont été l'automatisme des équipements techniques des bâtiment et la Conception Assistée par Ordinateur.

Depuis 2000, j'intervins en tant que chargé de cours à l'Université de La Rochelle au sein du Département Génie Civile et Mécanique et du Département Génie des Procédés. J'enseigne principalement en Mastère 2 avec quelques interventions en Licence 3 et Mastère 1.

Mes enseignements traitent de l'évaluation énergétique des bâtiments et du contrôle des équipements techniques. Les tableaux suivantes donnent le détail de mes interventions tant à l'Université Technique de Construction de Bucarest que l'Université de La Rochelle.

Tableau 1.1 Enseignement dispensé à l'Université Technique de Construction de Bucarest, 1989-1998

1996-1998	Mastère 2	Identification des paramètres des modèles des systèmes thermiques	2x28h CM
1993-1998	Licence 3	Contrôle séquentiel des équipements techniques du bâtiment	5x28h CM 15x28h TD 15x28h TP
1989-1998	Mastère 1	Conception assistée par ordinateur	8x28h CM 16x28h TP
1989-1993	Mastère 1	Méthodes numériques	4x28h TP
1989-1993	Mastère 1	Techniques expérimentales	4x28h TP

Tableau 1.2 Enseignement dispensé à l'Université de La Rochelle, 1999-2006

Département de Génie Civil et Mécanique			
2000-2001	Mastère 2	Commande et automatisme des procédés du génie climatique	4h CM
			4h TD
			4h TP
Mastère 2	Contrôle des performances énergétiques	4h CM	
		4h TD	
Mastère 2	Encadrement de projet	10h TP	
2001-2002	Mastère 2	Contrôle des performances énergétiques	4h CM
			12h TD
			6h CM
Mastère 2	Modélisation du comportement thermique des bâtiments	4h TD	
Maîtrise	Stage initiation à la recherche	40h TP	
2002-2003	Mastère 2	Contrôle des performances énergétiques	3h CM
			11h TD
			8h TP
Mastère 2	Projet	8h TP	
2003-2004	Mastère 2	Réglage et suivi des installations	2h CM
			6h TP
			10h CM
Mastère 2	Contrôle des performances énergétiques	8h TD	
Mastère 2	Encadrement de projet	36h TP	
2004-2005	Mastère 2	Contrôle des performances énergétiques	8h CM
			6h TD
			24h TP
Mastère 2	Encadrement de projet	16h TP	
Licence 2	Capteurs, métrologie et automatisme	10,5h CM	
		10,5h TD	
		24h TP	
2005-2006	Mastère 2	Contrôle des performances énergétiques	3h CM
			8,5h TD
			12h TP
Mastère 2	Evaluation énergétique et économique des bâtiments	3h CM	
			2,5h TP
			8h TD
Mastère 1 et 2	Encadrement de projet	39h TP	
Licence 3	Comportement thermique de bâtiment	12h TP	
Département Génie des Procédés			
2003-2004	Licence 3	Informatique industrielle et automatisme	4h GM
			4h TD
			29h TP
2004-2005	Mastère 1	Automatisme	6h GM
			6h TD
			21h TP
2005-2006	Mastère 1	Automatisme	9h CM
			9h TP
			9h TD

1.3 Activité administratives et responsabilités collectives

1.3.1 Université de La Rochelle

depuis 2006 Membre élu du Conseil Scientifique de l'Université

1.3.2 Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment

depuis 2003 Membre élu du Conseil de laboratoire

1.3.3 Département de Génie Civil et Mécanique, Université de La Rochelle

depuis 2006 Responsable du parcours Intégration de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables dans la conception des bâtiments du Master Ingénierie du Bâtiment

1.3.4 Coordination de projets

2000 – 2004 Coordonnateur du projet européen *Natural ventilation in urban environment URBVENT*, contrat NNE5-2000-00238 financé dans le 5^{ème} programme-cadre de RTD

2004 – 2005 Editeur, en collaboration avec Francis Allard, d'ouvrage *Natural Ventilation in the Urban Environment* ISBN 1844071294, Earthscan, London, UK, 2005

1.3.5 Revues internationales

depuis 2005 **Membre du comité éditorial** de la revue *Energy and Buildings*

depuis 2002 **Membre des comités de lecture des revues** : *Energy and Buildings*, *Solar Energy*, *HVAC&R Research*, *Atmospheric Environment*, *Transactions on Neural Networks*

1.3.6 Conférences internationales

2005 **Président de session** à la conférence *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment PALENC 2005*, Santorini, Grèce, 19-21 mai 2005

2003 **Membre du comité scientifique** de la conférence *Building Simulation 2003*, Eindhoven, Pays Bas, 11-14 août 2003

2002 **Président de session** à la conférence internationale *EPIC AIVC Energy efficient and healthy buildings in sustainable cities*, Lyon, 23-26 October, 2002
Organisateur d'un atelier sur la ventilation naturelle à la conférence internationale *EPIC AIVC Energy efficient and healthy buildings in sustainable cities*, Lyon, 23-26 October, 2002

1.3.7 Sociétés savantes

Depuis 2004 **Membre** (n° 0410543) de l'**International Solar Energy Society**

Depuis 1992 **Secrétaire Scientifique** de la Société Roumaine d'Installations Electriques et d'Automatisations

Depuis 1991 **Membre** de l'Association Générale de Frigoristes Roumains

2 Synthèse des activités de recherche

Mes activités de recherche s'articulent autour du concept de *bâtiment adaptatif*, c. à d. un bâtiment qui répond aux variations de l'environnement extérieur et intérieur pour assurer un confort optimal et une bonne qualité de l'air aux usagers avec une consommation énergétique minimale.

Définitions

Systèmes du bâtiment – les systèmes qui font partie de la structure du bâtiment et qui ont une fonction pour le contrôle de l'ambiance (par exemple, les tours de ventilation, les atriums, les double façades, les protections solaires).

Systèmes techniques – les systèmes de contrôle de l'ambiance qui sont installés après que le bâtiment soit construit et qui peuvent être modifiés (par exemple la chaufferie, la centrale de climatisation).

Systèmes de contrôle – la totalité des éléments qui permettent le contrôle des *systèmes du bâtiment* et des *systèmes techniques* (les capteurs, les systèmes de communication et traitement de l'information, les actionneurs tels que vannes et volets d'air motorisés).

Algorithmes de contrôle – l'ensemble d'instructions qui permettent le calcul de la commande. L'algorithme de contrôle est le domaine d'intérêt principal de ce travail.

L'architecture traditionnelle intégrait l'adaptation des systèmes du bâtiment en utilisant par exemple l'ombrage ou la ventilation naturelle pour agir sur l'ambiance intérieure du bâtiment. L'apparition des systèmes de chauffage et de climatisation a permis le contrôle de l'ambiance pour toutes les conditions climatiques. Le principe est basé sur l'installation de systèmes techniques qui ont une puissance au moins égale à la charge thermique du bâtiment. Les systèmes des bâtiments sont, dans ces cas, statiques ; toute l'adaptation du bâtiment est faite par les systèmes techniques.

Le paradigme du bâtiment adaptatif considère que le bâtiment réagit à l'environnement. Dans premier temps, on essaie que les systèmes du bâtiment utilisent le potentiel du climat et puis on conçoit les systèmes techniques. Dans cette approche, le bâtiment lui-même fait partie de la "centrale de climatisation." La synergie du fonctionnement des systèmes du bâtiment et des systèmes techniques est réalisée par le système de contrôle automatique.

Tableau 2.1 Principales thématiques de recherche et publications associées (Liste de publications, page 165)

Domaine de recherche	Revue internationale		Chapitres d'ouvrages internationaux		Congrès internationaux		Revue nationale		Congrès nationaux	
	[RI]		[OI]		[CI]		[RN]		[CN]	
Étude de l'environnement										
à l'intérieur du bâtiment	[RI 13]	[RI 15]	[OI 1]	[OI 3]	[CI 4]	[CI 7]	[RN 2]	[RN 3]		
			[OI 4]	[OI 7]	[CI 8]	[CI 15]	[RN 4]			
			[OI 9]		[CI 18]	[CI 20]				
					[CI 23]	[CI 24]				
					[CI 25]	[CI 27]				
					[CI 28]	[CI 29]				
à l'extérieur du bâtiment	[RI 6]	[RI 8]			[CI 5]		[RN 10]		[CN 5]	[CN 8]
					[CI 14]	[CI 16]				
Transferts à travers l'enveloppe	[RI 6]		[OI 2]		[CI 6]	[CI 26]	[RN 5]		[CN 2]	[CN 3]
									[CN 4]	[CN 6]
Potentiel d'adaptation du bâtiment	[RI 2]	[RI 4]	[OI 5]		[CI 1]	[CI 9]	[RN 6]		[CN 1]	
	[RI 5]	[RI 8]			[CI 11]	[CI 12]				
	[RI 9]				[CI 13]	[CI 14]				
					[CI 17]	[CI 19]				
Contrôle et diagnostic des équipements techniques	[RI 10]	[RI 11]	[OI 8]		[CI 10]	[CI 21]	[RN 1]	[RN 7]	[CN 7]	[CN 9]
	[RI 12]	[RI 14]			[CI 22]	[CI 30]	[RN 8]		[CN 10]	[CN 11]
					[CI 31]	[CI 32]	[RN 9]	[RN 11]	[CN 12]	[CN 13]
							[RN 12]	[RN 13]	[CN 14]	[CN 15]
							[RN 14]	[RN 16]	[CN 16]	
							[RN 17]	[RN 18]		
Aspects économiques			[OI 6]				[RN 15]	[RN 19]	[CN 17]	
							[RN 20]			
Total	13		9		30		20		17	

En réponse à cette problématique, mes travaux de recherche concernent l'environnement, le bâtiment et les systèmes (voir Tableau 2.1) :

- étude des écoulements, de la qualité de l'air et du confort à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment ;
- transferts à travers l'enveloppe ;
- potentiel d'adaptation du bâtiment ;
- contrôle intelligent et diagnostic des défauts des systèmes techniques ;
- aspects économiques.

Les conditions météorologiques et la qualité de l'air constituent des perturbations importantes pour la maîtrise des ambiances intérieures. La prédiction de leurs valeurs est utile pour un contrôle de type *feed-forward*. Actuellement, les prédictions météorologiques se font pour des intervalles de temps de 3 heures, voire d'une heure, pour un horizon temporel d'une semaine. Ces prévisions, disponibles en ligne, peuvent être utilisées avec les programmes d'occupation des bâtiments pour le contrôle prévisionnel des systèmes techniques. Mais le potentiel d'adaptation du bâtiment peut être diminué par l'environnement urbain, notamment à cause de la pollution, le bruit et la réduction de la vitesse du vent. Si les prévisions météorologiques à mésoéchelle (sur un maillage de 2,5 à 10 km) sont relativement précises, la prédiction de la qualité de l'air, du bruit et de la modification du vent à l'échelle de l'environnement du bâtiment n'est pas suffisamment développée.

En collaboration avec l'Association pour la surveillance de la qualité de l'air en Poitou-Charentes, j'ai développé un système de prédiction du niveau de pollution dans le cadre du contrat de recherche *Prédictions des pics d'ozone en régime de brise*. Ce modèle, qui utilise un approche neuro-flou et l'analyse discriminante floue, permet la prévision de la concentration en polluant à l'échelle urbaine. En coopération avec l'Association pour la surveillance de la qualité de l'air en Poitou-Charentes, on a utilisé ce modèle pour obtenir des cartes de pollution de la ville en fonction de la géographie urbaine, en intégrant des corrections imposées par les grands axes de circulation. Ses cartes ont été élaborées pour la ville d'Angoulême et de La Rochelle. Les résultats ont été publiés dans la revue internationale *Atmospheric Environment* [RI 7] et dans les actes d'un congrès international [CI 5].

Dans le but de prédire la concentration des polluants à l'intérieure des bâtiments, ces recherches ont eu comme suite un projet financé par l'ADEME dans le cadre du *Programme de Recherche Interorganisme pour une Meilleure Qualité de l'Air à l'Echelle Locale PRIMEQUAL-PREDIT*. Ce projet, coordonné par P. Blondeau, a consisté en la mesure simultanée des polluants atmosphériques (O_3 , NO_x , SO_2 , CO_2 , particules) à l'intérieur et à l'extérieur de différentes écoles et en la modélisation du transfert des polluants de l'extérieur à l'intérieur. Ma contribution a été la définition du projet, du protocole expérimental et de la méthodologie de modélisation. Ce projet a eu pour cadre la thèse de V. Iordache, *Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire : recherche de moyens de prédiction et de protection*, soutenue à Université de La Rochelle en janvier 2003. Les résultats ont été publiés dans la revue *Building and Environment* [RI 6].

Ces études sur la pollution atmosphérique ont été reliés à l'étude du milieu urbain et de son influence sur le potentiel de la ventilation naturelle. Cela a fait l'objet du projet européen *URBVENT Natural Ventilation in Urban Environment*, projet que j'ai initié et coordonné de 2000 à 2004 en collaboration avec F. Allard. Ce projet a été constitué de deux modules de recherche, un sur le microclimat urbain et l'autre sur le potentiel de la ventilation naturelle, un module de validation des modèles par des professionnels et un module de dissémination des résultats. Les recherches sur la pollution, réalisées dans le programme PRIMEQUAL-PREDIT, ont été complétées dans le projet URBVENT par l'étude du bruit, de l'effet d'îlot de chaleur urbain et de la réduction de la vitesse du vent dans les rues canyons. Des expériences ont été réalisées à Athènes par l'Université d'Athènes et l'Université Métropolitaine de Londres. Les travaux sur les aspects thermo-aérauliques dans les rues canyon ont fait l'objet de la thèse de C. Georgakis encadrée par M. Santamouris et soutenue en 2006 à l'Univeristé d'Athènes. Les résultats sur le microclimat urbain ont été publiés dans la revue *Building and Environment* [RI 6].

Une tâche importante du projet URBVENT a été l'estimation du potentiel d'adaptabilité du bâtiment par la ventilation naturelle. La méthode que j'ai développée utilise le concept de la température en évolution libre et une description statistique du comportement thermique du bâtiment qui présente les avantages des approches statiques pour la simplicité et de l'approche dynamiques pour la finesse de la description des phénomènes. Cette méthode a été publiée dans les revues *Energy and Buildings* [RI 4] [RI 9] et *Solar Energy* [RI 5]. Le potentiel climatique d'adaptation par ventilation et la réduction de ce potentiel par les contraintes urbaines ont été traités par une approche multicritère dans la thèse de M. Germano encadrée par C. - A. Roulet et soutenue à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne en janvier 2006. Le travail a donné

lieu à des publications dans la revue *International Journal of Ventilation* [RI 8] et dans des actes de congrès internationaux [CI 1], [CI 9], [CI 14], [CI 17].

Les résultats de ce projet ont été publiés dans un ouvrage collectif international, *Natural Ventilation in the Urban Environment* que j'ai édité en collaboration avec F. Allard [OS 1]. La synthèse du projet a obtenu le premier prix à l'*International Conference Passive and Low Energy Cooling for Built Environment PALENC* [CI 1]

J'ai étendu la validité de cette méthode pour les régimes de chauffage et de climatisation dans le cadre du projet EULEB – *European Low Energy Buildings* [RI 2], [RI 4]. Ces études sont reprises par I. Jaffal de l'Université de La Rochelle dans sa thèse sur les bâtiments à faible consommation énergétique. Cette thèse, qui a débuté en octobre 2005 et que je co-encadre avec C. Inard, est menée en collaboration avec EDF et l'Office HLM de La Rochelle.

J'enseigne une partie des résultats concernant l'adaptabilité du bâtiment aux étudiants du master Intégration de l'Efficacité Énergétique et des Energies Renouvelables organisé à l'Université de La Rochelle.

Généralement, le potentiel climatique du site n'est pas suffisant pour la maîtrise de l'ambiance par le contrôle des flux à travers l'enveloppe du bâtiment. On a alors recourt aux systèmes techniques (chauffage, ventilation et climatisation). La plupart du temps, ces systèmes fonctionnent en charge partielle d'où l'importance économique du contrôle automatique de leur fonctionnement. Pour les systèmes multi-variables non-linéaires, j'ai étudié le problème de l'optimisation du point statique de fonctionnement (cas des brûleurs à gaz) et de la réponse dynamique (cas des ventilo-convecteurs) ; les résultats ont été publiés dans les revues *Energy and Buildings* [RI 10] [RI 11] et *Solar Energy* [RI 12]. Ces travaux, commencés lors de ma thèse, ont été repris par A. Chicinas dans sa thèse soutenue en 2006 sur le contrôle intelligent des centrales de traitement d'air. Des résultats de cette thèse, que j'ai co-encadrée avec C. Inard, sont acceptés pour publication dans la revue *Control Engineering Practice* [RI 1].

Les systèmes de mesure et de contrôle permettent aussi le diagnostic des défauts. Mes travaux dans ce domaine ont fait partie de l'Annexe 34 "*Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance – The Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings*" de l'Agence Internationale de l'Énergie. Les résultats de ces travaux ont été publiés dans la revue *Energy and Buildings* [RI 14].

Le but final du contrôle des phénomènes de transfert à travers l'enveloppe et des équipements techniques est la maîtrise des ambiances intérieures. Dans une large gamme de valeurs de l'humidité relative, couramment présente à l'intérieur des bâtiments (de 30 % à 70 %), la sensation de confort dépend de la température de l'air, de la vitesse de l'air et de la température radiante moyenne. Ces paramètres peuvent être estimés en utilisant une approche CFD, mais le temps de calcul requis est prohibitif. Pour diminuer de manière notable la vitesse de calcul, j'ai considéré que le champ de vitesse dans un espace ventilé ne change pas fondamentalement si la température de soufflage change peu (typiquement de 1 à 2°C). Dans ces conditions, on doit uniquement résoudre l'équation de l'énergie. Pour appliquer cette approche, j'ai introduit une correction du bilan de masse pour chaque maille, correction qui est

nécessaire quand la divergence de l'écoulement n'est pas nulle. Ces travaux, qui ont été publiés dans la revue *Building and Environment* [R1 15], ont été repris par A. Sempey dans sa thèse sur la modélisation d'écoulements dans les ambiances habitables en utilisant un champ de vitesse fixe, thèse qui a débuté en septembre 2003 et que je co-encadre avec C. Inard.

J'enseigne des résultats issus des travaux sur le contrôle des équipements techniques dans le master *Gestion intelligente des bâtiments* de l'Université de La Rochelle.

Dans ce qui suit, je présente des contributions au concept de bâtiment adaptatif comme paradigme de conception et exploitation du bâtiment. Les aspects abordés sont 1) l'interaction entre le bâtiment et son microclimat urbain, 2) le potentiel des solutions de chauffage, ventilation et climatisation et 3) le contrôle des systèmes techniques. La première partie présente une méthode de prédiction du niveau de pollution en ozone et un modèle neuro-flou pour le transfert d'ozone de l'extérieur à l'intérieur du bâtiment. La deuxième partie présente une méthode basée sur la température en évolution libre pour estimer le potentiel d'application des solutions de chauffage, ventilation et climatisation en fonction du climat du site, du bâtiment et du critère de confort. En utilisant ce potentiel, les systèmes sont ensuite contrôlés pour réaliser une synergie maximale avec le bâtiment. La dernière partie présente des aspects concernant le contrôle et le diagnostic des défauts des systèmes centraux et terminaux. Dans un premier temps, on doit choisir le point optimal de fonctionnement et, par la suite, optimiser le comportement dynamique autour de ce point. Le caractère non linéaire des systèmes de contrôle d'ambiance exige des modèles linéaires par portions ou adaptatifs. La logique floue permet d'inclure ces deux aspects (linéarité par portions et adaptabilité). En plus, elle permet de décrire le fonctionnement séquentiel. On réalise, ainsi, un cadre unitaire de description de fonctionnement des systèmes.

2.1 Prédiction des pics d'ozone et son transfert dans les bâtiments

2.1.1 Prédiction des pics d'ozone

Cette section est basée sur l'article :

C. Ghiaus (2005). Linear fuzzy-discriminant analysis applied to forecast ozone concentration classes in sea-breeze regime, *Atmospheric Environment*, 39(26), pp. 4691-4702
doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.012>

Cette section présente un modèle de prédiction des pics d'ozone basé sur l'analyse discriminante, qui utilise la concentration d'ozone de la veille et les prédictions météo du vent et de la température. Ce modèle réalise une classification correcte des concentrations, si le domaine d'erreur accepté est comparable à la précision de mesure. On a défini sept classes de concentration, chacune ayant un domaine allant de 7.5 à 10% de la valeur absolue de la classe. L'analyse discriminante a été adaptée pour prendre en compte l'incertitude sur la valeur estimée du centre des classes. Étant donné que l'erreur de mesure maximale est de $\pm 10\%$, une erreur de classification d'une classe est acceptable. Le modèle manque typiquement un événement et donne deux fausses alarmes par an pour des périodes différentes de celles d'apprentissage. La validation a été réalisée en utilisant des tests spécialement conçus pour la prédiction des événements rares. La probabilité de détection est d'environ 98% et le score de Heidke est d'environ 80%. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'Association pour la surveillance de la qualité de l'air dans la région Poitou-Charentes (Ghiaus, Allard et al. 2000; Ghiaus, Caini et al. 2003).

2.1.1.1 Introduction

Dans des nombreuses régions européennes, la concentration d'ozone est devenue très élevée et continue à croître d'environ 1% par an (de Leeuw and van Znatvoort 1995; Stanners and Bourdeau 1995). Conformément à la réglementation européenne (EEC 1992), le seuil de la concentration pour l'information de la population est de $180 \mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne horaire. En plus du seuil d'information, les autorités locales sont intéressées par la prédiction des jours ayant une valeur moyenne sur une heure supérieure à $140 \mu\text{g m}^{-3}$.

Les modèles de prédiction de l'ozone dans la troposphère sont construits soit à partir de lois physiques soit de relations empiriques. En général, la première catégorie de modèles est utilisée pour les études d'impact, tandis que la deuxième est utilisée pour faire des prévisions (de Leeuw, Berge et al. 1996; Fromage and Gilbert 1997; van Aalst and de Leeuw 1997). Avec l'approche empirique, le résultat est donné soit quantitativement soit qualitativement en faisant une prédiction de la valeur maximale (moyenne sur une heure) ou d'une classe.

De nombreuses études présentent des approches empiriques ou statistiques pour la prévision des pics d'ozone. Millions et Davis (1994) montre que la forte auto-corrélation des séries de

temps des concentrations en polluants de l'air extérieur et la structure incomplète de la relation causale peut avoir comme résultat la violation de la condition d'indépendance de l'erreur, une condition nécessaire pour obtenir des modèles statistiques en appliquant les méthodes de régression. Robeson et Steyn (1990) ont comparé les performances de trois modèles statistiques (une combinaison déterministe et stochastique, stochastique ARIMA et régression) et ils se sont rendu compte de la difficulté de prévoir les pics de concentration. Hubbard et Cobourn (1998) ont utilisé une transformation paramétrique dans un modèle de régression multiple pour prédire la catégorie de concentration d'ozone. Des techniques non linéaires, comme les réseaux de neurones et les systèmes flous ont la capacité de prédire la valeur maximale de la concentration d'ozone de la journée de manière plus précise que les modèles de régression ou stochastique (Yi and Prybutok 1996; Colda and Ghiaus 1998; Gardner and Dorling 1998; Jorquera, Pérez et al. 1998). Mais ces méthodes nécessitent un certain nombre de précautions d'emploi pour éviter que l'algorithme de minimisation ne se bloque sur un minimum local. De plus, leurs propriétés d'interpolation sont bonnes mais celles d'extrapolation sont plutôt médiocres. Théoriquement, un modèle flou, neuronal ou neuro-flou peut se rapprocher d'une manière approximative d'une fonction multi-variable continue jusqu'au niveau de précision désiré mais avec ce type de modèles on peut obtenir également un surapprentissage (Rumelhart and McClelland 1988; Jang, Sun et al. 1997). Pour identifier correctement les paramètres de ces modèles, les données d'apprentissage doivent être distribuées uniformément dans l'espace des entrées (Ghiaus 1996). Cette condition n'est pas satisfaite quand le nombre des données est très faible, comme dans le cas des événements rares.

Comme une alternative à la prédiction de la valeur, la classification exprime l'information d'une manière compréhensible pour le grand public. Si un modèle prévoit correctement la classe de concentration d'ozone, il est utile pour les pouvoirs publics (Hubbard and Cobourn 1998). Ryan (1995) a utilisé la méthode d'arbre de classification et de régression (CART), la régression et la prévision experte pour la région de Baltimore, USA. Engel *et al.* (1998) ont appliqué l'analyse discriminante pour obtenir deux classes de jours : pollués et non-pollués, en fonction de la concentration d'ozone. Les variables explicatives utilisées étaient fonction du niveau de concentration qui séparait les catégories : la température maximale prévue pour le jour suivant, et la valeur maximale de l'ozone du jour antérieur ont été systématiquement utilisées ; deux des trois autres variables (la température minimale, la vitesse du vent à 1500 m d'altitude et la hauteur de la couche de mélange) ont été ajoutées. Davis *et al.* (1998) ont utilisé des techniques de classification des conditions météorologiques en sept catégories corrélées statistiquement avec la valeur maximale de la concentration de l'ozone. Ils en ont conclu que la température maximale de surface, la vitesse moyenne du vent et le rayonnement solaire sont importants dans presque toutes les catégories. La prévision basée sur la classification est moins sensible aux erreurs de prévision météorologique ; malgré l'imprécision inhérente, elle est très utile pour l'information de la population.

2.1.1.2 Méthode

L'analyse discriminante a été utilisée pour la prédiction des pics d'ozone sur un intervalle temporel de 36 heures. Cette méthode a été modifiée pour modéliser le flou des frontières entre les classes. La méthode prend en compte les erreurs introduites par les prévisions

météorologiques, les erreurs de mesure et les erreurs dues au changement dans le temps de l'emplacement des appareils de mesure.

La méthodologie de modélisation consiste en :

- 1) l'acquisition des données et le traitement des données manquantes,
- 2) l'étude des variables explicatives,
- 3) la construction du modèle,
- 4) la validation.

2.1.1.2.1 Données météorologiques et de concentration en ozone

Le modèle est basé sur des données collectées entre le 1^{er} janvier 1993 et le 31 décembre 1999 avec des moniteurs de type ultraviolet ayant une incertitude de mesure inférieure à $\pm 10\%$. L'erreur est considérée comme une dérive de zéro, exprimée en *ppb*, et en pourcentage de la valeur de 200 *ppb*. Quand le moniteur est calibré, on accepte une dérive de zéro de 2 *ppb* et une erreur relative de $\pm 5\%$. Pendant le fonctionnement normal, les moniteurs font des vérifications automatiques ; si la dérive de zéro est inférieure à 7 *ppb* ou si l'erreur relative est inférieure à 15%, les données sont validées, mais une demande de calibrage est transmise si la dérive de zéro est supérieure à 3 *ppb* ou si l'erreur relative est supérieure à 10%. La concentration en polluants et les valeurs météorologiques sont mesurées toutes les 15 minutes. Pendant la période utilisée pour l'apprentissage du modèle, le niveau d'alerte ($360 \mu\text{g m}^{-3}$) n'a jamais été atteint, le niveau d'information ($180 \mu\text{g m}^{-3}$) est apparu typiquement moins de cinq fois par an, et le niveau d'information des autorités locales ($140 \mu\text{g m}^{-3}$) a été enregistré typiquement dix fois par an. La concentration moyenne en ozone a été constante pendant la période d'étude, avec une valeur de $55 \mu\text{g m}^{-3}$.

Du fait de la procédure d'invalidation et des erreurs de transmission, les fichiers de données contiennent à peu près 5 % de valeurs manquantes pour l'ozone et les oxydes d'azote et 3.5 % pour les données météorologiques ; ces occurrences ne sont pas corrélées. En éliminant tous les instants pour lesquels il y a au moins une valeur manquante, la somme des valeurs exclues devient égale à 17 %. Ce problème augmente quand on utilise la moyenne glissante pour le calcul de la moyenne sur une heure : 21 % des données deviennent inutilisables. Pour éliminer ce problème, les séquences manquantes plus courtes d'une heure (99 % des données manquantes, Figure 2.1 a) ont été complétées en utilisant des fonctions splines basées sur quatre points avant et après la séquence des valeurs manquantes, Figure 2.1 b) (Reinsch 1967; deBoor 1978; Jones 1998).

2.1.1.2.2 Analyse des variables explicatives

L'ozone est un polluant secondaire, réactif, pour lequel les principes d'inertie chimique et de diffusion (valides pour d'autres polluants) ne sont pas valables (Toupance 1988). Du point de vue physique, démontré par l'analyse statistique, la température et le vent sont les facteurs les plus importants dans la formation de l'ozone (Tableau 2.2). En accord avec d'autres études, la

température maximale a la plus haute corrélation avec la concentration en ozone. Le rayonnement solaire, malgré son influence sur la formation de l’ozone, n’a pas été retenu comme variable explicative non seulement du fait de la faible corrélation mais aussi parce que sa valeur n’est pas prédite par les services météorologiques.

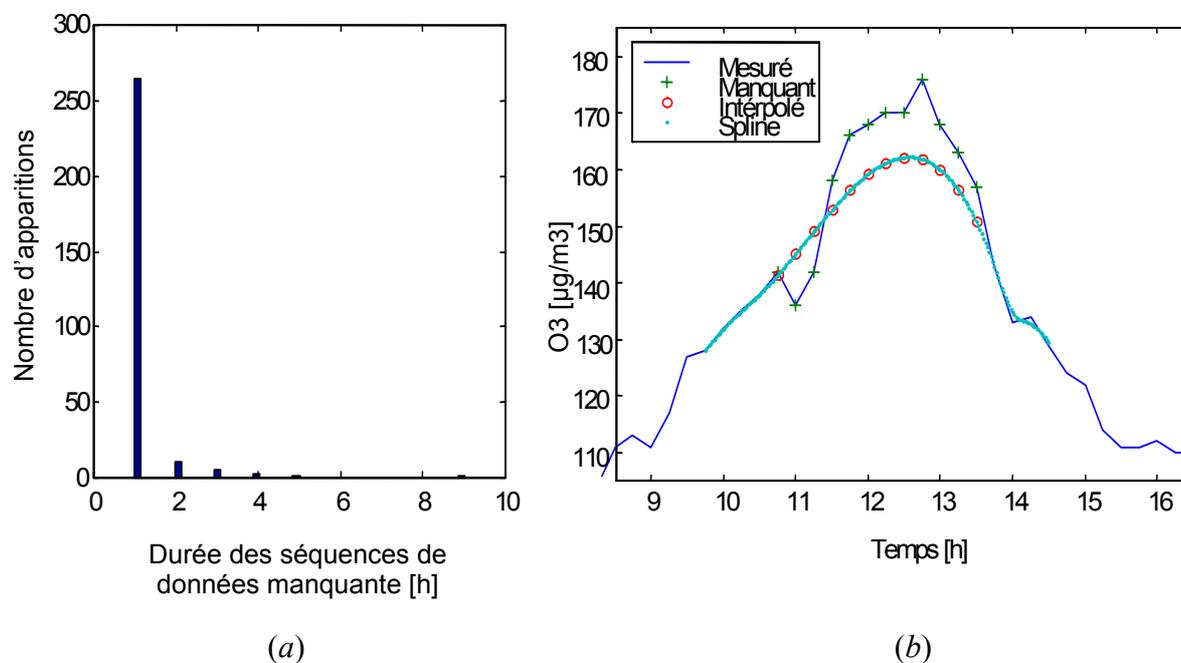


Figure 2.1 a) Histogramme typique de séquence de données manquantes. b) Interpolation des données manquantes en utilisant les fonctions splines

Tableau 2.2 Coefficients de corrélation entre les variables explicatives et la valeur maximale de la concentration d’ozone pour l’année 1998. Seuls les jours avec une température maximale supérieure à 22 °C ont été pris en considération.

Variable explicative	Période	Coefficient de corrélation
Température maximale	Maximum sur 24 h	0.756
Température minimale	Minimum sur 24 h	0.304
Vitesse du vent, direction sud – nord	7h00-9h00, maximum	0.197
Vitesse du vent, direction ouest – est	7h00-9h00, maximum	0.198
Vitesse du vent, direction sud – nord	9h00-20h00, maximum	0.0466
Vitesse du vent, direction ouest – est	9h00-20h00, maximum	0.127
Rayonnement solaire	Maximum sur 24 h	0.0637
Humidité relative	Maximum sur 24 h	-0.390

L’analyse visuelle et statistique des valeurs mesurées révèle deux types de jours qui présentent des épisodes d’ozone (Figure 2.2). Le premier type de jour est caractérisé par la brise marine avec un vent faible qui change de direction pendant la journée (Figure 2.2 a). Ce phénomène peut ramener l’ozone à sa source dans l’après-midi (Perros and Toupance 1988). La cause du deuxième type de jour peut être le transport de l’ozone par le vent du sud (Figure 2.2 b). Ces hypothèses sur les effets des phénomènes de transport n’ont pas été vérifiées.

La Figure 2.3 donne une image qualitative des groupes formés par les jours présentant une concentration en ozone plus élevée que $140 \mu\text{g m}^{-3}$. La température maximale de la journée et la vitesse du vent sont les meilleures variables discriminantes. Sur la Figure 2.3 ne sont pas représentées les valeurs contenues entre $120 \mu\text{g m}^{-3}$ et $140 \mu\text{g m}^{-3}$ pour mieux visualiser les groupes correspondants aux valeurs maximales, ainsi que les jours ayant une température maximale plus faible de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ et une vitesse du vent plus élevée de 5 m s^{-1} . L'importance de la température maximale et de la vitesse du vent est relevée aussi par les coefficients de corrélation (Tableau 2.2).

La concentration de l'ozone de la veille influence la formation de l'ozone, présente une relevance statistique, et n'a pas d'erreurs de prédiction. On pourrait argumenter que, étant donné que l'ozone peut être transporté sur des dizaines de kilomètres, la valeur à un moment donné ne dépend pas des valeurs antérieures du même endroit. Mais cet argument est valable également pour les variables météorologiques ; en général, elles ont des variations à l'échelle des kilomètres. Milionis et Davis (1994), et Hubbard et Cobourn (1998) mentionnent que, dans le but de minimiser l'erreur d'autocorrélation des résidus des modèles de régression, les valeurs décalées des variables ne doivent pas faire partie des entrées du modèle. Dans d'autres études, les valeurs antérieures de la concentration sont considérées comme étant des variables explicatives (Robeson and Steyn 1990; Jorquera, Pérez et al. 1998).

Les variables explicatives retenues dans cette étude sont les valeurs maximales et minimales de la température de la journée, de la vitesse du vent pendant la matinée et l'après-midi, la valeur maximale de l'ozone de la veille et la direction du vent. Les prévisions météo sont facilement disponibles. Les propriétés statistiques des prévisions météo sont données dans le Tableau 2.3. Les prévisions de la vitesse et de la direction du vent ont une corrélation plus importante avec les valeurs mesurées quand la température maximale est supérieure à $22 \text{ }^\circ\text{C}$ et notamment quand la concentration en ozone est supérieure à $140 \mu\text{g m}^{-3}$ (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Propriétés statistiques des prévisions météorologique pour l'année 1998 : moyenne de l'erreur (**m**), écart type (**s**) et coefficient de corrélation (**r**) entre la prévision et la mesure.

Type de journée	Tous			Temp. Max. > 22°C			Ozone > $140 \mu\text{g m}^{-3}$		
Nombre de valeurs	153			46			9		
Propriété statistique	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>r</i>
Température [$^\circ\text{C}$]	0.23	2.22	0.81	0.52	2.03	0.64	1.42	2.67	0.46
Vent vitesse [m.s^{-1}]	-0.33	1.78	0.29	-0.68	1.36	0.30	-0.73	1.25	0.46
direction [deg]	0.18	60.97	0.19	-10.24	62.09	0.18	-6.67	59.66	0.34

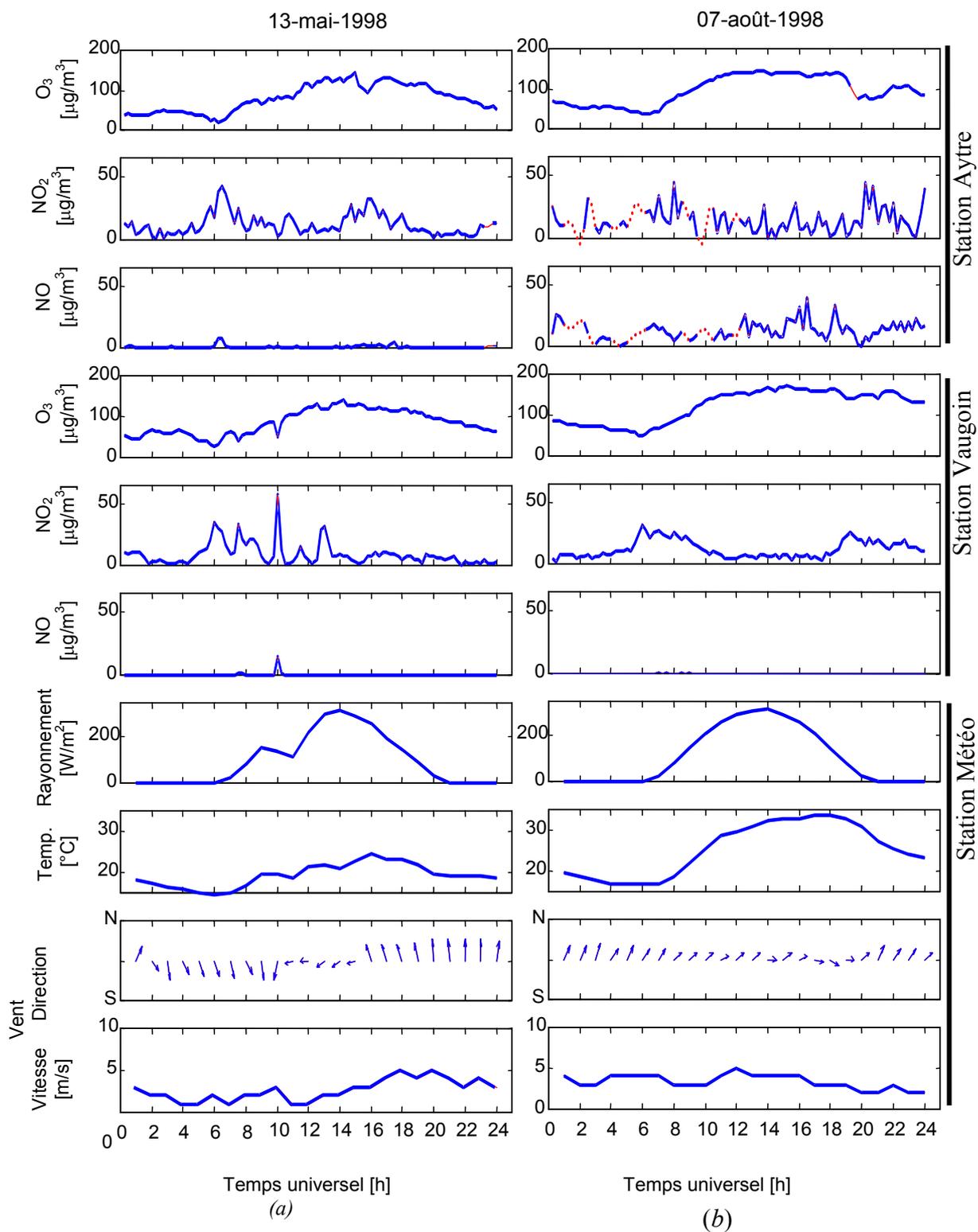


Figure 2.2 Deux jours typiques avec des concentrations hautes en ozone

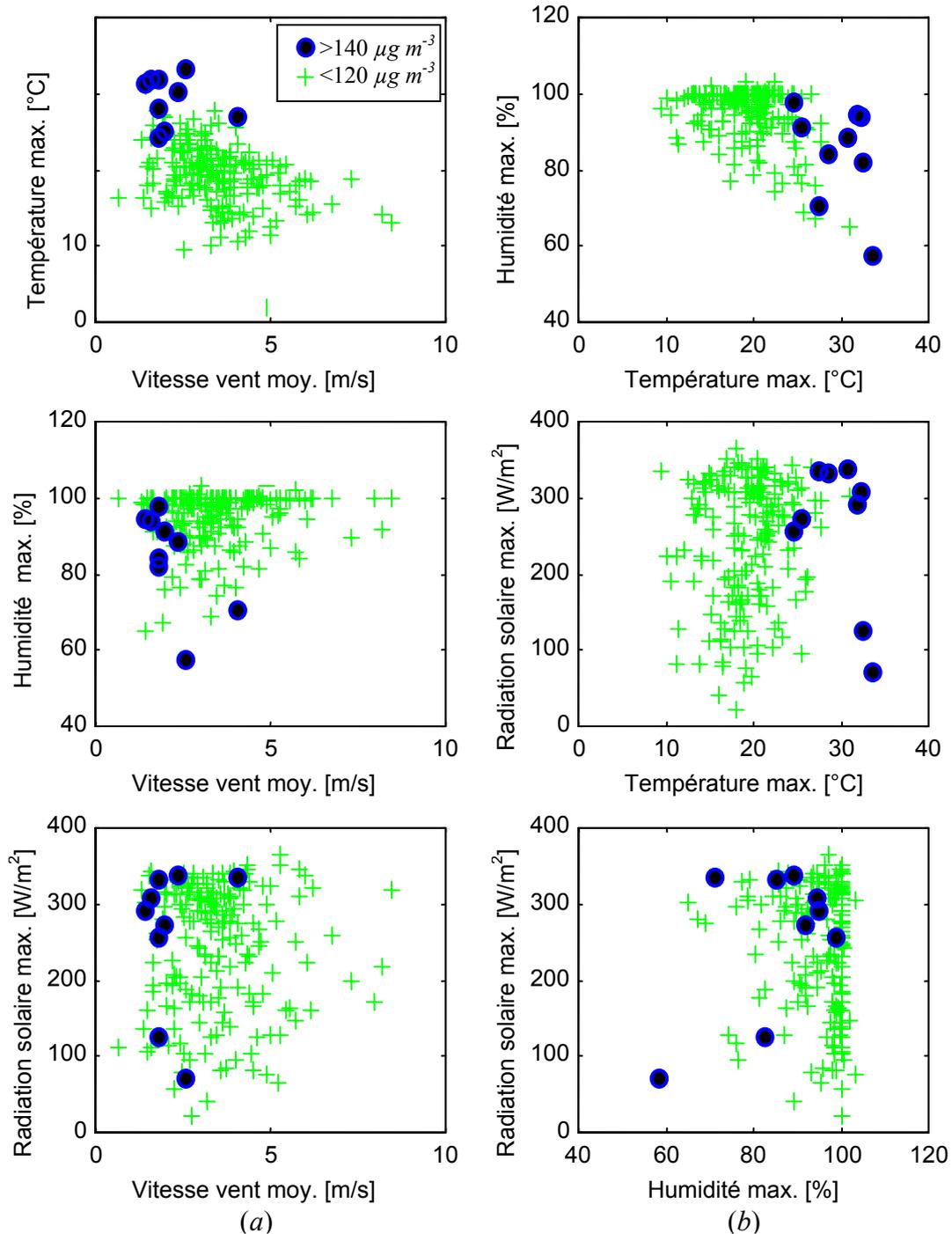


Figure 2.3 Relation entre les paramètres météorologiques et la concentration en ozone pour l'année 1998.

2.1.1.2.3 Méthode de classification

L'analyse discriminante a été utilisée pour réaliser la classification des jours en fonction de la concentration d'ozone et des variables explicatives. L'analyse discriminante a été modifiée pour prendre en compte l'incertitude des centres des groupes. L'objectif est de classer les

observations dans un groupe pour minimiser la probabilité d'erreur de classification. On suppose que les groupes ont une distribution multi-variable normale de moyenne différente, mais avec la même matrice de covariance. Les échantillons proviennent de plus de deux groupes de population des vecteurs aléatoires \mathbf{x} associés à chaque observation. Pour un ensemble de données d'apprentissage, $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$, l'appartenance de chaque observation est connue. En utilisant les hypothèses de la distribution de probabilité du chaque groupe et la fonction discriminante, les observations futures sont classifiées dans un des groupes g pour minimiser la probabilité d'erreur de classification. Considérons seulement deux populations, \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 , avec les moyennes connues, μ_1 et μ_2 ,

$$\mu_1 = E\mathbf{x}_1; \quad \mu_2 = E\mathbf{x}_2; \quad (2.1)$$

et la covariance commune, Σ ,

$$\Sigma = E[(\mathbf{x}_1 - \mu_1)(\mathbf{x}_2 - \mu_2)] \quad (2.2)$$

où E est l'espérance mathématique. Une méthode optimale de classification d'une population aléatoire, \mathbf{y} , dans un des deux groupes, \mathbf{x}_1 ou \mathbf{x}_2 , est basée sur la fonction de discrimination linéaire, $\mathbf{y}^T \Sigma^{-1}(\mu_1 - \mu_2)$. Si μ_1 , μ_2 et Σ sont estimés à partir des données d'apprentissage par \mathbf{m}_1 , \mathbf{m}_2 et \mathbf{S} , respectivement, alors on utilise la fonction discriminante obtenue à partir d'un échantillon, $\mathbf{y}^T \mathbf{S}^{-1}(\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2)$. Pour deux populations ayant une distribution normale mais qui diffèrent par leur valeur moyenne, la probabilité d'erreur de classification en utilisant la fonction de discrimination linéaire décroît de manière monotone avec le carré de la distance de Mahalanobis, δ^2 , entre les deux populations, distance qui est définie par (Jolliffe 1986; Jones 1998) :

$$\delta^2 = (\mu_1 - \mu_2)^T \Sigma^{-1}(\mu_1 - \mu_2) \quad (2.3)$$

La distance de Mahalanobis, δ , entre une observation, y , et la moyenne, μ_i , de la population \mathbf{x}_i , caractérisée par la matrice de covariance Σ_i est :

$$\delta^2 = (\mathbf{y} - \mu_i)^T \times \Sigma_i^{-1} \times (\mathbf{y} - \mu_i). \quad (2.4)$$

Si la moyenne, μ_i , et la matrice de covariance, Σ , sont estimés à partir d'un échantillon par \mathbf{m}_i et, respectivement, par \mathbf{S}_i , alors la distance de Mahalanobis estimée, d , entre une observation et la moyenne de l'échantillon est :

$$d^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{m}_i)^T \times \mathbf{S}_i^{-1} \times (\mathbf{y} - \mathbf{m}_i). \quad (2.5)$$

L'observation est classée dans le groupe pour lequel la distance de Mahalanobis est minimale. La distance de Mahalanobis corrige les différences dans la variance en chaque direction en prenant en compte la covariance. En plus, elle donne une mesure de la confiance dans la classification : la probabilité qu'une observation appartienne à une classe est d'autant plus élevée que la distance de Mahalanobis est courte et avec un maximum pour une distance nulle.

Un exemple de la partition du plan en fonction de la distance de Mahalanobis minimale par deux échantillons provenant de deux groupes différents est donné sur la Figure 2.4. Les propriétés des distributions, d'où ont été extraits les échantillons, sont données dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Propriétés des distributions des populations des échantillons de la Figure 2.4.

	□ Classe A (nombre d'observations $N_A=40$)		○ Classe B (nombre d'observations $N_B=50$)	
	Moyenne, μ_A	Écart type, σ_A	Moyenne, μ_B	Écart type, σ_B
Axe x	$\mu_{Ax}=5$	$\sigma_{Ax}=1.5$	$\mu_{Bx}=3$	$\sigma_{Bx}=1.0$
Axe y	$\mu_{Ay}=4$	$\sigma_{Ay}=0.7$	$\mu_{By}=5$	$\sigma_{By}=0.4$

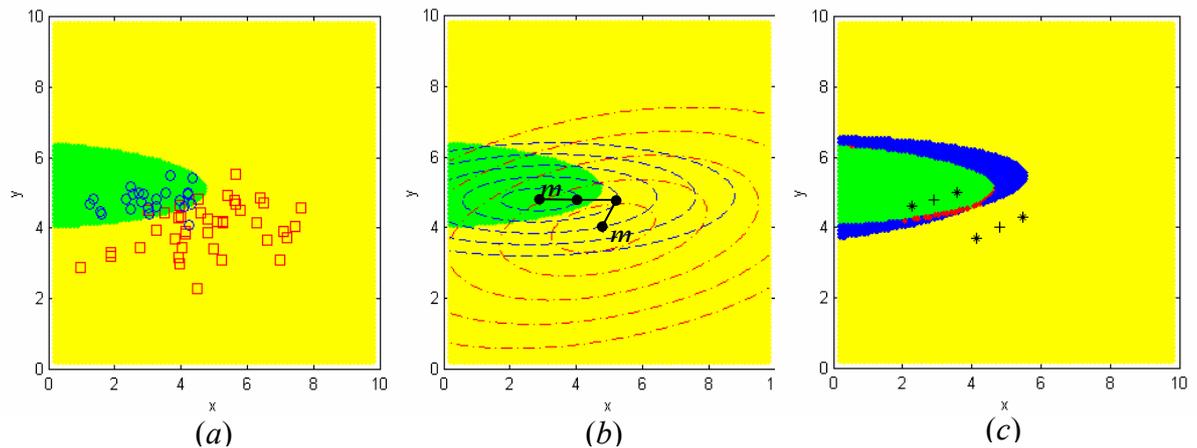


Figure 2.4 Partition du plan en utilisant la distance de Mahalanobis au centre de deux classes, A et B, pour lesquelles l'appartenance de chaque observation est connue. (a) Deux groupes, A (□) et B (○), de variables aléatoires avec une distribution multivariante Gaussienne. (b) Lignes de niveaux d'égalité des distances aux classes A et B. (c) Frontière floue entre les partitions avec la distance de Mahalanobis en utilisant un intervalle de confiance de $100(1-\alpha)\%$ de la position du centre des classes (ici, $\alpha=1$).

Les nouvelles observations qui se trouvent dans la zone la plus claire du plan de la Figure 2.4 sont à une distance de Mahalanobis plus courte du centre du groupe A. Elles seront alors classifiées comme appartenant à ce groupe. Les observations placées dans la zone la plus sombre seront classées dans le groupe B. On note que les deux groupes ne sont pas complètement séparables ; des observations connues comme appartenant au groupe A peuvent avoir une distance plus courte du centre du groupe B que du centre du groupe A (Figure 2.4 a). La distance de Mahalanobis entre une observation P et le centre des deux groupes est montrée sur la Figure 2.4 b : la distance du centre du groupe A, $d_{PA} = 1$, est plus courte que la distance du centre du groupe B, $d_{PB} = 2$. Les lignes – point correspondant aux points de distance égale à la classe A et les lignes pointillées correspondent aux points de distance égale à la classe B.

La distance de Mahalanobis représente une mesure statistique de la distance multivariante de chaque observation au centre des groupes des données. Mais la localisation du vrai centre de la population n'est pas connue ; elle est estimée à partir d'un échantillon. L'intervalle de confiance de la moyenne estimée va affecter l'appartenance des points qui se trouvent près de la frontière des groupes.

Si x est une distribution normale de moyenne inconnue, μ , et l'écart type inconnu, σ , est estimé par la moyenne de l'échantillon, m , et l'écart type de l'échantillon, s , alors, l'intervalle de confiance $100(1-\alpha)\%$ de la moyenne est :

$$m - t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq m + t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{2.6}$$

où $t_{\alpha/2, n-1}$ indique le pourcentage des points de la distribution t de Student avec $n - 1$ degrés de liberté $P\{t_{n-1} \geq t_{\alpha/2, n-1}\} = \alpha / 2$ (Montgomery 1996, pp. 88).

Le fait que la moyenne de l'échantillon se trouve dans un intervalle de confiance, implique que les points se trouvant à proximité de la frontière peuvent appartenir à plusieurs groupes ; un intervalle de confiance plus large implique une zone de flou plus large à la frontière (Figure 2.4 c).

2.1.1.2.4 Critères de performance

Une méthode d'évaluation des performances de prévision des événements rares est utilisée pour étudier les résultats catégoriels, les paramètres et les scores de compétence. Les éléments w, x, y, z du tableau de contingence, Tableau 2.5, représentent, respectivement, le nombre des événements nuls correctement prévus, les événements correctement prévus, les événements manqués et les fausses alarmes. Une prévision parfaite implique zéro événements manqués et zéro fausses alarmes (c. à d. $y = 0$ et $z = 0$).

Tableau 2.5 Tableau de contingence utilisé pour la validation de la prévision des pics d'ozone (Donaldson, Dyer et al. 1975)

Prévu	Observé		Total
	Oui	Non	
Oui	x	z	$x+z$
Non	y	w	$y+w$
Total	$x+y$	$z+w$	N

Les paramètres de capacité de prédiction sont définis en huit types sous la forme de rapports impliquant un élément du tableau de contingence et sa somme marginale associée (Tableau 2.6). Du fait des relations entre les paramètres de capacité, apparemment seulement quatre paramètres sont nécessaires. En fait, seulement trois des huit paramètres de capacité sont nécessaires, par exemple POD , qui mesure le pourcentage des événements prévus correctement, FAR , qui mesure la tendance à prédire plus d'événements, et PON , qui mesure la capacité à prévoir des journées sans pollution.

Tableau 2.6 Définition des paramètres de capacité issus du tableau de contingence (Doswell, Davis-Jones et al. 1990)

$\frac{x}{x+y} \equiv POD$	$\frac{x}{x+z} \equiv FOH$	$\frac{z}{x+z} \equiv FAR$	$\frac{z}{z+w} \equiv POFD$
$\frac{y}{x+y} \equiv FOM$	$\frac{y}{y+w} \equiv DFR$	$\frac{w}{z+w} \equiv PON$	$\frac{w}{y+w} \equiv FOCN$
POD	Probabilité de détection	DFR	Rapport de détection
$FOM=1-POD$	Fréquence des échecs	$FOCN=1-DFR$	Fréquence de non apparition correcte
FOH	Fréquence de succès	PON	Probabilité de non apparition
$FAR=1-FOH$	Rapport de fausses alarmes	$POFD=1-PON$	Probabilité de détection fausse

Les scores de compétence des prévisions, construits sur les paramètres de capacité, synthétisent les informations sur les performances de la prévision données par le tableau de contingence. Ces scores mesurent la performance de prévision en comparaison avec des techniques standard, telles que la persistance (dont on considère que la prévision est égale à la valeur antérieure) ou la prévision aléatoire ; ils réduisent la distorsion de la perception concernant la qualité de la prévision. En utilisant trois des quatre éléments du tableau de contingence Donaldson et al. (1975) ont défini l'indice critique de succès (*CSI, Critical Success Index*), nommé également le score de menace (*Threat Score*) :

$$CSI = x/(x + y + z) \quad (2.7)$$

Les événements rares sont caractérisés par le grand nombre de non – apparitions, w ; mais, ce score ne les prend pas en compte. Bien qu'un grand nombre de prévisions des événements nuls soit trivial, prédire que rien ne se passe est parfois difficile. Deux autres scores, la statistique des vraies capacités (*TSS, True Skill Statistics*) et le score de Heidke (S) prennent en compte la prévision des événements nuls, w , dans leurs définitions. Le TSS compare le nombre de prévisions correctes moins celles attribuées au hasard, avec la prévision parfaite :

$$TSS = POD - POFD = \frac{xw - yz}{(x + y)(z + w)} \quad (2.8)$$

Le score de Heidke s'écrit :

$$S = \frac{C - E}{N - E} = \frac{2(xw - yz)}{y^2 + z^2 + 2xw + (y + z)(x + w)} \quad (2.9)$$

où $C = x + y$ est le nombre de prévisions correctes, $N = x + y + z + w$ est le nombre total de prévisions, et

$$E = \frac{(x + z)(x + y) + (z + w)(y + w)}{x + y + z + w} \quad (2.10)$$

est le nombre de prévisions correctes dus au hasard. Le TSS et le S ont des valeurs comprises dans l'intervalle $[-1, +1]$.

Dans la Figure 2.5 est donnée une interprétation géométrique du tableau de contingence et des paramètres de compétence (Hays 1973; Doswell, Davis-Jones et al. 1990). La ligne pointillée représente un modèle parfait (pas d'événements non prévus, $y=0$, et pas de fausses alarmes, $z=0$). Les deux lignes continues représentent la régression des prévisions sur les observations,

$$\hat{F}(A) = b_{FA}(A - M_A) + M_F \quad (2.11)$$

et la régression des observations sur les prévisions,

$$\hat{A}(F) = b_{AF}(F - M_F) + M_A. \quad (2.12)$$

Les pentes des lignes de régression sont :

$$b_{FA} = \frac{xw - yz}{N^2} \frac{N^2}{(x + y)(z + w)} = TSS \quad (2.13)$$

et

$$b_{AF} = \frac{xw - yz}{N^2} \frac{N^2}{(x + z)(y + w)}. \quad (2.14)$$

Les valeurs moyennes sont données par :

$$M_A = \frac{x + y}{N} \quad (2.15)$$

et par

$$M_F = \frac{x + z}{N} \quad (2.16)$$

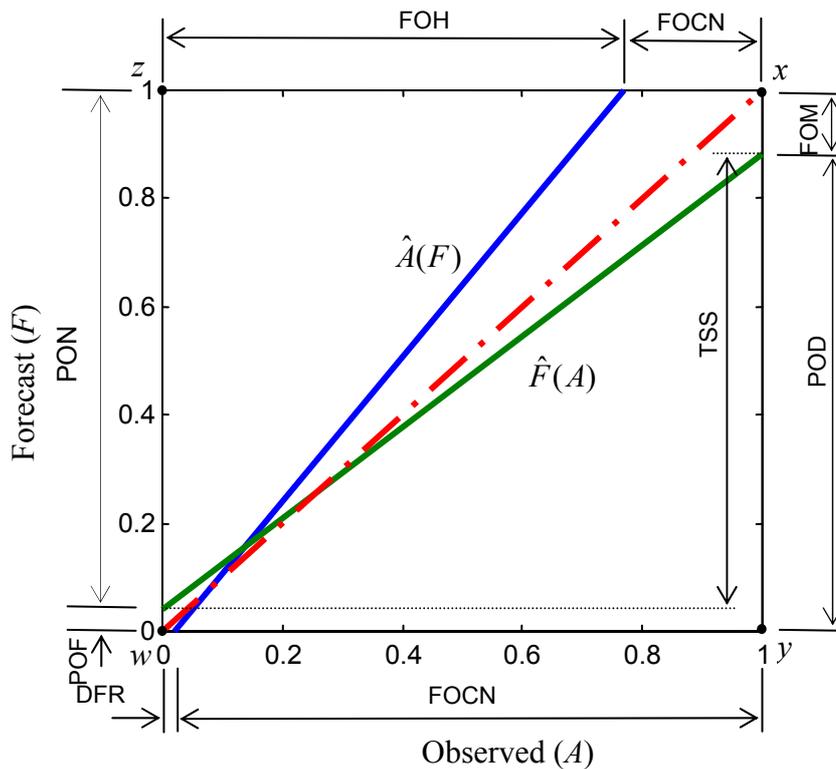


Figure 2.5 Interprétation géométrique du tableau de contingence et des paramètres de capacité de prédiction. L'abscisse représente les observations, A , et l'ordonnée représente les prévisions, F . Les points $w=(0, 0)$, $x=(1, 1)$, $z=(0, 1)$, et $y=(1, 0)$ correspondent, respectivement, à la prévision des non apparitions, la prévision correcte des événements, les fausses alarmes et les événements manqués.

Les intersections des lignes continues avec l'abscisse des observations A , et l'ordonnée F des prévisions, donnent les paramètres de compétence définis dans le Tableau 2.6. La statistique des vraies capacités (TSS , *True Skill Statistics*) peut être interprétée comme la pente de la droite de régression des prévisions sur les observations, $\hat{A}(F)$. La différence entre la ligne pointillée et les lignes continues donne une mesure de la performance du modèle.

Doswell *et al.* (1990) ont conclu que le score de Heidke, S , donne une meilleure mesure de la performance quand le tableau de contingence est dominé par des prévisions correctes de manque d'événements. Toutefois, un seul score ou un seul paramètre de capacité de prédiction ne peut caractériser complètement la performance de prédiction. Dans l'analyse de performance qui suit, on a utilisé les sommes marginales du tableau de contingence, POD , FOH et PON , et les scores de compétences TSS , S , et CSI .

2.1.1.3 Résultats et discussions

Les performances du modèle ont été testées pour trois situations : *a*) en utilisant les données météo mesurées pour la période d'apprentissage (c. à d. 1995, 1996, 1997 et 1998), *b*) en utilisant des valeurs météo prévues pour la période 1997 et 1998, années qui font partie de la période d'apprentissage, *c*) dans une situation réelle, en utilisant des données météo prévues pour une période qui ne fait pas partie de celle d'apprentissage. Quand le modèle prévoit l'appartenance à plusieurs classes, le résultat est considéré correct si une de classes est correcte.

Un ensemble de données est formé par les paramètres météorologiques (température maximale et minimale, vitesse et direction du vent pendant la matinée et dans l'après-midi) et la concentration maximale en ozone de la veille. Les journées sont divisées en sept classes autour du niveau de concentration de $140 \mu\text{g m}^{-3}$ (Tableau 2.7). Les différences entre les classes sont égales aux erreurs de mesure. Les jours ayant la température maximale inférieure à 22°C et les jours ayant une des données manquantes pour plus de trois heures ont été exclus de la base de données d'apprentissage.

Tableau 2.7 Les classes de concentration en ozone pour la prédiction d'un niveau de concentration égale à $140 \mu\text{g m}^{-3}$

Classe	Concentration en ozone [$\mu\text{g m}^{-3}$]
1.	<115
2. Très improbable	115 ... 125
3. Improbable	125 ... 135
4. Peu probable	135 ... 145
5. Probable	145 ... 155
6. Très probable	155 ... 165
7.	>165

Les résultats des tests sont présentés dans le Tableau 2.8 pour les situations dans lesquelles on n'accepte aucune erreur de classification et quand on admet une erreur d'une classe pour trois niveaux de confiance (1%, 2% et 10%). Les tableaux de contingence sont caractérisés par de grandes valeurs de prévisions correctes des événements nuls (c. à d. journées sans pollution), w , qui conduit à de grandes valeurs de la probabilité des événements nuls, PON . La représentativité des données d'apprentissage est importante pour obtenir un modèle correct. Les modèles statistiques donnent des résultats meilleurs quand les combinaisons des entrées ressemblent aux situations d'apprentissage. Dans le Tableau 2.8, on peut observer l'influence de la précision des prévisions météorologique à savoir une réduction de 20% des scores de performance TSS , S et CSI pour le test *b* par rapport au test *a*. La comparaison des tests *b* et *c* montre une réduction de 10% des scores de performance quand le modèle est mis en situation réelle. La probabilité de détection (POD) a des valeurs très élevées de 75 à 98% dans tous les tests, surtout quand une erreur d'une classe est acceptée. En comparant le score S dans le test *a* (Situation connue, prévision "parfaite") et le test *c* (situation nouvelle, prévision réelle), on observe qu'il diminue de 80% à environ 40% quand aucune différence de classe est acceptée

et de 90% à environ 80% quand une différence d'une classe est acceptée. Les valeurs élevées des paramètres et des scores de capacité peuvent être expliquées par la représentativité des données d'apprentissage, la frontière floue entre les groupes, et la capacité de l'analyse discriminante à séparer correctement les classes en fonction des variables explicatives.

Tableau 2.8 Performances de prévision : les éléments du tableau de contingence, les paramètres de compétence, les scores de compétence pour les années 1995 – 1998. Les trois tests sont : a) situation connue et prévision météorologique parfaite, quand le modèle est testé sur les mêmes données que celles d'apprentissage ; b) situation connue et prévision météorologique réelle, quand le modèle est testé pour les années d'apprentissage mais avec des prévisions météorologiques ; c) situation nouvelle et prévisions réelles, quand le modèle est testé dans une situation réelle.

		Tableau de contingence				Paramètres de compétence			Scores		
		x	y	z	w	POD	FOH	PON	TSS	S	CSI
a) Situation connue, prévision "parfaite"											
0 classe AD	$\alpha = 1\%$	37	5	11	254	0.88	0.77	0.95	0.83	0.79	0.69
	$\alpha = 5\%$	37	5	11	254	0.88	0.77	0.95	0.83	0.79	0.69
	$\alpha = 10\%$	37	5	11	254	0.88	0.77	0.95	0.83	0.79	0.69
		21	21	17	248	0.50	0.55	0.93	0.43	0.45	0.35
1 classe AD	$\alpha = 1\%$	41	1	5	260	0.97	0.89	0.98	0.95	0.92	0.87
	$\alpha = 5\%$	41	1	5	260	0.97	0.89	0.98	0.95	0.92	0.87
	$\alpha = 10\%$	41	1	5	260	0.97	0.89	0.98	0.95	0.92	0.87
		25	17	8	257	0.59	0.75	0.96	0.56	0.62	0.50
b) Situation connue, prévision réelle											
0 classe AD	$\alpha = 1\%$	10	4	7	150	0.71	0.58	0.95	0.66	0.61	0.47
	$\alpha = 5\%$	10	4	8	149	0.71	0.55	0.94	0.66	0.58	0.45
	$\alpha = 10\%$	11	3	8	149	0.78	0.57	0.94	0.73	0.63	0.50
		5	9	7	150	0.35	0.41	0.95	0.31	0.33	0.23
1 classe AD	$\alpha = 1\%$	41	1	5	260	0.97	0.89	0.98	0.95	0.92	0.87
	$\alpha = 5\%$	41	1	5	260	0.97	0.89	0.98	0.95	0.92	0.87
	$\alpha = 10\%$	41	1	5	260	0.97	0.89	0.98	0.95	0.92	0.87
		25	17	8	257	0.59	0.75	0.96	0.56	0.62	0.50
c) Situation nouvelle, prévision réelle											
0 classe AD	$\alpha = 1\%$	3	1	5	47	0.75	0.37	0.90	0.65	0.44	0.33
	$\alpha = 5\%$	3	1	6	46	0.75	0.33	0.88	0.63	0.40	0.30
	$\alpha = 10\%$	3	1	6	46	0.75	0.33	0.88	0.63	0.40	0.30
		1	3	3	49	0.25	0.25	0.94	0.19	0.19	0.14
1 classe AD	$\alpha = 1\%$	4	0	2	50	1.00	0.66	0.96	0.96	0.78	0.66
	$\alpha = 5\%$	4	0	2	50	1.00	0.66	0.96	0.96	0.78	0.66
	$\alpha = 10\%$	4	0	2	50	1.00	0.66	0.96	0.96	0.78	0.66
		1	3	2	50	0.25	0.33	0.96	0.21	0.23	0.16

La Figure 2.6 montre les résultats du modèle quand on utilise un intervalle de confiance pour la moyenne de 99% et une erreur acceptée de zéro ou d'une classe. Cette figure montre que les performances du modèle sont meilleures si on accepte une erreur plus grande (la colonne de droite) et diminuent quand les prévisions météorologiques sont utilisées à la place des valeurs mesurées.

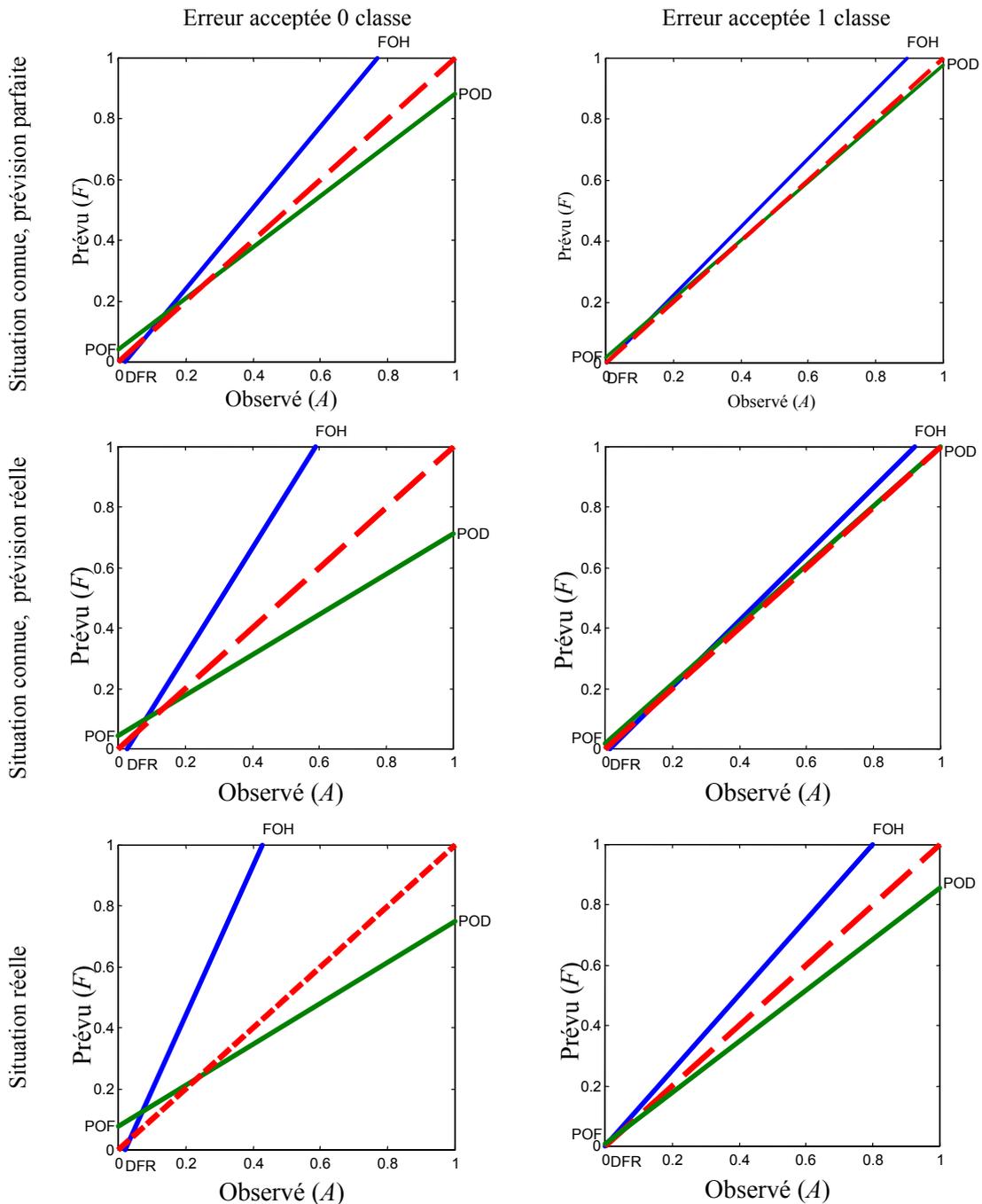


Figure 2.6 Représentation des performances de prévision de l'analyse discriminante quand l'intervalle de confiance de la moyenne est de 99%.

2.1.1.4 Conclusion

Cette étude a eu pour but d'obtenir un modèle de prévision du niveau d'ozone du lendemain pour informer les autorités locales des possibles dépassements d'une concentration égale à $140 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Les variables explicatives utilisées sont des valeurs météorologiques prévues pour le lendemain (la température maximale et minimale, la vitesse et la direction du vent pendant la matinée et l'après-midi) et la valeur maximale d'ozone de la journée.

L'analyse discriminante a été utilisée pour classer les journées en cinq niveaux de concentration autour de la valeur d'intérêt de $140 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Le domaine de variation pour une classe a été considéré approximativement égal à l'erreur de mesure acceptée de la concentration en ozone.

Pour estimer la sensibilité du modèle aux prévisions météo, des tests de validation ont été menés en trois situations : a) prévision parfaite, en utilisant les valeurs mesurées, b) prévisions réelles pour la période utilisée pour l'apprentissage, et c) situation réelle, quand des prévisions réelles ont été utilisées pour une période qui n'a pas servi pour l'apprentissage. Comme prévu, les performances du modèle sont meilleures dans le cas (a) par rapport au cas (c). Les indices de compétence diminuent d'environ 20% du test (a) au test (b) et de 10% du test (b) au test (c) mais ils restent élevés, spécialement quand une erreur de classification d'une classe est acceptée.

Dans les situations réelles, le modèle manque au plus un événement par an et donne deux fausses alarmes et la probabilité de détection (*POD*) est d'environ 98% avec un score de Heidke (*S*) d'environ 80%.

La classification en utilisant l'analyse discriminante donne deux indications importantes concernant les classes probables d'appartenance et le degré de confiance dans cette classification. La frontière floue entre les classes, introduite par l'intervalle de confiance de la moyenne, fait qu'un jour peut appartenir à plusieurs classes. La confiance dans la classification est donnée par la distance de Mahalanobis ; des distances grandes indiquent une confiance faible.

On doit souligner que l'acceptation d'imprécision de prévision augmente les performances du modèle. Comme un modèle ne peut pas être plus précis que les mesures à partir desquelles il a été conçu, des erreurs de prévision comparables avec les erreurs de mesure ne sont pas seulement acceptables mais incontournables.

Remerciements

Les travaux de recherche concernant la prédiction des pics d'ozone ont été soutenus par la Région Poitou-Charentes et par l'Association pour la qualité de l'air de la Région Poitou-Charentes, ATMO Poitou-Charentes. Météo France a fourni les données météorologiques mesurées et les prévisions.

2.1.2 Transfert d'ozone de l'extérieur à l'intérieur

Cette section est basée sur les articles :

C. Ghiaus, V. Iordache, F. Allard, P. Blondeau, Outdoor-indoor pollutant transfer, in C. Ghiaus, F. Allard (ed.), *Natural ventilation in the urban environment*, Earthscan, UK USA, ISBN 1-84407-129-4, pp. 124-135, 2005

C. Ghiaus, F. Allard, M. Santamouris, C. Georgakis and F. Nicol. Urban environment influence on natural ventilation potential, *Building and Environment*, 41(4), April 2006, pp. 395-406, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.003>, 2005

Le transfert d'ozone de l'extérieur à l'intérieur des bâtiments, caractérisé par le rapport entre la concentration à l'intérieur et celle à l'extérieur, I/O, peut être estimé en fonction de la concentration extérieure et de la perméabilité de la façade du bâtiment. Pour obtenir le modèle de transfert, on a effectué deux types d'expériences dans huit écoles de La Rochelle, France : la mesure simultanée de la concentration intérieure et extérieure en ozone et la mesure de la perméabilité de la façade. La variation du rapport I/O en fonction de la concentration extérieure et de la perméabilité a été décrite par un modèle neuro-flou qui indique la valeur moyenne du rapport I/O, l'écart type de la variation et le degré de confiance dans le résultat. Le modèle a été obtenu en utilisant les valeurs mesurées dans cinq écoles et a été testé en utilisant les valeurs mesurées dans trois autres écoles. Ce chapitre est basé sur des études menées en collaboration avec V. Iordache pendant ses études doctorales (Iordache 2003; Ghiaus, Iordache et al. 2005).

2.1.2.1 Introduction

La mauvaise qualité de l'air intérieur est responsable de 2.7% de la mortalité mondiale (Murray and Lopez 2002). La plus grande partie de ces problèmes de santé provient des émissions internes, notamment dans les pays en voie de développement. Mais, la pollution intérieure due aux polluants provenant de l'extérieur n'est pas négligeable, surtout dans les régions industrialisées et urbaine.

L'augmentation d'environ 1% par an de la concentration d'ozone attire l'attention (de Leeuw and de Paus 2001). Il est donc intéressant de connaître le rapport entre la valeur de la concentration à l'intérieur et celle à l'extérieur. Malgré le fait que l'on reconnaît le rôle de la ventilation dans la relation entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur, les modèles existants ne tiennent pas compte des facteurs importants, tels que la concentration extérieure et la perméabilité du bâtiment.

La relation entre la pollution intérieure et celle à l'extérieur peut être décrite sous la forme d'une fonction de transfert, qui est, en fait, le rapport entre la concentration à l'intérieur et celle à l'extérieur (I/O). Une relation empirique a été obtenue suite à une étude expérimentale. Les valeurs simultanées des variables explicatives potentielles ont été enregistrées et une base de données expérimentales a été obtenue. En utilisant cette base, le modèle neuro-flou a été construit. Ce modèle permet de prédire la concentration en ozone à l'intérieur quand on dispose de la valeur à l'extérieur et que l'on connaît le type de ventilation du bâtiment.

2.1.2.2 État de l'art

Le transfert de l'ozone de l'extérieur vers l'intérieur est un phénomène complexe qui n'est pas entièrement expliqué. Dans l'état actuel de l'art, les modèles prédominants sont empiriques. La plus grande partie des modèles donnent comme résultat le rapport entre la valeur de la concentration à l'intérieur et celle à l'extérieur, ce qui représente, en fait, une fonction de transfert avec une seule entrée. Il est évident que, le débit de ventilation est lui aussi une entrée du modèle. Le rapport entre la concentration à l'intérieur et celle à l'extérieur a été modélisé avec plusieurs degrés de complexité.

Les modèles les plus simples donnent une seule valeur du rapport I/O. Les mesures simultanées des concentrations intérieures et extérieures de Lee (1997) ont donné des valeurs égales à 0.88 et à 0.98 pour deux bâtiments différents. Malgré la similitude des valeurs trouvées par Lee, d'autres chercheurs ont trouvé des valeurs différentes. Chao (2001) a trouvé ce rapport égal à 0.72 et à 0.15 pour deux sites caractérisés par la même concentration extérieure. Les trois campagnes de mesure de Lepelley (1998) ont donné trois valeurs différentes (0.18, 0.32 et 0.24) pour le même bâtiment.

Ces modèles ont été obtenus pour des bâtiments spécifiques ; leurs valeurs ne sont valables que pour des bâtiments ayant les mêmes caractéristiques. Pour élargir la validité du modèle on doit prendre en compte les caractéristiques des bâtiments.

La comparaison de plusieurs résultats expérimentaux montre que la stratégie de ventilation influe sur le rapport entre les concentrations à l'intérieur et à l'extérieur (Saberski, Simena et al. 1973; Hales, Rollinson et al. 1974; Hayes 1991; Zhang and Liou 1994). Le transfert de polluant de l'extérieur vers l'intérieur est maximal quand les fenêtres sont ouvertes et minimal quand elles sont fermées. Il a également été démontré que le rapport I/O dépend également de la perméabilité des bâtiments (Romieu, Lugo et al. 1998; Salmon, Cass et al. 2000; Kirchner, Bailloit et al. 2001). Salmon et al. (2000) ont trouvé des rapports différents (0.17 et 0.42) pour deux bâtiments avec une ventilation naturelle. Cette différence est expliquée par la perméabilité différente des façades. La variation du rapport I/O en fonction de la fermeture des fenêtres,

$$CW_{I/O} = \frac{I/O_{ow} - I/O_{cw}}{I/O_{ow}} \quad (2.17)$$

est plus importante pour les façades étanches (Figure 2.7). Romieu et al. (1998) et Kirchner, Bailloit et al. (2001b) ont trouvé un rapport I/O de 0.36 et de 0.33, respectivement, tandis que Zhang et Liou (1994) et Zhang et Liou (1994) et Hayes (1991) ont trouvé un rapport I/O de 0.62 et de 0.65, respectivement. On peut donc en déduire que la variabilité du rapport I/O provient de la perméabilité du bâtiment qui influe sur le débit d'air à travers la façade. Quand les fenêtres sont ouvertes, la concentration à l'intérieur est sensiblement égale à celle de l'extérieure ; quand les fenêtres sont fermées, la concentration à l'intérieur diminue en fonction de la perméabilité de la façade. Les bâtiments peuvent être regroupés en trois classes: perméable, peu perméable et étanche, Figure 2.7 (Ghiaus, Iordache et al. 2005).

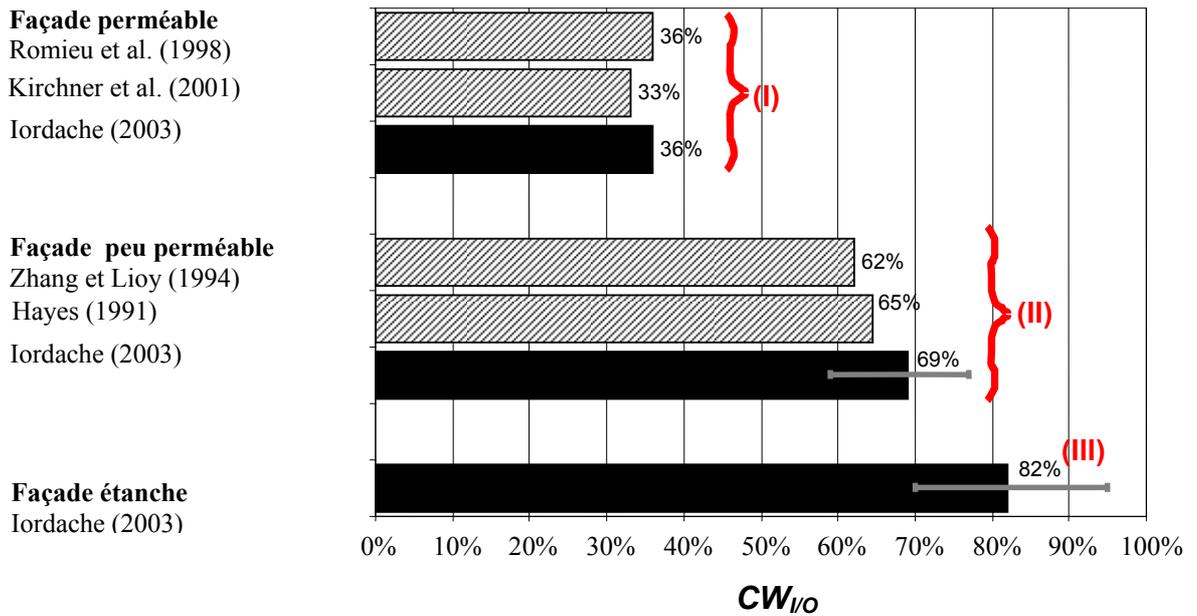


Figure 2.7 Valeurs du rapport I/O en fonction de l'étanchéité des fenêtres

Dans le cas de systèmes de ventilation avec recirculation de l'air, le pourcentage d'air neuf est un paramètre qui influence le rapport I/O. Saberski et al. (1973) ont trouvé que le rapport I/O est égal à 0.8 pour 100% d'air neuf et à 0.6 pour 70% d'air neuf. Davies et al. (1984) ont trouvé que le rapport I/O est égal à 0.8 pour 100% d'air neuf et à 0.4 pour le débit minimal d'air neuf.

La base de données de Hayes (1991) et les expériences de Weschler et al. (1989) suggèrent une relation exponentielle du rapport I/O avec les taux de renouvellement de l'air :

$$I/O = 1 - \exp(-a \times ach^b) \quad (2.18)$$

où $a = 0.28$ et $b = 0.7$ sont les paramètres du modèle (Figure 2.8 a).

En se basant sur des considérations théoriques, Ekberg (2000) a trouvé que le rapport I/O dépend également de la durée des pics de concentration extérieure. La dépendance en fonction de la concentration extérieure a également été mise en évidence par d'autres études. Les résultats de Weschler et al. (1989) pour un taux de renouvellement d'air égal à 4 sont similaires à ceux de Shair et Heitner (1974). Mais pour des taux de renouvellement de l'air très faibles, l'allure de la distribution est très différente (Figure 2.8 b).

La concentration à l'intérieur est aussi influencée par les sources internes. Quand la contribution des sources internes est élevée, le rapport I/O n'est plus représentatif du phénomène de transport de l'extérieur vers l'intérieur (Yocom 1982).

Les sources internes peuvent avoir un caractère permanent ou temporaire. Les phénomènes permanents sont représentés en majorité par l'absorption et la désorption des revêtements des parois. Le rapport entre la surface et le volume de la pièce (S/V) influe sur le rapport I/O (Cano-Ruiz, Kong et al. 1993; Nazaroff, Gadgil et al. 1993; Weschler 2000). Les expériences de Kirchner et al. (2001b) ont démontré une dépendance linéaire de I/O avec V/S. L'ozone

réagit plus avec le caoutchouc, les matériaux plastiques et le linoléum qu'avec le bois, le métal ou le verre (Barguil 1993; 1998; Klenø, Clausen et al. 2001). Romieu et al. (1998) ont trouvé que le rapport I/O diminue de 43% en présence de moquette.

Les phénomènes temporaires qui influent sur le rapport I/O sont généralement liés à l'activité humaine. Les photocopieuses et les imprimantes laser sont des sources d'ozone (Huré and Rousselin 1999; Wolkoff 1999); des valeurs de concentrations de 50 à 100 µg/m³ peuvent apparaître couramment quand ces équipements sont utilisés fréquemment (Koene 1992).

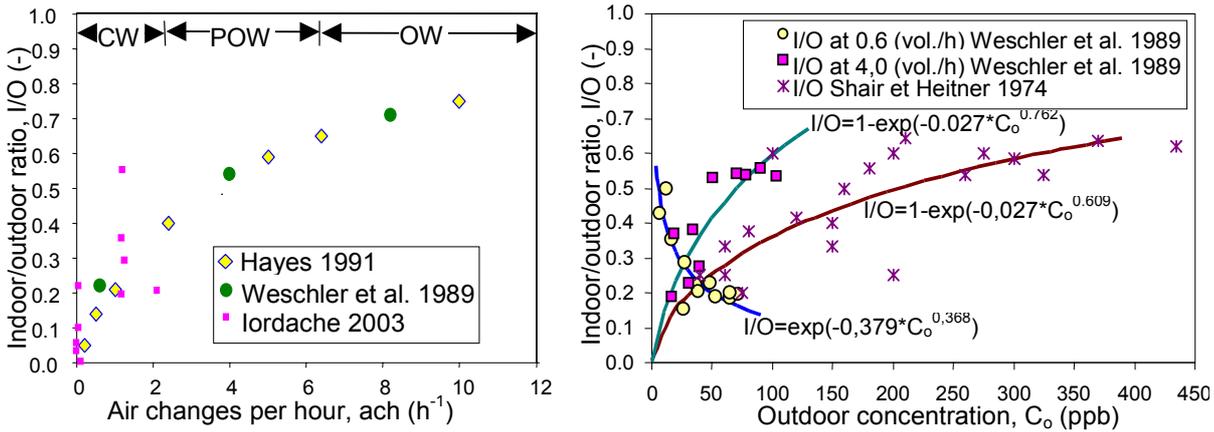


Figure 2.8 Variation du rapport des concentrations intérieures et extérieures de l'ozone en fonction : a) du taux de renouvellement d'air (CW fenêtres fermées, POW fenêtres partiellement ouvertes, OW fenêtres ouvertes); b) de la concentration extérieure.

2.1.2.3 Modélisation

Le rapport des concentrations intérieure et extérieure de l'ozone est une fonction non linéaire de la concentration extérieure, du débit d'air neuf et des sources internes. Le premier facteur peut être obtenu en utilisant des modèles de concentration extérieure de l'ozone (Bel, Bellanger et al. 1999; Ghattas 1999; Ghiaus, Allard et al. 2000). Le deuxième facteur, le débit d'air neuf, dépend des forces motrices de la ventilation naturelle (l'effet du vent et le tirage thermique) et de la perméabilité du bâtiment. La pression du vent peut être difficilement estimée, notamment en milieu urbain. Le tirage thermique dépend de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. La perméabilité de la façade est une caractéristique intrinsèque du bâtiment qui peut être mesurée (Ribéron 1991; ISO 1996; ASTM 1999). Le troisième facteur, les sources internes, dépend du "facteur humain"; leurs amplitude et occurrences sont aléatoires.

L'approche de la modélisation est statistique, parmi les variables explicatives elle utilise celles qui peuvent être mesurées. Le modèle a la forme :

$$I/O = f(C_o, Q_{4Pa}) \tag{2.19}$$

où C_o est la concentration extérieure et Q_{4Pa} est la perméabilité (débit d'air qui traverse la façade pour une différence de pression de 4 Pa). L'influence des variables qui ne sont pas

inclus dans le modèle exprimé par l'équation (2.19) se retrouve dans le résidu (l'erreur de modélisation).

La procédure de modélisation consiste dans la construction d'une base de données expérimentales et l'estimation des paramètres du modèle en minimisant l'erreur de prédiction.

2.1.2.3.1 Méthode expérimentale

Les bâtiments sélectionnés pour les expériences ont été huit écoles qui couvrent un large spectre de conditions environnementales, de types de façades et de systèmes de ventilation. On a choisi une salle de classe dans chacun des bâtiments ; leurs caractéristiques sont indiquées dans le Tableau 2.9. Pour le modèle décrit par l'équation (2.19), les variables explicatives (données d'entrées) sont la concentration en ozone, C_o , et la perméabilité du bâtiment, Q_{4Pa} . Pour déterminer le modèle (2.19), on a effectué deux types d'expériences : la mesure du rapport entre les concentrations intérieure et extérieure et la mesure de la perméabilité du bâtiment.

La mesure de la perméabilité donne une indication du débit d'infiltration à travers la façade quand les fenêtres sont fermées. La perméabilité de la façade a été mesurée pour deux situations : la première avec les fentes et les interstices de la façade rendu étanches, pour déterminer le débit d'air entre les pièces intérieures du bâtiment, et la seconde avec la façade normale. La différence entre les deux mesures donne la perméabilité de la façade.

Si l'écoulement est stationnaire et turbulent, la perte de charge entre deux plaques parallèles et infinies ou pour un écoulement perpendiculaire à un orifice dans une plaque s'écrit

$$\Delta p = 0.5 \rho Q^2 / (C_d A)^2 \quad (2.20)$$

où Δp est la différence de pression à travers l'orifice [Pa], ρ est la masse volumique de l'air [kg/m^3], Q le débit volumique d'air [m^3/s], C_d le coefficient de décharge, nombre sans dimension qui dépend de la géométrie de l'ouverture et du nombre de Reynolds, et A la surface de l'ouverture [m^2]. Les fentes et les interstices des bâtiments ont des formes variables et l'écoulement n'est généralement pas complètement turbulent. La perte de charge peut alors être calculée grâce à l'équation (2.20) où A est une aire équivalente et C_d est variable en fonction de la géométrie de l'orifice et de la différence de pression. On peut également utiliser une loi empirique :

$$Q = K \Delta p^n \quad (2.21)$$

où le coefficient d'écoulement K [$m^3/(s \cdot Pa^n)$] et l'exposant n sont déterminés expérimentalement et n'ont pas de signification physique. Pour un écoulement laminaire, $n = 1$, pour un écoulement turbulent, $n = 0.5$, et pour un écoulement transitoire, n prend des valeurs de 0.6 à 0.7 (Etheridge 1977; Kiel, Wilson et al. 1985; Gibert 1988).

Tableau 2.9 Caractéristiques des salles étudiées expérimentalement

ECOLES	Laleu 1	Lafond	Lavoisier	Descartes	Dor	Valin	St. Xandre	Esnandes
Usage de la pièce	atelier peinture	salle de classe maternelle grande section	salle de classe CM2	salle de classe CP	salle non-utilisée	salle de classe	salle de classe	salle de classe
Niveau	RDC	RDC	1 ^{er} étage	RDC	RDC	RDC	RDC	RDC
Occupation	pas de schéma d'occupation prédéfini	20 enfants horaires types	25 enfants horaires types	29 enfants horaires types	non occupée	horaires types	horaires types	horaires types
Volume	104 m ³	180 m ³	163 m ³	177 m ³	54.6 m ³	297.4 m ³	206.2 m ³	195.7 m ³
Surface au sol	30 m ²	46 m ²	54 m ²	55 m ²	14 m ²	70 m ²	62.5 m ²	60.2 m ²
Surface de la façade	15 m ²	28 m ²	24 m ²	28 m ²	19.5 m ²	42.1 m ²	29 m ²	28 m ²
Surface vitrée façade	4 m ²	12 m ²	12 m ²	12 m ²	6.5 m ²	11.25 m ²	14 m ²	13.5 m ²
Orientation de la façade	sud-ouest	sud	nord - ouest	sud-est	sud	sud	nord - ouest	sud
Revêtement intérieur	<i>sol</i> : linoléum <i>murs</i> : peinture, moquette <i>plafond</i> : dalles acoustiques	<i>sol</i> : carrelage <i>murs</i> : peinture <i>plafond</i> : dalles acoustiques	<i>sol</i> : linoléum <i>murs</i> : peinture <i>plafond</i> : peinture	<i>sol</i> : linoléum <i>murs</i> : peinture et moquette <i>plafond</i> : dalle acoustiques	<i>sol</i> : parquet <i>murs</i> : peinture, moquette <i>plafond</i> : peinture	<i>sol</i> : carrelage <i>murs</i> : peinture <i>plafond</i> : dalles acoustiques	<i>sol</i> : carrelage <i>murs</i> : peinture <i>plafond</i> : peinture	<i>sol</i> : linoléum <i>murs</i> : peinture, moquette <i>plafond</i> : peinture
Tableau à craies	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui
Type de ventilation	ouverture des fenêtres	ouverture des fenêtres	ouverture des fenêtres	ouverture des fenêtres	ouverture des fenêtres	ouverture des fenêtres	naturelle et mécanique	mécanique
Type de fenêtres	battantes PVC; état neuf	battantes PVC; état neuf	battantes bois; état très dégradé (jours apparents)	battantes métalliques; état très dégradé	battantes PVC; état neuf	battantes bois; état neuf	battantes PVC; état neuf	battantes alum. axe horizontale au milieu; état neuf
Emplacement	zone industrielle	hors centre ville	hors centre ville	bord de la mer	centre ville	centre ville	hors ville	hors ville
Longueur joints	8.46 m	38.01 m	17.60 m	44.40 m	10.35 m	27.60 m	34.00 m	22.00 m

Pour la mesure de la perméabilité on a utilisé la méthode de la "pressurisation statique" (ASTM 1999). Dans un premier temps, on a étanchéifié tous les passages de l'air (fentes de ventilation, prises électriques, etc.). En suite, on a pressurisé la pièce. On a mesuré le débit d'air introduit pour des différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur de 3 à 60 Pa. La loi de perméabilité est représentée par l'équation (2.21) avec les paramètres K et n obtenus par régression à partir des valeurs mesurées de $(\Delta p, Q)$.

Pour des situations réelles, le sens de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur peut s'inverser. Le sens de la différence de pression engendre deux situations différentes pour les fenêtres fermées : devenir plus étanches, quand les fenêtres ont la tendance de se fermer due à la différence de pression, ou devenir plus perméable, quand les fenêtres ont la tendance de s'ouvrir. Ce comportement différent des fenêtres joue un rôle important dans la perméabilité de la façade. Il est alors nécessaire de déterminer deux lois de perméabilité.

La pressurisation et la dépressurisation ont été réalisées avec un ventilateur de 900 m³/h soufflant dans une gaine traversant une fausse porte. Le débit d'air qui traverse la façade de la salle de classe est égal au débit mesuré dans la gaine. Pour la mesure du débit, on a mesuré la vitesse au centre de la gaine et on a utilisé une relation entre la vitesse au centre de la gaine et le débit mesuré par un système de gaz traceur. La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur produite par le ventilateur a été mesurée en utilisant un micro- manomètre.

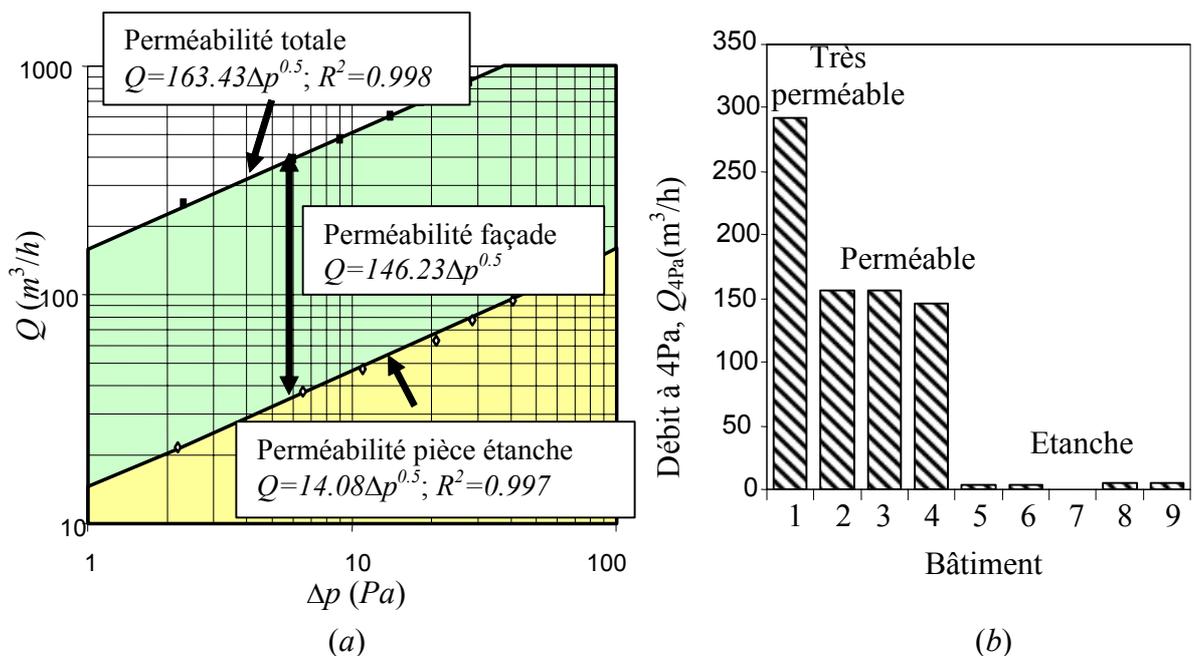


Figure 2.9 Perméabilité des écoles étudiées : a) Exemple de loi de perméabilité dans la situation de dépressurisation. b) Classification des écoles en fonction de la perméabilité.

Quatre types d'expériences ont été menés pour obtenir les lois de perméabilité :

1. salle de classe pressurisée et étanche
2. salle de classe dépressurisée et étanche
3. salle de classe dépressurisée et non-étanche
4. salle de classe pressurisée et non-étanche

Chaque série de mesures est composé d'au moins six couples (débit, écart de pression) pour une variation de la différence de pression de 3 à 60 Pa. Chaque mesure représente la valeur moyenne sur 3 minutes de mesures prises toutes les 5 secondes. Les valeurs mesurées sont

considérées valides si la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s et si l'écart type de la différence de pression est inférieur à 2 Pa. La perméabilité est le débit qui traverse la façade sous une différence de pression (4 Pa, pour des bâtiments réels et 50 Pa dans des conditions de laboratoire), divisée par l'unité de surface ou de longueur (Litvak 2000). La loi de perméabilité est obtenue en utilisant la régression linéaire pour la variation de Q en fonction de Δp . Les deux lois de perméabilité, en pressurisation et en dépressurisation, sont obtenues en faisant la différence entre les lois obtenues en situation normale et étanche (Figure 2.9 a). Les bâtiments peuvent être classés en fonction de la perméabilité en trois catégories : très perméables, perméables et étanches (Figure 2.9 b).

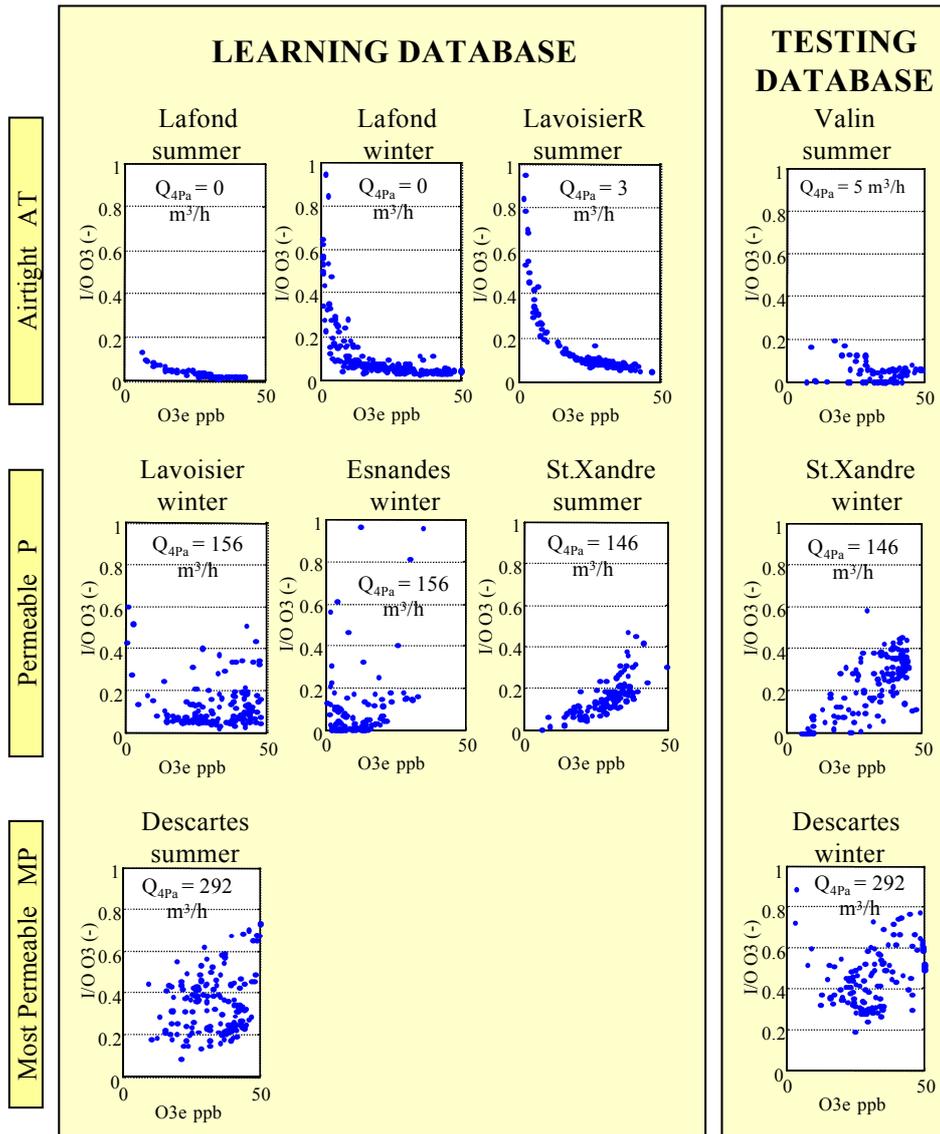


Figure 2.10 Variation du rapport I/O en fonction de la concentration extérieure et la perméabilité du bâtiment

2.1.2.3.2 Modélisation

Le rapport I/O entre la concentration en ozone à l'intérieur et celle à l'extérieur est une fonction non-linéaire de deux variables : la concentration extérieure en ozone et la perméabilité de la façade. Les phénomènes de transfert de l'ozone de l'extérieur à l'intérieur sont continus en valeurs et en dérivées. Ainsi, le modèle doit être, lui aussi, continu. Si on représentait le modèle par une série de modèles locaux obtenus par régression multiple, on aurait alors deux problèmes (Figure 2.11 a) : a) la continuité ne pourrait être respectée parce que les plans représentés par des modèles linéaires ne peuvent pas avoir tous les bords en commun, et b) le modèle ne pourrait pas être obtenu pour les zones où il manque des données car la régression ne peut pas être calculée. Pour éviter ces problèmes, on a utilisé la logique floue comme technique de modélisation. Dans cette approche, la transition d'un modèle local à un autre est faite d'une manière floue. En plus, on peut obtenir le modèle même si la base de données est incomplète (Figure 2.11 b). Les modèles flous qui font l'interpolation des modèles locaux linéaires sont du type Sugeno (Takagi and Sugeno 1985) :

$$\text{Si } x \text{ est } A \text{ et } y \text{ est } B \text{ alors } z = f(x, y) \quad (2.22)$$

où x et y sont les variables d'entrées et z la variable de sortie. L'expression floue :

$$\text{Si } x \text{ est } A \text{ et } y \text{ est } B \quad (2.23)$$

est l'antécédent de la règle. Le résultat de l'évaluation de l'antécédent donne le poids relatif du modèle représenté dans la conséquence de la règle,

$$z = f(x, y) \quad (2.24)$$

pour le domaine (A, B) de variation des variables x et y . Si la fonction $f(x, y)$ est linéaire,

$$f(x, y) = ax + by + c \quad (2.25)$$

alors, l'inférence floue de type Sugeno réalise une interpolation entre les modèles locaux linéaires. Le problème de la modélisation floue est :

- définir les ensembles linguistiques A et B de l'antécédent de la règle et trouver le degré d'appartenance des variables x et y aux ensembles linguistiques A et B ;
- trouver les paramètres a , b et c du modèle linéaire de la conséquence de la règle floue.

La méthodologie de modélisation consiste dans le calcul initial des centres des modèles locaux, dans la détermination des paramètres des modèles locaux, dans l'interpolation entre les modèles pour former la fonction pour tout le domaine, et dans l'optimisation des valeurs des paramètres pour minimiser l'erreur de prédiction. Cette procédure constitue l'étape d'apprentissage du modèle.

Le premier pas consiste à grouper les points dans l'espace des entrées-sorties en utilisant la méthode de "groupement par soustraction" (*subtractive clustering*) (Jang, Sun et al. 1997). La méthode consiste à trouver le centre, c , et l'écart type, σ , de la projection de la fonction de densité de distribution de type Gaussienne sur les axes des variables d'entrées.

Le deuxième pas consiste à déterminer les coefficients du modèle linéaire local qui correspond à chaque groupe déterminé précédemment en utilisant la régression multiple. Cela

revient à trouver les coefficients a , b et c de chaque modèle linéaire pour le domaine déterminé par le groupe de centre c et d'écart type σ .

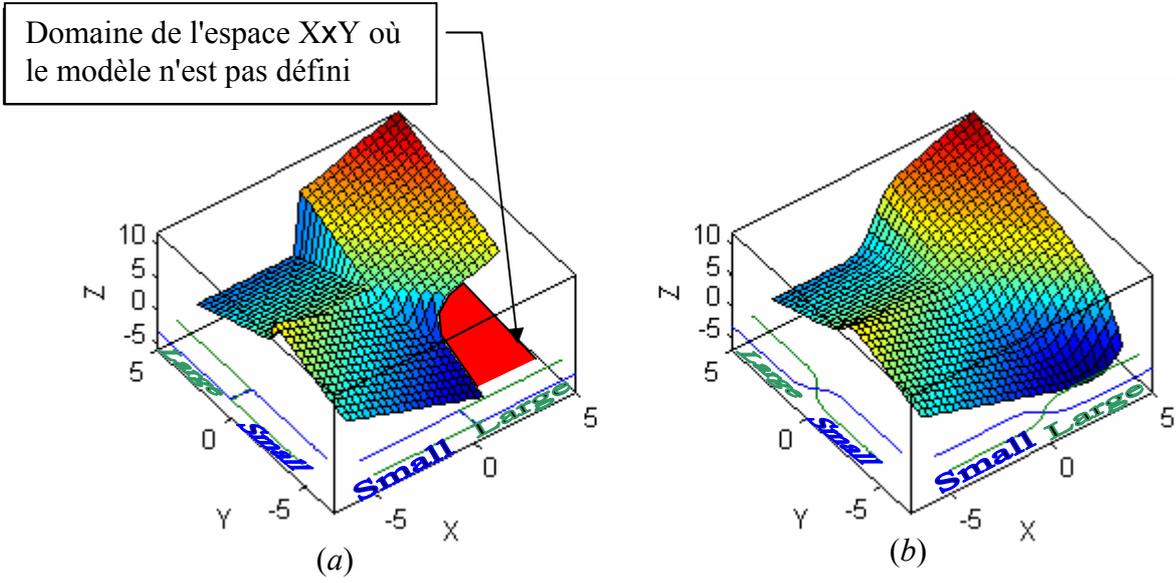


Figure 2.11 Deux types de modèles multivariables : a) régression multiple, b) modèle flou

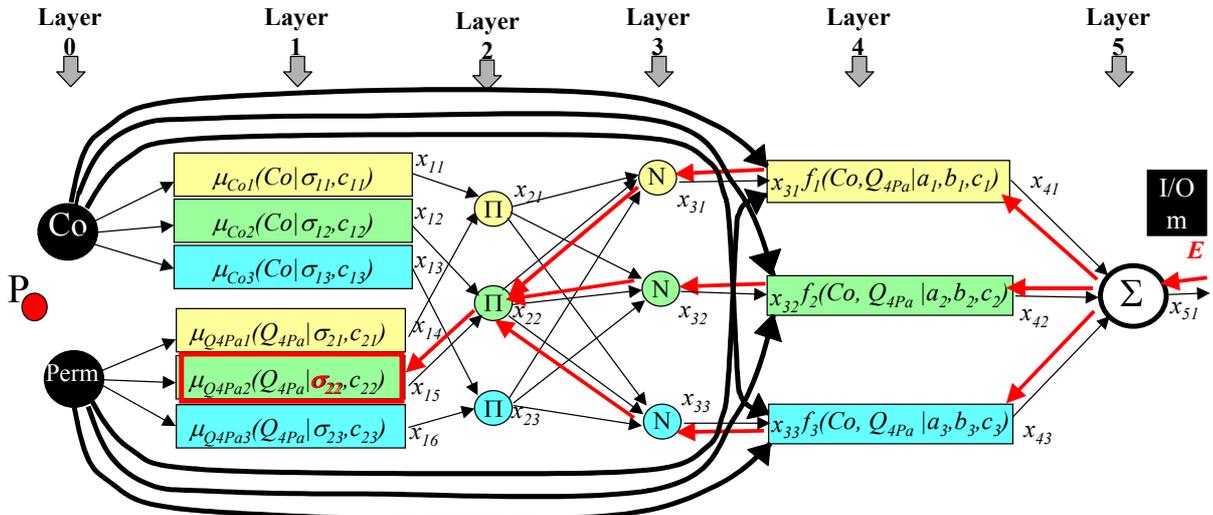


Figure 2.12 Modèle flou représenté sous la forme d'un réseau de neurones

La troisième étape est d'interpoler entre les modèles locaux en utilisant le modèle flou de type Sugeno. Ce modèle est représenté par des règles floues ayant pour antécédent de la règle les groupes décrits par leurs centres, c , et leurs écarts type, σ , et pour conséquence de la règle le modèle linéaire obtenu par régression. Chaque point, P , de coordonnées la concentration extérieure et la perméabilité, (C_o, Q_{4Pa}) , appartient simultanément à plusieurs groupes avec des différents degrés d'appartenance au groupe de la concentration extérieure :

$$\mu_{C_o} = \exp(-\|C_o - c_{C_o}\|^2 / (\sigma_{C_o}^2)) \quad (2.26)$$

et au groupe de la perméabilité :

$$\mu_{Q_{4Pa}} = \exp(-\|Q_{4Pa} - c_{Q_{4Pa}}\|^2 / (\sigma_{Q_{4Pa}}^2)) \quad (2.27)$$

Ces fonctions d'appartenance représentent la première couche d'un réseau de neurones (Figure 2.12). Les valeurs d'appartenance sont, ensuite, multipliées dans la deuxième couche. La valeur donnée par le modèle pour le point P de coordonnées (C_o, Q_{4Pa}) est la somme pondérée entre les valeurs des conséquents de chaque règle ; la troisième couche calcule les poids, la quatrième et la cinquième couche donnent la valeur finale.

Le but d'écrire le modèle flou sous la forme d'un réseau de neurones est de pouvoir utiliser la méthode de propagation inverse (*back propagation*) pour trouver les valeurs optimales des groupes et des modèles linéaires qui minimisent l'erreur de prédiction. On estime la dérivée ordonnée de l'erreur en fonction de chaque paramètre (Jang, Sun et al. 1997) :

$$\epsilon_{l,i} = \frac{\partial^+ E_P}{\partial x_{l,i}} \quad (2.28)$$

où $\epsilon_{l,i}$ est l'erreur introduite par le coefficient i de la fonction Gaussienne dans la couche j , E_P est l'erreur de sortie calculée pour le point P et $x_{l,i}$ est un des deux paramètres de la Gaussienne i . La nouvelle valeur du coefficient, i , est obtenue en ajoutant à la valeur ancienne le produit entre la dérivée ordonnée et le pas de correction. Après la modification des paramètres des groupes (c et σ), de nouveaux paramètres sont calculés pour les modèles linéaires locaux. Cette procédure itérative est répétée jusqu'à ce que le gradient de l'amélioration de l'erreur soit suffisamment faible.

En plus de la prédiction de la valeur du rapport I/O, deux autres indications sont données : la précision du résultat et l'indice de confiance dans le résultat et la précision. La précision est indiquée par la variance des valeurs mesurées autour de la valeur prédite. L'intervalle de l'erreur est représenté par la distance du centre du groupe à la limite de l'intervalle de 95 % de confiance. Cette distance est égale à 1.96 fois l'écart type (Wonnacott and Wonnacott 1990; Spiegel 1996). L'écart type est défini par :

$$\begin{aligned} \sigma_{(I/E - \overline{I/E})} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i \left[(I/E - \overline{I/E})^2 \right]} \cong \sqrt{\sum_i \left[\frac{1}{n} (I/E - \overline{I/E})^2 \right]} \\ \sigma_{(I/E - \overline{I/E})} &= \sqrt{\sum_i \left[\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n 1 \right)} (I/E - \overline{I/E})^2 \right]} \end{aligned} \quad (2.29)$$

La définition (2.29) s'applique pour des domaines clairement définis. On a modifié cette expression pour que elle soit adaptée aux domaines flous, en considérant les poids égaux à la valeur d'appartenance au groupe F_j :

$$\sigma_{Fj(I/E-\overline{I/E})} \cong \sqrt{\sum_i \left[\frac{\mu_{i,j}}{\sum_j (\mu_{i,j})} (I/E_i - \overline{I/E_j})^2 \right]} \quad (2.30)$$

La deuxième indication du modèle est donnée par l'indice de confiance dans le résultat. L'indice de confiance est faible dans les domaines de l'espace où il y a peu de données mesurées. L'indice de crédibilité est défini par :

$$CR_i = \frac{\mu_i}{\max_i (\mu_i)} = \frac{\sum_j \mu_{i,j}}{\max_i \left(\sum_j \mu_{i,j} \right)} = \frac{\sum_j (\mu_{iCe_j} \cdot \mu_{iPerm_j})}{\max_i \left(\sum_j (\mu_{iCe_j} \cdot \mu_{iPerm_j}) \right)} \quad (2.31)$$

où i et j sont les indices du point et du groupe, respectivement. Cet indice de crédibilité est ensuite normalisé en divisant sa valeur par la plus grande valeur obtenue dans tout le domaine des entrées.

2.1.2.3.3 Modèle obtenu

Les données utilisées pour trouver les paramètres du modèle (ou pour "l'apprentissage") sont groupées dans l'espace (Co , Q_{4Pa} , I/O) en fonction des trois niveaux de perméabilité de la façade : très perméable ($Q_{4Pa} \approx 300 \text{ m}^3/\text{h}$), perméable ($Q_{4Pa} \approx 50 \text{ m}^3/\text{h}$) et étanche ($Q_{4Pa} \approx 0 \text{ m}^3/\text{h}$). Le modèle représente une surface dans cet espace qui passe entre les points mesurés. La Figure 2.13 montre la forme caractéristique du modèle relevée par les données de la Figure 2.10 : le rapport I/O diminue avec l'augmentation de la concentration extérieure pour les façades étanches et augmente avec la concentration extérieure pour les façades perméables.

En utilisant la procédure de "groupement par soustraction" (*subtractive clustering*), on a trouvé deux groupes (Figure 2.14) dont les paramètres sont donnés dans le Tableau 2.10. Le premier groupe est localisé dans le domaine des façades étanches, avec le centre $c_{Q_{4Pa}} \approx 5 \text{ m}^3/\text{h}$, et dans le domaine des concentrations moyennes, avec le centre $c_{Co} \approx 28 \text{ ppb}$. Le second groupe est localisé dans le domaine des façades très perméables ($c_{Q_{4Pa}} \approx 292 \text{ m}^3/\text{h}$) et des valeurs moyennes de la concentration extérieure ($c_{Co} \approx 36 \text{ ppb}$).

La surface du modèle peut être représentée sous la forme de courbes de niveau (Figure 2.15 a). On note que les valeurs extrêmes correspondent, d'une part, aux façades étanches et aux valeurs faibles de la concentration extérieure et, d'autre part, aux façades très perméables et aux valeurs de la concentration extérieure élevées. Le deuxième diagramme montre la variance des points dans la base des données mesurées (Figure 2.15 b). La variance est plus élevée pour les bâtiments perméables. Le troisième diagramme montre la crédibilité de la prédiction. La crédibilité est plus élevée quand il y a plus de données mesurées, c.-à-d. à proximité des centres des deux groupes. La plus haute crédibilité ($CR > 0.5$) correspond aux valeurs moyennes de concentration en ozone ; la crédibilité est plus faible pour les valeurs extrêmes de concentration en ozone.

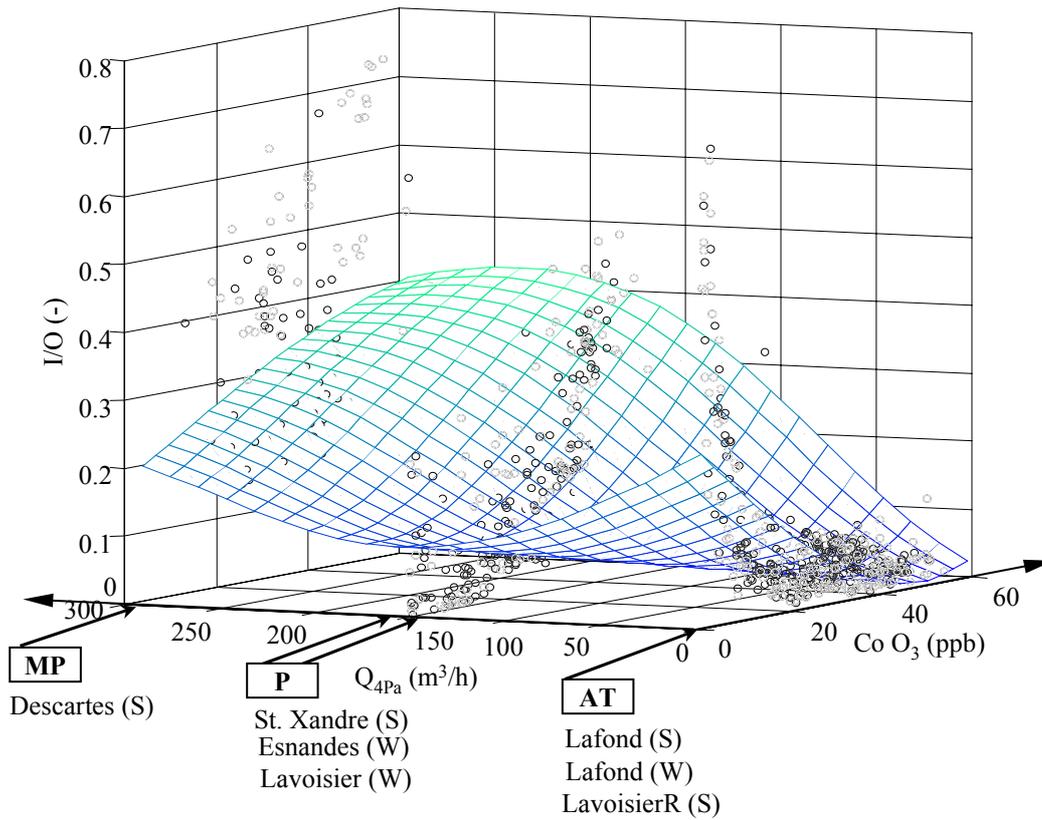


Figure 2.13 Modèle de prédiction du rapport I/O de concentration en ozone

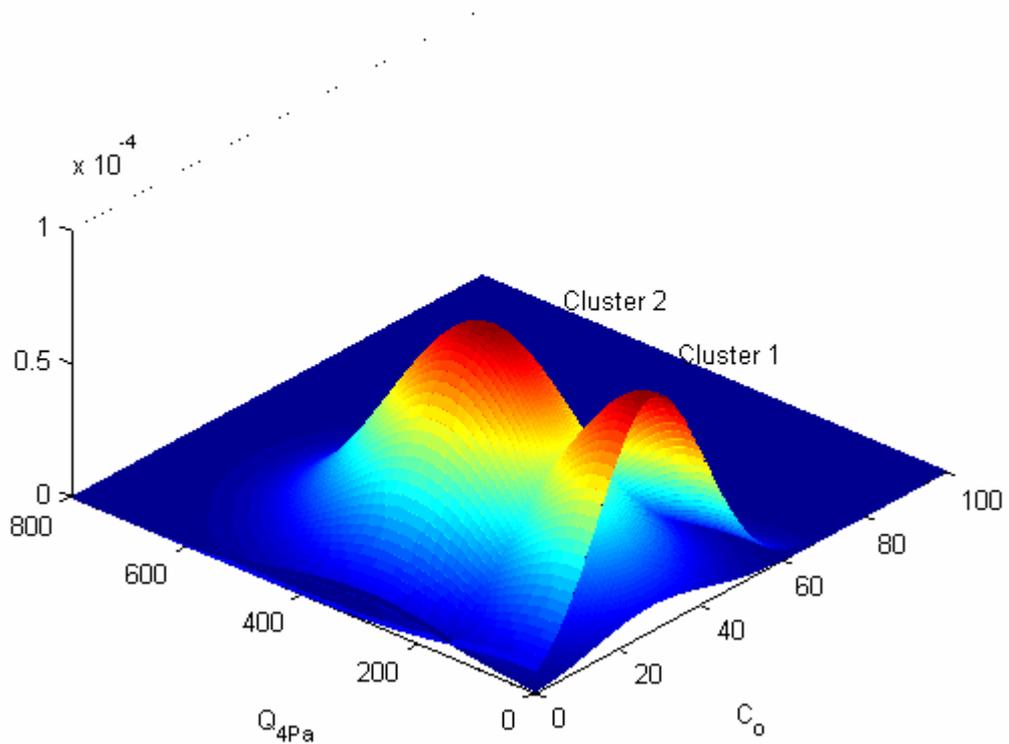
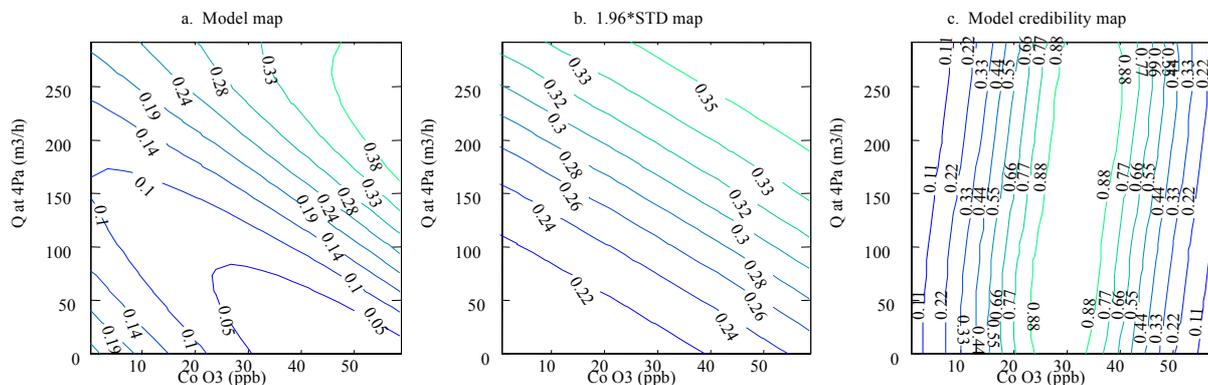


Figure 2.14 Deux groupes qui forment les deux règles floues

Tableau 2.10 Paramètres du modèle

Groupe	Antécédent				Conséquent		
	C_o Gaussienne		Q_{4Pa} Gaussienne		Modèle : $I/E = aC_o + bQ_{4Pa} + c$		
	σ_{C_o} (ppb)	c_{C_o} (ppb)	$\sigma_{Q_{4Pa}}$ (m ³ /h)	$c_{Q_{4Pa}}$ (m ³ /h)	a	b	c
1	13.0480	28.0134	139.3874	5.0176	-0.0088	-0.0018	0.2440
2	13.1499	35.5182	139.5093	291.9422	0.0003	-0.0013	0.7990

Figure 2.15 Diagrammes du modèle : a) rapport I/O; b) précision, $1.96\sigma_{I/O}$ c) crédibilité

2.1.2.4 Validation du modèle

Le modèle donne le rapport I/O entre la concentration en ozone à l'intérieur et à l'extérieur quand les fenêtres sont fermées. Quand les fenêtres sont ouvertes, on peut considérer que ce rapport est égal à l'unité. Le modèle a été testé en utilisant les valeurs mesurées pour trois écoles ayant des perméabilités différentes, écoles qui n'ont pas été utilisées dans la phase d'apprentissage du modèle.

La concentration intérieure obtenue en multipliant la concentration extérieure par le rapport I/O est comparée avec la valeur mesurée. Les résultats obtenus pour une semaine sont donnés à la Figure 2.16. Pour chaque école on a tracé deux graphiques : le premier montre la variation temporelle des concentrations extérieure et intérieure (mesurées et prédites) ; le deuxième graphique indique la précision du modèle, la crédibilité et l'erreur de prédiction. Quand l'erreur de prédiction est plus petite que la précision, on considère que le résultat du modèle est correct.

La Figure 2.16 montre les résultats obtenus pour une école avec une façade étanche. La concentration en ozone à l'intérieur est très faible par rapport en comparaison avec la concentration extérieure. Pour 95 % du temps, l'erreur de prédiction est plus petite que la précision. La seule erreur du modèle est obtenue pour la journée du 02/05/2001 quand la valeur de la concentration à l'intérieur est trop élevée, si on tient compte de la valeur de la concentration à l'extérieur. L'erreur de prédiction est en général inférieure à 3 ppb, avec une valeur maximale de 5 ppb enregistrée la journée du 02/05/2001 à environ 10h. En général, l'indice de crédibilité a des valeurs supérieures à 0.5. Les périodes pour lesquelles l'indice de

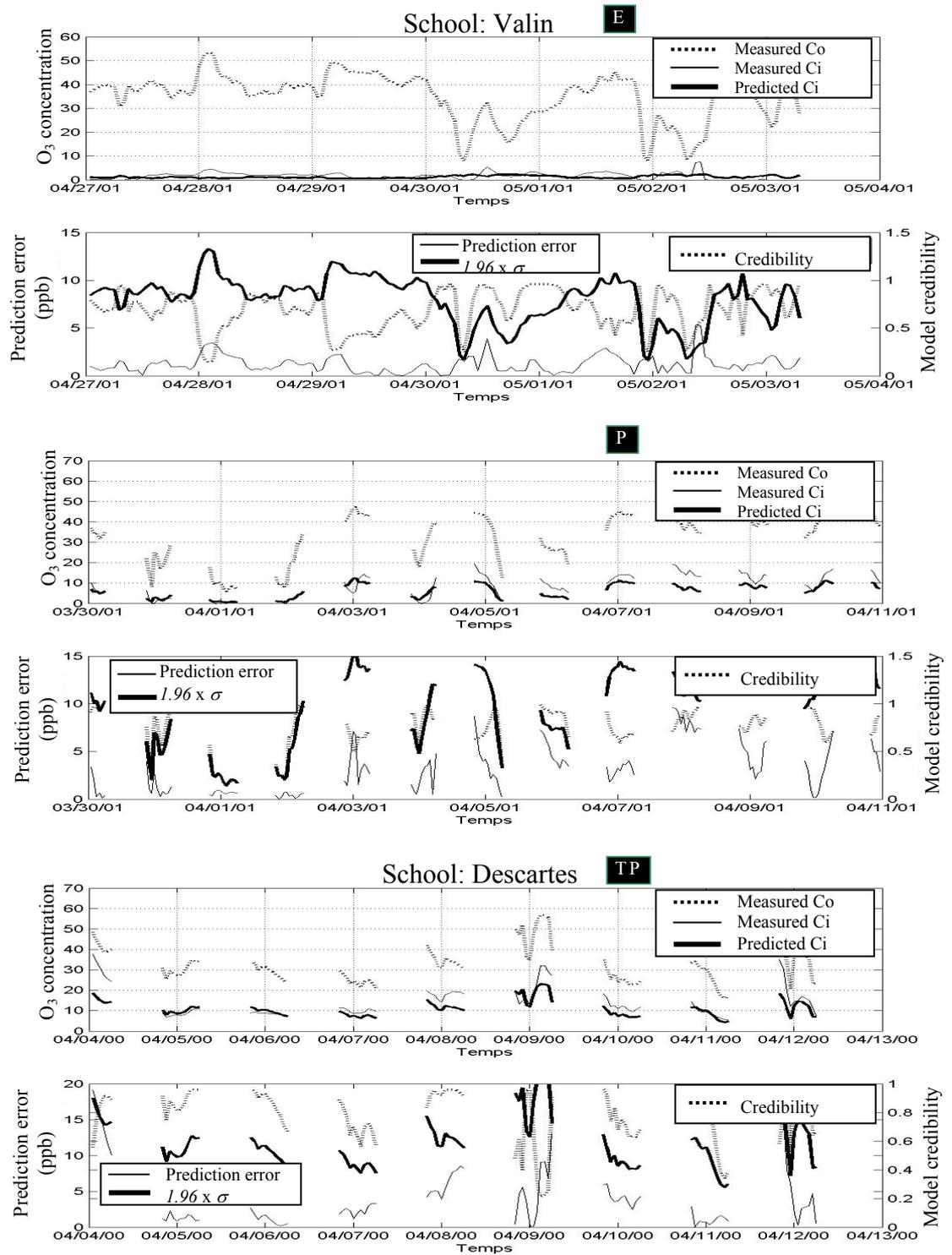


Figure 2.16 Prédiction de la concentration en ozone pour trois écoles

crédibilité a des valeurs inférieures à 0.5 correspondent aux valeurs extrêmes de la concentration en ozone.

La deuxième école a une façade perméable ce qui fait que le rapport I/O est plus élevé que dans le cas précédent. L'erreur de prédiction de la concentration intérieure est en général inférieure à 7 ppb, sa valeur maximale étant de 10 ppb pour la journée du 08/04/2001.

La troisième école a une façade très perméable ce qui fait que le rapport I/O est encore plus élevé. L'erreur de prédiction de la concentration intérieure est, en général, inférieure à 7 ppb, avec une valeur maximale de 10 ppb obtenue pour la journée du 07/04/2001. La précision du modèle est, en général, de 10 ppb, avec une valeur maximale de 15 ppb. Généralement, l'indice de confiance est supérieur à 0.5, avec des valeurs plus faibles quand la concentration extérieure est inférieure à 15 ppb.

2.1.2.5 Conclusion

La physique du phénomène de transfert de l'ozone à travers une enveloppe de bâtiment et son étude expérimentale démontrent que le rapport entre la concentration d'ozone à l'intérieur et à l'extérieur dépend de la perméabilité du bâtiment et de la concentration extérieure. Le niveau de concentration à l'intérieur dépend également des sources internes, mais leur contribution est difficile à prédire.

La complexité des phénomènes de transfert à travers l'enveloppe et des réactions chimiques rend impossible la modélisation basée sur des lois physico-chimiques. Pour développer un modèle exploitable dans l'état actuel des connaissances, on a utilisé une approche statistique. On a mesuré la perméabilité et les valeurs des concentrations intérieure et extérieure de huit écoles de différentes typologies et on a trouvé les paramètres d'un modèle neuro-flou, du rapport I/O en fonction de la perméabilité et de la concentration extérieure.

L'étude expérimentale a démontré que la concentration d'ozone à l'intérieur est presque égale à celle de l'extérieur quand les fenêtres sont ouvertes. Quand les fenêtres sont fermées, la variation du rapport I/O avec la concentration extérieure est une fonction non-linéaire avec des allures différentes en fonction de la perméabilité de la façade. Le modèle neuro-flou peut approcher une fonction non-linéaire continue de plusieurs variables. Le rapport I/O, représenté par une surface dans l'espace des entrée-sortie, a une valeur maximale de 0.4 pour une concentration extérieure élevée et une façade très perméable. La valeur prédite du rapport I/O est accompagnée par la précision de la prédiction et l'indice de confiance de celle-ci. Le résultat du modèle consiste en trois diagrammes qui indiquent la valeur du rapport I/O, la précision et l'indice de crédibilité. Ce modèle a été obtenu en utilisant les valeurs mesurées pour cinq écoles et a été validé en utilisant les valeurs mesurées pour trois autres écoles. Le modèle a donné des résultats corrects, plus précis et avec un indice de confiance plus élevé pour les domaines de concentration extérieure pour lesquelles on dispose du maximum de valeurs mesurées. Le domaine de validité du modèle est restreint aux concentrations extérieures inférieures à 60 ppb, valeur qui correspond à la valeur maximale de la concentration extérieure en ozone pendant les campagnes de mesures. Le domaine de validité

est indiqué également par l'indice de confiance qui a des valeurs faibles pour des concentrations comprises entre 10 ppb et 50 ppb. Le domaine de validité peut être entendu en ajoutant des valeurs mesurées quand la concentration extérieure en ozone est plus élevée. Une autre possibilité pour améliorer le modèle est de trouver d'autres variables explicatives.

2.1.2.6 Remerciements

Cette section résume les résultats d'un projet de recherche financé par Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) dans le cadre du programme national PRIMEQUAL pour la qualité de l'air à l'échelle locale. Les expériences ont été réalisées avec le soutien de l'Association Régionale pour la Qualité de l'Air dans la Région Poitou-Charentes (ATMO Poitou-Charentes) et le soutien de la ville de La Rochelle.

2.1.3 Références

- ASTM, E.-. (1999). Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Barguil, S. (1993). Contribution à l'évaluation de l'exposition du citoyen au polluant atmosphérique. Paris, René Descartes: 247.
- Bel, L., L. Bellanger, V. Bonneau, G. Ciuperca, D. D. Castelle, C. Deniau, B. Ghattas, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi and R. Tamassone (1999). Eléments de comparaison de prévisions statistiques des pics d'ozone. Paris, Société de statistique de France.
- Cano-Ruiz, J. A., D. Kong, R. B. Balas and W. W. Nazaroff (1993). "Removal of reactive gases at indoor surfaces: combining mass transport and surfaces kinetics." *Atmospheric Environment* **27**(13): 135-152.
- Chao, C. Y. H. (2001). "Comparison between indoor and outdoor air contaminant levels in residential buildings from passive sampler study." *Building and Environment* **36**(9): 999-1007.
- Colda, I. and C. Ghiaus (1998). *Ozone level forecasting using artificial neural networks*. 5th Symposium on Wind Engineering, Bucharest, Romania, Technical University of Civil Engineering.
- Davies, T. D., B. Ramer, G. Kaspyzok and A. C. Delany (1984). "Indoor/Outdoor Ozone Concentrations at a Contemporary Art Gallery." *Air Pollution Control Association* **31**(2): 135-137.
- Davis, J. M., B. K. Eder, D. Nychka and Q. Yang (1998). "Modeling the effects of meteorology on ozone in Houston using cluster analysis and generalized additive models." *Atmospheric Environment* **32**(14/15): 2505-2580.
- de Leeuw, F. and T. A. de Paus (2001). "Exceedance of ozone threshold values in Europe in 1997." *Water, Air, and Soil Pollution* **128**: 255-281.
- de Leeuw, F., E. Berge, K. Gronsky and M. Tombrou (1996). Review on requirements for models and model application. Copenhagen, Denmark, European Topic Centre for Air Quality.
- de Leeuw, F. and E. van Znatvoort (1995). Exceedance of ozone threshold values in European Community. Copenhagen K, Denmark, European Topic Centre on Air Quality.
- deBoor, C. (1978). *A practical guide to splines*, Springer-Verlag.

- Donaldson, C. A., R. M. Dyer and M. J. Krauss (1975). *An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events*. 9th Conf. Severe Local Storms.
- Doswell, C. A., R. Davis-Jones and D. L. Keller (1990). "On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables." *Weather and forecasting* **5**: 576-585.
- EEC (1992). "Directive 92/72/EEC of September 21 on Ozone Air Pollution." *J. European Community* **L297**(1).
- Ekberg, L. E. (2000). "Outdoor air contaminants and indoor air quality under transient conditions." *Indoor Air Journal* **4**(189-196).
- Engel, F., C. Viel and H. Chanut (1998). "Développement d'un modèle statistique de prévision à 24 heures d'un dépassement du seuil d'information de la population pour l'ozone." *Pollution Atmosphérique* **juil.-sept.**: 59-63.
- Etheridge, D. W. (1977). "Crack flow equations and scale effect." *Building and Environment* **12**(3): 181-189.
- Fromage, A. and E. Gilbert (1997). "Prévision des épisodes d'ozone: état de l'art dans le monde." *Pollution Atmosphérique*(avril-juin): 52-59.
- Gardner, M. W. and S. R. Dorling (1998). "Artificial neural networks (the multilayer perceptron) - A review of application in the atmospheric sciences." *Atmospheric Environment* **32**(14/15): 2627-2636.
- Ghatts, G. (1999). Prévisions des pics d'ozone par arbre de régression, simple et agrégés par bootstrap. Paris, Société de statistique de France.
- Ghiaus, C. (1996). Intelligent control of indoor climate. *Electrical Engineering and Automation*. Bucharest, Technical University.
- Ghiaus, C., F. Allard, F. Caini and A. Gazeau (2000). *La prévision des pics d'ozone en régime de brise à l'aide de la modélisation neuro-floue*. Journées thématiques "Automatique et Environnement", Nancy, France.
- Ghiaus, C., F. Caini and R. Belarbi (2003). *Linear discriminant analysis applied to forecast ozone concentration classes in sea-breeze regime*. ICUC5 5th Intl. Conference on Urban Climate, Lodz, Poland.
- Ghiaus, C., V. Iordache, F. Allard and P. Blondeau (2005). Outdoor-indoor pollutant transfer. *Natural Ventilation in the Urban Environment*. C. Ghiaus and F. Allard. London, UK, James and James / Earthscan: 256.
- Gibert, J. P. (1988). Etude de l'écoulement à travers les défauts d'étanchéité du bâtiment. Extrapolation des mesures aux petits débits. *Rapport CETE*. Lyon, France, HEB.
- Hales, C. H., A. M. Rollinson and F. H. Shair (1974). "Experimental Verification of Linear Combination Model for Relating Indoor-Outdoor Pollutant Concentrations." *Environment Science and Technology Journal* **8**(5): 452-453.
- Hayes, S. R. (1991). "Use of an Indoor Air Quality Model (IAQM) to Estimate Indoor Ozone Levels." *Journal Air & Waste Management Association* **41**(2): 161-170.
- Hays, W. L. (1973). *Statistics for the social sciences (2nd edition)*, Holt, Rinehart and Winston Inc.
- Hubbard, M. and G. Cobourn (1998). "Development of a regression model for forecast ground-level ozone concentration in Louisville, KY." *Atmospheric Environment* **32**(14/15): 2637-2647.
- Huré, P. and X. Rousselin (1999). L'émission d'ozone par les photocopieurs et les imprimantes laser. France, INRS.
- Iordache, V. (2003). Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire Recherche de moyens de prédiction et de protection. *LEPTAB*. La Rochelle, France, University of La Rochelle.

- ISO (1996). Isolation thermique - Détermination de l'étanchéité à l'air des bâtiments - Méthode de pressurisation par ventilateur, Norme Internationale.
- Jang, J.-S. R., C. T. Sun and E. Mizutani (1997). *Neuro-fuzzy and soft computing*, Prentice Hall.
- Jang, J.-S. R., C.-T. Sun and E. Mizutani (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- Jolliffe, I. T. (1986). *Principal component analysis*, Speinger-Verlag.
- Jones, B. A. (1998). *Statistics toolbox user's guide*, MathWorks™.
- Jorquera, H., R. Pérez, A. Cipriano, A. Espejo, V. Letelier and G. Acuña (1998). "Forecasting ozone daily maximum levels at Santiago, Chile." *Atmospheric Environment* **32**(20): 3415-3424.
- Kiel, D. E., D. J. Wilson and M. H. Sherman (1985). "Air leakage flow correlations for varying house construction types." *ASHRAE Transactions* **91**(91).
- Kirchner, S., O. Bailloit, B. Collignan, J.-P. Flori, O. Garret, A.-M. Laurent, Y. L. Moullec, P. O'Kelly, O. Ramalho, M. Sauvaget, J. G. Villenave and C. Vedel (2001). Experimental study on the transfert conditions of local atmospheric pollution to indoor dwelling environment. *Final Report, Convention Recherche n° 98.04.051*, ADEME, France: 147-148.
- Klenø, J. G., P. A. Clausen, C. J. Weschler and P. Wolkoff (2001). "Determination of ozone removal rates by selected building products using the FLEC emission cell,." *Environmental Science and Technology* **36**(12): 2548-2553.
- Koene, M. (1992). "Les émissions d'ozone à l'origine de problèmes climatiques." *JANUS* **10**: 264.
- Lee, S.-C. (1997). "Comparison of indoor and outdoor air quality at two staff quarters in Hong Kong." *Environment International* **23**(6): 791-797.
- Lepelley, N. (1998). Modèle d'exposition quotidienne de la population harvraise à la pollution atmosphérique. *Rapport Primequal-Predit*, Air Normand, Rouen, France.
- Litvak, A. (2000). Etanchéité à l'air des constructions - Etat de l'art, recensements des pratiques. *Final report. Contract n° 99.04.009*. Lyon, France, CETE de Lyon and ADEME.
- Montgomery, D. C. (1996). *Introduction to Statistical Quality Control*. New York, John Wiley Sons.
- Murray, C. and A. Lopez (2002). *World Health Report 2002*. Geneva, World Health Organization.
- Nazaroff, W. W., A. J. Gadgil and C. J. Weschler (1993). Critique of the use of deposition velocity in modelling indoor air quality. *Modeling of indoor air quality and exposure*. N. L. Nagda. Philadelphia, American Society for Testing and Materials: 81-104.
- Perros, P. and G. Toupance (1988). "Climatologie d'ozone en régime de brise." *Pollution Atmosphérique juillet-aout*.
- Reinsch, C. (1967). "Smoothing by spline functions." *Numer. Math.* **10**: 177-183.
- Ribéron, J. (1991). Guide méthodologique pour la mesure de la perméabilité à l'air des enveloppes de bâtiments. *Cahiers du CSTB n° 2493*. Paris, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment: 21.
- Robeson, S. M. and D. G. Steyn (1990). "Evaluation and comparison of statistical forecast models for daily maximum ozone concentration." *Atmospheric Environment* **24B**(2): 303-312.
- Romieu, I., M. C. Lugo, S. Colome, A. M. Garcia, M. A. Hernandez, A. Geyh, S. V. Ruiz and E. R. Palazuelos (1998). "Evaluation of Indoor Ozone Concentration and Predictors of

- Indoor-Outdoor Ratio in Mexico City." *International Journal Air & Waste Management Association* **48**: 327-336.
- Rumelhart, D. and J. McClelland (1988). *Parallel distributed processing*, MIT Press.
- Ryan, W. (1995). "Forecasting severe ozone episodes in the Baltimore metropolitan area." *Atmospheric Environment* **29**(17): 2387-2398.
- Saberski, R. H., D. A. Simena and F. H. Shair (1973). "Concentrations, Decay Rates and Removal of Ozone and Their Relation to Establishing Clean Indoor Air." *Environmental Science And Technology Journal* **7**(4): 157-166.
- Salmon, L. G., G. R. Cass, K. Bruckman and J. Haber (2000). "Ozone exposure inside museums in the historis central district of Krakow, Poland." *Atmospheric Environment* **34**: 3823-3832.
- Shair, F. H. and K. L. Heitner (1974). "Theoretical model for relating indoor pollutant concentrations to those outside." *Environmental Science And Technology Journal* **8**(5): 444-451.
- Spiegel, M. R. (1996). *Statistique. Cours et Problèmes, 2nd ed.* Paris, Mc Graw-Hill.
- Stanners, D. and P. Bourdeau (1995). Europe's Environment: The Dobris Assessment. Copenhagen, Denmark, European Topic Centre on Air Quality.
- Takagi, T. and M. Sugeno (1985). "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **15**: 116-132.
- Toupance, G. (1988). "L'ozone dans la basse troposphère. Théorie et pratique." *Pollution Atmosphérique jan.-mars*: 32-42.
- van_Aalst, R. M. and F. de_Leeuw (1997). National ozone forecasting systems and international data exchange in northwest Europe, European Environmental Agency.
- Weschler, C. J. (2000). "Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry." *Indoor Air Journal*, **10**: 269-288.
- Weschler, C. J., H. C. Shields and D. V. Naik (1989). "Indoor Ozone Exposures." *J Air Pollut Control Assoc* **39**: 1562-1568.
- Wolkoff, P. (1999). "Photocopies and indoor air pollution." *Atmospheric Environment* **33**: 2129-2130.
- Wonnacott, T. H. and R. J. Wonnacott (1990). *Introductory Statistics for Buissness and Economics, 4th ed.*, John Wiley & Sons.
- Yi, J. and V. Prybutok (1996). "A neural model forecasting for prediction of daily maximum ozone concentration in an industrialized urban area." *Environmental Pollution* **92**(3): 349-357.
- Yocom, J. E. (1982). "Indoor-outdoor air quality relationship. A critical review." *JAPCA* **32**(500-520).
- Zhang, J. and P. J. Liroy (1994). "Ozone in Residential Air: Concentrations, I/O Ratios, Indoor Chemistry, and Exposures." *Indoor Air Journal* **4**(95-105).

2.2 Estimation du potentiel de chauffage, de ventilation et de climatisation

2.2.1 Estimation expérimentale de la courbe de charge par régression robuste

Cette section est basée sur l'article :

C. Ghiaus (2006). Experimental estimation of building energy performance by robust regression. *Energy and Buildings*, 38(6), 582-587

doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.014>

Pour l'estimation des indices de performance énergétiques telles que la courbe de charge ou la signature énergétique on a besoin d'une régression robuste des consommations énergétiques en fonction de la température extérieure. Une solution que nous proposons dans cette section est d'utiliser le domaine entre le premier et le troisième quartile du graphique quantile-quantile pour vérifier si la consommation énergétique et la température extérieure ont la même distribution et, si c'est le cas, de réaliser la régression dans ce domaine du graphique quantile-quantile. Le résultat est un modèle qui conserve sa performance de prédiction pour des valeurs de la température extérieure qui sont différentes de celles utilisées pour l'identification des paramètres. Le modèle robuste donne le coefficient global de transfert de chaleurs (ou la résistance thermique totale) et la température de non-chauffe. Le modèle peut être utilisé pour l'estimation de la consommation énergétique d'un bâtiment avec des données climatiques provenant d'une autre localisation géographique ou d'un autre intervalle de temps.

Mots clés : identification des paramètres, graphique quantile - quantile, coefficient global de transfert de chaleur, signature énergétique, courbe de chauffe, audit énergétique.

2.2.1.1 Introduction

La performance énergétique des bâtiments peut être déterminée en utilisant une procédure ou une combinaison de trois procédures (Richalet, Neirac et al. 2001) :

- le calcul de la consommation énergétique en utilisant des données sur le bâtiment (les parois, les fenêtres, les systèmes techniques, etc.) collectées in situ par les auditeurs ;
- l'analyse des factures des consommations énergétiques ;
- l'utilisation des données mesurées en continu par les systèmes de gestion technique du bâtiment ou pendant des campagnes de mesure.

Dans le premier cas, le calcul de la consommation énergétique est fondamentalement similaire aux méthodes utilisées pour l'estimation des consommations dans la phase de la conception (CSTB 2000; Roulet, Millet et al. 2004). Par conséquent, cette méthode est très sensible à

l'estimation des propriétés thermo–physiques des matériaux et des dimensions géométriques du bâtiment ainsi qu'aux suppositions concernant l'occupation et le mode d'exploitation du bâtiment. Malgré ces inconvénients, l'analyse du bâtiment permet à l'auditeur de donner un diagnostic. La seconde méthode, basée sur l'analyse des factures, utilise les relevées mensuelles de compteurs (CIBSE 1996). L'influence des phénomènes avec une dynamique plus rapide qu'un mois est pris en compte en moyenne. L'énergie consommée par mètre carré, l'indice le plus simple et le plus utilisé qui est basé sur des factures, ne peut pas indiquer l'influence de la conception du bâtiment, de l'exploitation, des conditions de confort ou des conditions météorologiques sur les performances énergétiques (Yannas 1996). La troisième approche est basée sur des valeurs mesurées. Elle utilise une procédure d'identification des paramètres d'un modèle du bâtiment. Les systèmes de gestion techniques de bâtiment (GTB) facilitent le monitoring de la consommation énergétique et l'évaluation des performances en temps réel sur des intervalles de temps courts, typiquement, de 10 min à 1 heure (Levermore 1995; O'Sullivan, Keane et al. 2004). Les données mesurées peuvent être utilisées pour l'audit énergétique en ligne, pour estimer la signature énergétique, ou corroborées avec les investigations in situ (Hammarsten 1987; CIBSE 1996; Deng and Burnett 2000; Richalet, Neirac et al. 2001; Botsaris and Prebezanos 2004; Parnell and Larsen 2005). Un problème important dans l'application de cette méthode est que la corrélation entre les données obtenues pour des intervalles de temps courts peut être biaisée par des perturbations aléatoires non-mesurées comme l'occupation, le taux de ventilation ou les gains solaires qui n'ont pas une distribution Gaussienne. Dans ce cas, on a besoin d'une procédure robuste pour identifier correctement les paramètres du modèle.

Les modèles utilisés pour l'identification sont statiques ou dynamiques. Un paramètre qui est habituellement identifié dans les deux approches est le coefficient global de transfert ou la valeur U (Leftheriotis and Yianoulis 2000; Jimenez and Heras 2004). Les modèles dynamiques utilisés pour l'identification des paramètres sont linéaires en paramètres comme les modèles de type ARX ou ARMAX (Virk, Cheung et al. 1995) ou des modèles non-linéaires de type boîte noire tels que les réseaux de neurones (Olofsson, Andersson et al. 1998; González and Zamarreño 2005; Yang, Rivard et al. 2005). D'autres approches utilisent les réseaux de neurones pour déterminer le coefficient global de transfert et la masse thermique (Lundin, Andersson et al. 2004; Lundin, Andersson et al. 2005).

L'analyse statistique de la consommation globale d'énergie déterminée à partir de factures montre que la consommation énergétique peut être estimée avec une erreur de 10 % en utilisant seulement la température extérieure (Zmeureanu, Fazio et al. 1999; Jimenez and Heras 2004; Dong, Lee et al. 2005). Grâce à des données mesurées, la signature énergétique du bâtiment qui relie la consommation énergétique à la température extérieure est obtenue par régression à partir de modèles statiques simplifiés (Bauer and Scartezzini 1998; Westergren, Högberg et al. 1999; Pfafferott, Herkel et al. 2005).

La signature énergétique du bâtiment est liée au coefficient global de transfert du bâtiment, U , qui est la transmittance thermique moyenne par conduction et par ventilation à travers l'enveloppe du bâtiment (CSTB 2000; Roulet, Millet et al. 2004). Cette valeur est utilisée couramment comme un indice de performance pour l'enveloppe, notamment pour le régime de chauffage ; son utilisation pour les bâtiments qui utilisent de l'air conditionné est sujet à interrogation (Yik and Wan 2005). La résistance thermique totale, R , ou la conductance thermique totale, U , des composants du bâtiment peut être calculée à partir des propriétés

thermiques des matériaux (ASHRAE 2001). Si on possède des informations sur les caractéristiques du bâtiment, le coefficient global de transfert peut être calculé à partir des valeurs de composants et utilisé ensuite pour simuler le comportement thermique du bâtiment (Roulet, Millet et al. 2004). Une approche similaire est utilisée dans l'audit énergétique : la consommation énergétique est évaluée à partir des caractéristiques du bâtiment obtenues par une étude spécifique (Dahlsveen and Petras 2003).

Les modèles statiques ont été généralement utilisés pour exprimer la charge de chauffage ou de refroidissement en fonction de la température extérieure (ASHRAE 2001; Botsaris and Prebezanos 2004). Pour estimer cette relation à partir des données mesurées on a utilisé des méthodes statistiques ; quand la corrélation est faible on a besoin d'une méthode robuste de régression (Nouwynck, Hermoye et al. 1990; Zmeureanu 1990; Marchio and Rabl 1991; Zmeureanu and Fazio 1991; Rabl and Rialhe 1992; Levermore 1995; CIBSE 1996).

2.2.1.2 Relation entre la température extérieure et les déperditions des bâtiments

Le flux de chaleur à travers l'enveloppe d'une zone du bâtiment s'écrit :

$$q_h = U(T_o - T_i) - q_g \quad (2.32)$$

où U , est le coefficient global des transfert de chaleur qui prends en compte la transmission et la ventilation, T_o est la température extérieure, T_i est la température moyenne à l'intérieur de la zone, et q_g représente les gains gratuits, solaires, sources internes ou provenant des autre zones (ASHRAE 2001; Roulet, Millet et al. 2004). Plus généralement, q_g peut représenter les effets de la masse thermique ce qui rend l'équation (2.32) valide en régime dynamique. La température extérieure pour laquelle le bâtiment à la température intérieure T_i est en équilibre thermique avec son environnement, sans chauffage ni refroidissement, est nommée température de non - chauffage et elle est reliée aux gains de chaleur :

$$q_g = U(T_b - T_i). \quad (2.33)$$

Dans les bâtiments à l'ambiance contrôlée, la température intérieure, T_i , est quasiment constante. Le chauffage est nécessaire quand la température extérieure est inférieure à la température de non-chauffage qui est utilisée comme température de non chauffage pour le calcul des degrés-jours ou degrés-heures. Le flux de chaleur du bâtiment est alors :

$$q_h = U[T_o - T_b]\delta_h \quad (2.34)$$

avec

$$\delta_h = \begin{cases} 1, & \text{if } T_o < T_b \\ 0, & \text{if } T_o \geq T_b \end{cases} \quad (2.35)$$

L'énergie de chauffage nécessaire au bâtiment sur l'intervalle de temps $(t_2 - t_1)$ peut être calculée par :

$$Q_h = \int_{t_1}^{t_2} U[T_o(t) - T_b] \delta_h dt . \quad (2.36)$$

Si on considère l'intervalle de temps $(t_2 - t_1)$ d'une heure et la valeur moyenne de U sur cet intervalle, U_h , alors la quantité de chaleur pendant une heure est une fonction de la température extérieure :

$$Q = U_h(t)[T_o(t) - T_b(t)] \cdot 1h . \quad (2.37)$$

En réalité, U_h et T_b varient dans le temps. Notons que, dans les équations (2.32), (2.33) et (2.34), les pertes de chaleur sont négatives et celles de froid sont positives. La représentation de la demande de chaleur, Q , en fonction de la température extérieure génère un nuage de points. La Figure 2.17 présente les résultats de la simulation du comportement thermique d'un bâtiment climatisé dans deux conditions climatique différentes : à Moscou, en Russie, et à Rome, en Italie. En utilisant la régression linéaire, le nuage de points peut être modélisé de manière approximative par une expression linéaire :

$$Q = \beta_0 + \beta_1 T_o . \quad (2.38)$$

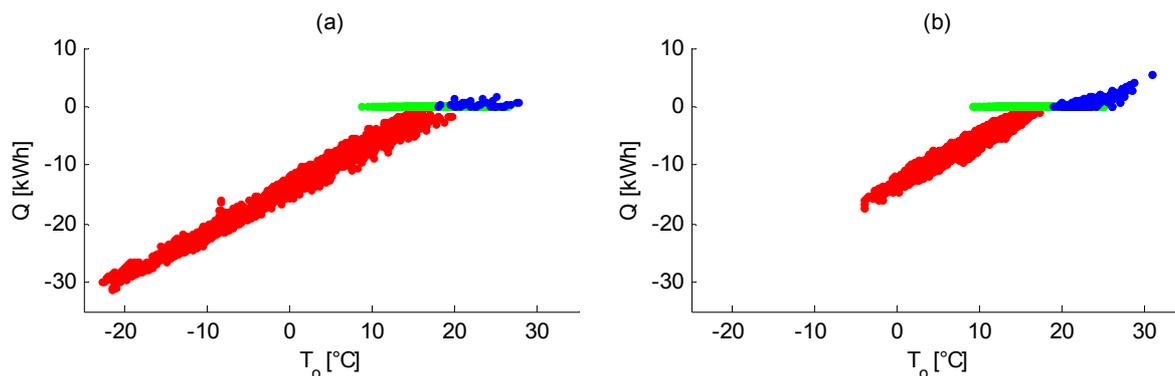


Figure 2.17 Demande énergétique pour le chauffage et pour le refroidissement en fonction de la température extérieure pour un bâtiment de type bureaux complètement climatisé calculée pour deux climats : a) Moscou, Russie et b) Rome, Italie

Tableau 2.11 Coefficients de régression, coefficient global de transfert et température de non chauffage pour un bâtiment de bureaux

	Lat [deg]	β_0	β_1	K [W/K]	T_b [°C]
Moscou	55.7	-13939	722	722	19.3
Rome	41.8	-13041	740	740	17.6
Vienne	48.2	-14034	789	789	17.8
Munich	48.1	-13444	773	773	17.4
Paris	48.8	-14053	841	841	17.5

A partir des équations (2.37) et (2.38) on obtient le coefficient global de transfert pour le bâtiment,

$$K_h = \beta_1 \quad (2.39)$$

et la température de non chauffage, c. à d. la température extérieure pour laquelle la demande de chaleur est nulle :

$$T_b = -\beta_0 / \beta_1. \quad (2.40)$$

Dans le Tableau 2.11 sont donnés les résultats obtenus par simulation pour un bâtiment de bureaux ayant une façade en verre, orientée sud et placé à Moscou, Rome, Vienne, Munich et Paris. Les variations de la température de non chauffage et du coefficient global de transfert sont dues au vent et aux gains solaires.

2.2.1.3 Estimation de la consommation énergétique en utilisant la courbe de charge

Si la variable y a une distribution normale de moyenne μ_y et de variance σ_y , la droite de régression obtenue en utilisant les moindres carrés, $y = b_0 + b_1x$, est une estimation de la vraie ligne de régression, $\mu_y = \beta_0 + \beta_1x$, qui décrit l'évolution de la réponse moyenne μ_y en fonction de x (Wannacott and Wannacott 1990).

Le modèle de régression de Q en fonction de T_o et de sa fréquence d'apparition peut être utilisé pour l'estimation de la consommation énergétique. Comme les valeurs observées de Q varient autour de leur moyenne, μ_Q , si on considère la fréquence d'apparition de la température extérieure dans des intervalles de T_{bin} , la demande énergétique est la somme de produits entre $Q(T_o)$ et le nombre des apparitions de T_o , $F(T_o)$, dans le domaine délimité par $[T_o - T_{bin} / 2, T_o + T_{bin} / 2]$:

$$Q_{tot} = \sum_{T_o=T_{o\min}}^{T_b} Q(T_o) \cdot F(T_o), \quad (2.41)$$

où $T_o \in \left\{ T_{o\min} + \frac{1}{2}T_{bin} \quad T_{o\min} + \frac{3}{2}T_{bin} \quad T_{o\min} + \frac{5}{2}T_{bin} \quad \dots \quad T_b \right\}$

La Figure 2.18 montre le nuage de points de la demande énergétique pendant les heures d'occupation, de 9h00 à 17h00, pour un bâtiment de type bureaux. Chaque point représente la demande énergétique pour une heure et la température moyenne pour cet intervalle de temps. La courbe de charge, $Q = U_h[\theta_o - \theta_b] \cdot 1h$, est obtenue par régression. Les histogrammes de la température extérieure sont obtenus en groupant la température dans des intervalles de 1°C. L'estimation de l'énergie se fait en multipliant le nombre d'apparitions dans un intervalle avec la valeur moyenne de la courbe de charge pour cet intervalle et en additionnant ces produits.

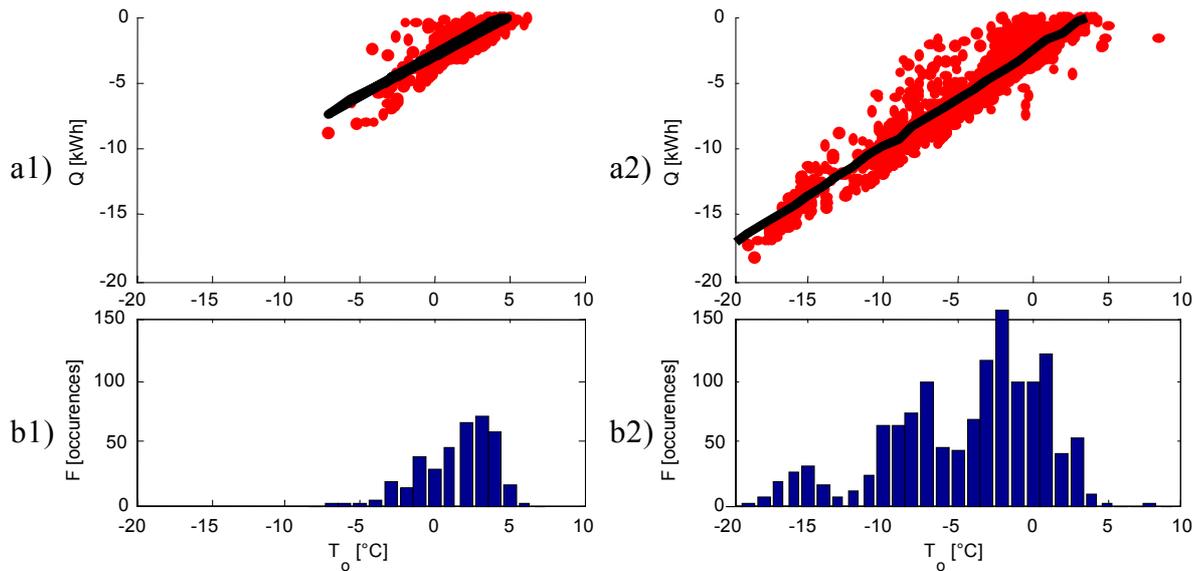


Figure 2.18 Demande d'énergie et distribution des fréquences d'apparition pour le même bâtiment placé à : a) Paris, France ; b) Moscou, Russie.

Dans le Tableau 2.12 sont données les erreurs relatives entre l'énergie totale demandée pour le conditionnement et sa estimation en utilisant la courbe de charge obtenue par régression. La courbe de charge a été obtenue en faisant la simulation pour le bâtiment localisé à Paris. La consommation énergétique a été alors estimée pour le même bâtiment dans des différents climats. La dernière ligne du Tableau 2.12 montre les différences typiques entre l'estimation de la demande énergétique réelle et celle obtenue en utilisant la courbe de charge ; l'erreur relative pour le même climat est de moins de 2%. Quand la courbe de charge obtenue pour un ensemble de données (dans ce cas Paris) est utilisée pour un autre ensemble de données (par exemple Munich, Vienne, Rome ou Moscou), les erreurs sont plus importantes, mais inférieures à 10%. Les erreurs sont plus petites pour la période de nuit quand il n'y a pas d'apports solaires.

Tableau 2.12 Erreurs relatives entre la consommation énergétique réelle et son estimation en utilisant la courbe de charge calculée pour Paris par régression ordinaire et régression robuste. (Note : les données "expérimentales" ont été obtenues par simulation).

	Lat [deg]	Régression ordinaire		Régression robuste	
		\mathcal{E}_{night} [%]	\mathcal{E}_{day} [%]	\mathcal{E}_{night} [%]	\mathcal{E}_{day} [%]
Moscou	55.7	3.0	-3.4	-2.8	2.4
Rome	41.8	5.3	--	-1.6	--
Vienne	48.2	1.5	-10.4	1.9	-1.0
Munich	48.1	6.2	-3.6	2.5	-2.9
Paris	48.8	0.2	1.5	-2.3	-2.5

2.2.1.4 Conditions d'application et limites de la régression ordinaire

Pour la régression linéaire on fait les hypothèses que la température extérieure, T_o , a une distribution normale et que la charge, Q , est une variable aléatoire de moyenne $\mu_Q = \beta_0 + \beta_1 T_o$ et de variance σ^2 . Ces conditions peuvent être synthétisées par (Wannacott and Wannacott 1990) :

- Les variables aléatoires Q sont indépendantes
- de moyenne $\mu_Q = \beta_0 + \beta_1 T_o$ (2.42)
- et variance σ^2

Les conditions (2.42) impliquent que les résidus de la régression doivent avoir une distribution normale de moyenne zéro.

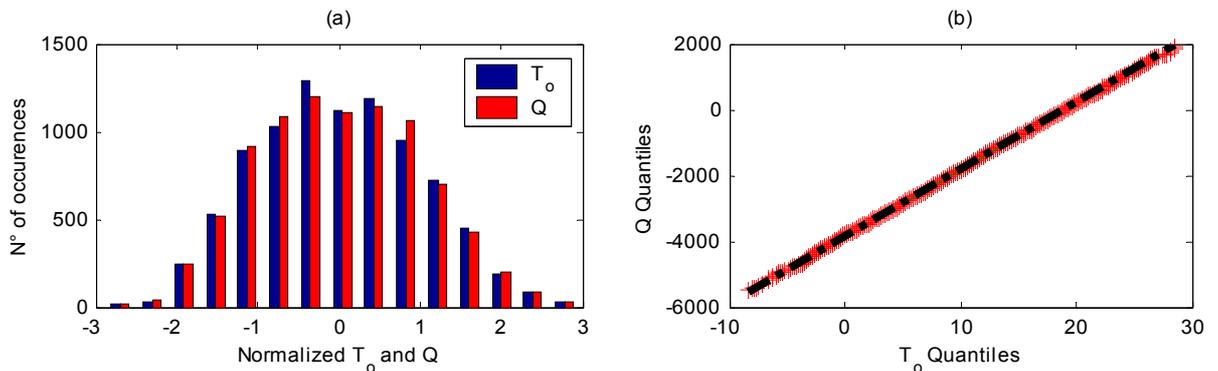


Figure 2.19 Distributions de la température extérieure et de la charge quand les distributions sont presque identiques : a) histogramme b) graphe quantile-quantile

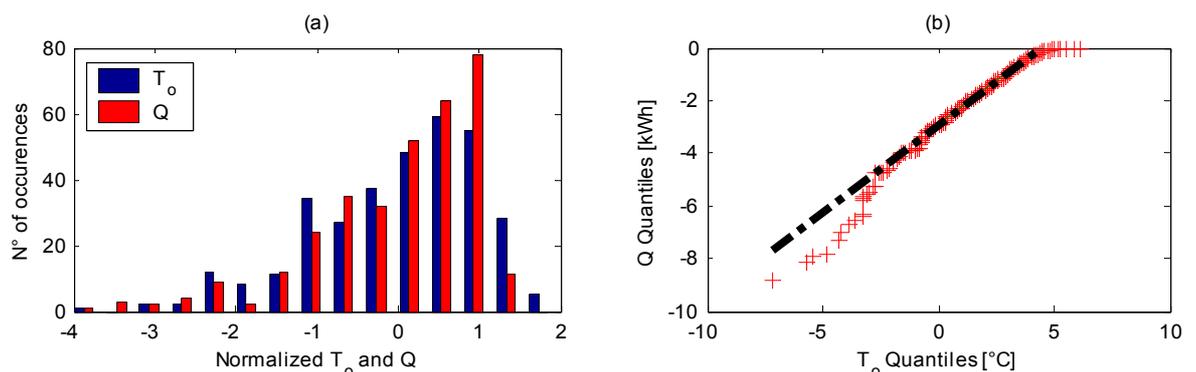


Figure 2.20 Distribution de la température extérieure et de la charge pour des conditions réelles : a) histogramme b) graphe quantile-quantile

Pour un intervalle de temps long, la distribution statistique de la température extérieure, $T_o(t)$, est normale (ou Gaussienne). Si le bâtiment est climatisé, si les apports internes et les taux de ventilation sont des variables aléatoires indépendantes avec une distribution normale et si la température intérieure est contrôlée dans un domaine restreint de variation, alors la

charge (de chauffage ou de climatisation) a également une distribution normale. La Figure 2.19 (a) illustre ce cas ; après la normalisation pour obtenir la moyenne zéro et la variance unitaire, la distribution de la température extérieure et de la charge sont presque identiques. Les conditions (2.42) et celle concernant la distribution de la température extérieure ne sont pas satisfaites dans des situations réelles (Figure 2.20). Aux extrémités, la distribution de la charge est différente de celle de la température extérieure.

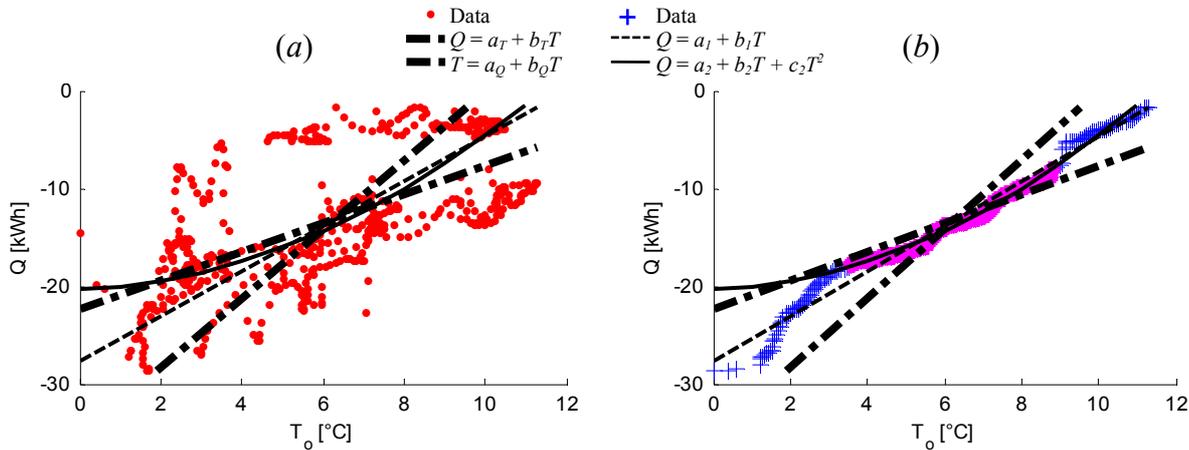


Figure 2.21 Modèles de régression a) nuage de points b) graphe quantile–quantile

La courbe de charge est, en première approximation, une fonction linéaire de la variable aléatoire température extérieure, comme indiquée dans les équations (2.37) et (2.38). La transformation linéaire va changer la moyenne et la variance mais pas la forme de la distribution. Soit \mathbf{x} est un vecteur de valeurs aléatoires,

$$\begin{aligned} \text{si } \mathbf{y} &= [\mathbf{1} \quad \mathbf{x}] \times [a \quad b]^T \\ \text{alors } \mu_y &= a + b\mu_x \\ \text{et } \sigma_y &= |b|\sigma_x \end{aligned} \tag{2.43}$$

où μ et σ représentent la moyenne et l'écart type des variables indexées. Si on veut trouver quelle est la valeur attendue de Q en fonction de T_o ,

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{1} \quad \mathbf{T}_o] \times [a_T \quad b_T]^T \tag{2.44}$$

on utilise alors l'estimation des moindres carrés pour trouver les coefficients :

$$b_T = \frac{(\mathbf{T} - \mu_T)^T \times (\mathbf{Q} - \mu_Q)}{(\mathbf{T} - \mu_T)^T \times (\mathbf{T} - \mu_T)} \tag{2.45}$$

et

$$a_T = \mu_Q - b_Q \mu_T. \tag{2.46}$$

Un exemple de l'estimation de $\mathbf{Q} = [\mathbf{1} \quad \mathbf{T}_o] \times [a_T \quad b_T]^T$ pour un bâtiment réel est donné sur la Figure 2.21 (a) :

$$Q = -22.43 + 1.47T_o. \quad (2.47)$$

D'autre part, si on veut trouver quelle est la température extérieure, T_o , pour laquelle le bâtiment est en équilibre thermique pour un flux thermique donné, Q , alors nous trouvons par régression les coefficients de l'équation :

$$\mathbf{T}_o = [\mathbf{1} \quad \mathbf{Q}] \times [a_Q \quad b_Q]^T \quad (2.48)$$

à savoir :

$$b_Q = \frac{(\mathbf{Q} - \mu_Q)^T \times (\mathbf{T} - \mu_T)}{(\mathbf{Q} - \mu_Q)^T \times (\mathbf{Q} - \mu_Q)} \quad (2.49)$$

et

$$a_Q = \mu_T - b_Q \mu_Q. \quad (2.50)$$

Un exemple de l'estimation de $\mathbf{T}_o = [\mathbf{1} \quad \mathbf{Q}] \times [a_Q \quad b_Q]^T$ pour un bâtiment réel est donné sur la Figure 2.21 (a) :

$$T_o = 9.99 + 0.28Q. \quad (2.51)$$

Le coefficient de corrélation des régressions (2.44) et (2.48) est :

$$r_{T_o, Q}^2 = b_{T_o} \cdot b_Q. \quad (2.52)$$

Pour l'exemple montré sur la Figure 2.21 (a), en utilisant les valeurs de (2.47) et de (2.51), nous obtenons $r_{T_o, Q}^2 = 0.41$. Cette valeur montre une faible corrélation entre les données et indique une confiance réduite dans le modèle. Notons que le modèle (2.44) donne de bons résultats quand on estime la demande énergétique en utilisant l'équation (2.41) pour les données utilisées mais les résultats seront moins précis pour d'autres données de température extérieure (voir Tableau 2.12).

2.2.1.5 Régression robuste de la courbe de chauffe basée sur le graphique quantile - quantile

Pour remédier ce problème, on propose une régression basée sur le graphique quantile – quantile. La discussion de la méthode est réalisée en utilisant des données réelles mesurées dans une école de La Rochelle, France, pendant un mois de la saison de chauffage. L'école est chauffée pendant la journée à 20°C et pendant la nuit à 15°C. Les données considérées dans cet exemple correspondent à un l'intervalle de temps de 10h00 à 17h00.

Les points dans un graphe quantile – quantile représentent des quantiles de données. Les quantiles indiquent le nombre d'éléments d'une variable aléatoire qui se trouvent dans un domaine. Le quantile k de P_k est la valeur de la variable aléatoire x ayant N éléments, noté

x_k , qui corresponde à la fréquence cumulée de Nk/n . Le quantile est nommé percentile pour $n=100$ (Evans, Hastings et al. 2000). La 25^{ème} et la 75^{ème} percentile sont nommées le premier et le troisième quartile, respectivement ; la 50^{ème} percentile est la médiane (Wannacott and Wannacott 1990). Si les points d'un graphique quantile–quantile sont distribués sur une droite, alors les deux distributions sont les mêmes, que les distributions soient normales ou non. La Figure 2.19 (b) présente les données de la Figure 2.19 (a) sur un graphique quantile–quantile avec $n=100$ (c. à d. en percentiles). Il est évident que les deux ensembles de données proviennent de la même distribution.

Une estimation robuste de la relation linéaire entre la température extérieure et la courbe de charge peut être réalisée en se basant sur la région centrale du graphique quantile – quantile et en considérant les données entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile. Si le graphique est linéaire dans ce domaine, les distributions sont les mêmes et les coefficients du modèle

$$\mathbf{Q} = a + b\mathbf{T}_o \quad (2.53)$$

sont :

$$b = \sigma_Q / \sigma_{T_o} \quad (2.54)$$

et

$$a = \mu_{T_o} - b\mu_Q \quad (2.55)$$

ce qui représente l'axe de la composante principale sur la Figure 2.21.

L'équation (2.55) est un résultat direct du fait que Q est une fonction de la variable aléatoire T_o et qu'elle est en concordance avec les équations (2.43). Sur la Figure 2.21, la composante principale donnée par l'équation (2.55) est placée entre les deux modèles de régression donnés par les équations (2.44) et (2.48). La Figure 2.21 (b) montre que le modèle (2.55) modélise de façon approximative le graphique quantile – quantile dans la zone centrale.

L'équation $Q = f(T_o)$ est non linéaire dans le cas de systèmes hydrauliques de chauffage équipés de radiateurs à cause de la non linéarité des phénomènes de transfert par convection et rayonnement :

$$P_i = US(T_m - T_a)^n, \quad 1 \leq n \leq 1.5 \quad (2.56)$$

où P est la puissance de radiateurs, U est le coefficient global de transfert de chaleur, S est la surface totale, T_a est la température ambiante et T_m est la température moyenne de l'eau :

$$T_m = (T_s + T_r)/2 \quad (2.57)$$

où T_s et T_r sont les températures de l'eau à aller et de retour, respectivement. La non–linéarité de la relation $Q = f(T_o)$ peut être modélisée en considérant une fonction quadratique :

$$Q = a_2 + b_2T_o + c_2T_o^2. \quad (2.58)$$

Pour les mêmes raisons mentionnées ci-dessus, une régression robuste des paramètres de l'équation (2.58) peut être obtenue en utilisant les données du graphique quantile –quantile entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile. Pour les données de la Figure 2.21, le modèle obtenu est :

$$Q = -20.35 + 0.12T_o + 0.15T_o^2. \quad (2.59)$$

Ce modèle a une pente faible pour $T_o = -5^\circ C$ qui est la température utilisée pour le dimensionnement des installations de chauffage à La Rochelle, France, et une pente plus importante pour la température de non chauffage de $12^\circ C$.

Quand la consommation est estimée en utilisant l'équation (2.41), la régression ordinaire, les équations de (2.44) à (2.46), donne des erreurs relatives de 0.5% pour les données utilisées et d'environ 5-10 % pour d'autres données (Tableau 2.12). La régression basée sur les quantiles, à savoir les équations (2.53) et (2.58), donne la même erreur relative de 2 à 4% pour les données utilisées pour l'obtenir ainsi que pour d'autres données (Tableau 2.12).

2.2.1.6 Conclusion

Un grand nombre de bâtiments sont équipés avec des systèmes de gestion technique du bâtiment (GTB). Ceux-ci contrôlent la température intérieure et enregistrent les consommations énergétiques et la température extérieure. Ces données peuvent être utilisées pour estimer la performance énergétique du bâtiment, comme par exemple la courbe de charge en fonction de la température extérieure. Cette relation peut être utilisée pour évaluer le coefficient global de transfert, représenté par la pente de la courbe de charge, $U_h = \beta_1$, divisé par la surface extérieure, et la température de non chauffage, $T_b = -\beta_0 / \beta_1$, qui est reliée aux gains gratuits. Le coefficient global de transfert et la température de non chauffage sont des concepts simples qui sont utiles pour l'analyse économique ou pour l'étiquetage énergétique des bâtiments (Isakson 1983; Richalet, Neirac et al. 2001). Ils sont de bons indicateurs de la qualité de la conception, de l'exécution et de l'exploitation du bâtiment. La courbe de chauffe peut être utilisée pour le diagnostic de la performance énergétique de la même manière que la signature énergétique (CIBSE 1996) et pour la correction météorologique des consommations (Nouwynck, Hermoye et al. 1990).

2.2.2 Température en évolution libre dans l'estimation de la performance énergétique des bâtiments

Cette section est basée sur l'article :

C. Ghiaus (2006). Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods, *Energy and Buildings*, 38(5), 429-435

doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.003>

Les méthodes utilisées pour l'estimation des performances énergétiques des bâtiments sont basées sur des modèles statiques ou dynamiques. Un changement de paradigme consiste à utiliser une approche statistique, telle que la distribution des fréquences d'occurrences, dans le but d'estimer la demande énergétique avec un seul concept pour tout le domaine de fonctionnement du bâtiment (chauffage, ventilation et climatisation) et le but de découpler le comportement thermique du bâtiment, le domaine de température de confort et les valeurs météorologiques. Ces desiderata peuvent être atteints en utilisant la température en évolution libre pour caractériser le comportement thermique de bâtiment et la distribution des fréquences de la température extérieure pour caractériser le climat. Dans la section 2.2.1 on a démontré que les valeurs des modèles statiques peuvent être utilisées pour estimer la courbe de charge et que cette courbe peut être utilisée pour calculer la consommation énergétique. Dans cette section on démontre que la température en évolution libre est une notion équivalente à la courbe de charge et peut être utilisée comme celle-ci. Les avantages principaux de l'utilisation de la température en évolution libre sont que 1) le comportement dynamique peut être décrit avec des concepts statiques, 2) tout le domaine de fonctionnement du bâtiment (chauffage, ventilation, climatisation) peut être caractérisé avec un même et seul concept et 3) le comportement thermique du bâtiment, le confort et le climat sont découplés. Le formalisme mathématique utilise la notation matricielle.

2.2.2.1 Introduction

Actuellement, la performance énergétique des bâtiments est estimée en utilisant deux approches : statique et dynamique. L'approche statique est adéquate si le fonctionnement du bâtiment et l'efficacité des équipements techniques (de chauffage, de ventilation et de climatisation) sont constants, au moins sur des intervalles donnés de temps et de température extérieure (ASHRAE 2001). L'approche dynamique, qui utilise la simulation du comportement thermique du bâtiment, nécessite des informations exhaustives sur les caractéristiques constructives et le fonctionnement du bâtiment. Les résultats de la simulation sont donnés habituellement sous forme de séries temporelles. Pour que l'analyse dynamique soit intégrée dans la pratique courante, l'approche actuelle nécessite deux améliorations : réduire le nombre des données d'entrée (Ellis and Mathews 2001) et condenser les informations données comme résultats.

Un nouveau paradigme pour l'estimation des performances énergétique dans les phases initiales de la conception est basé sur la distribution des fréquences (Ghiaus 2003). Cette méthode peut être combinée avec le raisonnement qualitatif (Germano, Ghiaus et al. 2005).

L'avantage d'utiliser des fréquences de distribution à la place des séries temporelles est que l'information contenue dans les fréquences de distribution est plus riche. Par exemple, le concepteur sera plus intéressé par la fréquence et la durée d'apparition des valeurs de la température intérieure supérieure à la limite acceptable dans un intervalle de temps de, par exemple, 10 ans, que dans la variation horaire de la température dans le même intervalle de temps. Avec une information statistique, les décisions de la conception deviennent un choix de risques acceptés.

Les méthodes statiques basées sur la température (Shaviv 2001; Heras, Jiménez et al. 2004) ou sur la courbe de chauffage / climatisation (Elkhuizen, Peitsman et al. 2003) peuvent être adaptées pour caractériser le comportement dynamique en utilisant la distribution de probabilité de la température (Ghiaus 2003). La courbe de chauffe et la température du bâtiment ont été utilisées séparément dans l'analyse des performances énergétiques (Pfafferott, Herkel et al. 2003; Pfafferott, Herkel et al. 2005). Cette section démontre l'équivalence entre la courbe de charge et la température en évolution libre et son utilisation pour l'analyse de régimes de chauffage, de ventilation et de climatisation. L'avantage de cette méthode est que les trois facteurs importants qui influencent la consommation énergétique, le comportement thermique du bâtiment, le confort et le climat, sont découplés.

2.2.2.2 Équivalence entre les méthodes dynamiques et la courbe de charge

La déperdition de chaleur totale du bâtiment, q_l , est la somme des déperditions par conduction, q_c , et par ventilation, q_v :

$$q_l = q_{cd} + q_v. \quad (2.60)$$

Dans une forme générale, la fonction de transfert qui caractérise la relation entre la température intérieure et les déperditions par conduction est :

$$\frac{\tilde{T}_o + \tilde{T}_s - \tilde{T}_i}{\tilde{q}_{cd}} = \tilde{R}_{cd}, \quad (2.61)$$

où les fonctions de la variable complexe marquées par un tilde, $\tilde{f} \equiv f(s)$, $s = \sigma + j\omega$, représentent des transformées de Laplace,

- $\tilde{T}_o + \tilde{T}_s$ est la température équivalents, c.-à-d. la température de l'air extérieur qui, en l'absence d'échanges radiatifs engendrerait le même flux thermique à travers l'enveloppe du bâtiment que la combinaison de la convection et du rayonnement,
- \tilde{T}_i - température intérieure,
- \tilde{q}_c - flux thermique par conduction, et

- \tilde{R}_{cd} - fonction de transfert qui exprime la résistance dynamique due à la conduction thermique.

Une autre forme de l'équation (2.61) est de l'exprimer sous la forme de la conductance thermique, \tilde{K}_{cd} :

$$\frac{\tilde{q}_{cd}}{\tilde{T}_o + \tilde{T}_s - \tilde{T}_i} = \tilde{K}_{cd}. \quad (2.62)$$

On doit noter que seulement l'équation (2.61) est une fonction de transfert qui exprime une relation entre l'entrée, \tilde{q}_{cd} , et la sortie, $\tilde{T}_o + \tilde{T}_s - \tilde{T}_i$; l'équation (2.62) est seulement équivalente à l'équation (2.61), mais elle ne représente pas le rapport entre la sortie et l'entrée, comme une fonction de transfert. En utilisant différentes méthodes de réduction de modèles (Moore 1981; Laub, Heath et al. 1987), la conductance thermique peut être mise sous la forme :

$$\tilde{K}_{cd} = K_{cd} \frac{1 + b_1 s + \dots + b_n s^n}{1 + a_1 s + \dots + a_m s^m}; m \geq n \quad (2.63)$$

où

$$K_{cd} = \lim_{s \rightarrow 0} \tilde{K}_{cd} \quad (2.64)$$

est le coefficient global de transfert de chaleur en régime stationnaire et

$$G_{cd}(s) = \frac{1 + b_1 s + \dots + b_n s^n}{1 + a_1 s + \dots + a_m s^m}; m \geq n \quad (2.65)$$

est le gain dynamique.

La fonction de transfert qui décrit la relation entre la température intérieure et les déperditions de chaleur par ventilation est :

$$\frac{\tilde{T}_o - \tilde{T}_i}{\tilde{q}_v} = \tilde{R}_v \quad (2.66)$$

qui, peut être écrite comme :

$$\frac{\tilde{q}_v}{\tilde{T}_o - \tilde{T}_i} = \tilde{K}_v. \quad (2.67)$$

Généralement, le gain dynamique de \tilde{K}_v est beaucoup plus rapide que celui de \tilde{K}_{cd} et il peut être négligé,

$$\tilde{K}_v = K_v. \quad (2.68)$$

En régime dynamique, l'équation de bilan d'énergie est :

$$\tilde{q}_h + \tilde{q}_g = \tilde{q}_{cd} + \tilde{q}_v \quad (2.69)$$

où $\tilde{q}_h \leq 0$ est le flux de chaleur pour le chauffage et \tilde{q}_g représente les gains (solaire, des sources internes ou d'autres zones). Notons que dans le formalisme utilisé dans l'équation (2.69), les flux \tilde{q} modélisent également les effets de l'inertie thermique et que le flux de chauffage prend des valeurs négatives. Les équations (2.62), (2.67) et (2.69), impliquent que :

$$\tilde{q}_h = \lfloor \tilde{K}(\tilde{T}_o - \tilde{T}_i) + \tilde{K}_{cd}\tilde{T}_s - \tilde{q}_g \rfloor \quad (2.70)$$

où

$$\tilde{K} = \tilde{K}_{cd} + \tilde{K}_v \quad (2.71)$$

et les parenthèses $\lfloor \]$ indiquent l'opération :

$$\lfloor f \rfloor = \begin{cases} f & \text{si } f < 0 \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (2.72)$$

La température de non chauffage, T_b , est la température pour laquelle le bâtiment à la température intérieure T_i est en équilibre thermique avec l'extérieur,

$$T_b \equiv T_o \Big|_{q_h=0} \quad (2.73)$$

Les équations (2.70) et (2.73) donnent :

$$\tilde{q}_g = \tilde{K}(\tilde{T}_o - \tilde{T}_i) + \tilde{K}_{cd}\tilde{T}_s \quad (2.74)$$

Les équations (2.70) et (2.74) impliquent que :

$$\tilde{q}_h = \tilde{K}(\tilde{T}_o - \tilde{T}_b) \quad (2.75)$$

En se basant sur les équations (2.63) et (2.68), on considère que la forme de \tilde{K} dans l'équation (2.75) est :

$$\tilde{K} = K_v + K_{cd}\tilde{H} \quad (2.76)$$

où

$$\tilde{H} = \frac{1 + b_1s + \dots + b_n s^n}{1 + a_1s + \dots + a_m s^m}; m \geq n \quad (2.77)$$

est un filtre. On peut encore augmenter la généralité de cette hypothèse en considérant que \tilde{H} dans l'équation (2.77) représente des modèles linéaires locaux qui caractérisent un mode de fonctionnement du système de chauffage / ventilation / climatisation. Dans ces conditions, la valeur moyenne de \tilde{q}_h dans un intervalle de variation de la température extérieure autour de la valeur T_o est :

$$\bar{q}_h = \bar{K}(T_o - \bar{T}_b), \quad (2.78)$$

où \bar{K} , $\bar{K} = \bar{K}_{cd} + \bar{K}_v$, est la valeur moyenne de \tilde{K} . En utilisant l'équation (2.78), la somme des flux de chaleur pour le chauffage pour un intervalle autour de la température extérieure T_o est :

$$\sum [q_h] = F \cdot \bar{q}_h = F \cdot \bar{K}(T_o - \bar{T}_b), \quad (2.79)$$

où $F \equiv F(T_o | q_h < 0)$ est la fréquence d'occurrence de la température extérieure dans l'intervalle considéré, avec la condition que le chauffage soit nécessaire. La demande énergétique sur tout l'intervalle de variation de la température extérieure est :

$$\sum_{T_o} [q_h] = \mathbf{F}^T \times \bar{\mathbf{K}} * (\mathbf{T}_o - \bar{T}_b), \quad (2.80)$$

où $\mathbf{T}_o = [T_{o1} \ T_{o2} \ \dots \ T_{ok}]^T$ est le vecteur des valeurs centrales des intervalles de la température extérieure, $\mathbf{F} = [F(T_{o1}) \ F(T_{o2}) \ \dots \ F(T_{ok})]^T$ est le vecteur des fréquences d'apparition de la température extérieure dans les intervalles centrés sur \mathbf{T}_o , et $\bar{\mathbf{K}} = [\bar{K}(T_{o1}) \ \bar{K}(T_{o2}) \ \dots \ \bar{K}(T_{ok})]^T$ le vecteur des valeurs moyennes de la conductance globale qui correspondent aux intervalles centrés sur \mathbf{T}_o . L'opérateur \times représente la multiplication matricielle et l'opérateur $*$ représente la multiplication élément par élément des vecteurs :

$$\bar{\mathbf{K}} * \mathbf{T}_o = [\bar{K}(T_{o1}) \cdot T_{o1} \ \bar{K}(T_{o2}) \cdot T_{o2} \ \dots \ \bar{K}(T_{ok}) \cdot T_{ok}]^T. \quad (2.81)$$

Si les valeurs du vecteur $\bar{\mathbf{K}}$ sont constantes, alors :

$$\bar{\mathbf{K}} * \mathbf{T}_o = \bar{K} \mathbf{T}_o, \quad (2.82)$$

et l'équation (2.80) devient :

$$\sum_{T_o} [q_h] = \mathbf{F}^T \times \bar{K} (\mathbf{T}_o - \bar{T}_b). \quad (2.83)$$

Généralement, les logiciels de simulation de bâtiment ou les compteurs d'énergie donnent la consommation énergétique pour des intervalles de temps constants, Δt ; une valeur commune est $\Delta t = 1h$. En intégrant le flux énergétique donné par l'équation (2.75) durant le temps Δt , l'énergie consommée dans l'intervalle Δt est alors :

$$\tilde{Q} = \tilde{K}(\tilde{T}_o - \tilde{T}_b)\Delta t. \quad (2.84)$$

En utilisant la valeur moyenne du flux énergétique exprimée par l'équation (2.78), l'énergie consommée dans la période Δt est :

$$\bar{Q} = \bar{K}(T_o - \bar{T}_b)\Delta t, \quad (2.85)$$

où \bar{Q} , \bar{K} , et \bar{T}_b sont les valeurs moyennes de la consommation énergétique horaire, du coefficient global de transfert de chaleur et de la température de non chauffage pour un intervalle autour de la température extérieure T_o . La demande énergétique pour le chauffage est alors :

$$\sum_{T_o} [Q] = \mathbf{F}^T \times \bar{K} (T_o - \bar{T}_b) \Delta t. \quad (2.86)$$

Si les valeurs du vecteur \bar{K} sont constantes, c.-à-d. si les valeurs moyennes de la conductance totale sont constantes pour un intervalle de variation de la température extérieure et pour un mode de fonctionnement des équipements techniques, alors la conductance globale, \bar{K} peut être trouvée par régression (voir section 2.2.1).

Il résulte que, la consommation énergétique peut être calculée en découplant les données météorologiques, exprimées par la distribution des fréquences de la température extérieure, de la caractéristique du bâtiment exprimée par l'équation (2.38). Le désavantage d'exprimer la caractéristique thermique en fonction de la courbe de charge est que celle-ci peut caractériser seulement les régimes de chauffage et de climatisation.

Une alternative à l'utilisation de la courbe de charge est l'utilisation de la température en évolution libre qui peut caractériser le bâtiment dans tout son domaine de fonctionnement : chauffage, ventilation et climatisation (Ghiaus 2003).

2.2.2.3 Relation entre la courbe de chauffe et la température en évolution libre

Les gains solaire et internes, \tilde{q}_g , sont égaux aux déperditions totales quand la température extérieure est égale à la température de non chauffage, T_b , pour une température de confort minimale T_{cl} (ASHRAE 2001). Ceci peut s'exprimer par :

$$\tilde{q}_g = \tilde{K} (T_{cl} - \tilde{T}_b). \quad (2.87)$$

On définit la température en évolution libre, T_{fr} , par la température intérieure obtenue quand le bâtiment n'est ni chauffé ni climatisé et quand la perméabilité reste constante et égale à la valeur d'hiver, c.-à-d. quand les fenêtres sont fermées (Ghiaus 2003). Dans ce cas, les gains sont :

$$\tilde{q}_g = \tilde{K} (\tilde{T}_{fr} - \tilde{T}_o). \quad (2.88)$$

Des équations (2.87) et (2.88), il résulte que :

$$\tilde{T}_{fr} - T_{cl} = \tilde{T}_o - \tilde{T}_b. \quad (2.89)$$

La courbe de charge (2.78) exprimée en fonction de la température en évolution libre, devient :

$$\tilde{q}_h = \tilde{K}(\tilde{T}_{fr} - T_{cl}). \tag{2.90}$$

De l'équation (2.90), nous obtenons la température en évolution libre :

$$\tilde{T}_{fr} = T_{cl} + \tilde{q}_h / \tilde{K}. \tag{2.91}$$

Notons que dans l'équation (2.91) la charge de chauffage, \tilde{q}_h , est négative. Pour des raisons pratiques, l'équation (2.91) peut être exprimée en fonction de la demande énergétique, Q_h , dans l'intervalle, Δt :

$$\tilde{T}_{fr} = T_{cl} + \tilde{Q}_h / (\tilde{K} \cdot \Delta t). \tag{2.92}$$

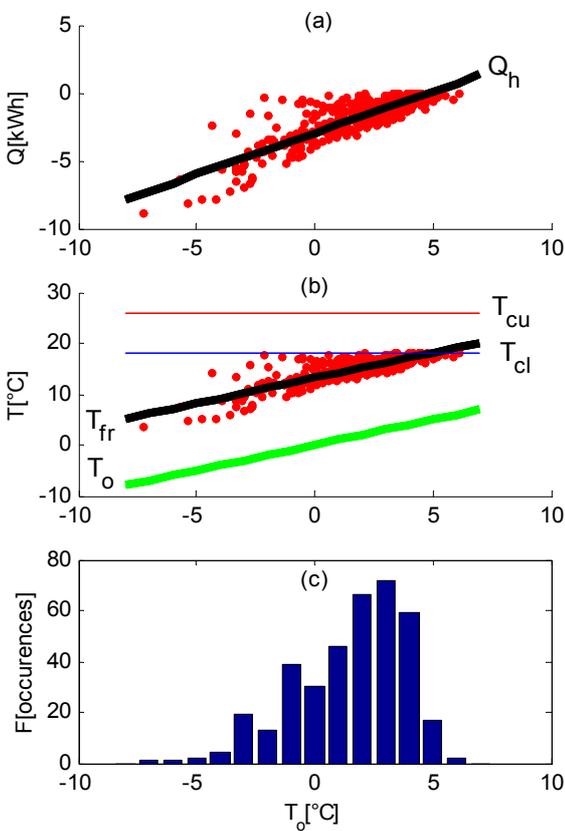


Figure 2.22 Courbe de charge et température en évolution libre : a) Courbe de charge ; b) Température en évolution libre obtenue avec la courbe de charge ; c) Distribution des fréquences de la température extérieure.

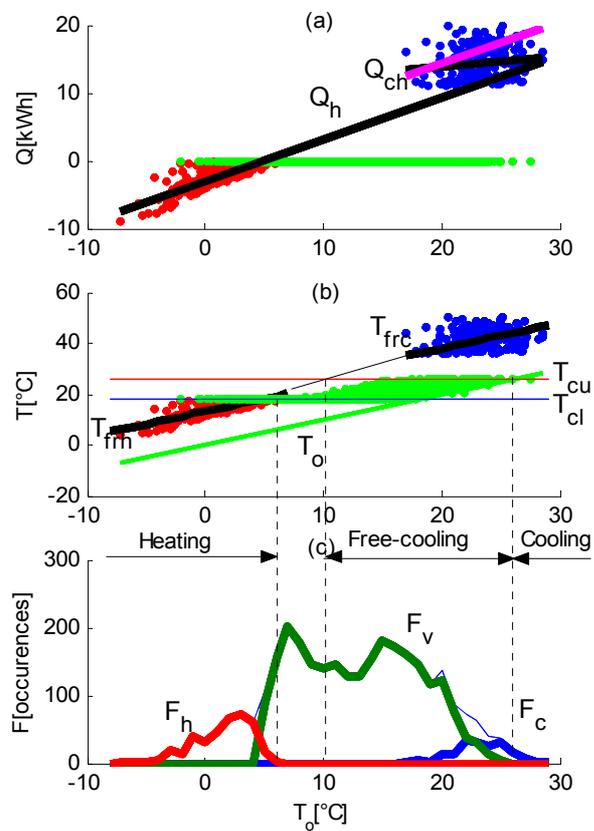


Figure 2.23 Courbe de charge et température en évolution libre pour l'estimation du chauffage et de la climatisation : a) Courbe de charge ; b) Température en évolution libre ; c) Distribution des fréquences de la température extérieure.

Pour les raisons expliquées aux équations (2.76) et (2.77), l'équation (2.92) peut être écrite avec des valeurs moyennes par :

$$\bar{T}_{fr} = T_{cl} + \bar{Q}_h / (\bar{K} \cdot \Delta t). \quad (2.93)$$

Les équations (2.92) et (2.93) permettent de représenter la température en évolution libre comme une fonction de la charge.

La Figure 2.22 (a) montre le nuage de points de la consommation énergétique et la courbe de charge, Q_h , obtenue par régression. La Figure 2.22 (b) montre l'équivalent de la Figure 2.22 (a) obtenue en utilisant la température en évolution libre calculée avec les équations (2.92) et (2.93).

2.2.2.4 Évaluation de la performance énergétique en utilisant la température en évolution libre

La température en évolution libre peut remplacer la courbe de charge dans l'évaluation de la consommation énergétique. Elle peut être utilisée dans des méthodes comme degrés – jours, pour évaluer l'adéquation climatique des systèmes de chauffage / ventilation / climatisation ou pour estimer le potentiel de refroidissement par ventilation (Ghiaus 2003; Germano, Ghiaus et al. 2005; Ghiaus and Allard 2006).

Les courbes de charge pour le chauffage et la climatisation sont montrées sur la Figure 2.23 (a). La droite de régression Q_h représente la courbe de charge de chauffage. La courbe de charge pour la climatisation est plus difficile à estimer due à la dispersion des données qui rend le résultat incertain (Yik and Wan 2005). La dispersion des données est produite par les taux variables de renouvellement d'air utilisés en free-cooling. Comme le bâtiment est le même, on peut supposer que la pente de la charge de climatisation est la même que celle de chauffage (la conductance thermique est la même) mais la température de non chauffage est biaisée avec $T_{cu} - T_{cl}$. En conséquence, la courbe de charge de climatisation, Q_{ch} , est parallèle à celle de chauffage, Q_h , mais biaisée pour passer par le centre de gravité de nuage des points.

Les températures en évolution libre obtenues en utilisant l'équation (2.92) pour le nuage de points et l'équation (2.93) pour la droite de régression, sont montées sur la Figure 2.23 (b). Mathématiquement équivalente à la Figure 2.23 (a), cette représentation montre dans une forme condensée la performance énergétique du bâtiment en régime de chauffage, de ventilation et de climatisation.

2.2.2.5 Conclusion

La courbe de charge peut être utilisée conjointement avec la fréquence de distribution de la température extérieure pour déterminer la consommation énergétique d'un bâtiment dans des différents localisations géographiques ou pour le même emplacement mais avec des données météorologiques différentes. L'erreur introduite en utilisant la courbe de charge à la place de la somme des consommations énergétiques est inférieure à 5%. Ces propriétés rendent la courbe de charge utile dans trois applications : 1) la spécification et la vérification des performances énergétiques, 2) l'estimation de la demande énergétique d'un bâtiment dans une autre localisation géographique et 3) la comparaison de la demande énergétique pour des périodes de temps différents. Comme la courbe de charge est une caractéristique du bâtiment indépendante du climat, elle peut être utilisée comme un critère de performance requis dans la phase de conception et vérifiable dans la phase d'exploitation. La courbe de charge obtenue expérimentalement pour un bâtiment peut être utilisée pour estimer la demande énergétique de celui-ci dans un autre climat ; cette information peut être très utile pour estimer la faisabilité d'un bâtiment exemplaire dans un autre contexte. La même courbe de charge peut être utilisée pour estimer la consommation énergétique dans le futur ce qui peut être utilisé dans les contrats d'exploitation des équipements techniques des bâtiments.

Le principal désavantage de la courbe de charge est qu'elle caractérise seulement les régimes de chauffage et de climatisation mais pas celui de ventilation et qu'elle ne montre pas explicitement le domaine de la température de confort. La température en évolution libre donne la même information que la courbe de charge. L'avantage d'utiliser la température en évolution libre est qu'elle décrit le comportement thermique du bâtiment en le découplant de la température de confort et des données météorologiques. En utilisant la température en évolution libre, la température de confort et la distribution des fréquences de la température extérieure, on peut estimer la demande énergétique d'une manière équivalente à la méthode des degrés-jours appliquée sur des intervalles de temps et de température extérieure (la méthode *bin*).

2.2.3 Température d'évolution libre et adéquation climatique des systèmes

Cette section est basée sur l'article :

C. Ghiaus (2003). Free-running building temperature and HVAC climatic suitability. *Energy and Buildings*, 35(4), 405-411

doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00110-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00110-X)

Les décisions prises dans les phases initiales de la conception architecturale du bâtiment ont une grande influence sur la demande et l'efficacité énergétique. Au cours de cette phase, les architectes et les ingénieurs doivent manipuler des concepts communs qui révèlent l'influence du bâtiment, du critère de confort et du climat sur la demande énergétique. On propose d'utiliser ici le concept de température en évolution libre, qui combinée avec les critères de confort et avec le climat nous permet d'évaluer la part de la demande pour le chauffage et la climatisation. En se basant sur ce concept et sur la distribution de probabilité des valeurs de la température extérieure, on a développé une méthode qui indique les besoins en chauffage et climatisation et donne une mesure de l'économie d'énergie de climatisation obtenue en utilisant le refroidissement par ventilation. Cette méthode précise également la charge pour laquelle les systèmes de chauffage et de climatisation doivent être dimensionnés pour obtenir une efficacité maximale et elle indique la faisabilité de la ventilation naturelle par effet de tirage thermique. Les données météorologiques nécessaires pour cette méthode proviennent des études satellitaires et sont disponibles dans le domaine public.

Mots clés : degrés – heure, conception architecturale, estimation et efficacité énergétique

2.2.3.1 Introduction

La conception architecturale a une influence importante sur la demande énergétique des bâtiments. Les décisions prises dans les premières phases de la conception influencent et limitent les solutions de chauffage, de ventilation et de climatisation. Dans les phases initiales de la conception, les architectes et les ingénieurs doivent analyser les différentes solutions avec des méthodes qui demandent peu de temps pour acquérir les données, préparer les entrées, faire les calculs et analyser les résultats. Ces méthodes ne doivent pas être particulièrement précises, mais elles doivent permettre le choix correct des solutions de chauffage, de ventilation et de climatisation. Il est préférable que les concepts utilisés aient une signification simple et commune pour l'architecte et pour l'ingénieur et qu'ils montrent l'effet des choix des solutions sur la demande énergétique.

La plus grande partie des logiciels de simulation du comportement thermique du bâtiment résolvent seulement des problèmes "fermés". Ils répondent aux questions du type "*que se passe-t-il si ...*" : quel sera le résultat si ce paramètre prend cette valeur. C'est le principe des logiciels de simulation tels que DOE-2, BLAST, COMIS et TRNSYS, logiciels qui sont utiles

dans la phase d'évaluation des performances quand la conception est finalisée. Ces logiciels peuvent aider le concepteur à estimer la consommation annuelle d'énergie mais ils ne peuvent pas l'aider à concevoir des solutions qui améliorent les performances énergétiques (Deng and Burnett 2000). Dans les phases initiales du projet, le problème de conception est ouvert. On doit répondre aux questions du type "*qu'est-ce on doit faire*" : Concevoir le bâtiment pour utiliser la ventilation naturelle pour le refroidissement ou installer un système d'air conditionné ? Augmenter la masse thermique ? Quelle sera l'influence du critère de confort choisi ? Dans les phases initiales de conception, quand les architectes prennent des décisions qui répondent implicitement à ces questions, ils peuvent avoir ou pas de support technique. Souvent, les ingénieurs interviennent dans le projet après que la forme, l'orientation, le fenêtrage, et les matériaux de construction aient été choisis. Il est important d'avoir un outil qui peut répondre aux problèmes ouverts dans la phase d'esquisse. Dans cette section on propose une méthode d'estimation de la faisabilité de la ventilation naturelle pour le refroidissement basée sur la température en évolution libre.

L'évaluation de la performance énergétique est basée sur trois facteurs : la caractéristique thermique de bâtiment, le confort et le climat. Le premier facteur peut être synthétisé par la température intérieure en évolution libre. Le deuxième facteur, le confort thermique, est caractérisé par un domaine de variation de la zone neutre de température intérieure qui varie avec la température extérieure moyenne. Cette zone de neutralité est plus large dans les bâtiments qui utilisent la ventilation naturelle que dans ceux qui utilisent de l'air conditionné. Le climat peut être caractérisé par la distribution des fréquences ou par la distribution de probabilité de la température extérieure.

2.2.3.2 Méthode

La faisabilité climatique des systèmes de chauffage et de conditionnement de l'air est une mesure de l'énergie nécessaire pour le chauffage et le refroidissement et de l'énergie de climatisation économisée en utilisant la ventilation. Le climat doit être pris en compte en relation avec le comportement thermique du bâtiment et le confort désiré. La présence des forces motrices pour la ventilation (le vent et le tirage thermique) est également importante. La méthode proposée ci-dessous prend en compte ces aspects, à l'exception du vent.

2.2.3.2.1 Température en évolution libre

Un bâtiment en évolution libre n'utilise ni le chauffage ni la climatisation. En plus, on va considérer que la température en évolution libre est définie pour le taux minimal réglementaire de renouvellement d'air. Avec ces hypothèses, on peut accepter que, pour un mois donné de l'année, la température en évolution libre dépend de l'heure de la journée (Figure 2.24).

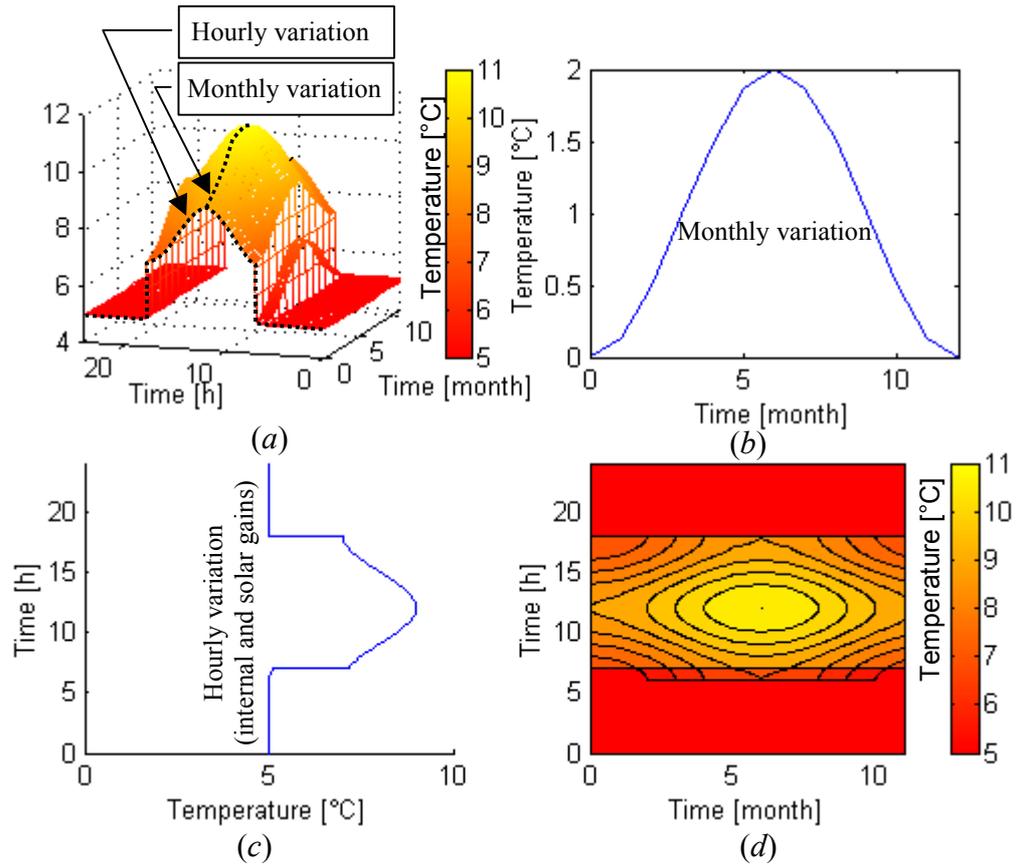


Figure 2.24 Différence horaire et mensuelle entre la température intérieure d'un bâtiment en évolution libre et la température extérieure : a) représentation 3D, b) variation mensuelle, c) variation horaire, d) effets cumulés des variations mensuelles et horaires.

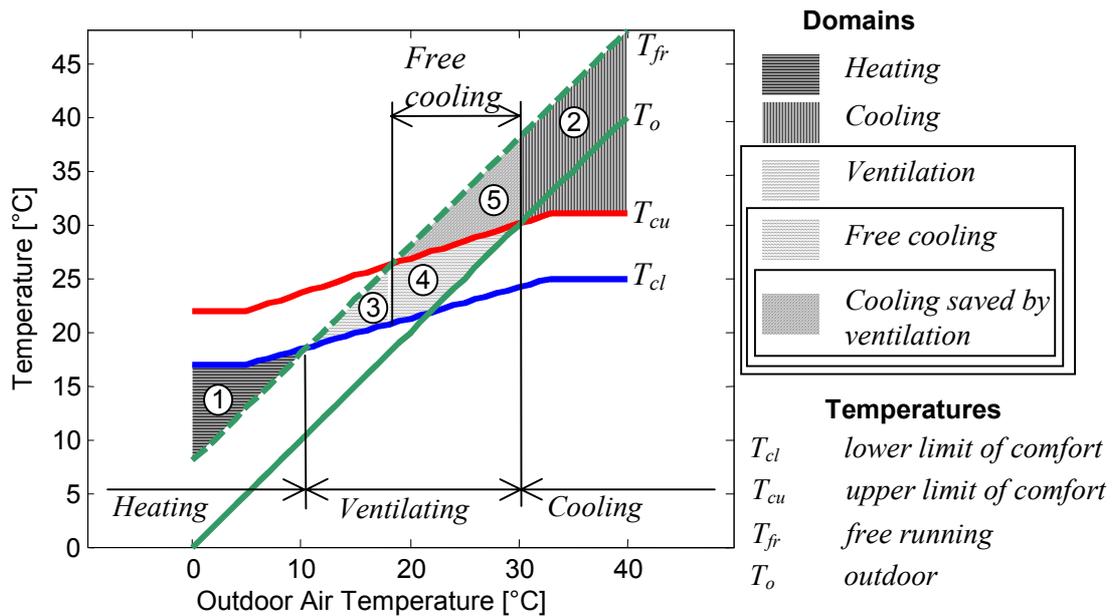


Figure 2.25 Domaines de chauffage, de ventilation et de climatisation

2.2.3.2.2 Confort adaptatif

Le confort thermique présente une zone neutre qui est marquée sur la Figure 2.25 par la limite inférieure, T_{cl} , et la limite supérieure, T_{cu} , de confort. Ces limites varient avec la température extérieure moyenne mensuelle. Tout porte à croire en effet que le confort thermique dans les bâtiments avec de la ventilation naturelle présente une zone neutre plus large que celle considérée dans les normes ISO 7730 et ASHRAE 55 (Fountain, Brager et al. 1996; Brager and de Dear 1998; Sayigh and Marafía 1998; de Dear 1999; Nicol 2001).

2.2.3.2.3 Domaines de chauffage, de ventilation et de climatisation

En utilisant la température intérieure du bâtiment en évolution libre, la température extérieure et le domaine de confort, on peut définir les domaines correspondants aux stratégies de chauffage, de ventilation et de climatisation comme des expressions binaires (Figure 2.25).

Le chauffage est nécessaire quand la température en évolution libre est au-dessous de la limite inférieure de confort,

$$\delta_h = \begin{cases} 1, & \text{si } T_{fr} < T_{cl} \\ 0, & \text{si } T_{fr} \geq T_{cl} \end{cases} \quad (2.94)$$

La climatisation est nécessaire quand la température extérieure et celle en évolution libre sont plus grandes que la limite supérieure de confort,

$$\delta_c = \begin{cases} 1, & \text{si } T_{fr} > T_{cu} \text{ et } T_o > T_{cu} \\ 0, & \text{si non.} \end{cases} \quad (2.95)$$

La ventilation peut être utilisée entre le chauffage et la climatisation. Quand le débit d'air fourni par la ventilation mécanique ou naturelle est supérieur au débit minimal pour assurer la qualité de l'air, la température intérieure peut être variée de T_{fr} à $\max(T_o, T_{cl})$. La ventilation est applicable pour les zones 3, 4 et 5 (Figure 2.25),

$$\delta_v = \begin{cases} 1, & \text{si } T_{fr} > T_{cl} \text{ et } T_o < T_{cu} \\ 0 & \end{cases} \quad (2.96)$$

Pour la zone 5, si le bâtiment est maintenu fermé, alors la climatisation serait nécessaire. Mais l'utilisation de la ventilation peut modifier le débit d'air et la température intérieure peut varier entre la température en évolution libre et, à la limite, la température extérieure,

$$\delta_{fc} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_{fr} > T_{cu} \text{ et } T_o < T_{cu} \\ 0, & \text{si non.} \end{cases} \quad (2.97)$$

Ces domaines sont indiqués sur la Figure 2.23 (b) où on peut observer que le potentiel de refroidissement par ventilation (*free-cooling*) n'est pas utilisé entièrement (il y a beaucoup de points représentant la climatisation dans la zone de refroidissement par ventilation).

2.2.3.2.4 Fréquence de distribution de degré – temps pour

Une mesure de la demande énergétique dans un climat, similaire à la méthode basée sur des intervalles (ASHRAE 2001), peut être obtenue en utilisant les domaines montrés sur la Figure 2.25 . La variation de la température en évolution libre, T_{fr} , en fonction de la température extérieure, T_o , peut être définie pour un intervalle de temps de la journée d'un mois de l'année. Alors, le produit entre la différence de température et la fréquence probable de cette différence, $N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T_o)$, donne une distribution de probabilité. Son unité de mesure est le degré – temps, où le temps a la valeur de l'intervalle de temps (typiquement 1 ou 3 heures).

La densité de probabilité est la limite de la densité relative quand le nombre de valeurs de la variable tend vers l'infini :

$$\text{Pr} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{f}{N} \right) \quad (2.98)$$

Pour une distribution discrète ayant des intervalles de température T_{bin} , la probabilité que la température soit dans l'intervalle délimité par $T - T_{bin}/2$ et $T + T_{bin}/2$, $T \in \{T_{min}, T_{min} + T_{bin}, T_{min} + 2T_{bin}, \dots\}$ est :

$$\text{Pr}(T, T \in [T - T_{bin}/2, T + T_{bin}/2]) = T_{bin} \cdot P_{df}(T) \quad (2.99)$$

La fréquence probable de la variable T dans l'intervalle $[T - T_{bin}/2, T + T_{bin}/2]$ est :

$$F(T) = N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T) \quad (2.100)$$

Pour tout le domaine de variation de la température extérieure, $\mathbf{T}_o = [T_{o1} \ T_{o2} \ \dots \ T_{ok}]^T$, les fréquences probables sont $\mathbf{F} = [F(T_{o1}) \ F(T_{o2}) \ \dots \ F(T_{ok})]^T$. Cette définition est équivalente à celle donnée par l'équation (2.80). Les fréquences peuvent être des valeurs mesurées (voir section 2.2.2) ou calculées à partir de la distribution de probabilité (voir équation (2.100)).

La zone 1 dans la Figure 2.25 est reliée à l'énergie nécessaire pour le chauffage. La distribution de la fréquence pour le chauffage, \mathbf{F}_h , calculée à partir de la distribution de probabilité est :

$$F_h(t, T_o) = N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T_o) \cdot (T_{cl} - T_{fr}) \cdot \delta_h \quad (2.101)$$

La zone 2 est reliée à l'énergie nécessaire pour la climatisation. La distribution de la fréquence pour la climatisation, \mathbf{F}_c , calculée à partir de la distribution de probabilité est :

$$F_c(t, T_o) = N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T_o) \cdot (T_{fr} - T_{cu}) \cdot \delta_c \quad (2.102)$$

La zone 5 est reliée à l'énergie de climatisation économisée grâce à la ventilation. La distribution de fréquences pour le refroidissement par *free-cooling*, \mathbf{F}_{fc} , exprimée en fonction de la distribution de probabilité, $P_{df}(T_o)$, est :

$$F_{fc}(t, T_o) = N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T_o) \cdot (T_{fr} - T_{cu}) \cdot \delta_{pc} \quad (2.103)$$

Les distributions de fréquence de chauffage, \mathbf{F}_h , de ventilation, \mathbf{F}_v , et de climatisation \mathbf{F}_c , représentent les nombres d'occurrences de la température extérieure pour lesquelles les relations (2.94), (2.96), et (2.95) sont satisfaites. Un exemple de distribution des fréquences, \mathbf{F}_h , \mathbf{F}_v , et \mathbf{F}_c est montrée sur la Figure 2.23 (c). La température en évolution libre, \mathbf{T}_{fr} , le domaine de confort, \mathbf{T}_{cl} et \mathbf{T}_{cu} , et les distributions de fréquences, \mathbf{F}_h , \mathbf{F}_v , et \mathbf{F}_c , peuvent être utilisées pour l'estimation de la consommation énergétique (Ghiaus 2003; Ghiaus and Allard 2005). La distribution de fréquences des degrés – heures pour le chauffage dans des intervalles de température extérieure est :

$$\mathbf{F}_{DHh} = \mathbf{F}_h * (\mathbf{T}_{cl} - \mathbf{T}_{fr}) \quad (2.104)$$

pour la climatisation est :

$$\mathbf{F}_{DHc} = \mathbf{F}_c * (\mathbf{T}_{fr} - \mathbf{T}_{cu}) \quad (2.105)$$

et pour refroidissement par ventilation est :

$$\mathbf{F}_{DHfc} = \mathbf{F}_{fc} * (\mathbf{T}_{fr} - \mathbf{T}_{cu}) \quad (2.106)$$

En multipliant les équations (2.104), (2.105), et (2.106) par \bar{K} , on obtient la distribution des fréquences de la demande énergétique pour le chauffage, la climatisation et les économies obtenues en utilisant le refroidissement par ventilation à la place de la climatisation.

L'énergie totale de chauffage est :

$$Q_h = \mathbf{F}_h \times \bar{K} (\mathbf{T}_{cl} - \mathbf{T}_{fr}), \quad (2.107)$$

et de climatisation est :

$$Q_c = F_c \times \bar{K}(T_{fr} - T_{cu}). \quad (2.108)$$

L'énergie totale de climatisation qui peut être économisée par la ventilation est :

$$Q_{fc} = F_{fc} \times \bar{K}(T_{fr} - T_{cu}). \quad (2.109)$$

2.2.3.2.5 Distribution des fréquences de degrés – temps pour le tirage thermique

L'avantage d'utiliser la ventilation naturelle pour le refroidissement est que celle-ci véhicule des débits d'air très importants sans consommation d'énergie. La ventilation naturelle utilise deux forces motrices : le vent et le tirage thermique. L'adéquation climatique de l'utilisation de la ventilation naturelle peut être évaluée à partir de la différence de pression statique entre deux ouvertures séparées sur la verticale par la distance h :

$$\Delta p_s = \rho_i g h (T_i - T_o) / T_o \quad (2.110)$$

où :

Δp_s la différence de pression statique, Pa

ρ densité de l'air, kg/m³

g accélération de la pesanteur, 9.81m/s²

h hauteur, m

T température moyenne, K

indices :

i intérieure

o extérieure.

Le tirage thermique est proportionnel à $(T_{cu} - T_o) / T_o$. Pour le domaine de variation de la température dans la ventilation naturelle on peut approximer, avec une erreur inférieure à 5%, que le tirage thermique est proportionnel à $T_{cu} - T_o$. La distribution des fréquences de $(T_{cu} - T_o) / T_o$ ou $T_{cu} - T_o$ donne une mesure de l'applicabilité du tirage thermique :

$$F_{se}(t, T_o) = N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T_o) \cdot (T_{cu} - T_o) / T_o \cdot \delta_{fc} \quad (2.111)$$

ou

$$F_{se}(t, T_o) = N \cdot T_{bin} \cdot P_{df}(T_o) \cdot (T_{cu} - T_o) \cdot \delta_{fc} \quad (2.112)$$

Les distributions de fréquence des degrés – heures pour le chauffage, la climatisation et le refroidissement économisé par ventilation nous permettent d'évaluer l'adéquation climatique des solutions techniques. La distribution de fréquence des degrés – heures pour le tirage thermique donne une indication sur l'applicabilité de l'effet de cheminée pour la ventilation naturelle.

2.2.3.3 Interprétation des résultats

Si on connaît la température intérieure du bâtiment en évolution libre, le domaine de confort thermique et la distribution horaire de la température intérieure, on peut calculer la distribution des fréquences de degrés – heures pour le chauffage et la climatisation. A cet égard, la méthode présentée précédemment est équivalente à la méthode des intervalles, *bin method* (ASHRAE 2001). L'avantage d'utiliser cette méthode est qu'on obtient des résultats qui indiquent la température extérieure pour laquelle l'efficacité énergétique d'un système de chauffage et/ou climatisation doit avoir l'efficacité maximale. Une autre information importante concerne l'énergie économisée pour le refroidissement quand on utilise la ventilation et l'adéquation de l'effet de tirage thermique. Cette approche peut être utilisée pour un bâtiment neuf ou pour évaluer la performance énergétique d'un bâtiment existant si celui-ci était construit dans un autre lieu.

Pour illustrer la méthode, nous considérons un bâtiment caractérisé par la différence entre la température extérieure et celle intérieure en évolution libre donnée sur la Figure 2.24, et le confort adaptatif donné sur la Figure 2.25. Pour ce bâtiment, on considère deux emplacements le long du parallèle 45° Nord : La Rochelle, France, et Belgrade, Serbie (Figure 2.26). Les distributions de fréquence des degrés – heures pour le chauffage, la climatisation, le refroidissement par ventilation et le tirage thermique sont donnée sur la Figure 2.27 et Figure 2.28 pour La Rochelle et pour Belgrade, respectivement. Leurs intégrales sur une année sont données dans le Tableau 2.13.

En ce qui concerne le chauffage, on note que la demande d'énergie pour le bâtiment considéré est deux fois plus importante à Belgrade qu'à La Rochelle (Tableau 2.13). Un système de chauffage devrait avoir l'efficacité maximale pour une température extérieure d'approximativement -5 °C à Belgrade et 5 °C à La Rochelle. A La Rochelle, la demande de chauffage est beaucoup plus importante pendant la nuit que pendant la journée, ceci est une information importante pour les bâtiments qui fonctionnent en intermittence.

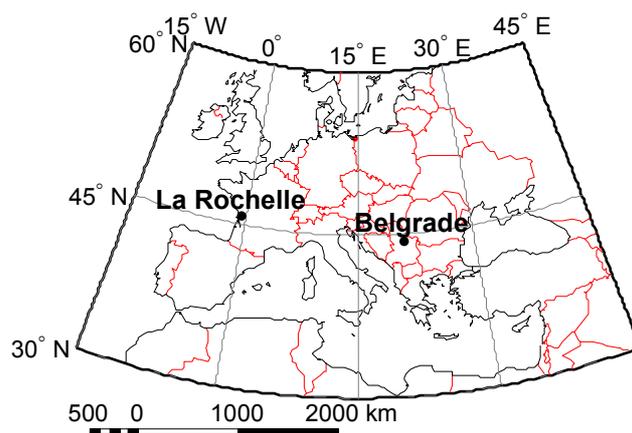


Figure 2.26 Sites choisis

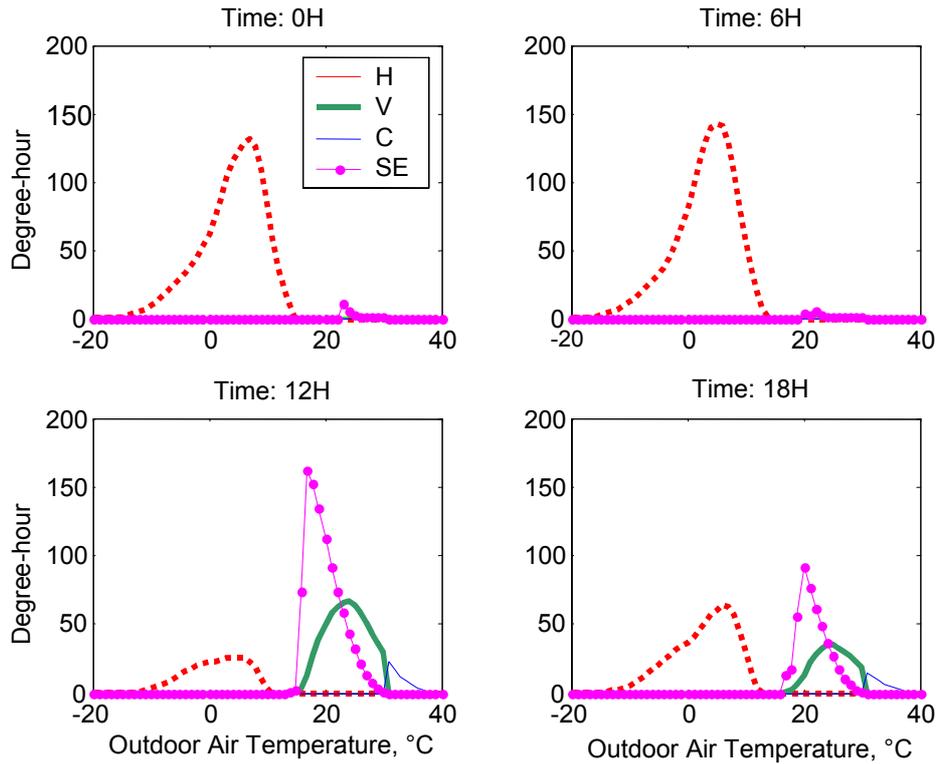


Figure 2.27 Distribution des fréquences des degrés – heures pour le chauffage (H), la climatisation (C), le refroidissement par ventilation (V) et le tirage thermique (SE) obtenue à La Rochelle, France.

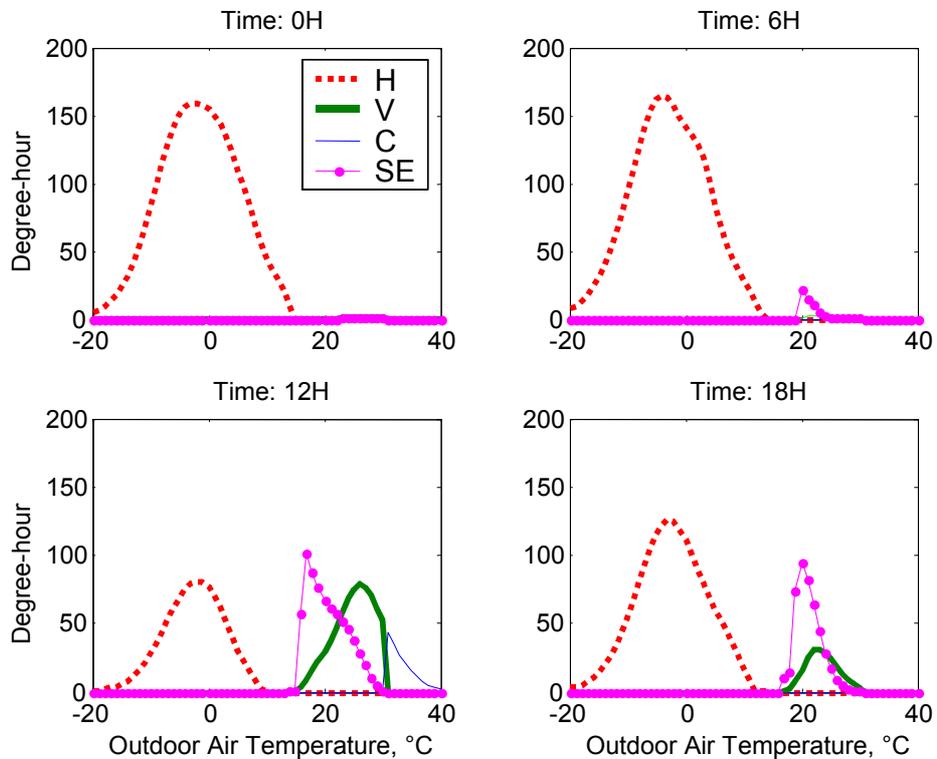


Figure 2.28 Distribution des fréquences de degrés – heures obtenue à Belgrade, Yougoslavie.

Tableau 2.13 Degrés – heures annuels à 0h, 6h, 12h et 18h pour deux sites sur le parallèle de 45° Nord.

	Heure				Total
	00	06	12	18	
<i>Chauffage</i>					
La Rochelle	1560	1631	350	770	4311
Belgrade	2883	2738	1059	1871	8551
<i>Climatisation</i>					
La Rochelle	0	0	73	53	126
Belgrade	0	0	171	3	174
<i>Free-Cooling</i>					
La Rochelle	5	2	670	306	983
Belgrade	0	12	708	213	933
<i>Effet de tirage thermique</i>					
La Rochelle	20	14	983	464	1481
Belgrade	1	56	710	444	1211

En ce qui concerne le refroidissement, on observe que les sommes totales de degrés–heures sont similaires (Tableau 2.13) ; mais les distributions des fréquences sont différentes. A La Rochelle, la distribution est plus dispersée sur la journée qu'à Belgrade (à comparer Figure 2.27 et Figure 2.28 à 12h et à 18h). En conséquence, si un système de climatisation est utilisé, sa puissance installée à La Rochelle peut être la moitié de celle installée à Belgrade. Si une solution de ventilation naturelle par effet de tirage thermique était envisagée, alors cet effet serait d'environ 1,5 fois plus important à La Rochelle qu'à Belgrade. Dans les deux villes, la ventilation par effet de tirage thermique ne peut pas être utilisée pour le refroidissement pour tout le domaine de variation de la température extérieure. Pour éviter la climatisation, une alternative serait de changer la masse thermique pour diminuer le domaine de variation de la température intérieure en évolution libre.

2.2.3.4 Données climatiques

La méthode présentée ci-dessus nous permet d'évaluer l'adéquation climatique quand nous connaissons la caractéristique thermique du bâtiment (c.-à-d. la température intérieure en évolution libre), la zone de confort et les données climatiques (c.-à-d. la densité de probabilité de la température extérieure). La température en évolution libre peut être calculée pour les bâtiments neufs et mesurée pour les bâtiments existants. Le domaine de variation de la température de confort constitue un choix du concepteur. Les données météorologiques peuvent être obtenues auprès des services météorologiques. Une alternative est d'utiliser les moyennes mensuelles fournies par le centre Global Resource Information Database (GRID) de Genève, membre du Programme des Nations Unis pour l'Environnement (UNEP). Les valeurs moyennes et les écarts type de la température pour des intervalles de 3 heures pour chaque mois sont librement disponible auprès de International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Initiative.

La base de données utilisée pour l'implémentation de cette méthode est Climate Database version 2.1 créée par International Institute for Applied System Analyses (IIASA) Laxenburg, Autriche (Leemans 1991). Cette base a été construite en utilisant des enregistrements sur au moins cinq ans entre 1930 et 1960. Les données provenant de huit sources ont été standardisées, classées, sélectionnées, interpolées pour correspondre à 0,5° de latitude. La base de données IIASA est considérée fiable à l'échelle régionale, malgré quelques inconsistances.

La moyenne et l'écart type de la température pour chaque mois aux intervalles de 3 heures ont été obtenues à partir de la base de donnée International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP). Les données ont été représentées initialement sur une grille de 320 x 160 points avec un espacement de 1.125 degrés de latitude et longitude pour la période du 1 janvier 1987 au 31 décembre 1988. Les valeurs de surface proviennent des modèles de simulation, corrigées par des observations de surface et par des informations "a priori" sur le climat.

2.2.3.5 Conclusions

L'adéquation climatique des solutions de chauffage, de ventilation et de climatisation dépend du comportement thermique du bâtiment, du confort thermique et du climat. Dans les phases initiales de la conception, les décisions sont prises en utilisant peu des données. La différence entre la température intérieure en évolution libre et la température extérieure est une caractéristique synthétique du comportement thermique du bâtiment. Cette différence de température peut être mesurée dans les bâtiments existants ou elle peut être calculée pour les nouveaux bâtiments. L'adéquation du climat au refroidissement par ventilation dépend de l'énergie de climatisation économisée en utilisant la ventilation. L'économie d'énergie peut être estimée en utilisant la distribution des fréquences de la différence entre la température du bâtiment en évolution libre et la limite supérieure de la température de confort.

2.2.3.6 Remerciements

Ce travail de recherche a été soutenu par la Commission Européenne dans le cadre du projet de recherche "URBVENT - Natural ventilation in urban areas" du 5^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement. On est reconnaissant à J. Axley, professeur à Yale University, Etats-Unis, pour le soutien apporté pendant son année sabbatique à l'Université de La Rochelle financé par la Région Poitou-Charentes.

2.2.4 Références

- ASHRAE (2001). Energy Estimating and Modeling Methods. *ASHRAE Fundamentals*.
- ASHRAE (2001). Nonresidential cooling and heating load calculation procedures. *ASHRAE Fundamentals*.
- ASHRAE (2001). Thermal and water vapor transmission data. *ASHRAE Fundamentals*.
- Axley, J. (2001). Application of Natural Ventilation for U.S. Commercial Buildings, NIST: 146.
- Bauer, M. and J.-L. Scartezzini (1998). "A simplified correlation method accounting for heating and cooling loads in energy-efficient buildings." *Energy and Buildings* **27**(2): 147-154.
- Botsaris, P. N. and S. Prebezanos (2004). "A methodology for thermal energy building audit." *Building and Environment* **39**.
- Brager, G. and R. de Dear (1998). "Thermal adaptation in the built environment: a literature review." *Energy and Buildings* **27**: 83-96.
- CIBSE (1996). *Energy savings in buildings - General information leaflet 50*, Crown.
- CSTB (2000). Les règles Th-U. *Réglementation Thermique 2000*.
- Dahlsveen, T. and D. Petras (2003). *Energetický audit budov*, Jaga Group.
- de Dear, R. (1999). Adaptive thermal comfort in natural and hybrid ventilation. Sydney, Australia, International Energy Agency, Annex 35 Energy conservation in buildings and community systems.
- Deng, S.-M. and J. Burnett (2000). "A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong." *Energy and Buildings* **31**(1): 7-12.
- Dong, B., S. E. Lee and M. H. Sapar (2005). "A holistic utility bill analysis method for baselining whole commercial building energy consumption in Singapore." *Energy and Buildings* **37**(2): 167-174.
- Elkhuizen, P. A., H. C. Peitsman and W. J. Wienk (2003). "A new design guideline for the heating and cooling curve in AHU units of HVAC systems." *Building Services Engineering Research and Technology* **24**(3): 191-202.
- Ellis, M. W. and E. H. Mathews (2001). "A new simplified thermal design tool for architects." *Building and Environment* **36**(9): 1009-1021.
- Evans, M., N. Hastings and B. Peacock (2000). *Statistical distributions*. New York, J. Wiley & sons.
- Fountain, M., G. Brager and R. deDear (1996). "Expectations of indoor climate control." *Energy and Buildings* **24**: 179-182.
- Germano, M., C. Ghiaus, C.-A. Roulet and F. Allard (2005). "Natural ventilation potential of urban buildings." *International Journal of Ventilation* **4**: 49-56.
- Ghiaus, C. (2003). "Free-running building temperature and HVAC climatic suitability." *Energy and Buildings* **35**(4): 405-411.
- Ghiaus, C. and F. Allard (2005). "Potential for free-cooling by ventilation." *Solar Energy in press*.
- Ghiaus, C. and F. Allard (2006). "Potential for free-cooling by ventilation." *Solar Energy* **80**(4): 402-413.
- González, P. A. and J. M. Zamarreño (2005). "Prediction of hourly energy consumption in buildings based on a feedback artificial neural network." *Energy and Buildings* **37**(6): 595-601.
- Hammarsten, S. (1987). "A critical appraisal of energy-signature models." *Applied Energy* **26**(2): 97-110.

- Heras, M. R., M. J. Jiménez, M. J. S. Isidro, L. F. Zarzalejo and M. Pérez (2004). "Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept." *Solar Energy* **78**(1): 85-96.
- Isakson, H. R. (1983). "Residential space heating : An analysis of energy conservation." *Energy Economics* **5**(1): 49-57.
- Jimenez, M. J. and M. R. Heras (2004). "Application of multi-output ARX models for estimation of U and g values of building components in outdoor testing." *Solar Energy* **79**(3): 302-310.
- Laub, A. J., M. T. Heath, C. C. Paige and R. C. Ward (1987). "Computation of system balancing transformations and other applications of simultaneous diagonalization algorithms." *IEEE Trans. Automatic Control* **32**: 115-122.
- Leemans, R., W. Cramer (1991). The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness of a global terrestrial grid. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Leftheriotis, G. and P. Yianoulis (2000). "Thermal properties of building materials." *Solar Energy* **69**(4): 295-304.
- Levermore, G. J. (1995). "Performance lines and energy signatures - Analysis with respect to the CIBSE Building Energy Code." *Building Services Engineering Research and Technology* **16**(1): 47-50.
- Lundin, M., S. Andersson and R. Östin (2004). "Development and validation of a method aimed at estimating building performance parameters." *Energy and Buildings* **36**(9): 905-914.
- Lundin, M., S. Andersson and R. Östin (2005). "Further validation of a method aimed to estimate building performance parameters." *Energy and Buildings* **37**(8): 867-871.
- Marchio, D. and A. Rabl (1991). "Energy-efficient gas-heated housing in France: predicted and observed performance." *Energy and Buildings* **17**(2): 131-139.
- Moore, B. (1981). "Principal component analysis in linear systems: controllability, observability, and model reduction." *IEEE Transactions on Automatic Control* **26**: 17-31.
- Nicol, F. J. (2001). *Characterizing occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans*. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- Nouwynck, J., P.-P. Hermoye and L. Vercruyssen (1990). "Analysis of fuel consumption in a building estate." *Energy and Buildings* **14**(3): 243-247.
- O'Sullivan, D. T. J., M. M. Keane, D. Kelliher and R. J. Hitchcock (2004). "Improving building operation by tracking performance metrics throughout the building lifecycle (BLC)." *Energy and Buildings* **36**(11): 1075-1090.
- Olofsson, T., S. Andersson and R. Östin (1998). "A method for predicting the annual building heating demand based on limited performance data." *Energy and Buildings* **28**(1): 101-108.
- Parnell, R. and O. P. Larsen (2005). "Developing the home energy report: An everyday householder-centred approach." *Energy and Buildings* **37**(10): 1092-1103.
- Pfafferott, J., S. Herkel and M. Jäschke (2003). "Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements." *Energy and Buildings* **35**(11): 1129-1143.
- Pfafferott, J., S. Herkel and J. Wapler (2005). "Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models." *Energy and Buildings* **37**(8): 844-852.
- Rabl, A. and A. Rialhe (1992). "Energy signature models for commercial buildings: test with measured data and interpretation." *Energy and Buildings* **19**(2): 143-154.

- Richalet, V., F. P. Neirac, F. Tellez, J. Marco and J. J. Bloem (2001). "HELP (house energy labeling procedure): methodology and present results." *Energy and Buildings* **33**(3): 229-233.
- Roulet, C.-A., J.-R. Millet, H. vanDijk and M. Speikman (2004). Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, European Standard: 92.
- Roulet, C.-A., J.-R. Millet, H. vanDijk and M. Speikman (2004). Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling CEN/TC 89 N 974 E, European Standard: 92.
- Sayigh, A. and A. H. Marafia (1998). "Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2**(1-2): 3-24.
- Shaviv, E., A. Yezioro, I. G. Capeluto (2001). "Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy." *Renewable Energy* **24**: 445-452.
- Virk, G. S., J. Y. M. Cheung and D. L. Loveday (1995). "Practical stochastic multivariable identification for buildings." *Applied Mathematical Modelling* **19**(10): 621-636.
- Wannacott, T. H. and R. J. Wannacott (1990). *Introductory statistics for business and Economics*. New York, J. Wiley & Sons.
- Westergren, K.-E., H. Högberg and U. Norlén (1999). "Monitoring energy consumption in single-family houses." *Energy and Buildings* **29**(3): 247-257.
- Yang, J., H. Rivard and R. Zmeureanu (2005). "On-line building energy prediction using adaptive artificial neural networks." *Energy and Buildings* **37**(12): 1250-1259.
- Yannas, S. (1996). "Energy indices and performance targets for housing design." *Energy and Buildings* **23**(3): 237-249.
- Yik, F. W. H. and K. S. Y. Wan (2005). "An evaluation of the appropriateness of using overall thermal transfer value (OTTV) to regulate envelope energy performance of air-conditioned buildings." *Energy* **30**: 41-71.
- Zmeureanu, R. (1990). "Assessment of the energy savings due to the building retrofit." *Building and Environment* **25**(2): 95-103.
- Zmeureanu, R. and P. Fazio (1991). "Analysis of the energy performance of office buildings in Montreal in 1988." *Energy and Buildings* **17**(1): 131-139.
- Zmeureanu, R., P. Fazio, S. DePani and R. Calla (1999). "Development of an energy rating system for existing houses." *Energy and Buildings* **29**(2): 107-119.

2.3 Contrôle automatique des systèmes

2.3.1 Identification de type "boîte grise" des centrales de traitement d'air

Cette section est basée sur l'article :

C. Ghiaus, A. Chicinas, C. Inard (2006). Grey-box identification of air-handling unit elements. *Control engineering practice*, (sous la presse)

doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.08.005>

et sur des résultats obtenus pendant la thèse d'A. Chicinas que j'ai co-encadré.

Les modèles des composants des centrales de traitements d'air, CTA, sont non linéaires et les variables réglées, la température et l'humidité relative, sont couplées. Cette section démontre que dans le cas de l'échange thermique sensible sans déshumidification si les sorties des batteries électriques, de batterie à eau et des humidificateurs à vapeur d'une centrale de traitement d'air sont considérées les différences entre la température de l'air et le poids d'eau entre la sortie et l'entrée, alors les modèles peuvent être écrits comme le produit d'un gain statique non-linéaire et d'une fonction de transfert linéaire. Les paramètres de l'équivalent discret de ces modèles sont expérimentalement identifiés. La dynamique des équipements de la CTA et des capteurs est très semblable. Ainsi, l'identification des éléments de la CTA prend en compte le modèle du capteur, précédemment identifié. Cette approche de type "boîte-grise" combine la modélisation théorique, l'identification des paramètres des modèles discrets et l'identification des paramètres des modèles partiellement connus en employant des techniques d'optimisation.

2.3.1.1 Introduction

Dans les bâtiments climatisés les centrales de traitements l'air (CTA) sont employées pour contrôler un ou plusieurs des paramètres de l'air soufflé. Généralement il s'agit de la température, θ_{sa} , et de l'humidité relative, ϕ_{sa} , de l'air. Ces systèmes peuvent être à débit d'air constant ou variable. Les systèmes à débit d'air constant ont des ventilateurs à vitesse fixe et contrôlent la température et l'humidité du bâtiment en faisant varier la température et l'humidité de l'air soufflé. Dans les systèmes à débit variable, on contrôle le débit de l'air. Dans ce qui suit, on va considérer le cas d'une CTA à débit constant dont on veut contrôler simultanément la température et l'humidité de l'air de soufflage.

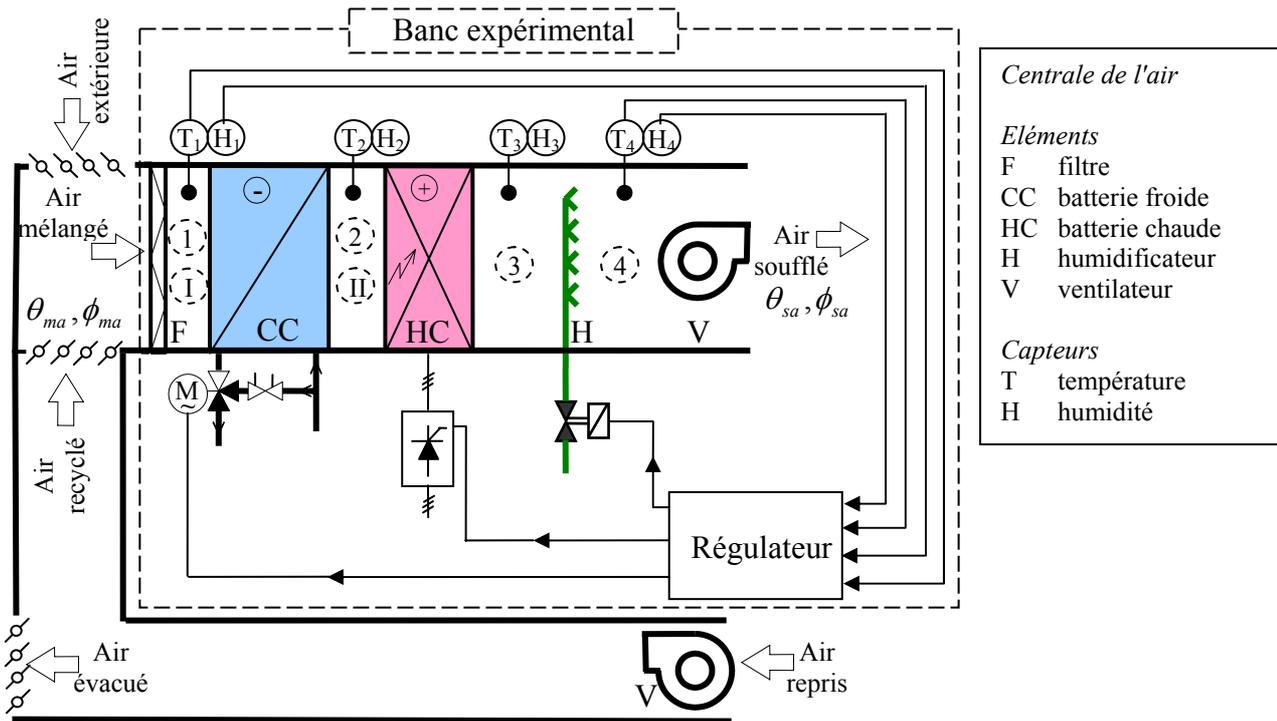


Figure 2.29 Centrale de traitement d'air (CTA)

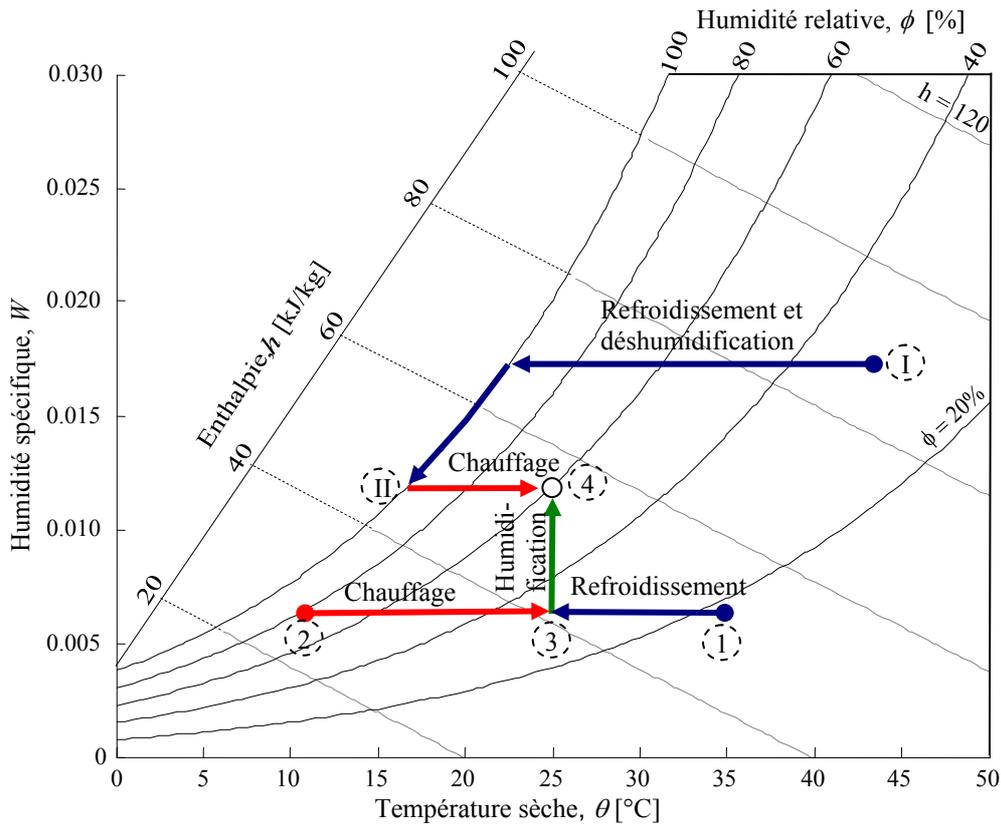


Figure 2.30 Représentation sur la diagramme de l'air humide des procédés de la centrale de traitement d'air

Une centrale de traitement d'air peut avoir différentes configurations. La Figure 2.29 présente une CTA type à débit d'air constant composée d'une batterie de refroidissement, CC, une batterie de chauffage, HC, et un humidificateur à vapeur, H. Les trois volets d'air, qui sont

actionnés simultanément, mélangent l'air neuf et l'air recyclé provenant du bâtiment ; l'air mélangé est alors conditionné par la CTA et est fourni au bâtiment par le système de distribution d'air.

Les transformations de l'air humide au sein d'une CTA sont données sur la Figure 2.30 : chauffage et humidification (transformations 2 – 3 – 4), refroidissement sans déshumidification et humidification (transformations 1 – 3 – 4), et déshumidification par refroidissement et chauffage (transformations I – II – 4). La température et l'humidité de l'air à l'entrée de la CTA (états 1, 2 et I sur la Figure 2.30) et de l'air soufflé (état 4 sur la Figure 2.30) varient à cause des conditions météorologiques et de la charge du bâtiment.

Le rôle du contrôle d'une centrale de traitement d'air (CTA) est de commander ses éléments (batterie de refroidissement, batterie de chauffage et humidificateur) afin de contrôler la température, θ_{sa} , et l'humidité relative, ϕ_{sa} , de l'air soufflé. Un premier problème vient du fait que les variables contrôlées sont couplées : une variation de la température de l'air, θ , produit une variation de l'humidité relative, ϕ , et vice-versa (voir Figure 2.30). Une deuxième difficulté est due à la charge. Pour une même valeur de la commande, u , d'un équipement de la CTA, la température et l'humidité relative (θ_{a2}, ϕ_{a2}) de l'air à la sortie seront différentes selon la température et l'humidité relative (θ_{a1}, ϕ_{a1}) de l'air à l'entrée. Un troisième obstacle est la non-linéarité intrinsèque de certains équipements de la CTA. Enfin, autres problèmes sont dus aux variations temporelles des caractéristiques des équipements, l'hystérésis des vannes de régulation etc. Cette section se concentre sur une proposition de modèles qui résolvent les trois premiers problèmes.

La variation continue du point de fonctionnement d'une CTA, la non linéarité des éléments de la CTA et le couplage des variables commandées fait que la commande de la CTA ne soit pas un problème trivial (Ghiaus 1996; Underwood 1999). Le développement de la technologie des systèmes de gestion technique des bâtiments permet l'implémentation d'algorithmes sophistiqués de commande pour répondre à ce problème. Les conditions météorologiques et la charge du bâtiment modifient très rapidement le point de fonctionnement de la CTA ce qui implique un changement rapide du gain statique de la boucle de contrôle. Une boucle de contrôle de type PID devient alors soit trop lente soit trop sensible (et souvent oscillante). La mauvaise qualité des commandes d'une CTA est une des causes du mécontentement des occupants (Levermore 2000). Dans la pratique, elle est acceptée car cela n'a pas de conséquences catastrophiques (Underwood 1999). Cependant, il est à noter que le chauffage et la climatisation des bâtiments consomment environ 42% de l'énergie primaire en France et que le confort intérieur influe sur la productivité, particulièrement dans les bâtiments de bureau. On estime que le potentiel d'économie d'énergie dans les bâtiments est de l'ordre de 20 à 50% et que 15% des pertes sont imputables à une mauvaise gestion des équipements techniques (Levermore 2000).

Puisque les solutions classiques de type PID sont peu adaptées au problème du contrôle d'une CTA, quelques approches considèrent la CTA dans sa totalité comme étant une boîte noire à sorties et entrées multiples (MIMO) et emploient une variante de contrôle adaptatif, flou, neuronal ou avec des algorithmes génétiques (Tobi and Hanafusa 1991; So 1995; Sousa,

Babuska et al. 1997; Bi, Cai et al. 2000; Singh, Zaheer-uddin et al. 2000; Wang and Jin 2000; Ghiaus 2001; Wang and Xu 2002; Thompson and Dexter 2005).

Le problème avec le contrôle adaptatif est qu'il nécessite une période d'apprentissage afin de trouver les nouveaux paramètres du régulateur. Ces techniques conviennent lorsque les valeurs des paramètres varient lentement. Une alternative au réglage adaptatif est le gain programmé. La caractéristique non linéaire de la CTA peut être obtenue à partir de mesures ou de modèles et les paramètres du régulateur peuvent être ajustés selon le point de fonctionnement (Ghiaus 1996; Ghiaus 2001; Deng 2002; Thompson and Dexter 2005). Dans d'autres approches, des compensateurs multivariables sont conçus en tenant compte des lois physiques de transformation de l'air humide (Underwood 1999). Le découplage des variables commandées peut être obtenu en employant la quasi-orthogonalité de la température, θ , et du poids d'eau (ou l'humidité spécifique), W (Figure 2.30). Le poids d'eau (ou l'humidité spécifique), W , est calculé à partir des valeurs de la température, θ , et de l'humidité relative, ϕ , pour le point de fonctionnement. La commande est alors élaborée par rapport à la température et à l'humidité spécifique (Howell 1988).

Explicitement ou implicitement, tous ces algorithmes sont synthétisés en employant le modèle de la CTA comme un système commandé. Le modèle peut être de type "boîte blanche", "boîte noire" ou "boîte grise". Les modèles de type "boîte blanche", qui sont basés sur des considérations théoriques, sont inclus dans les logiciels de simulation des performances des bâtiments. Ces logiciels sont utilisés pour émuler la CTA avec des algorithmes de commande basés sur les modèles (Clarke, Cockroft et al. 2002; Mathews and Botha 2003) ou dans le diagnostic de la boucle de contrôle (Salsbury 1999; Wang and Zheng 2001). Les modèles de type "boîte noire", qui sont des relations entrée – sortie reproduisant les valeurs mesurées, sont employés dans des applications pratiques de contrôle. Ils sont obtenus par des techniques d'identification expérimentales telles que Ziegler-Nichols, identification de paramètre (Pakanen and Sundquist 2003);(Bi, Cai et al. 2000), etc. Si les modèles obtenus sont linéaires, ils sont valides autour d'un point statique de fonctionnement (Shin, Chang et al. 2002; Kramer 2003; Tashtoush, Molhim et al. 2005). Dans la modélisation de type "boîte grise", la structure du modèle est obtenue à partir des lois fondamentales et les paramètres des modèles sont obtenus à partir des mesures. Cette approche est particulièrement utile pour des applications de contrôle quand le modèle est exprimé sous une forme appropriée telle que la fonction de transfert ou l'espace d'état.

Beaucoup de modèles de type "boîte grise" des batteries ont été développés pour les procédés de chauffage, de refroidissement sans déshumidification et d'humidification (transformations 2-3-4 et 1-3-4 dans la Figure 2.30). Ceci est justifié par le fait que la température de consigne de l'air intérieur est typiquement une valeur fixée dans la zone de confort pendant le temps d'occupation et que l'humidité est laissée variable dans des limites imposées par la conception du système (ASHRAE 1999). Quelques réglementations interdisent la déshumidification par le refroidissement (COSTIC 2003). Des fonctions de transfert grises avec des paramètres distribués pour les batteries à ailettes eau/air ont été obtenues à partir des caractéristiques géométriques de la batterie et des propriétés physiques de l'air, de l'eau et du métal (Gartner and Harrison 1963; Gartner and Harrison 1965; Gartner and Daane 1969). Ainsi, un modèle du premier ordre de la batterie a été obtenu (Gartner 1972). D'autres approches utilisent le filtre de Kalman pour l'identification des paramètres d'une représentation dans l'espace d'état du modèle obtenu à partir de considérations physiques (Jonsson and Palsson 1994). Le

problème devient plus compliquée lorsque l'air est déshumidifié (transformations I- II -4 dans la Figure 2.30) ; la batterie peut être partiellement ou totalement humide présentant un coefficient de transfert thermique variable. Un modèle de commande pour les batteries humides peut être obtenu en estimant la charge de refroidissement à partir de mesures sur l'eau (Wang, Cai et al. 2004; Jin, Cai et al. 2005).

En général, les modèles de centrale de traitement d'air (CTA), théoriques ou expérimentaux, ne considèrent pas séparément les équipements de la CTA et leurs capteurs, bien que dans des applications pratiques la dynamique des équipements et des capteurs soit comparable. Si le modèle dynamique du capteur est connu, il peut être facilement intégré dans le modèle de l'équipement quand l'approche théorique est utilisée. Cependant, dans l'approche de type "boîte noire", les modèles utilisés pour l'identification des paramètres considèrent le capteur et l'équipement comme un seul système. Ainsi, le gain dynamique dû au capteur n'est pas révélé, bien qu'il soit très important.

L'objectif de ce travail est de proposer une manière simple d'améliorer la commande d'une CTA à débit d'air constant en formulant les modèles de ses équipements de sorte qu'ils deviennent à entrée unique et sortie unique (SISO) et linéaires dans tout le domaine de fonctionnement. Modéliser les transformations de l'air de cette façon a pour conséquence une stratégie de commande qui peut être considérée comme similaire au gain variable préprogrammé avec la différence que l'algorithme de commande type PID est avec des paramètres fixes sur tout le domaine de fonctionnement.

Cette section ne traite que la modélisation et de l'identification des paramètres des équipements d'une centrale de traitement d'air (CTA) à débit d'air constant sans déshumidification. La CTA est composée d'une batterie de refroidissement, d'une batterie de chauffage électrique et d'un humidificateur à injection de vapeur (Figure 2.29). Les transformations de l'air considérées sont le chauffage avec humidification et le refroidissement avec humidification (Figure 2.30). La CTA est un système à entrées et sorties multiples avec trois entrées, les commandes de la batterie de refroidissement, de la batterie de chauffage et de l'humidificateur, et deux sorties, la température de l'air soufflé et l'humidité spécifique (Figure 2.29). Les sondes sont identifiées séparément en utilisant leur réponse indicielle. Cette information est ensuite employée pour identifier les paramètres du modèle de l'équipement. La structure du modèle pour chaque équipement est obtenue par la discrétisation du modèle continu dérivé des lois physiques. Les paramètres du modèle sont identifiés en utilisant une approche de type "boîte grise" dans laquelle les paramètres de la sonde sont connus.

La modélisation tire profit du fait que le débit d'air est constant et qu'il n'y a pas de condensation sur la batterie de refroidissement et considère la variation de la température de l'air, θ , et de l'humidité spécifique, W , comme étant les sorties de chaque élément. De cette manière, on démontre que chaque élément fait varier une seule variable : les batteries font varier la différence de température et l'humidificateur fait varier la différence de l'humidité spécifique (poids d'eau).

2.3.1.2 Banc expérimental

Les expériences ont été effectuées sur une CTA commerciale équipée d'un automate programmable commercial (Figure 2.29). La CTA d'une section de $0,80 \times 0,50 \text{ m}^2$, est composée d'un filtre, d'une batterie de refroidissement à eau glacée, d'une batterie de chauffage électrique, un humidificateur à vapeur et d'un ventilateur à vitesse constante. Le débit d'air constant dans la CTA est $Q_a = 0,33 \text{ m}^3/\text{s} \cong 1200 \text{ m}^3/\text{h}$. Il a été mesuré en employant une méthode de gaz traceur. La vitesse moyenne de l'air dans la CTA est $v_a = 0,82 \text{ m/s}$. Elle a été mesurée dans une section de la CTA sur une grille de 4×4 points équidistants à l'aide des anémomètres à fil chaud. L'intégrale des valeurs de la vitesse de l'air sur la section de la CTA donne une valeur du débit d'air égale à celle obtenue par ma méthode de gaz traceur et ceci à $\pm 1\%$.

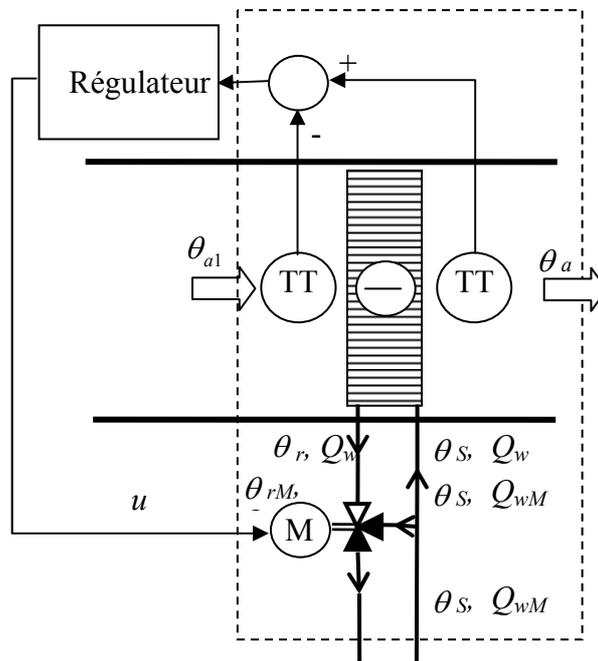


Figure 2.31 Batterie de refroidissement et notations

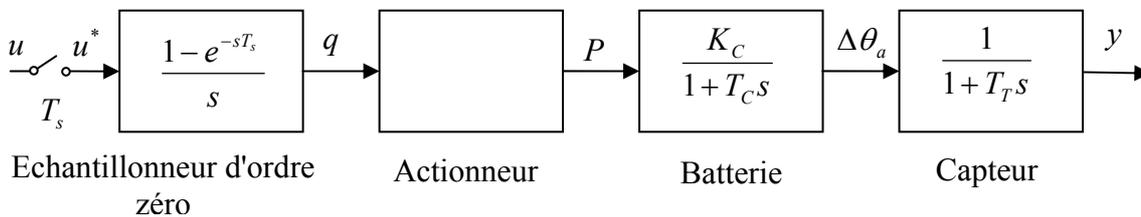


Figure 2.32 Schéma bloc du système discret des batteries.

La batterie de refroidissement est commandée par une vanne trois voies avec une caractéristique linéaire (Figure 2.31). La batterie est reliée à un groupe froid qui fournit l'eau

à une température comprise entre 7 et 10°C. Pour le refroidissement sans déshumidification, la différence de température moyenne entre l'entrée et la sortie de l'air de la batterie pour le débit maximal d'eau est de 14.5 °C (Tableau 2.14). Ceci correspond à une puissance maximale de la batterie de refroidissement de 5,74 kW.

Deux batteries électriques de puissance nominale 4,3 kW et 9,5 kW, respectivement, ont été testées. Pour la puissance maximale, les deux batteries électriques chauffent l'air de 11,3°C et 24,0°C, respectivement (Tableau 2.14). La puissance fournie par les batteries électriques est contrôlée en utilisant une commande chrono – proportionnelle avec un relais statique. La base de temps est égale à 1 minute.

Tableau 2.14 Transformations de l'air dans la CTA

Commande	Batterie électrique		Batterie refroidissement CC	Humidificateur à vapeur H
	HC ₁	HC ₂		
<i>u</i> [%]	$\Delta\theta$ [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	ΔW [g/kg]
0	0.0	0.0	0.0	0.00
25	3.4	6.4	-10.1	0.37
50	6.9	12.6	-12.0	1.53
75	9.3	18.4	-13.9	3.00
100	11.3	24.0	-14.5	3.99; 4.70*

* $\Delta W = 3.99$ g/kg pour $u < 100\%$; $\Delta W = 4.70$ g/kg pour $u = 100\%$,

L'humidificateur injecte la vapeur dans le flux d'air augmentant ainsi l'humidité de l'air. La débit massique maximal de vapeur est $\dot{m}_{wM} = 6.77$ kg/h, ce qui, pour le débit massique d'air sec $\dot{m}_{da} = 1440$ kg/h, produit une augmentation du contenu d'humidité de 4.70 g/kg_{as}, $\Delta W = 4.70$ g/kg (Tableau 2.14).

Les transformations étudiées sont chauffage et humidification (états 2 – 3 – 4 sur la Figure 2.30) et refroidissement sans déshumidification et humidification (états 1 – 3 – 4 sur la Figure 2.30). Les capteurs de température et d'humidité T₁H₁, T₂H₂, T₃H₃ et T₄H₄ ont été utilisées pour obtenir les valeurs expérimentales (Figure 2.29). Dans une situation réelle, seules les capteurs T₁H₁ et T₄H₄ sont nécessaires.

2.3.1.3 Identification des paramètre des modèles des capteurs de température et d'humidité

En supposant que la température de la sonde est homogène, le bilan énergétique du capteur peut être exprimé par :

$$m_T c_T \frac{d\theta_T}{dt} = U_T S_T (\theta_a - \theta_T), \quad (2.113)$$

où le membre gauche de l'équation représente la variation de l'énergie interne de la sonde et le membre de droite représente le transfert thermique par convection entre l'air et la sonde.

Si on considère la température de l'air, θ_a , comme une entrée et la température du capteur, θ_T , comme une sortie, la fonction de transfert correspondant à l'équation (2.113) est donnée par :

$$G_T(s) \equiv \frac{\theta_T(s)}{\theta_a(s)} = \frac{K_T}{1 + T_T \cdot s}, \quad (2.114)$$

avec le gain statique $K_T = 1$ et la constante de temps $T_T = R_T C_T$, où R_T est la résistance thermique à la surface du capteur, $R_T = 1/(U_T S_T)$, et C_T est sa masse thermique, $C_T = m_T c_T$. Afin d'utiliser la série temporelle des valeurs expérimentales, la fonction de transfert (2.114) doit être transformée dans le domaine z en employant la relation $z = e^{T_s s}$, avec T_s le temps d'échantillonnage. Une approximation de cette relation est la transformée bilinéaire,

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}. \quad (2.115)$$

La forme discrète du modèle est alors obtenue en appliquant la transformée bilinéaire (2.115) à la fonction de transfert (2.114) :

$$G_T(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}, \quad (2.116)$$

où :

$$b_0 = b_1 = \frac{K_T \cdot T_s}{2T_T + T_s} \quad (2.117)$$

et

$$a_1 = \frac{T_s - 2T_T}{2T_T + T_s}. \quad (2.118)$$

Si on note la sortie y et l'entrée u , l'équation (2.116) fournit un modèle entrée-sortie discret :

$$y(t) + a_1 y(t - T_s) = b_0 u(t) + b_1 u(t - T_s) \quad (2.119)$$

ou, en utilisant l'opérateur q^{-1} ,

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}, \quad (2.120)$$

où $A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1}$ et $B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1}$.

En notant :

$$\mathbf{y} \equiv [y(t) \quad y(t-1) \quad \dots \quad y(t-m)]^T, \quad (2.121)$$

$$\mathbf{A}_D \equiv \begin{bmatrix} y(t-1) & u(t) & u(t-1) \\ y(t-2) & u(t-1) & u(t-2) \\ \dots & \dots & \dots \\ y(t-m-1) & u(t-m) & u(t-m-1) \end{bmatrix} \quad (2.122)$$

et

$$\boldsymbol{\psi} \equiv [a_1 \quad b_0 \quad b_1]^T, \quad (2.123)$$

le modèle (2.119) peut être écrit sous une forme matricielle :

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_D \times \boldsymbol{\psi} + \mathbf{e}, \quad (2.124)$$

où un vecteur d'erreur, \mathbf{e} , a été incorporé afin de modéliser le bruit aléatoire et l'erreur de modélisation. Les paramètres, $\hat{\boldsymbol{\psi}}$, sont évalués en minimisant la somme des carrés des erreurs :

$$E(\boldsymbol{\psi}) = \mathbf{e}^T \times \mathbf{e}, \quad (2.125)$$

où $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{A}_D \times \boldsymbol{\psi}$ est le vecteur d'erreur produit par un choix spécifique de $\boldsymbol{\psi}$. Si $\mathbf{A}_D^T \times \mathbf{A}_D$ est non singulier, puis $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ est unique et donné par :

$$\hat{\boldsymbol{\psi}} = (\mathbf{A}_D^T \times \mathbf{A}_D)^{-1} \times \mathbf{A}_D^T \times \mathbf{y}. \quad (2.126)$$

Connaissant les paramètres estimés $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ de l'équation (2.126), les paramètres T_T et K_T du modèle continu peuvent être obtenus à partir des équations (2.118) et (2.117). Il est à noter que deux valeurs de K_T peuvent être obtenues à partir de l'équation (2.117). Le gain statique peut être également estimé à partir de :

$$K_T = \frac{\sum_{j=0}^m b_j}{1 + \sum_{i=1}^n a_i}. \quad (2.127)$$

Une différence significative entre ces trois valeurs indique une estimation peu précise des paramètres.

L'identification des paramètres exige l'excitation de tous les modes du système. Un signal simple qui contient un spectre large de fréquence est l'entrée échelon. Il peut être facilement obtenu en retirant les sondes de température et d'humidité de la centrale de traitement d'air (CTA), en attend que leur indication se stabilise et ensuite en re-introduisant les sondes dans la CTA et en attendant que le signal se stabilise. L'identification de la sonde peut être faite dans l'usine, par le fabricant de la CTA, ou in situ, à la mise en service. Il faut noter que dans la pratique seulement les sondes T₁H₁ et T₄H₄ sont nécessaires parce que les procédés de

chauffage, refroidissement et d'humidification sont découplés (voir les sections 2.3.1.4 et 2.3.1.5).

Tableau 2.15 Valeurs des paramètres identifiées pour les capteurs de température et d'humidité (temps d'échantillonnage $T_s = 1/6$ [min])

Capteur	Modèle discret	Modèle continu	
		Gain statique K	Constante de temps T [min]
Température	$A(q^{-1}) = 1 - 0.8564 q^{-1}$ $B(q^{-1}) = 0.07432 + 0.07432 q^{-1}$	1.035	1.08
Humidité	$A(q^{-1}) = 1 - 0.9190 q^{-1}$ $B(q^{-1}) = 0.04299 + 0.04299 q^{-1}$	1.062	1.97

Dans le Tableau 2.15 sont données les valeurs des paramètres identifiés à partir de l'équation (2.126). Il est à noter que la valeur du gain statique est très proche de 1, indiquant un bon calibrage des sondes et que les constantes de temps pour le capteur de température et pour le capteur d'humidité sont différentes.

2.3.1.4 Identification des paramètres des modèles de batteries

Le modèle de batterie développé dans cette section considère comme sortie la différence de température de l'air entre la sortie et l'entrée de la batterie et comme entrée la puissance fournie par la batterie. Pour la batterie de refroidissement, la puissance fournie par la batterie est commandée par une vanne trois voies. Pour la batterie de chauffage, la puissance est commandée par un relais statique. La batterie de refroidissement est considérée sèche tout le long de la transformation.

2.3.1.4.1 Modèle de la batterie électrique

Le modèle dynamique de la batterie électrique peut être obtenu à partir de son bilan énergétique :

$$m_c c_c \frac{d\theta_c}{dt} = P - \rho_a Q_a c_a (\theta_{a2} - \theta_{a1}), \quad (2.128)$$

où le terme de gauche est l'accumulation d'énergie dans la masse de la batterie et le terme droite est la différence entre la puissance électrique de la batterie et celle absorbée par l'air. En négligeant la capacité thermique de l'air, le bilan thermique de l'air à travers la batterie s'écrit :

$$\rho_a Q_a c_a (\theta_{a2} - \theta_{a1}) = U_c S_c \left(\theta_c - \frac{\theta_{a2} + \theta_{a1}}{2} \right). \quad (2.129)$$

Considérons la température d'air d'entrée comme référence :

$$d\theta_{a1} / dt \equiv 0, \quad (2.130)$$

et

$$\Delta\theta_a \equiv \theta_{a2} - \theta_{a1}. \quad (2.131)$$

De (2.130) et (2.131) on obtient

$$\frac{d\theta_{a2}}{dt} = \frac{d\Delta\theta_a}{dt}. \quad (2.132)$$

La fonction de transfert de la batterie électrique est obtenue en éliminant θ_c des équations (2.128) et (2.129) et en appliquant la transformé de Laplace pour les conditions initiales nulles :

$$\frac{\Delta\theta_a}{P} = \frac{K_C}{1 + T_C s}, \quad (2.133)$$

où

$$K_C = (\rho_a Q_a c_a)^{-1} \quad (2.134)$$

et

$$T_C = m_c c_c \left(\frac{1}{2\rho_a Q_a c_a} + \frac{1}{U_c S_c} \right). \quad (2.135)$$

Il est à noter que pour une centrale de traitement d'air à débit d'air constant, les valeurs de K_C et T_C sont constantes pour les batteries électriques. Ces paramètres peuvent être estimés à partir des valeurs caractéristiques de la batterie en employant les équations (2.134) et (2.135) ou peuvent être obtenus par l'identification expérimentale. Bien que le modèle exprimé par l'équation (2.133) soit linéaire, la puissance P peut être une fonction linéaire ou non linéaire de la commande, u , et la constante de temps varie si la masse thermique de la batterie varie, comme c'est le cas pour les batteries à eau.

L'actionneur de la batterie électrique est un relais statique qui fait varier la puissance fournie à la batterie de zéro à 100% de la puissance maximale, P_M , selon la commande, u :

$$P = u P_M. \quad (2.136)$$

En intégrant l'équation (2.136) à l'équation (2.133), la fonction de transfert du système formé par le relais statique et la batterie électrique devient :

$$\frac{\Delta\theta_a}{u} = \frac{K_C P_M}{1 + T_C s} \quad (2.137)$$

L'équation (2.137) prouve que le gain statique, $K_C P_M$, est constant ce qui implique que la caractéristique statique est linéaire avec la pente $K_C P_M$ (voir Figure 2.33 a, lignes HC₁ et HC₂). Les points sur la Figure 2.33 (a) correspondent aux valeurs mesurées du Tableau 2.14.

2.3.1.4.2 Modèle de la batterie de refroidissement

Avec les notations de la Figure 2.31, les équations du bilan énergétique de la batterie de refroidissement pour un point et pour le point nominal (puissance maximale M) sont :

$$\begin{cases} P = Q_w c \rho (\theta_S - \theta_r) \\ P_M = Q_{wM} c \rho (\theta_S - \theta_{rM}) \\ P = U_o A_o \Delta\theta_m \\ P_M = U_{oM} A_o \Delta\theta_{mM} \end{cases} \quad (2.138)$$

où P est la puissance, $P \in [0 \ P_M]$; P_M est la puissance maximale ; Q_w et Q_{wM} sont les débits d'eau correspondant à P et à P_M respectivement ; U_C et U_{CM} sont les coefficients globaux de transfert de chaleur qui correspondent à Q et Q_M , respectivement ; θ_S est la température de l'eau froide fournie par le groupe froid ; θ_r et θ_{rM} sont les températures de retour de l'eau correspondant à Q et à Q_M , respectivement ; θ_a est la température moyenne de l'air ; $\Delta\theta_m$ et $\Delta\theta_{mM}$ sont les différences moyennes de température.

Le coefficient global de transfert de chaleur pour une batterie à ailettes est :

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{\eta h_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{B}{h_w}} \quad (2.139)$$

où h_a et h_w sont les coefficients de transfert convectif pour le film d'air et d'eau, respectivement ; η est l'efficacité des ailettes ; δ/λ est la résistance thermique de conduction ; B est le rapport entre la surface extérieure et celle intérieure. Pour simplifier le modèle, on considère que les différences de température sont de la forme :

$$\Delta\theta_m = \left(\theta_a - \frac{\theta_S + \theta_r}{2} \right) \quad (2.140)$$

et

$$\Delta\theta_{mM} = \left(\theta_a - \frac{\theta_S + \theta_{rM}}{2} \right). \quad (2.141)$$

Le système d'équations (2.138) dévient :

$$\begin{cases} P = Q_w c\rho(\theta_S - \theta_r) \\ P_M = Q_{wM} c\rho(\theta_S - \theta_{rM}) \\ P = U_o A_o \left(\theta_a - \frac{\theta_S + \theta_r}{2} \right) \\ P_M = U_{oM} A_o \left(\theta_a - \frac{\theta_S + \theta_{rM}}{2} \right) \end{cases} \quad (2.142)$$

La magnitude des valeurs typiques des résistances thermiques des batteries aux ailettes sont de $7 \cdot 10^{-6}$ - $2 \cdot 10^{-6}$ ($m^2 \cdot K$)/W pour la conduction dans le métal, de 10^{-1} - $7.5 \cdot 10^{-3}$ ($m^2 \cdot K$)/W pour la convection dans le film d'air et de 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-6}$ ($m^2 \cdot K$)/W pour le film d'eau (Heldman 2003). Dans l'équation (2.139), la résistance de conduction peut être négligée.

En notant :

$$p \equiv \frac{P}{P_M}; \quad q \equiv \frac{Q}{Q_M}, \quad (2.143)$$

les deux premières équations du système (2.142) il en résulte que

$$p = q \frac{\theta_S - \theta_r}{\theta_S - \theta_{eM}}, \quad (2.144)$$

et les deux dernières équations du même système donnent :

$$p = \frac{U_o}{U_{oM}} \frac{2\theta_a - \theta_S - \theta_r}{2\theta_a - \theta_S - \theta_{rM}}. \quad (2.145)$$

En substituant l'expression de θ_r issu de (2.144) dans l'équation (2.145), il vient :

$$p = \frac{q}{\frac{U_{oM}}{U_o} aq + b}, \quad (2.146)$$

où

$$\begin{aligned} a &= (2\theta_a - \theta_S - \theta_{rM}) / (2(\theta_a - \theta_S)) \\ b &= (\theta_{rM} - \theta_S) / (2(\theta_a - \theta_S)) \end{aligned} \quad (2.147)$$

La résistance du film d'eau varie avec la vitesse de l'eau, $U_o \propto v_{eau}^{0.8}$ (McAdams 1954; ASHRAE 2001). Il en résulte :

$$\frac{h_w}{h_{wM}} = q^{0.8}. \quad (2.148)$$

En introduisant (2.148) dans (2.139) et en négligeant la résistance thermique du parois, on obtient :

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_{wM}} q^{0.8} \quad (2.149)$$

L'équation (2.146) dévient :

$$p = \frac{q}{a_1 q + a_2 q^{0.2} + b}, \quad (2.150)$$

où $a_1 = aU_{oM} \frac{1}{h_a}$ et $a_2 = aU_{oM} \frac{1}{h_{wM}}$. Les paramètres a_1 , a_2 et b de l'équation (2.150)

peuvent être estimés par régression multiple en considérant la forme :

$$\frac{1}{p} = a_1 + a_2 \frac{1}{q^{0.8}} + b \frac{1}{q}, \quad (2.151)$$

L'équation (2.150) prouve que le gain statique est non linéaire. Des équations (2.133), (2.143) et (2.146) il résulte :

$$\Delta\theta_a = K_C P_M p, \quad (2.152)$$

où K_C est donné par l'équation (2.134), P_M est la puissance maximale du groupe froid, et p est donné par l'équation (2.146). En considérant l'équation (2.152), l'équation (2.146) devient :

$$\Delta\theta_a = K_C P_M \left(\frac{q}{a_1 q + a_2 q^{0.2} + b} \right). \quad (2.153)$$

Le débit dans la batterie de refroidissement dépend de la position de la vanne trois voies de commande. Si la vanne trois voies a une caractéristique linéaire et si la résistance hydraulique de la vanne d'équilibrage est égale à celle de la batterie, l'équation (2.153) nous permet de représenter la relation entre la position de la vanne trois voies, q , et la différence de température de l'air, $\Delta\theta_a$. Comme la relation (2.153) est linéaire par rapport aux paramètres, les paramètres peuvent être estimés à partir de mesures en employant la régression linéaire. La courbe CC dans la Figure 2.33 (a) montre les valeurs de la caractéristique statique pour la batterie de refroidissement. Les points sont obtenus expérimentalement (voir Tableau 2.14). Les courbes passant par les points sont obtenues par régression des données expérimentales et en employant l'équation (2.153) pour les conditions nominales. Les deux courbes sont pratiquement identiques.

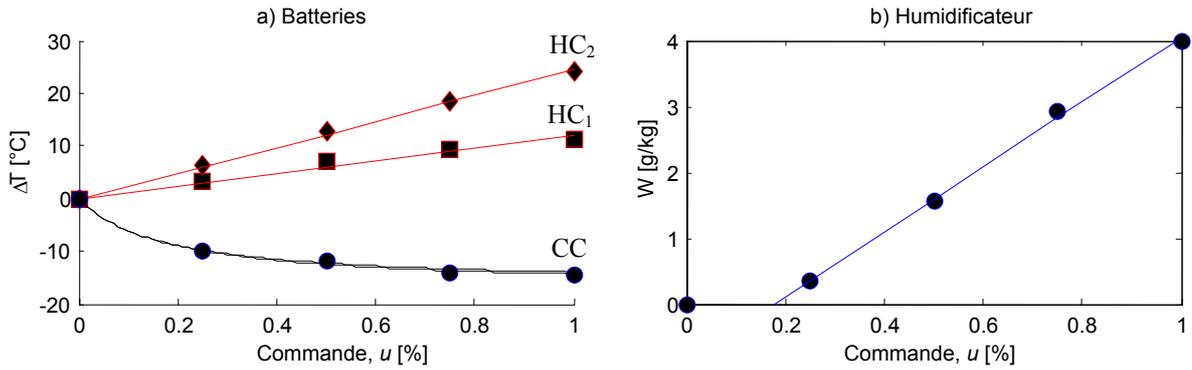


Figure 2.33 Caractéristiques statiques : a) batteries électriques HC_1 et HC_2 et batterie froide CC ; b) humidificateur à vapeur.

La caractéristique statique non linéaire de la batterie de refroidissement induit un faible performance du régulateur classique de type PI (Salsbury 1999). L'avantage de pouvoir exprimer la fonction de transfert de la batterie de refroidissement par un gain statique variable et un gain dynamique est que le gain du régulateur peut être facilement programmé selon le point de fonctionnement de la batterie.

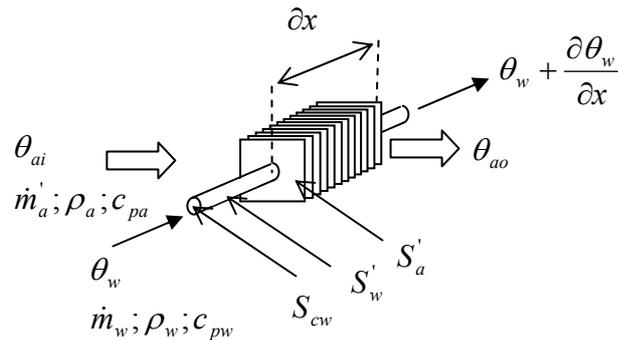


Figure 2.34 Modèle de batterie à eau froide

Un modèle dynamique de la batterie froide sèche peut être obtenu à partir des bilans d'énergie, Figure 2.34, (Pearson, Leonard et al. 1974) :

$$\begin{cases} \dot{m}'_w c_{pw} \frac{\partial \theta_w}{\partial x} + h_w S'_w (\theta_w - \theta_t) + \rho_w c_{pw} S_{cw} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \\ \dot{m}'_a c_{pa} (\theta_{ao} - \theta_{ai}) = \eta_o h_a S'_a \text{LMTD} \\ \dot{m}'_a c_{pa} (\theta_{ao} - \theta_{ai}) - h_w S'_w (\theta_w - \theta_t) + c'_t \frac{\partial \theta_t}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (2.154)$$

où c - chaleur spécifique
 h - coefficient de transfert de chaleur convective
 m - masse
 t - temps
 LMTD - différence de température moyenne logarithmique
 S - surface

θ – température

les indices :

a - air

i - entrée

o - sortie

w - eau

et ' signifie par unité de longueur du tube à ailettes. Un modèle dynamique de premier ordre avec une constante de temps variable a été obtenu à partir des équations (2.154). Sur la Figure 2.35 on observe que la constante de temps diminue avec la vitesse de l'eau dans la batterie froide.

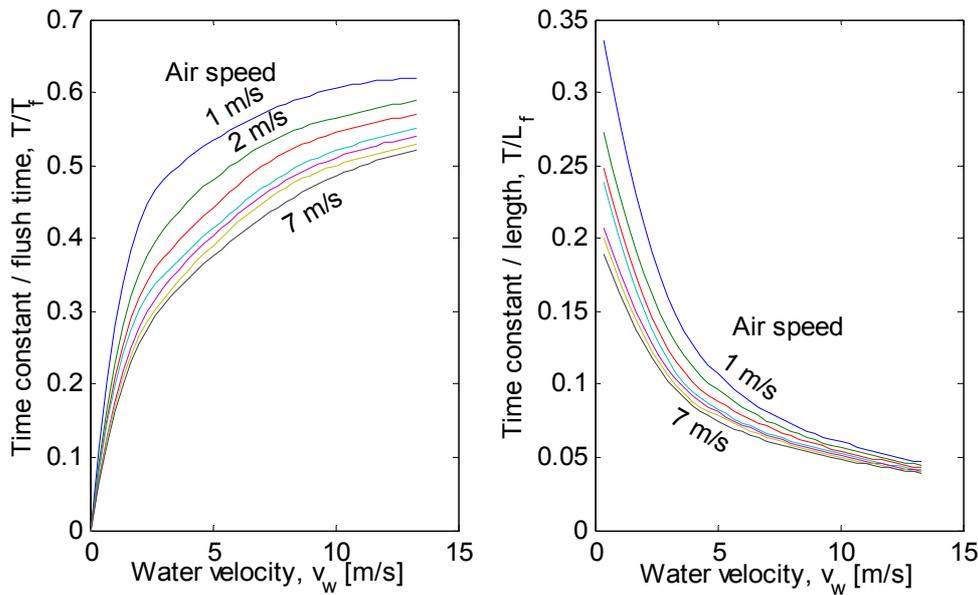


Figure 2.35 Variation de la constante de temps de la batterie froide (Pearson, Leonard et al. 1974)

La fonction de transfert de la batterie est alors exprimée par :

$$H_{CC}(s) = K_{CC} \cdot G_{CC}(s), \tag{2.155}$$

avec: K_{CC} - gain statique;

$$K_{CC} = \frac{\Delta\theta_a}{P_M} \left(a + b \frac{1}{q} \right), \tag{2.156}$$

$$G_{CC} - \text{gain dynamique; } G_{CC} = \frac{1}{1 + T_{CC} \cdot s}.$$

où l'expression de la constante de temps est donnée par l'équation (2.135). Le premier terme

$\frac{m_c c_c}{2\rho_a Q_a c_a}$ est constant pour les CTA à débit fixe ; le deuxième terme varie avec la vitesse de

l'eau, $U_C \propto v_{eau}^{0.8}$ (McAdams 1954). On peut considérer que la constante de temps de la batterie de refroidissement est formée de deux termes, un terme constant et un terme qui dépend de la vitesse de l'eau par la commande de la vanne trois voies :

$$T_{CC} = T_{Ca} + \frac{T_{Cw}}{u^{0.8}}. \quad (2.157)$$

où

$$T_{Ca} = m_c c_c \frac{1}{2\rho_a Q_a c_a} \quad (2.158)$$

et

$$\frac{T_{Cw}}{u^{0.8}} = m_c c_c \frac{1}{U_c S_c} \quad (2.159)$$

L'équation (2.158), qui donne des résultats similaires au modèle de Pearson, Leonard et al. (1974), montre clairement la variation de la constante de temps de la batterie en fonction de débit.

2.3.1.4.3 Modèles discrets des batteries

Le modèle discret des batteries se compose d'un échantillonneur d'ordre zéro sur la commande, l'actionneur, la batterie et la sonde (Figure 2.32). La relation entre la puissance et la commande est linéaire pour la batterie électrique, l'équation (2.136), et non-linéaire pour la batterie à eau, l'équation (2.155). En considérant la relation entre la puissance et la commande comme linéaire pour de petites variations autour d'un point de fonctionnement, la fonction de transfert du système représenté à la Figure 2.32 est :

$$G_p(s) = \frac{1 - e^{-sT_s}}{s} \cdot \frac{K_C}{(1 + T_C s)(1 + T_T s)} e^{-s\tau}. \quad (2.160)$$

Le capteur correctement calibré a un gain statique unitaire ; sa constante de temps, T_T , est déterminée en employant la régression pour le modèle discret décrit dans la section 2.3.1.3.

En écrivant la fonction de transfert (2.160) sous la forme de fractions,

$$G_p(s) = (1 - e^{-sT_s}) \cdot e^{-s\tau} K_C \left[\frac{1}{s} + \frac{T_C^2 / (T_T - T_C)}{1 + T_C s} + \frac{T_T^2 / (T_C - T_T)}{1 + T_T s} \right]. \quad (2.161)$$

et en mettant l'équation (2.161) sous la forme d'un modèle d'espace d'état on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{aligned} \quad (2.162)$$

où:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{T_C + T_T}{T_C T_T} & -\frac{1}{T_C T_T} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} K_C \\ T_C T_T \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \quad 1], \quad \mathbf{D} = 0.$$

La fonction discrète de transfert est obtenue en employant la transformé z de chaque terme de l'équation (2.161) :

$$G_p(z) = K_C \cdot z^{-k} \cdot \frac{z-1}{z} \left(\frac{z}{z-1} + \frac{T_C}{T_T - T_C} \cdot \frac{z}{z - e^{-T_s/T_C}} + \frac{T_T}{T_C - T_T} \cdot \frac{z}{z - e^{-T_s/T_T}} \right) \quad (2.163)$$

ou

$$G_p(z) = \frac{\beta_1 z + \beta_0}{z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0} \quad (2.164)$$

avec

$$\beta_1 = K_C \frac{T_C e^{-T_s/T_C} - T_T e^{-T_s/T_T} - T_C + T_T}{T_T - T_C},$$

$$\beta_0 = K_C \frac{(T_T - T_C) \cdot e^{-T_s/T_C} \cdot e^{-T_s/T_T} + T_C e^{-T_s/T_T} - T_T e^{-T_s/T_C}}{T_T - T_C}$$

$$\alpha_1 = -(e^{-T_s/T_C} + e^{-T_s/T_T})$$

et

$$\alpha_0 = e^{-T_s/T_C} \cdot e^{-T_s/T_T}.$$

En exprimant l'équation (2.164) dans l'espace d'état, on obtient la forme discrète du modèle de la batterie :

$$\begin{aligned} z\mathbf{x} &= \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{aligned} \quad (2.165)$$

où

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_0 \\ & \beta_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = 0. \quad (2.166)$$

2.3.1.4.4 Identification des paramètres des modèles "boîte grise"

Les paramètres du modèle donné par l'équation (2.164) peuvent être identifiés par la méthode de la boîte noire. Cependant, cette méthode n'utilise pas les connaissances acquises par l'identification des paramètres des capteurs.

Dans le modèle (2.162) les paramètres de la batterie, K_C et T_C , sont inconnus et la constante de temps de la sonde, T_T , est connue (étant identifié en utilisant le modèle et le procédé décrits dans la section 2.3.1.3). Le modèle boîte grise peut être employé pour résoudre ce problème d'identification d'un modèles avec des paramètres partiellement connus (Ljung 2005). Le modèle est de la forme donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}\mathbf{w} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} + \mathbf{w} \end{aligned} \quad (2.167)$$

où:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{T_C + T_T}{T_C T_T} & -\frac{1}{T_C T_T} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} K / (T_C \cdot T_T) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \quad 1], \quad \mathbf{D} = 0, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

et l'état initial. $\mathbf{x}_0 = [0 \quad 0]^T$. Le bruit additif, \mathbf{w} , dans le modèle (2.167) est négligeable et le gain de Kalman, \mathbf{K} , est mis à zéro. Les matrices \mathbf{A} et \mathbf{B} sont en partie connues. La prédiction du système des équations (2.167) prend la forme :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(t + T_s) = \mathbf{F}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{u}(t) + \mathbf{K}(\boldsymbol{\psi})(\mathbf{y}(t) - \mathbf{C}(\boldsymbol{\psi})\hat{\mathbf{x}}(t)) \\ \hat{\mathbf{y}}(t|\boldsymbol{\psi}) = \mathbf{C}(\boldsymbol{\psi})\hat{\mathbf{x}}(t) \end{cases}, \quad (2.168)$$

où \mathbf{F} et \mathbf{G} sont calculés à partir de \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} et l'intervalle d'échantillonnage T_s selon l'équation (2.166). Il est à noter que si le modèle a m entrées, p sorties et n états, un maximum de $(p + m) n$ paramètres liés à \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} peuvent être estimés (Parrilo and Ljung 2003). On considère le cas d'erreur de sortie quand w est zéro, ce qui implique $\mathbf{K} = 0$. Les paramètres inconnus $\boldsymbol{\psi}$ sont estimés en réduisant au minimum l'erreur de prédiction :

$$V_N(\boldsymbol{\psi}) = \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t|\boldsymbol{\psi})]^2 \quad (2.169)$$

par rapport à $\boldsymbol{\psi}$. Le minimum global de (2.169), désigné par, $\hat{\boldsymbol{\psi}}_N$, est trouvé par une recherche itérative en utilisant une méthode de Gauss-Newton (Ljung 1999; Ljung 2005) :

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_N^{(i+1)} = \hat{\boldsymbol{\psi}}_N^{(i)} + \mu \mathbf{R}_N^{(i)} V_N'(\hat{\boldsymbol{\psi}}_N^{(i)}). \quad (2.170)$$

La méthode de recherche (2.170) exige une valeur initiale de la valeur du paramètre $\hat{\boldsymbol{\psi}}_N^{(0)}$. Selon la valeur initiale, les itérations $\hat{\boldsymbol{\psi}}_N^{(i)}$ peuvent diverger, converger vers un minimum local ou converger vers la valeur désirée du minimum global. Ainsi, la valeur initiale estimée du paramètre doit se situer dans le domaine d'attraction du minimum global (Parrilo and Ljung 2003; Wernholt 2004).

2.3.1.5 Identification des paramètres du modèle de l'humidificateur

Pour certains auteurs, l'humidificateur peut être modélisé par une fonction de transfert du premier ordre avec une constante de temps provenant de la "capacité" de l'humidificateur (Kramer 2003; Tashtoush, Molhim et al. 2005). Puisque la vapeur est directement injectée dans le flux d'air, l'humidificateur augmente instantanément le poids d'eau de l'air soufflé. Le processus est décrit par les bilans de masse et d'énergie (ASHRAE 2001) :

$$\begin{cases} \dot{m}_{da} W_1 + \dot{m}_w = \dot{m}_{da} W_2 \\ \dot{m}_{da} h_1 + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_{da} h_2 \end{cases}. \quad (2.171)$$

De l'équation du bilan de masse, il vient que l'augmentation du contenu d'humidité est le rapport entre le débit massique de vapeur et celui de l'air :

$$\Delta W \equiv W_2 - W_1 = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{da}}. \quad (2.172)$$

Pour les humidificateurs à vapeur, la vapeur est injectée directement dans le flux d'air. Puisque le phénomène de mélange est pratiquement instantané, la fonction de transfert de l'humidificateur est caractérisée seulement par le temps de transport de la vapeur du générateur de vapeur à l'injection située à l'intérieur du flux d'air :

$$\frac{\Delta W}{u} = \frac{\dot{m}_{wM}}{\dot{m}_{da}} e^{-\tau s}, \quad (2.173)$$

où u est la commande de l'humidificateur. L'identification de ce modèle consiste simplement dans la mesure du gain statique, $\dot{m}_{wM} / \dot{m}_{da}$, et le temps de transport, τ . La caractéristique statique de l'humidificateur à vapeur est donnée à la Figure 2.33 (b). Les points représentent les valeurs mesurées données sur le Tableau 2.14 ; la droite représente la régression linéaire obtenue en utilisant les mesures. Le fait que la caractéristique ne passe pas par l'origine est dû à la commande chrono proportionnelle et le temps de transport du générateur de vapeur à l'injection ; quand la commande est plus petite que 20%, le temps pour lequel la commande est active est plus court que le temps de transport.

2.3.1.6 Sorties secondaires

L'approche de modélisation présentée dans cette section suppose que le débit d'air est constant dans la CTA. Les équipements de la centrale de traitement d'air engendrent la variation des variables primaires : la température du thermomètre sec pour les batteries et le poids d'eau pour l'humidificateur à vapeur. La deuxième sortie de chaque élément, c.-à-d. l'humidité pour les batteries et la température pour l'humidificateur, sont un résultat de la variation des sorties primaires.

Quand les variables commandées sont la température et l'humidité relative, les variables secondaires peuvent être calculées en utilisant les relations de l'air humide (ASHRAE 2001). Il est à noter que l'humidification directe par injection de vapeur est une transformation quasi isotherme ; la valeur de la température augmente habituellement de 1°C (ASHRAE 2001). Si on connaît la température d'entrée, l'augmentation de la température peut être calculée à partir du système des équations (2.171).

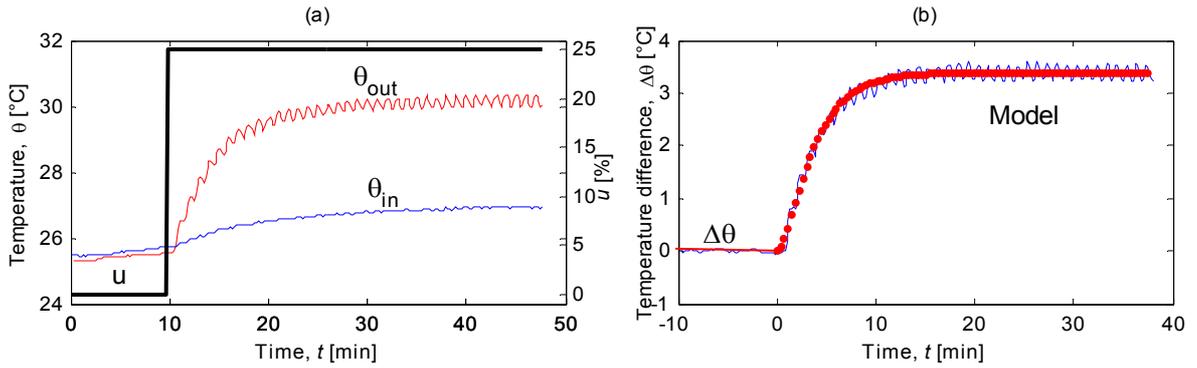


Figure 2.36 Identification des modèles dynamiques de la batterie électrique n° 1 : a) valeurs expérimentales ; b) comparaison entre la différence de température mesurée et le modèle boîte grise.

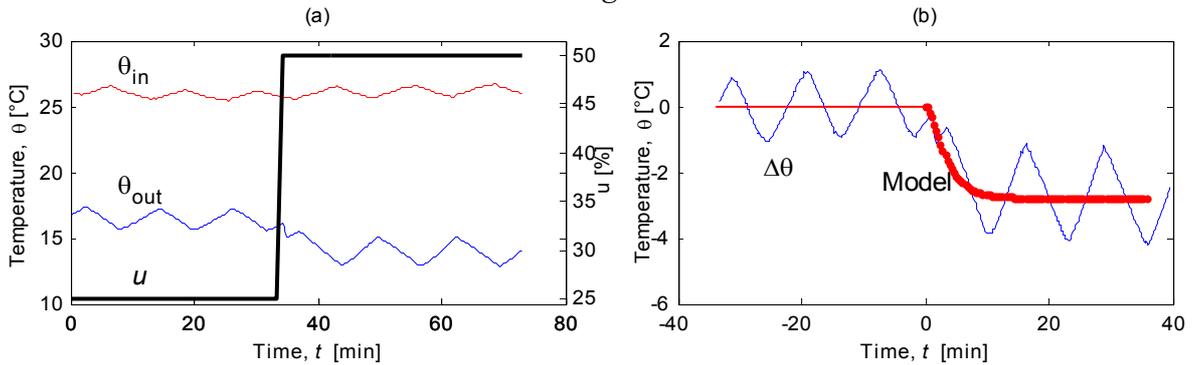


Figure 2.37 Identification du modèle dynamique de la batterie froide : a) valeurs expérimentales ; b) comparaison entre les différences de température mesurées et le modèle boîte grise.

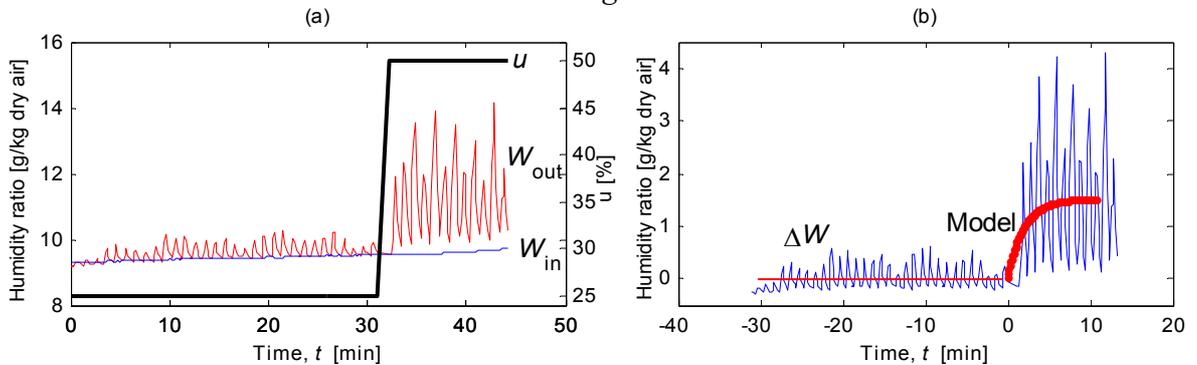


Figure 2.38 Identification du modèle dynamique de l'humidificateur : a) valeurs expérimentales ; b) comparaison entre les différences de rapport d'humidité mesurées et le modèle boîte grise.

2.3.1.7 Protocole expérimental et discussion des résultats

Le protocole expérimental consiste en deux étapes. D'abord, la fonction de transfert de la sonde est identifiée. La sonde est extraite de la CTA, est laissée en dehors de la CTA pendant environ 5 minutes et puis réinsérée dans la CTA. La réponse indicielle est notée et le modèle est identifié en employant la procédure décrite dans la section 2.3.1.3. Dans un deuxième temps, on applique une commande en échelon de valeur de 25% de la valeur maximale à un

élément (par exemple la batterie électrique, la batterie de refroidissement ou l'humidificateur). Puis, on calcule la différence entre les conditions de sortie de l'air et les conditions à l'entrée. Les paramètres du modèle gris sont identifiés en suivant la procédure décrite dans la section 2.3.1.4.

La Figure 2.36 montre la commande et les températures de la batterie électrique et la comparaison entre la sortie mesurée et le modèle. Il est à noter que la sortie du modèle de la batterie est la différence de température entre la sortie et l'entrée de l'air, $\Delta\theta$. Les petites oscillations de la température de sortie, θ_{out} , sont dues à la commande chrono – proportionnelle de la batterie. La base de temps choisie est d'un minute ce qui correspond aux oscillations de la sortie, $\Delta\theta$, sur la Figure 2.36 (b).

La Figure 2.37 montre les résultats pour la batterie de refroidissement pour une commande en échelon de 25 à 50%. Les températures ont un cycle de variation d'environ 15 minutes dû à la commande toute ou rien de la température de départ de l'eau fournie par le groupe froid. Les valeurs de marche–arrêt du groupe froid ont été fixées à 10°C et 7°C, respectivement. La variation de l'eau froide se retrouve sur la variation de la température de l'air à la sortie, θ_{out} . Il est à noter également sur la Figure 2.37 (a) que la température de l'air à l'entrée, θ_{in} , varie. Ce phénomène est dû à la turbulence de l'air en amont de la batterie de refroidissement : l'air frappe la batterie et une partie influence le capteur en retour. Dans la Figure 2.37 (b), les points de début et de fin de la séquence de commande ont été choisis pour ne pas influencer la moyenne avant et après le changement de la commande.

La Figure 2.38 montre les résultats pour l'humidificateur. La fonction de transfert de l'humidificateur est un temps de transport pur (voir section 2.3.1.5). La commande de l'humidificateur est chrono proportionnelle avec une base de temps d'une minute. A cause de la commande, nous considérons la fonction de transfert de l'humidificateur comme étant linéaire et que la commande tout ou rien introduit un bruit qui est filtré par les gaines de ventilation. Si la commande est plus courte d'environ 10 s, alors l'humidificateur n'injecte pas de vapeur dans la CTA. La Figure 2.33 (b) montre que la caractéristique statique est zéro si la commande est inférieure à 18%, ce qui correspond à environ 10 s pour une base de temps d'une minute. Pour le cas de la Figure 2.38, la commande a variée de 25% à 50% sous la forme d'un échelon. Les commandes marche - arrêt de l'humidificateur apparaissent dans les variations du poids d'eau de l'air à la sortie, W_{out} . Les valeurs mesurées du poids d'eau, W_{out} , sont filtrées par la sonde d'humidité.

Les causes de la valeur élevées du rapport signal bruit de la batterie de refroidissement (voir Figure 2.37 b) et de l'humidificateur (voir Figure 2.38 b) sont de nature différente. Dans le premier cas c'est la puissance maximale que la batterie peut fournir qui varie. Cette perturbation sera rejetée par le système de commande à cause de sa basse fréquence par rapport à la bande de passage de la batterie. Dans le deuxième cas, la commande chrono – proportionnelle de l'humidificateur et son manque d'inertie produisent des variations importantes ; celles-ci ne peuvent pas être réduites par le système de commande. Cependant, la valeur de l'humidité est filtrée par le système de distribution d'air et dans l'espace conditionné.

Tableau 2.16 Paramètres identifiés pour la batterie électrique HC₁. Les paramètres du capteur de température identifiés en utilisant le modèle discret sont $K_T = 1.03$ et $T_T = 1.1$

Commande échelon	Model discret					Model gris	
	avec une constante de temps		avec deux constantes de temps			K_C	T_C
	K_C	T	K_C	T_1	T_2		
0-25%	13.60	3.42	13.03	0.19	2.72	13.54	2.91
25-50%	13.80	3.26	13.65	0.23	1.91	13.57	3.30
50-75%	12.40	2.31	12.04	0.10	2.34	12.36	2.62
75-100%	11.30	2.56	11.70	0.05	4.11	11.75	2.80

Le Tableau 2.16 donne une comparaison des résultats de trois identifications des paramètres : deux modèles de type "boîte noire" dérivés des modèles continus un avec une constante de temps et l'autre avec deux constantes de temps, et d'un modèle de type "boîte grise" dans lequel le modèle de la sonde est connu. Toutes les méthodes ont identifié correctement le gain statique, K_C . Le du premier ordre représente l'équivalent d'un modèle réduit. Les constantes de temps identifiées pour le deuxième modèle discret (obtenu à partir du modèle continu du second ordre) ne représentent pas les valeurs réelles : la constante de temps T_1 est très petite ce qui montre que le modèle correspond au bruit plus qu'au signal. En considérant que le modèle du capteur est connu et en utilisant cette information dans le modèle gris, on trouve la valeur correcte de la constante de temps de la batterie, T_C . Les deux constantes de temps, celle de la batterie et celle du capteur, peuvent être utilisées pour le paramétrage des régulateurs.

2.3.1.8 Validation du modèle

La technique de validation de base est la comparaison des résultats de simulation et des valeurs mesurées. En outre, l'approche d'identification présentée dans les sections 2.3.1.3 et 2.3.1.4 permet de multiples vérifications. Les résultats obtenus en utilisant l'identification des paramètres des modèles en utilisant la réponse indicielle peuvent être facilement comparés aux résultats des méthodes graphiques classiques. Le modèle dynamique du capteur a deux paramètres, K_T et T_T , qui peuvent être calculés à partir des trois paramètres du modèle discret a_1 , b_0 et b_1 , et du gain statique exprimé par l'équation (2.127). Si les paramètres K_T et T_T calculés à partir de ces valeurs sont presque égaux, l'identification est correcte. Les paramètres du modèle de la batterie, K_C et T_C peuvent être calculés à partir des trois éléments du modèle exprimé dans l'espace d'état, équation (2.167), et de l'expression du gain statique, équation (2.127). Si les valeurs obtenues sont presque égales, l'identification est correcte.

La comparaison des gains statiques obtenus avec les équations (2.117) et (2.127) montre si l'identification est correcte. Les valeurs du gain statique peuvent être comparées aux évaluations théoriques obtenues à partir des modèles statiques : l'équation (2.136) pour la batterie électrique et l'équation (2.146) pour la batterie de refroidissement. La Figure 2.33 (a)

montre la comparaison entre les gains statiques obtenus en identifiant les paramètres du modèle de type "boîte grise", équation (2.162), et en utilisant le modèle (2.136) pour la batterie électrique et le modèle (2.153) pour la batterie refroidissement. La comparaison ne montre pratiquement aucune différence entre le modèle et les données mesurées. La Figure 2.33 (b) montre la caractéristique statique de l'humidificateur. Le gain statique est linéaire, comme l'indique la théorie.

2.3.1.9 Conclusion

La centrale de traitement d'air (CTA) à débit constant est un système à entrées et sorties multiples (MIMO). Les entrées sont les commandes des éléments de la CTA : la batterie de refroidissement, la batterie de chauffage, et l'humidificateur. Les sorties sont la température de l'air et l'humidité spécifique (poids d'eau ou contenu d'humidité) de l'air soufflé.

Si les sorties des équipements de la CTA sont la différence de la température pour les batteries et la différence de l'humidité spécifique pour l'humidificateur, et si la batterie de refroidissement est sèche (c.-à-d. il n'y a pas de déshumidification par le refroidissement), alors les différents procédés sont découplés. Ceci nous permet de définir des fonctions de transfert séparément pour chaque élément. Chaque élément modifie une seule sortie, c.-à-d. la température pour les batteries et le poids d'eau pour l'humidificateur. Quand les variables commandées sont la température et l'humidité relative, l'autre sortie, c.-à-d. l'humidité relative pour les batteries et la température pour l'humidificateur, est calculée à partir de la sortie de la fonction de transfert en employant les relations de l'air humide.

La fonction de transfert des batteries relie la différence de température entre la sortie et l'entrée de l'air et la commande de la batterie. Nous avons montré que, dans le cas d'un échange thermique sensible (aucune déshumidification par le refroidissement), la fonction de transfert peut être écrite comme le produit entre le gain statique et le gain dynamique sous la forme d'un modèle du premier ordre. Les gains sont constants, pour la batterie électrique et variables pour les batteries à eau. L'avantage d'écrire la fonction de transfert comme le produit d'un gain statique et d'un gain dynamique non-linéaire est que le gain statique peut être facilement linéarisé en fonction du point de fonctionnement. L'humidificateur à vapeur est caractérisé par un gain statique linéaire.

L'analyse théorique donne la forme des modèles. L'identification expérimentale des paramètres est faite pour la forme discrète des modèles obtenus en appliquant la transformée bilinéaire. Des entrées en échelon ont été utilisées pour les sondes et pour les éléments de la CTA. Nous avons observé que dans notre cas (CTA commerciale) le gain dynamique des capteurs est presque égal à celui des équipements. Par conséquent, l'identification des éléments de la CTA (batteries et humidificateur) tient compte du modèle de la sonde, modèle qui a été identifié au préalable. La procédure pour trouver les paramètres des équipements de la CTA utilise une optimisation itérative de l'estimation afin de réduire au minimum l'erreur de prédiction d'un modèle de type boîte grise.

L'identification "boîte grise" proposée dans cette section utilise les lois de la physique pour trouver la forme des modèles et les paramètres connus des capteurs identifiés séparément. Le résultat consiste en des fonctions de transfert prêtes à être utilisées dans les logiciels de simulation et dans la synthèse d'algorithme de commande. L'avantage pratique d'avoir des constantes de temps séparées pour les sondes et pour les éléments de la CTA est que le paramétrage du régulateur PID peut être fait directement en utilisant ces valeurs. Ainsi, le temps nécessaire pour l'identification est payant en réduisant le temps nécessaire pour le paramétrage des régulateurs. Une fois que le régulateur est paramétré, ses paramètres n'ont pas besoin d'être changés parce que le modèle du procédé, comme il a été formulé dans cet article, est linéaire ou peut être rendu linéaire. La linéarisation peut être considérée comme équivalente au gain adaptatif préprogrammé mais l'avantage d'exprimer les modèles sous une forme linéaire est que les paramètres de contrôleur n'ont pas besoin d'être changés sur tout le domaine de fonctionnement. Le coût de cette solution est représenté principalement par celui du capteur supplémentaire de température et d'humidité qui mesure les propriétés de l'air à l'entrée, après la boîte à mélange.

2.3.2 Diagnostic des défauts des climatiseurs basés sur le graphe de liaison

Cette section est basée sur l'article :

C. Ghiaus (2001). Fuzzy model and control of a fan-coil, *Energy and Buildings*, vol. 33, pp. 545-551

doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00070-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00070-X)

La méthode de graphe de liaison représente une approche unifiée pour modéliser les systèmes physiques. Son principe de base est que le transfert de puissance lie les composants d'un système. Le modèle de graphe de liaison est le même pour la représentation quantitative, dans laquelle les paramètres ont des valeurs numériques, ainsi que pour l'approche qualitative, dans laquelle les paramètres sont classifiés de manière qualitative. Pour déduire la cause des défauts en utilisant une méthode qualitative, un système d'équations qualitatives doit être résolu. Cependant, les caractéristiques des opérateurs qualitatifs exigent des méthodes spécifiques pour résoudre des systèmes d'équations ayant des variables qualitatives. Cet article propose une méthode pour résoudre de façon récursive le système qualitatif des équations dérivées du graphe de liaison et un modèle de graphe de liaison d'un groupe froid avec détente directe utilisé dans les centrales de traitement d'air. Les résultats de diagnostic de deux défauts dans un dispositif de climatisation réel sont présentés et discutés. Parfois, plus d'un défaut est déduit. Dans ces cas, des informations additionnelles sont exigées pour localiser le défaut. Le diagnostic de défaut est lancé par un mécanisme de détection de défauts qui classe également les mesures quantitatives parmi des valeurs qualitatives ; la détection de défaut n'est pas présentée ici.

Mots clés : diagnostic de défauts ; centrale de traitement d'air ; graphe de liaison qualitatif

2.3.2.1 Introduction

Les technologies actuellement disponibles pour la gestion technique des bâtiments possèdent plus de puissance de calcul que nécessaire pour des tâches de surveillance et/ou de commande des systèmes énergétiques. À mesure que la complexité des systèmes techniques du bâtiment augmente, un système de diagnostic est utile pour orienter le personnel exploitant. Actuellement, des systèmes de diagnostic sont employés couramment en électronique et en aéronautique grâce à la disponibilité des entrées mesurables et des modèles.

Le diagnostic des défauts est démarré par un mécanisme de détection des défauts. Le suivi quantitatif est utilisé pour détecter le comportement anormal provoqué par des défauts du système. Une solution pour la détection de défaut est d'utiliser comme indice de performance l'intégrale de l'écart et le carré de l'écart entre la valeur de sortie et sa valeur de référence, quand la commande en boucle fermée est disponible (Wang and Linkens 1996). La détection des défauts peut également être réalisée en comparant la sortie du système à la sortie d'un modèle, pour les mêmes entrées appliquées au système et au modèle (Himmelblau 1970; Lee, Park et al. 1996; Peitsman and Bakker 1996).

Le diagnostic des défauts est basé sur deux approches principales : quantitative et qualitative. L'approche quantitative repose principalement sur des lois physiques et exige la connaissance avancée de la structure du système et des valeurs de ses paramètres. L'idée qui est à la base de cette approche est d'estimer en ligne les valeurs des paramètres du modèle et de les comparer à des valeurs "normales". Les modèles peuvent être basés sur des lois physiques (Himmelblau 1970; Haves, Salisbury et al. 1996) ou sur l'identification statistique des paramètres (Lee, Park et al. 1996; Peitsman and Bakker 1996; Yoshida, Iwami et al. 1996). Avec ces méthodes, les problèmes principaux sont l'absence d'un modèle précis pour beaucoup d'équipements techniques utilisés dans les bâtiments et la sensibilité du système de diagnostic des défauts aux erreurs de modélisation (Frank 1990). Cependant, les modèles numériques donnent une idée du comportement du système, ils sont de bons moyens pour la conception et l'analyse de systèmes et facilite la communication entre les spécialistes. Pour une autre approche quantitative, le système de diagnostic identifie des formes spécifiques de comportement (Tzafestas, Singh et al. 1986; Singh, Schimdt et al. 1987; Frank 1990; Dexter and Benouaret 1996; Li, Vaezi-Nejad et al. 1996; Yoshida, Iwami et al. 1996; Frank and Koppen-Seliger 1997). L'approche qualitative peut être basée sur des règles expertes ou des lois physiques. En simplifiant, les règles expertes sont des fonctions non-linéaires multi-variables obtenues à partir de la connaissance des experts dans le domaine. Une façon de mettre en application de tels systèmes est d'utiliser la logique floue, dans laquelle différents types de raisonnement sont définis pour modéliser la description verbale (Zadeh 1989). Néanmoins, il y a deux problèmes avec cette approche : le modèle est sensible aux fonctions d'appartenance, et/ou les règles peuvent n'avoir aucune signification physique, rendant l'analyse difficile. Une autre approche, qui utilise les arbres de défaut, exige également la connaissance a priori des défauts (Butler and Johnson 1995).

Le diagnostic des défauts fondé sur le graphe de liaison qualitatif utilise des lois physiques et a l'avantage de trouver les défauts qui ne se sont jamais produits ou indiqué auparavant. Biswas et al. (1996) ont utilisé le graphe de liaison qualitatif pour obtenir des modèles utilisables dans le diagnostic des défauts. Leur approche a été améliorée par Wang et Linkens (1996), qui ont proposé un mécanisme d'inférence capable de diagnostiquer des défauts du système sans modèles de défaut ou arbres de défaut. Des défauts imprévus peuvent être localisés en résolvant un système d'équations dérivées du modèle de graphe de liaison, si les défauts se produisent dans les composants du système, les capteurs, les régulateurs, ou les actionneurs. La méthode de résolution des systèmes d'équations qualitatives est différente des méthodes numériques parce que les opérateurs qualitatifs ne se comportent pas de la même façon que leurs homologues numériques. Par exemple, si $a = b + x$, x n'a pas une valeur qualitative unique satisfaisant l'équation et ne peut pas, en conséquence, être trouvé simplement comme $x = a - b$. Cette caractéristique exige d'examiner toutes les valeurs possibles qui peuvent satisfaire le système d'équations qualitatives. Une méthode de résolution récursive est présentée dans cette section.

2.3.2.2 Diagnostic des défauts basé sur le graphe de liaison qualitatif

La modélisation numérique est l'outil principal pour concevoir et analyser les systèmes techniques. Néanmoins, les ingénieurs ne se réfèrent pas aux systèmes d'une façon exclusivement quantitative ; ils emploient souvent des rapports qualitatifs entre les variables, principalement pour décrire les systèmes complexes non-linéaires et variables dans temps

(Wang and Linkens 1996). Le graphe de liaison est une méthode qui permet de modéliser les systèmes mécaniques, électriques, hydrauliques, et thermiques par une approche unifiée (Rosenberg and Karnopp 1983). Le graphe de liaison permet d'obtenir des systèmes d'équations linéaires, non-linéaires, ou qualitatifs. Rosenberg et Karnopp (1983) donnent une description détaillée de la méthode de graphe de liaison, et Wang et de Linkens (1996) présentent les graphes de liaison qualitatifs.

2.3.2.2.1 Graphe de liaison

Le graphe de liaison est un graphique dans lequel les nœuds représentent les équations de conservation, et les nœuds terminaux représentent soit des éléments du système (tels que la résistance, la capacité, l'inertie) soit des sources. La liaison entre deux éléments du système, A et B , est réalisée par le transfert de puissance (Figure 2.39). Une demi flèche représente la puissance (qui est le produit des variables effort, e , et flux, f) transférée de A à B ,

$$P = e \cdot f \quad (2.174)$$

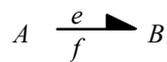


Figure 2.39 La liaison : le flux de A à B . L'effort e et le flux f sont des variables de puissance.

Selon le système, l'effort représente la force, le couple, la pression, la tension, ou la température absolue, alors que le flux représente la vitesse, la fréquence de rotation, le débit, le courant, ou le flux d'entropie. Les liaisons sont numérotées et les variables de puissance correspondent au numéro de liaison.

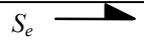
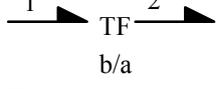
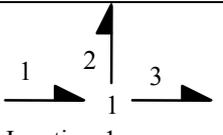
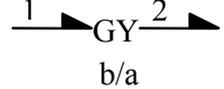
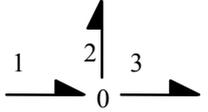
La première catégorie de nœuds terminaux est constituée par des éléments idéaux de type uni-port actif (Tableau 2.17, colonne 1) : résistance pour la dissipation de puissance, et capacité et inertie pour le stockage d'énergie. Les éléments passifs, présentés dans le Tableau 2.17, colonne 1, sont définis par les équations (appelées « les lois constitutives ») :

$$e_i = R \cdot f_i \quad f_j = C \frac{d}{dt} e_j \quad e_k = I \frac{d}{dt} f_k \quad (2.175)$$

où i, j et k représentent les numéros de liaisons.

La deuxième catégorie des nœuds terminaux est constituée des éléments idéaux de type uni-port actif, qui sont des sources d'énergie soit pour l'effort soit pour le flux (Tableau 2.17, colonne 2).

Tableau 2.17 : Éléments du graphe de liaison

1	2	3	4
1-Ports Passifs	1-Ports Actifs	2-Ports	3-Ports
i  Résistance	S_e  Source d'effort	 Transformateur	 Jonction-1
j  Capacitance	S_f  Source de flux	 Giratoire	 Jonction-0
k  Inertie			

Les éléments bi-port, les transformateurs et les giratoires, transfèrent l'énergie, mais modifient les valeurs des variables de puissance (Tableau 2.17, colonne 3). Le transformateur, tel qu'un levier, boîte de vitesse ou transformateur électrique, relie les variables correspondantes de puissance des ports par les relations :

$$e_1 = \frac{b}{a} e_2 \quad f_1 = \frac{a}{b} f_2. \quad (2.176)$$

Un giratoire, tel qu'un moteur électrique, relie l'effort à un port au flux à l'autre port :

$$e_1 = \frac{b}{a} f_2 \quad f_1 = \frac{a}{b} e_2. \quad (2.177)$$

Les nœuds d'un graphe de liaison sont de deux types : jonction-1 et jonction-0 (voir Tableau 2.17, colonne 4). Pour une jonction, la somme des puissances de tous les liaisons est zéro à chaque moment. Pour la jonction-1, le flux est commun à toutes les liaisons et la somme algébrique de tous les efforts est zéro. Pour la jonction-0, l'effort est commun à toutes les liaisons et la somme des flux est zéro. Par exemple, les équations pour la jonction-1 dans le Tableau 2.17, colonne 4, sont :

$$e_1 = e_2 + e_3 \quad f_1 = f_2 = f_3 \quad (2.178)$$

tandis que celles pour la jonction-0 sont :

$$f_1 = f_2 + f_3 \quad e_1 = e_2 = e_3. \quad (2.179)$$

Les éléments présentés dans le Tableau 2.17 sont suffisants pour la majorité des systèmes mécaniques, électriques, thermiques, hydrauliques ou acoustiques. Pour des situations spéciales, d'autres éléments peuvent être créés.

2.3.2.2.2 Graphe de liaison qualitatif

Le graphe de liaison qualitatif emploie des valeurs qualitatives à la place de valeurs quantitatives pour les paramètres de système. Wang et Linkens (1996) ont présenté cette méthode. Les valeurs qualitatives sont définies sur l'ensemble $\{[1] \ [+] \ [0] \ [-] \ [1] \ [?]\}$. Pour des valeurs positives ou négatives, dans des limites raisonnables d'une variable, les valeurs qualitatives sont $[+]$ et $[-]$, respectivement, alors que pour le domaine entre ces deux on donne la valeur $[0]$. Les valeurs qualitatives $[1]$ et $[-1]$ dénotent des valeurs numériques positives et négatives dans des limites peu raisonnables, tandis que $[?]$ représente une valeur incertaine. Le choix des frontières des variables qualitatives est un aspect quantitatif fondamental de l'approche qualitative du graphe de liaison. La transformation des variables mesurées en des valeurs qualitatives dépend du type et des dimensions du système étudié. Elle est réalisée par le mécanisme de détection des défauts.

L'ensemble de valeurs qualitatives $\{[1] \ [+] \ [0] \ [-] \ [1] \ [?]\}$ classe des variables mesurées, des variables des liaisons de puissance, et des éléments du système. Les valeurs $[+]$ et $[-]$ indiquent les états normaux. Pour des variables mesurées, les valeurs $[1]$ et $[-1]$ dénotent de grandes valeurs numériques positives et négatives, respectivement. Pour les variables e et f de puissance, les valeurs $[1]$, $[-1]$ et $[0]$ représentent le comportement anormal provoqué par des défauts de système. Pour les éléments R , C et I du système, la valeur $[1]$ est assignée à un élément défectueux obstruant le flux de puissance (composant bloqué), tandis que $[0]$ est assigné quand un défaut cause la perte de puissance (fuite ou court circuit) (Wang and Linkens 1996).

L'ensemble des opérateurs qualitatifs correspond aux opérateurs standards numériques : $\{+, -, \times, /\}$, représentant : l'addition, la soustraction, la multiplication, et la division, respectivement. Leurs définitions sont données dans le Tableau 2.18 (Wang and Linkens 1996). L'addition et la multiplication qualitatives sont commutatives. A la différence de leurs homologues numériques, les opérations qualitatives peuvent donner le même résultat pour différents arguments. Wang et Linkens (1996) expliquent le choix des résultats qualitatifs d'opération.

Dans le cadre des opérations qualitatives, la même valeur peut être obtenue pour différents arguments. Par exemple, $[-1] = [-1] + [-1]$ et $[-1] = [-1] + [-]$. Par conséquent, l'équation :

$$[-1] = [-1] + x \quad (2.180)$$

a l'ensemble de solutions :

$$x = \{[-1], [-]\}. \quad (2.181)$$

Tableau 2.18 Opérations qualitatives (Wang and Linkens 1996)

$[X] + [Y]$						
$[Y]$	$[X]$					
	-1	-	0	+	1	?
-1	-1	-1	-1	-	0	?
-	-1	-	-	?	+	?
0	-1	-	0	+	1	?
+	-	?	+	+	1	?
1	0	+	1	1	1	?
?	?	?	?	?	?	?

$[X] - [Y]$						
$[Y]$	$[X]$					
	-1	-	0	+	1	?
-1	0	+	1	1	1	?
-	-	?	+	+	1	?
0	-1	-	0	+	1	?
+	-1	-	-	?	+	?
1	-1	-1	-1	-	0	?
?	?	?	?	?	?	?

$[X] \times [Y]$						
$[Y]$	$[X]$					
	-1	-	0	+	1	?
-1	1	1	?	-1	-1	?
-	1	+	0	-	-1	?
0	?	0	0	0	?	?
+	-1	-	0	+	1	?
1	-1	-1	?	1	1	?
?	?	?	?	?	?	?

$[X]/[Y]$						
$[Y]$	$[X]$					
	-1	-	0	+	1	?
-1	+	+	0	-	-	?
-	+	+	0	-	-	?
0	*	*	*	*	*	*
+	-	-	0	+	+	?
1	-	-	0	+	+	?
?	?	?	?	?	?	?

Cependant, en résolvant l'équation $[-1] = [-1] + x$, avec $x = [-1] - [-1]$, on obtient la solution $x = [0]$. Par conséquent, des méthodes spécifiques pour résoudre des équations qualitatives sont nécessaires. Une telle méthode est donnée par Wang et Linkens (1996), mais leur approche n'examine pas toutes les solutions possibles. Une méthode récursive, dans laquelle toutes les solutions possibles d'une équation sont examinées dans l'ensemble restant des équations, est donnée ci-après. Les équations qualitatives discrètes sont écrites sous un format standard, ce qui conduit à une implémentation simple de l'algorithme de résolution.

2.3.2.2.3 *Forme discrète des équations du graphe de liaison*

Dans des systèmes d'acquisition de données, des variables sont mesurées avec un pas de temps Δt . Les équations du graphe de liaison deviennent alors des équations aux différences finies. Par exemple, l'équation :

$$f_j = C \frac{d}{dt} e_j \quad (2.182)$$

devient :

$$f_j(k \cdot \Delta t) = C \left[\frac{e_j(k \cdot \Delta t) - e_j((k-1) \cdot \Delta t)}{\Delta t} \right] \quad (2.183)$$

et l'équation :

$$e_k = I \frac{d}{dt} f_k \quad (2.184)$$

devient :

$$e_k(k \cdot \Delta t) = I \left[\frac{f_k(k \cdot \Delta t) - f_k((k-1) \cdot \Delta t)}{\Delta t} \right]. \quad (2.185)$$

Si le pas de temps d'échantillonnage est égal à une unité de temps, la capacité et les valeurs d'inertie deviennent $C/\Delta t = C'$ et $I/\Delta t = I'$, respectivement. Les équations (2.183) et (2.185) sont alors équivalentes à :

$$f_j(k) = C'[e_j(k) - e_j(k-1)] \quad (2.186)$$

et

$$e_k(k) = I'[f_k(k) - f_k(k-1)]. \quad (2.187)$$

Les autres équations du graphe de liaison ont la même forme dans le domaine discret et dans le domaine continu.

2.3.2.2.4 Types d'équations du graphe de liaison qualitatif

Le système d'équations qualitatives peut être écrit avec seulement trois types d'équations : addition, multiplication et dérivation.

Les équations d'addition expriment la conservation de l'écoulement dans les jonctions-1 et la conservation de l'effort dans les jonctions-0, et ont la forme :

$$A = x + B \quad (2.188)$$

où A et B sont les valeurs qualitatives connues et x est l'inconnue.

Les équations de multiplication modélisent les "lois constitutives" des résistances, des transformateurs et des giratoires. Leur forme générale est :

$$A = B \cdot x. \quad (2.189)$$

Les équations pour la capacité et l'inertie sont de type dérivatif. Leur forme générale, correspondant aux équations (2.186) et (2.187), est :

$$A = K(x - X') \quad (2.190)$$

où x est la valeur inconnue, et A, X' et K sont connus. La valeur X' représente la valeur précédente de la variable x : $X' = x(t - \Delta t)$. Les procédures nécessaires pour déterminer le temps d'échantillonnage et pour assigner des valeurs qualitatives aux variables mesurées ne sont pas présentées dans cette section.

2.3.2.2.5 Évaluation du graphe de liaison qualitatif

Cette section propose trois types d'actions pour évaluer le graphe de liaison qualitatif : attribution, déduction et vérification. Si la variable inconnue est du côté gauche de l'équation qualitative, la résolution de l'équation est simple : l'évaluation est faite à l'aide des opérateurs qualitatifs, en utilisant le Tableau 2.18. Cependant, comme montré avec l'équation (2.180), quand l'inconnue est du côté droit, la résolution de l'équation exige de trouver toutes les solutions possibles.

La vérification implique de tester l'égalité d'une équation quand toutes les variables des deux côtés de l'équation sont connues. L'attribution implique de trouver le membre de la partie gauche d'une équation qualitative quand tous les termes de la partie droite sont connus. Par exemple, l'équation $x = [1] + [1]$ est résolue grâce à la définition de l'addition donnée dans le Tableau 2.18. La déduction commence en trouvant toutes les solutions à une équation ayant une inconnue du côté droit et, puis, en essayant les équations restantes avec ces valeurs. De ces trois actions, la déduction est la seule qui ne soit pas une conséquence directe des définitions qualitatives d'opérateurs données dans le Tableau 2.18.

La fonction récursive pour résoudre le graphe de liaison qualitatif est :

Fonction : *Liaison - qualitative*

1. *Attribution et vérification*

Dans la mesure du possible, réaliser l'attribution et la vérification dans l'ensemble d'équations. Si toutes les équations du système peuvent être testées, indiquer si elles sont vérifiées ou non, et finir la **Fonction Liaison - qualitative**. Si aucune équation de l'ensemble ne peut être examinée, en raison d'une variable encore inconnue, procéder à la déduction.

2. *Déduction*

Dans la première équation qui a une inconnue du côté droit,

Pour toutes les valeurs possibles de l'inconnue, {[1] [+] [0] [-] [1] [?]} ,

Si l'équation est satisfaite, **appeler la fonction Liaison - qualitative**, **Fin_si**

Fin_pour

Fin_fonction : *Liaison - qualitative*.

Cet algorithme de diagnostic de défaut est plutôt semblable à celui proposé par Wang et Linkens (1996). Cependant, une différence importante existe : la fonction est récursive, elle fait appel à elle-même durant l'action de déduction. Par conséquent, le système d'équations est testé pour toutes les solutions possibles.

L'inférence de diagnostic du défaut commence quand le comportement anormal est détecté dans une variable mesurée. L'algorithme de diagnostic de défaut est :

Initialisation

1. *Fixer tous les paramètres (correspondant à la résistance, à la capacité, à l'inertie) à leurs valeurs normales ;*

2. *Assigner les valeurs qualitatives correspondantes aux variables mesurées.*

Diagnostic de défaut

Pour toutes les entrées (efforts ou flux) :

1. *Supposer que l'entrée est un défaut et lui donner une valeur de défaut ([1],[0], ou [-1] ;*

2. *Évaluer la fonction : Liaison - qualitative.*

Pour tous les composants (résistance, capacité, inertie) :

1. *Supposer qu'un composant est défectueux, fixer son type de défaut, et fixer la variable puissance qui le caractérise à une valeur correspondant à ce type de défaut. (voir Tableau 2.19) ;*

2. *Évaluer la fonction : Liaison-qualitative.*

Tableau 2.19 Valeurs des variables caractéristiques de puissance correspondant aux composants défauts

Composant	R		C		I	
Valeur de défaut du composant	[0]	[1]	[0]	[1]	[0]	[1]
Valeur de la variable caractéristique de puissance	$e = [0]$	$f = [0]$	$f = [0]$	$e - e' = [0]$	$e = [0]$	$f - f' = [0]$

L'évaluation du graphe de liaison montrera quel élément du système est un candidat de défaut. Un élément est un candidat au défaut quand le système des équations qualitatives est satisfait pour une valeur de défaut donnée à cet élément. Une valeur de défaut assignée à un composant détermine la valeur de la variable caractéristique de puissance reliée à celui-ci. De la loi constitutive de la résistance,

$$e = R \cdot f \quad (2.191)$$

il résulte que : $e = [0]$ quand $R = [0]$, et $f = [0]$ quand $R = [1]$. De la loi constitutive de la capacité,

$$f(k) = C[e(k) - e(k-1)], \quad (2.192)$$

il résulte que : $f = [0]$ quand $C = [0]$, et $e(k) - e(k-1) = [0]$ ou $e - e' = [0]$ quand $C = [1]$. Un raisonnement similaire peut être fait pour l'inertie. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 2.19.

2.3.2.3 Diagnostic des défauts d'un dispositif réel de climatisation

L'algorithme de diagnostic de défaut a été testé sur un group froid réel à détente directe dans un palier en utilisant le réfrigérant R-12 et refroidit par l'air (voir Figure 2.40). La capacité du compresseur était 4.6 kW, quand il fonctionne à une température de condensation de 54.5°C, et à une température d'évaporation de 7°C. Les conditions utilisées dans l'expérience n'étaient pas nominales.

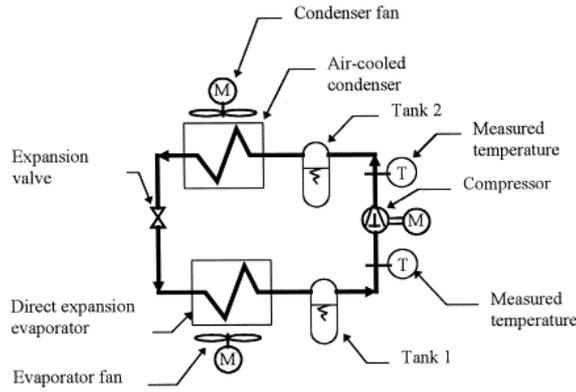


Figure 2.40 Schéma d'un groupe froid à expansion directe refroidi par air

Le graphe de liaison proposé pour le système de la Figure 2.40 utilise la température comme effort et le flux d'entropie comme flux. Le groupe de froid transfère de l'énergie de l'évaporateur vers le condenseur. Le cycle de Carnot qui décrit ce procédé est un modèle simplifié d'un cycle de réfrigération parfait fonctionnant entre deux températures. La Figure 2.41 montre le cycle Carnot de réfrigération sur des coordonnées d'entropie et de température. Le flux de chaleur \dot{Q}_R est extrait à une température constante T_R par le condenseur et le flux de chaleur \dot{Q}_0 est évacué à la température constante T_0 par l'évaporateur. Le compresseur augmente la température du réfrigérant par compression isentropique de la température T_R à la température T_0 en utilisant la puissance mécanique W :

$$W = (T_0 - T_R)(\dot{S}_C - \dot{S}_E) \tag{2.193}$$

Le cycle est terminé par une expansion isentropique dans la vanne d'expansion. Si nous considérons l'entropie $S_E = 0$ et $S_C = S$, les transferts de puissance dans l'état d'équilibre sont donnés par :

$$\dot{Q}_0 = T_0 \dot{S} \tag{2.194}$$

$$\dot{Q}_R = T_R \dot{S} \tag{2.195}$$

$$W = (T_0 - T_R) \dot{S} \tag{2.196}$$

où $\dot{S} = \dot{m}s$, \dot{m} est le débit massique, et s est la différence entre l'entropie spécifique des états 1, 2 (S_C) et 3, 4 (S_E) (Figure 2.41).

Le modèle de graphe de liaison est donné à la Figure 2.42. La source de flux S_f liée à la liaison 1 modélise le flux d'entropie introduit par l'évaporateur. L'élément capacitif C lié à la liaison 2 modélise la capacité du réservoir 1, dans laquelle le flux d'entropie, $\dot{S} = \dot{m}s$, est accumulé à la température T_R . La jonction-0, des liaisons 1, 2, et 3, représente l'équation de

conservation du flux d'entropie à la température T_R . La source d'effort, S_e , lié à la liaison 4, modélise la puissance fournie par le compresseur à entropie constante. L'élément capacitif C lié à la liaison 6 modélise la capacité du réservoir 2, alors que la source de flux, S_f , liée à la liaison 7, modélise l'écoulement d'entropie extrait par le condenseur. La jonction-0 des liaisons 5, 6, et 7 représente le bilan d'entropie pour le condenseur, à température constante, T_0 . Le système d'équations dérivées du modèle de graphe de liaison est :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 = f_2 + f_3 \\ e_1 = e_2 = e_3 \\ f_2 = C_1(e_2 - e_2') \\ f_3 = f_4 = f_5 \\ e_5 = e_3 + e_4 \\ f_5 = f_6 + f_7 \\ e_5 = e_6 = e_7 \\ f_6 = C_2(e_6 - e_6') \end{array} \right. \quad (2.197)$$

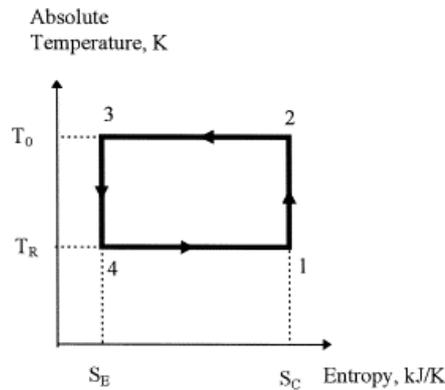


Figure 2.41 : Cycle de Carnot de réfrigération

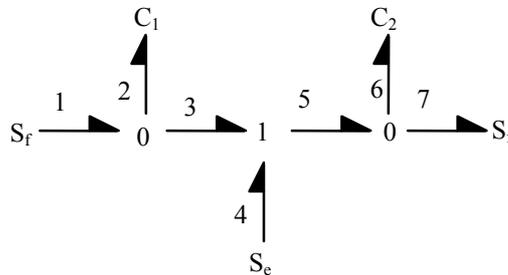


Figure 2.42 : Modèle de graphe de liaison pour le système de réfrigération (isolation thermique parfaite)

Deux types de défauts sont induits par :

1. le ralentissement du ventilateur de l'évaporateur, ce qui implique que $f_1 = [0]$ (flux de chaleur très faible dans l'évaporateur), et
2. le ralentissement du ventilateur du condenseur, ce qui implique que $f_7 = [0]$ (flux de chaleur très faible du côté de condenseur).

Les variables mesurées sont les températures du réfrigérant à l'admission et à la sortie du compresseur. La localisation d'un défaut commence en assignant des valeurs qualitatives aux variables mesurées. Puis, toutes les sources et les composants du système sont considérés comme des causes possibles de défaut, c.-à-d., l'évaporateur, le compresseur, le condenseur, et le réservoir de réfrigérant. Les variables de puissance et les paramètres du système reçoivent des valeurs qualitatives selon les défauts possibles. Le flux de chaleur retiré par l'évaporateur représente une source de flux et détermine la valeur de la variable de flux sur la liaison 1, f_1 . Si le compresseur tombe en panne, la température du réfrigérant n'augmente pas (c.-à-d., $e_4 = [0]$), et le débit massique est zéro. Par conséquent, le transfert thermique dans l'évaporateur et le condenseur devient nul (c.-à-d., $f_1 = [0]$, $f_7 = [0]$) et les variables de puissance reçoivent les valeurs qualitatives suivantes : $e_4 = [0]$, $f_1 = [0]$, $f_7 = [0]$.

Dans le premier test, le ralentissement du ventilateur de l'évaporateur diminue le transfert thermique dans l'évaporateur. Ainsi, la température du réfrigérant entrant diminue considérablement et la température du réfrigérant quittant le compresseur diminue légèrement (voir Figure 2.43). Alors, les valeurs qualitatives $[-1]$ et $[-]$ sont assignées aux variables e_3 (la température d'admission du compresseur) et e_5 (la température de sortie du compresseur), respectivement. La méthode d'assignation des valeurs qualitatives aux variables, basée sur leurs valeurs numériques, n'est pas présentée ici. Après la résolution du système des équations qualitatives, le ventilateur de l'évaporateur est inféré comme défaut potentiel (voir Tableau 2.20). Cependant, plus de candidats au défaut sont déduits. Wang et Linkens (1996) présentent des suggestions pour des mesures additionnelles afin de raffiner automatiquement le résultat initial du diagnostic des défauts.

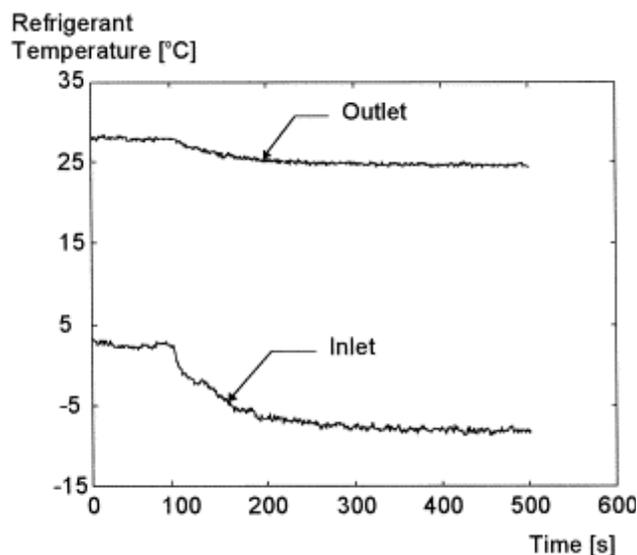


Figure 2.43 Variation de la température du réfrigérant à l'entrée et à la sortie du compresseur quand la vitesse du ventilateur de l'évaporateur a été réduite

Tableau 2.20 : Résultats de l'inférence de défaut basée sur le graphe de liaison donné à la Figure 2.42, quand la vitesse du ventilateur de l'évaporateur et la vitesse du ventilateur du condenseur sont diminuées

1	2	3	4
Hypothèses de défaut	Test pour	Candidats au défaut pour des variables mesurées	
		$e_3 = [-1]$ et $e_5 = [-]$ (défaut réel : vitesse faible du ventilateur de l'évaporateur 1.a)	$e_3 = [1]$ et $e_5 = [1]$ (défaut réel : vitesse faible du ventilateur du condenseur 2.a)
1 Transfert anormal de chaleur de l'évaporateur	a) $f_1 = [0]$	Oui	Non
	b) $f_1 = [1]$	Oui	Non
2 Transfert anormal de chaleur du condenseur	a) $f_7 = [0]$	Non	Oui
	b) $f_7 = [1]$	Non	Non
3 Compresseur arrêté	$e_4 = [0] ; f_1 = [0] ; f_7 = [0]$	Non	Non
4 Capacité du réservoir 1	a) $C_1 = [0] ; f_2 = [0]$	Oui	Oui
	b) $C_1 = [1] ; e_2 - e'_2 = [0]$	Oui	Non
5 Capacité du réservoir 2	a) $C_2 = [0] ; f_6 = [0]$	Non	Oui
	b) $C_2 = [1] ; e_6 - e'_6 = [0]$	Non	Non

Les variables mesurées sont les températures du réfrigérant à l'admission (e_3) et à la sortie du compresseur (e_4). Plusieurs candidats au défaut sont trouvés, y compris les vrais défauts : faible transfert thermique de l'évaporateur dans la colonne 3, et faible transfert thermique de condenseur dans la colonne 4.

La Figure 2.43 montre les résultats du deuxième test, quand la vitesse du ventilateur du condenseur est réduite. Les températures du réfrigérant à l'admission et à la sortie du compresseur sont considérées trop élevées ; la valeur qualitative [1] est assignée aux variables e_3 et e_5 . Après la résolution de l'ensemble des équations, la solution $f_7 = [0]$ est trouvé, entre autres. Ceci signifie que le ventilateur du condenseur est un candidat au défaut.

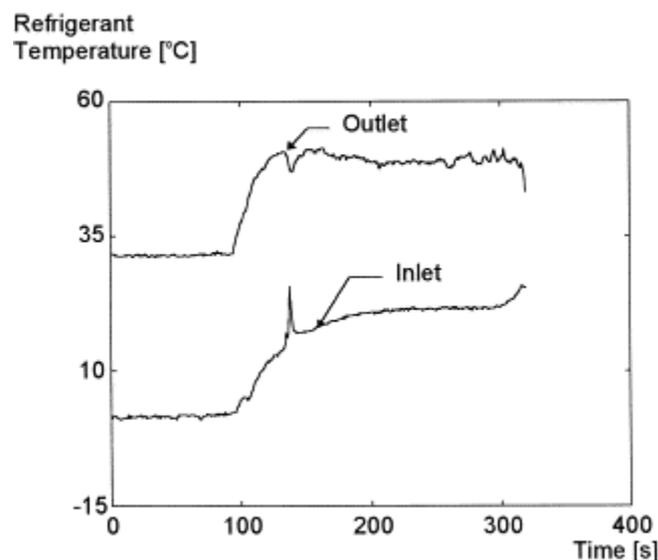


Figure 2.44 : Variation de la température du réfrigérant à l'entrée et à la sortie du compresseur quand la vitesse du ventilateur du condenseur a été réduite.

Le Tableau 2.20 présente les résultats de l'inférence de défaut. Les types de défauts testés sont montrés dans la colonne 1. Certaines valeurs de défaut déterminent la valeur des autres variables (lignes 3, 4, et 5). Les colonnes 3 et 4 montrent qui sont les défauts potentiels pour les valeurs qualitatives données par les variables mesurées, e_3 et e_5 . L'algorithme de diagnostic de défaut trouve toujours les défauts réels, mais d'autres défauts potentiels sont également trouvés. Pour réduire ce nombre de candidats au défaut, plus de variables devraient être mesurées.

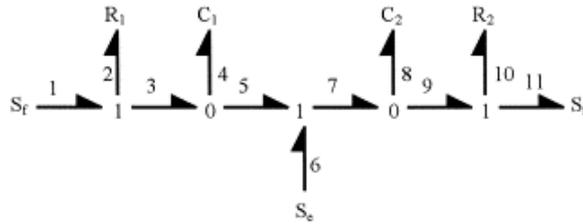


Figure 2.45 : Modèle de groupe froid incluant les résistances thermiques

Tableau 2.21 : Résultats de l'inférence de défaut basée sur le graphe de liaison donné à la Figure 2.45

1	2	3	4
Hypothèses de défaut	Test pour	Candidats au défaut pour des variables mesurées	
		$e_3 = [-1]$ et $e_5 = [-]$ (défaut réel : vitesse faible du ventilateur de l'évaporateur 1.a)	$e_3 = [1]$ et $e_5 = [1]$ (défaut réel : vitesse faible du ventilateur du condenseur 2.a)
1 Transfert anormal de chaleur de l'évaporateur	$f_1 = [0]$ $f_1 = [1]$	Oui Oui	Non Non
2 Transfert anormal de chaleur du condenseur	$f_{11} = [0]$ $f_{11} = [1]$	Non Non	Oui Non
3 Compresseur arrêté	$e_4 = [0]$; $f_1 = [0]$; $f_7 = [0]$	Non	Non
4 Résistance 1	$R_1 = [0]$; $e_2 = [0]$ $R_1 = [1]$; $f_2 = [0]$	Oui Non	Oui Non
5 Capacité du réservoir 1	$C_1 = [0]$; $f_4 = [0]$ $C_1 = [1]$; $e_4 - e_4' = [0]$	Oui Oui	Oui Non
6 Résistance 2	$R_2 = [0]$; $e_2 = [0]$ $R_2 = [1]$; $f_2 = [0]$	Oui Non	Oui Non
7 Capacité du réservoir 2	$C_2 = [0]$; $f_8 = [0]$ $C_2 = [1]$; $e_8 - e_8' = [0]$	Non Non	Non Non

Plusieurs candidats au défauts sont trouvés, y compris les défauts réels : faible transfert thermique de l'évaporateur dans la colonne 3, et faible transfert thermique du condenseur dans la colonne 4.

Tableau 2.22 Type des équations du graphe de liaison et de la catégorie de la fonction correspondante

Opérations	Représentation du graphe de liaison	Catégorie de fonction (nom_équation)
$f_i = f_j + f_k$	jonction-1	addition
$e_l = e_m + e_n$	jonction-0	addition
$f_i = C * (e_i - e'_i)$	capacité	accumulation
$e_j = I * (f_j - f'_j)$	inductance	accumulation
$e_k = R * f_k$	résistance	multiplication
$e_l = \frac{b}{a} * e_l$	transformateur	multiplication
$f_m = \frac{a}{b} * f_m$	transformateur	multiplication
$e_n = \frac{b}{a} * f_n$	giratoire	multiplication
$f_p = \frac{a}{b} * e_p$	giratoire	multiplication

Des résultats similaires sont obtenus si un modèle plus complexe est employé. Le modèle montré à la Figure 2.45 inclut les résistances thermiques R_1 et R_2 pour modéliser la perte de chaleur des conduits. Dans ce cas, les résistances R_1 et R_2 sont également testées comme des candidats de défaut potentiels.

Le Tableau 2.21 donne les résultats de cette inférence de défaut tandis que le Tableau 2.22 donne les types d'équations du graphe de liaison et la catégorie de fonction. Les colonnes sont les mêmes que dans le Tableau 2.20, mais des lignes supplémentaires ont été ajoutées pour les résultats des candidats au défaut de type résistances thermiques. Comme dans le cas du modèle précédent, plus d'un candidat au défaut est inféré. D'autres mesures ou des investigations directes peuvent localiser avec précision le défaut.

2.3.2.4 Conclusion

Le graphe de liaison qualitatif est une méthode de diagnostic des défauts pour les systèmes complexes. A partir d'un modèle de graphe de liaison, on obtient un système d'équations qualitatives. Toute équation de ce système peut être réduite à un des trois types : addition, multiplication, et dérivation, qui simplifie le processus d'écriture et de résolution du système d'équations qualitatives pour tout modèle.

Après la détection du défaut, l'inférence de diagnostic de défaut commence en attribuant d'abord des valeurs qualitatives aux variables mesurées et en faisant ensuite une hypothèse de défaut (c.-à-d., supposer qu'une entrée ou qu'un élément est défectueux). En se basant sur cette hypothèse, une valeur qualitative correspondante est donnée à la variable représentant l'élément supposé défectueux. L'algorithme d'inférence présenté ici résout cet ensemble

d'équations par la recherche dans tout l'espace des solutions. L'algorithme se compose de trois actions : test, attribution, et déduction. Dans le test, on vérifie l'égalité de chaque équation qui a des valeurs pour toutes ses variables. L'attribution implique d'assigner des valeurs qualitatives aux membres inconnus du membre gauche de l'équation, quand toutes les variables du membre de droite de l'équation sont connues. Alternativement, nous réalisons la déduction quand il y a une variable inconnue du côté droit de l'équation, et toutes les autres variables sont connues. Ceci implique de trouver toutes les solutions possibles de l'équation et, puis, d'exécuter l'algorithme d'inférence avec chaque valeur approximative. Ceci rend l'algorithme récursif.

Si, après le test de l'ensemble des équations, au moins une égalité n'est pas satisfaite, l'hypothèse de défaut est rejetée. Si l'ensemble des équations est satisfait, le défaut supposé devient un candidat au défaut. L'algorithme peut fournir plus qu'un défaut comme candidat. Des mesures supplémentaires ou l'inspection directe peuvent alors donner le vrai défaut.

L'algorithme de diagnostic de défaut basé sur le graphe de liaison qualitatif a été testé sur une unité commerciale de climatisation de l'air. Les paramètres mesurés étaient la température réfrigérante à l'admission et à la sortie du compresseur. Les défauts induits étaient :

1. réduction du flux de chaleur extrait par l'évaporateur (en ralentissant le ventilateur de l'évaporateur), et
2. réduction du flux de chaleur rejetée par le condenseur (en ralentissant le ventilateur du condenseur).

En appliquant l'algorithme décrit ci-dessus pour chaque défaut induit, plusieurs candidats, y compris de vrais défauts, ont été inférés.

Cette méthode a l'avantage de diagnostiquer un défaut sans connaître a priori les défauts possibles. En outre, l'exécution de l'algorithme d'inférence de défaut est rapide et simple, en raison de sa nature récursive. Cependant, du fait que les candidats au défaut dépendent du modèle, et sont soit les entrées (des sources de flux ou d'effort), soit les éléments (résistance, capacité, inertie), la modélisation incorrecte du système a comme conséquence la perte de candidats au défaut.

2.3.2.5 Remerciements

Le travail présenté dans cette section a été réalisé grâce à une bourse de recherches attribuée par United States Information Agency dans le cadre du programme Fulbright.

2.3.3 Contrôle flou des ventilo-convecteurs

Cette section est basée sur l'article :

C. Ghiaus (2001). Fuzzy model and control of a fan-coil, *Energy and Buildings*, 33(6), 545-551

doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00097-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00097-9)

Les modèles et les contrôleurs flous sont représentés par des règles de type *si – alors*. Ils combinent d'une manière aisément compréhensible des représentations quantitatives et qualitatives. Les règles qualitatives ont pour résultat un contrôleur quantitatif non – linéaire adéquat pour les systèmes non – linéaires qui contrôle le confort thermique avec des objectifs définis vaguement. Les modèles flous sont obtenus par identification expérimentale en variant les entrées pour que le ventilo-convecteur atteigne les états rencontrés dans son fonctionnement normal. Les modèles flous obtenus peuvent être utilisés pour le contrôle ou pour la simulation. Dans son domaine de validité, le contrôleur flou donne des résultats supérieurs aux régulateurs classiques. En effet, l'avantage principal de contrôleurs flous est la possibilité d'introduire facilement des programmes de fonctionnement et des objectifs définis vaguement.

2.3.3.1 Introduction

Les systèmes de chauffage et de climatisation utilisent l'air ou un liquide caloporteur. Leurs objectifs sont la maîtrise de la température, de l'humidité, de la vitesse de l'air et de la qualité de l'air. La température des ambiances est contrôlée en faisant varier la température et le débit d'air. La maîtrise de la température de l'air soufflé est utile pour l'évaluation du confort et dans la conception des systèmes de contrôle : dans les modèles de confort thermique, la température est comme entrée et le contrôle en cascade de la température des ambiances considère la température de l'air introduit dans la boucle intérieure. D'où l'intérêt de contrôler la température de l'air et d'avoir la possibilité d'introduire des règles d'exploitation dans les algorithmes de commande.

Les contrôleurs flous sont représentés par des règles vagues de type *si – alors* (par ex. *si* la température est faible, *alors* ouvre un peu la vanne de contrôle) qui permettent une représentation facile et aisément compréhensible des connaissances des experts. Ces règles qualitatives ont pour résultat un algorithme de contrôle quantitatif non – linéaire. Puisqu'il n'y a pas une relation unique entre une expression qualitative et une valeur quantitative, une partie de l'information est perdue dans cette transformation. Malgré cette perte, la possibilité d'implémenter dans les régulateurs automatiques des stratégies complexes disponibles sous la forme de connaissances expertes représente un net avantage. Généralement, les régulateurs à paramètres constants peuvent être considérés comme des fonctions statiques. Le régulateur linéaire génère une surface de contrôle multidimensionnelle. Les contrôleurs flous sont, dans la plus grande partie des cas, des fonctions statiques non – linéaires.

On affirme habituellement que le contrôle flou est plus robuste et adéquat au contrôle des systèmes non – linéaires mais il n'y pas une démonstration de la robustesse des contrôleurs flous. Un algorithme flou est en effet une fonction multi-variable non-linéaire ; la robustesse d'un système contrôlé d'une telle fonction dépend des règles qui la définissent. Quand la variation d'un paramètre est connue, même partiellement, l'algorithme flou peut être conçu pour être moins sensible à la variation de ce paramètre. L'autre affirmation, à savoir que les algorithmes flous sont plus appropriés pour le contrôle non – linéaire est valable pour les systèmes dont les non – linéarités dépendent de l'erreur (c.-à-d. de la différence entre la sortie et la consigne) et de ses dérivées dans le temps. Mais dans bien des situations les non – linéarités sont en fonction d'autres variables qui doivent être mesurées. En conséquence, la conception d'un contrôleur flou nécessite des connaissances sur les procédés, bien que celles-ci ne soit pas exprimées sous une forme mathématique claire (Ghiaus 1996).

Un problème important dans le contrôle flou est la stabilité. Comme les contrôleurs flous sont des fonctions non – linéaires, la stabilité est difficile à analyser (Driankov, Hellendoorn et al. 1993). Dans la pratique, l'analyse de la stabilité est remplacée par des essais faits sur des prototypes (Mamdani 1993).

Des applications du contrôle flou classique, en utilisant l'inférence introduite par Zadeh et Mamdani, aux systèmes de chauffage et de climatisation sont publiées dans des articles scientifiques aussi bien que dans des applications industrielles. Tobi et Hanfusa (1991) décrivent un banc expérimental pour le contrôle des systèmes de climatisation. Le contrôleur a deux entrées, la température et l'humidité de l'ambiance contrôlée, et trois sorties, les vannes des batteries de chauffage et refroidissement et la commande de l'humidificateur. L'algorithme utilise 22 règles. Pedrycz (1993) donne un exemple d'implémentation de la commande d'un système de climatisation pour la société Mitsubishi Heavy Industry. Le développement de ce système de 25 règles pour le chauffage et 25 règles pour le refroidissement, a nécessité trois jours pour écrire les règles, un mois pour déterminer les fonctions d'appartenance, et environ trois mois pour les réglages finaux. Altrock et al. (1994) affirme qu'un système de contrôle basé sur des heuristiques est efficace pour les systèmes de chauffage. Dounis et al. (1995) ont développé et testé un système flou de contrôle du confort en utilisant un modèle du bâtiment. Les commandes considérées ont été le chauffage, le refroidissement et l'angle de l'ouverture des fenêtres. Fraisse, Virgone et Roux (1997) présentent une comparaison entre des contrôleurs classiques et flous pour un modèle de bâtiment tertiaire. Sousa et al. (1997) présentent une approche similaire au contrôleur flou de type Sugeno pour le banc expérimental présenté dans cette section.

Sans être exhaustive, la présentation précédente des applications du contrôle flou aux systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation révèle l'importance du modèle du système, même si celui-ci n'est pas exprimé sous une forme mathématique. Le modèle flou peut être obtenu à partir de règles heuristiques ou en utilisant des techniques d'identification.

2.3.3.2 Identification des modèles flous

Les techniques d'identification des modèles flous sont développées pour les modèles flous linguistiques, définis par Zadeh (1965) qui utilisent l'inférence de type Mamdani (1974), ou

les modèles flous avec une conséquence exprimée par une loi linéaire en paramètres, définis par Sugeno (Sugeno 1985; Jang, Sun et al. 1997). Les modèles flous sont obtenus à partir de la mesure des entrées et des sorties. Ils peuvent être utilisés pour faire des simulations ou pour concevoir de régulateurs. L'identification des modèles linguistiques de type Mamdani à partir de données d'entrée-sortie est similaire à la détermination des associations décrites par des tableaux de données (Pedrycz 1984) ; une bonne description d'un modèle non linéaire nécessite plusieurs règles. Les données d'apprentissage doivent être significatives pour l'espace défini par les entrées et les sorties si non le modèle peut atteindre des états qui n'ont jamais été présents pendant l'apprentissage, états pour lesquels les sorties sont imprévisibles. Quand le modèle est utilisé pour la prédiction récurrente (c.-à-d. quand la sortie est calculée en se basant sur la sortie antérieure du modèle), le modèle atteint facilement des états non-identifiés où il peut être instable ou bloqué dans. Les méthodes utilisées pour l'identification de modèles Sugeno considèrent que les fonctions d'appartenance sont trapézoïdales et que leur nombre est donné ; les sommets des trapèzes sont trouvés en utilisant un critère de minimisation, d'habitude le carré de l'erreur (Takagi and Sugeno 1985). Une autre approche est basée sur le fait que la relation entrée-sortie pour un système avec plusieurs entrées et une seule sortie forme une surface dans l'espace défini par le produit cartésien des entrées et de la sortie. L'algorithme d'identification fait une approximation de cette surface avec un nombre de plans spécifiés a priori (Yager and Filev 1993; Yoshinari, Pedrycz et al. 1993). La forme des fonctions d'appartenance peut être basée sur des méthodes de groupement, quand le nombre de groupes est connu (Ruspini 1969; Gustafson and Kessel 1979; Bezdek 1981). Le nombre des groupes peut être réduit au minimum avant que les fonctions d'appartenance soit déterminées (Chiu 1994; Kaymak and Babuska 1995). L'algorithme d'identification des modèles flous de type Sugeno considère un ensemble des règles ayant des ensembles flous dans la prémisse et un modèle linéaire en paramètres en conséquence :

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } \dots x_k \text{ est } A_k \text{ alors } y = p_0 + p_1 x_1 + \dots + p_k x_k \quad (2.198)$$

Chaque règle du modèle (2.198) peut être interprétée comme un modèle linéaire. L'identification de ce modèle en utilisant des valeurs mesurées d'entrée-sortie nécessite le choix de :

1. x_1, \dots, x_k les variables de la prémisse de la règle ;
2. A_1, \dots, A_k les fonctions d'appartenance de la prémisse ;
3. p_0, p_1, \dots, p_k les paramètres de la conséquence.

Les fonctions d'appartenance peuvent être choisies arbitrairement ou en utilisant un algorithme numérique de groupement (Gustafson and Kessel 1979; Bezdek 1981; Dumitrescu 1993; Dumitrescu 1994). Par exemple, l'algorithme de groupement *Fuzzy C-Mean Clustering* considère M vecteurs $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_M$ comme des éléments dans un espace de dimension r où la distance $d(\bullet, \bullet)$ entre deux éléments est définie. La notion fondamentale de cet algorithme est la matrice de partition, \mathbf{F} , avec c lignes et m colonnes, ayant les propriétés :

$$\begin{aligned}
 &0 \leq f_{ik} \leq 1 \\
 &\sum_{i=1}^c f_{ik} = 1, \forall k, 1 \leq k \leq M \\
 &0 < \sum_{k=1}^M f_{ik} < M, \forall i, 1 \leq i \leq c
 \end{aligned} \tag{2.199}$$

La $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice \mathbf{F} représente une fonction d'appartenance discrète ; f_{ik} montre le degré d'appartenance de l'élément x_k à l'ensemble i . La deuxième condition montre que chaque ensemble flou n'est pas vide et n'inclut pas tous les éléments. Notant v_i les centres des ensembles flous, l'expression à minimiser est :

$$\begin{aligned}
 Q &= \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^c f_{ik}^2 d^2(x_k, v_i) = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^c f_{ik}^2 \|x_k - v_i\|^2 = \\
 &\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^c f_{ik}^2 (x_k - v_i)^T \mathbf{M} (x_k - v_i)
 \end{aligned} \tag{2.200}$$

où \mathbf{M} est une matrice positive (Dumitrescu 1993; Chiu 1994). Q est la somme de la variance des éléments autour du centre de l'ensemble flou. La matrice de partition \mathbf{F} peut être trouvée en minimisant Q .

Si on connaît les ensembles flous des prémisses des règles, les paramètres des conséquences sont trouvés en minimisant le critère quadratique de la différence entre la sortie du modèle et celle du système. Les paramètres de la conséquence sont trouvés par régression,

$$\mathbf{P} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \tag{2.201}$$

où \mathbf{P} est le vecteur des paramètres, \mathbf{X} est une matrice formée par les ensembles flous des antécédents des règles, et \mathbf{Y} est le vecteur des sorties. Par exemple, considérons une fonction non linéaire définie par :

$$\begin{cases}
 y = 0.25x & \text{pour } 0 < x \leq 3.3 \\
 y = x^2 + 0.75 & \text{pour } 3.3 < x \leq 6.6 \\
 y = 0.25x + 8.25 & \text{pour } 6.6 < x \leq 10
 \end{cases} \tag{2.202}$$

En utilisant les fonctions d'appartenance A_1, A_2 et A_3 définies sur la Figure 2.46 (b), le modèle flou de type Sugeno est

$$\begin{cases}
 \text{Si } x \text{ est } A_1 \text{ alors } y = 1.50x + 0.82 \\
 \text{Si } x \text{ est } A_2 \text{ alors } y = 3.57x - 12.86 \\
 \text{Si } x \text{ est } A_3 \text{ alors } y = 0.97x
 \end{cases} \tag{2.203}$$

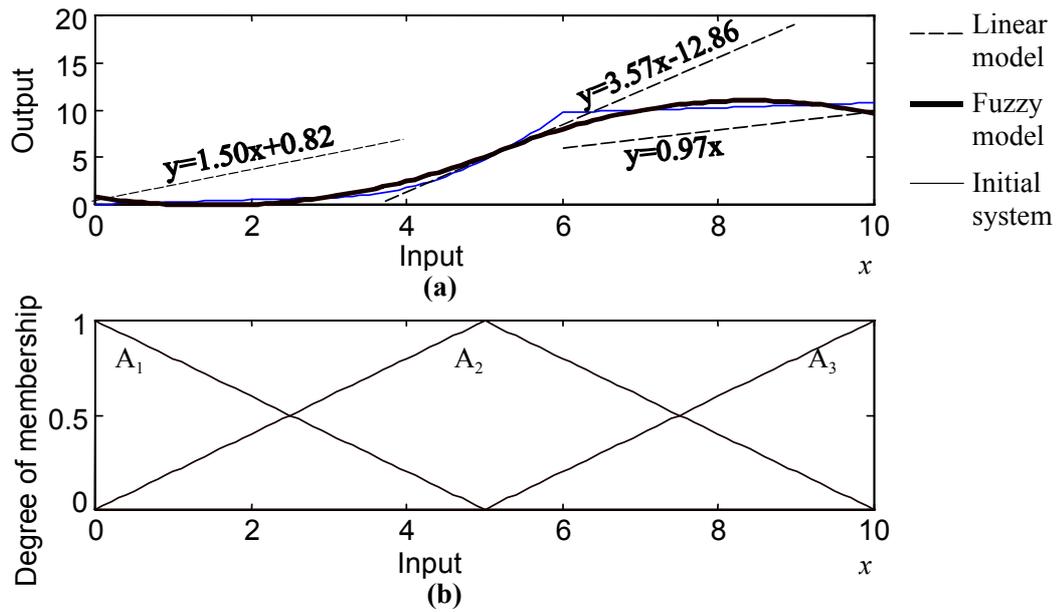


Figure 2.46 Identification d'un modèle flou de type Sugeno ayant les fonctions d'appartenance de l'antécédent prédéfinies : (a) fonction donnée par l'équation (2.202), modèles linéaires et modèle flou ; (b) fonctions d'appartenance des entrées.

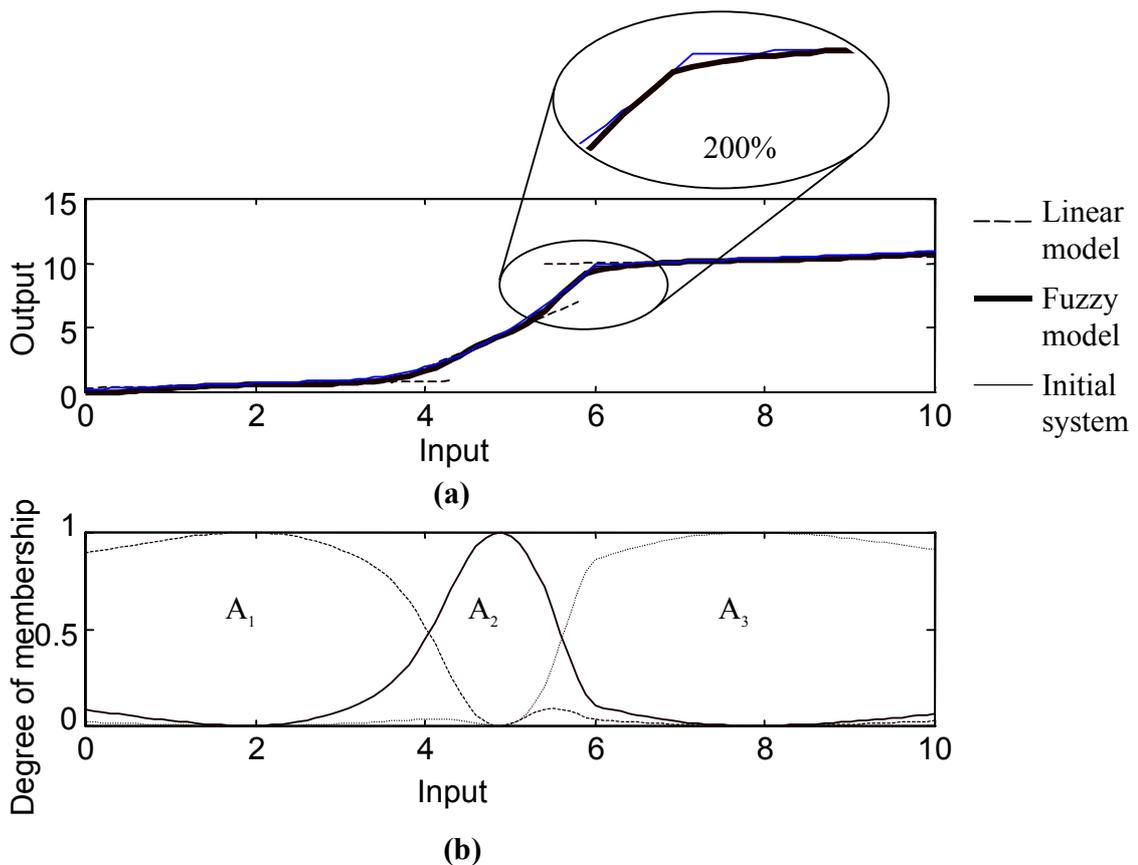


Figure 2.47 Identification d'un modèle flou de type Sugeno en utilisant des fonctions d'appartenance déterminées avec l'algorithme de groupement Fuzzy C-Means Clustering : (a) Fonction donnée, modèles linéaires et modèle flou. (b) Fonctions d'appartenance d'entrée.

Pour ce système, les fonctions d'appartenance obtenues en utilisant l'algorithme de groupement *Fuzzy C-Mean Clustering* est

$$\begin{cases} \text{Si } x \text{ est } A_1 \text{ alors } y = 0.13x + 0.34 \\ \text{Si } x \text{ est } A_2 \text{ alors } y = 2.83x - 9.39 \\ \text{Si } x \text{ est } A_3 \text{ alors } y = 0.12x + 9.34 \end{cases} \quad (2.204)$$

Si on analyse le comportement du système initial (2.202), avec le modèle ayant des règles floues prédéfinies (2.203) et avec le modèle flou identifié (2.204), on constate que le dernier est meilleur.

La méthode d'identification des modèles flous de type Sugeno proposée par Babuska (1998) a été utilisée pour modéliser un ventilo-convecteur. En utilisant ce modèle, on a conçu un algorithme de contrôle de la température de soufflage du ventilo-convecteur.

2.3.3.3 Modèle flou de type Sugeno

Les ventilo-convecteurs sont des appareils terminaux qui font circuler l'air par convection forcée, filtrent l'air, introduisent de l'air neuf et contrôlent la température, l'humidité et la vitesse de l'air soufflé. Le débit d'air neuf est réglé pour contrôler l'humidité. La vitesse de l'air soufflet varie sur trois niveaux. La température de l'air soufflé est contrôlée continuellement.

La modélisation et le contrôle sont donnés pour un ventilo-convecteur du commerce. Le ventilo-convecteur a deux batteries séparées, une pour le chauffage et une pour le refroidissement. Elles sont équipées avec des vanes de contrôle, et deux registres ajustables pour l'air neuf et l'air recyclé. Chaque registre a trois lames couvrant une septième, deux septièmes et quatre septièmes de la section de passage du registre. Le modèle a dans la conséquence de la règle la prédiction de la sortie au pas de temps suivant en fonction d'une combinaison linéaire des entrées et de la sortie au temps précédent :

$$\text{Si } y(k) \text{ est } A_i \text{ alors } y(k+1) = b_1u_1(k) + b_2u_2(k) + b_3u_3(k) + ay(k) \quad (2.205)$$

où

u_1 est la position de la vanne de contrôle ;

u_2 - la position du registre d'air intérieur ;

u_3 - la position du registre d'air neuf ;

y - la température de sortie du ventilo-convecteur ;

$A_i, i = 1 \dots 5$ - les ensembles flous définis dans l'univers du discours de la sortie y .

Le domaine de contrôle de la vanne et les ensembles flous de la sortie sont compris entre 20 et 70°C (Figure 2.48 b). Pour une identification correcte, les variables d'entrée doivent contenir le spectre des fréquences et le domaine d'amplitude caractéristiques des conditions normales de fonctionnement du système. Autrement dit, le système doit attendre des états représentatifs pour les conditions normales de fonctionnement. Pour l'identification, la commande de la position de la vanne de réglage a été choisie comme la somme de fonctions sinusoïdales avec des amplitudes et des fréquences différentes, représentatives du domaine normal de

fonctionnement du ventilo-convecteur (Figure 2.48 a). Le but est que l'identification soit faite dans le domaine de la température de soufflage de 30 à 55°C qui est le plus fréquent.

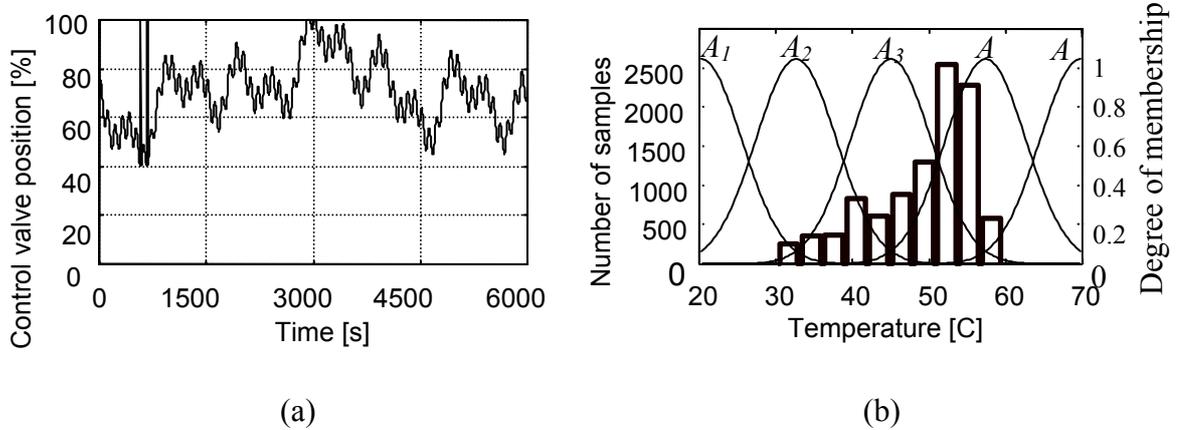


Figure 2.48 Caractéristiques des signaux utilisés pour l'identification : (a) exemple de signal de commande utilisé pour l'identification. (b) histogramme des valeurs de la sortie superposée sur les fonctions d'appartenance de la sortie.

Avant l'utilisation des données pour l'identification, les valeurs d'entrée et de sortie ont été normalisées et centrées. Le modèle identifié pour les valeurs moyennes $y = 40^\circ\text{C}$, $u_1 = 70\%$, $u_2 = 37\%$ et $u_3 = 65\%$, en utilisant un temps d'échantillonnage $\Delta t = 3\text{ s}$ est :

$$\begin{cases}
 \text{si } y(k) \text{ est } A_1, \text{ alors} \\
 y(k+1) = -0.1569 u_1(k) + 0.1608 u_2(k) - 0.007851 u_3(k) - 3.846y(k) \\
 \text{si } y(k) \text{ est } A_2, \text{ alors} \\
 y(k+1) = 0.007371 u_1(k) - 0.00127 u_2(k) - 0.000466 u_3(k) + 0.9867y(k) \\
 \text{si } y(k) \text{ est } A_3, \text{ alors} \\
 y(k+1) = 0.013834 u_1(k) - 0.00385 u_2(k) - 0.001104 u_3(k) + 0.9791y(k) \\
 \text{si } y(k) \text{ est } A_4, \text{ alors} \\
 y(k+1) = 0.01383 u_1(k) - 0.00134 u_2(k) - 0.000292 u_3(k) + 0.9878y(k) \\
 \text{si } y(k) \text{ est } A_5, \text{ alors} \\
 y(k+1) = -0.01573 u_1(k) + 0.0005 u_2(k) + 0.001693 u_3(k) + 1.0223y(k)
 \end{cases} \quad (2.206)$$

On peut noter que la première et la dernière règle sont qualitativement différentes des autres. En analysant le conséquent de ces règles, on remarque qu'elles sont apparemment incorrectes parce que leurs paramètres indiquent que l'ouverture de la vanne de la batterie chaude aurait comme résultat la diminution de la température de soufflage (relation inverse entre la sortie $y(k+1)$ et l'entrée u_1). De plus, la cinquième règle caractérise un modèle instable (le signe de $y(k)$ est positif). La faible qualité des règles 1 et 5 est prévisible car les données nécessaires pour l'identification de leurs paramètres sont insuffisantes (Figure 2.48 b). Les règles 2, 3 et 4 définissent un modèle simple et intuitif en assignant aux ensembles flous A_2 , A_3 et A_4 les variables linguistiques petit, medium et grand, respectivement.

Le modèle a été testé pour deux situations : pour le contrôle, en l'utilisant comme un prédicteur pour le pas de temps suivant, pour la simulation, en l'utilisant comme prédicteur récursif. Le test du prédicteur pour le pas de temps suivant implique que la sortie au pas de temps suivant, $y(k+1)$, est prédite en utilisant les mesures effectuées au pas de temps k . Ce test est pratique pour le contrôle parce que la sortie mesurée est connue. La prédiction récursive réclame seulement la condition initiale de la sortie ; puis, la sortie $y(k+1)$ est calculée en utilisant les valeurs antérieures $y(k)$ données par le modèle. Ce test est plus difficile parce qu'une fois que le modèle est entré dans un état qui n'a pas été atteint pendant l'identification, il peut se bloquer ou devenir instable. Les résultats de la prédiction d'un pas de temps sont très bons, les erreurs de prédiction se situant dans le domaine d'erreur de mesure. Le modèle donne de bons résultats également avec le test récursif pour des variations des entrées différentes de celles utilisées pour l'identification (Figure 2.49).

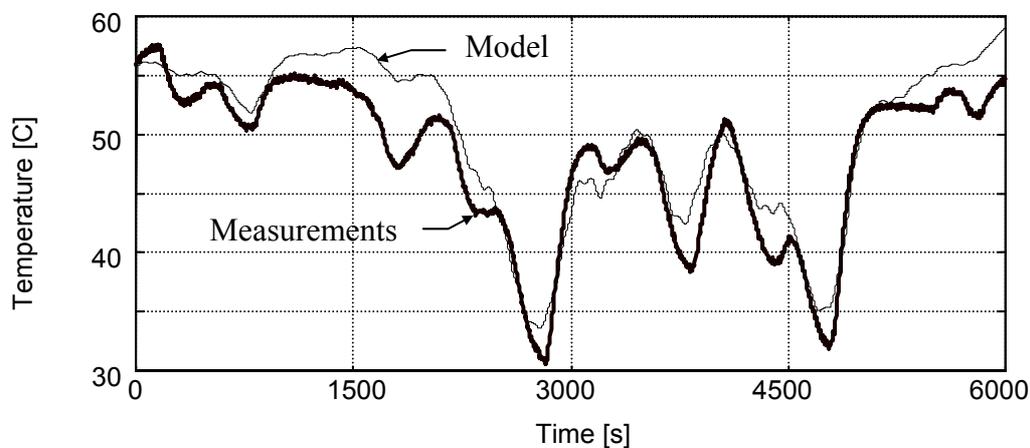


Figure 2.49 Comparaison entre la sortie du ventilo-convecteur et celle du modèle avec le test récursif

2.3.3.4 Algorithme de contrôle flou

La bonne qualité du modèle identifié nous permet de synthétiser l'algorithme de contrôle pour chaque modèle linéaire décrit dans les conséquences des règles en utilisant la théorie des systèmes linéaires. Comme les positions des volets d'air neuf et de recyclage sont imposées par la qualité de l'air intérieur, les commandes des volets d'air ne sont pas des sorties du régulateur. Les positions des volets sont des perturbations que le contrôleur doit rejeter. Le modèle du ventilo-convecteur a alors une entrée qui est la position de la vanne et une sortie qui est la température de soufflage. Un modèle plus sophistiqué considèrerait, par exemple, la température de l'air à l'aspiration du ventilo-convecteur ou les températures intérieure et extérieure (Sousa, Babuska et al. 1997).

Le modèle à une entrée et une sortie a été obtenu en éliminant du modèle flou complet (2.205) les variables qui correspondent aux positions des volets d'air et les règles incorrectes 1 et 5. Ce modèle peut être représenté comme une surface (Figure 2.50). Pour chacun de trois modèles linéaires décrits dans les conséquences des règles 2, 3 et 4, on a conçu un régulateur linéaire en utilisant le placement des pôles, bien qu'une autre méthode applicable aux systèmes linéaires pouvait être utilisée.

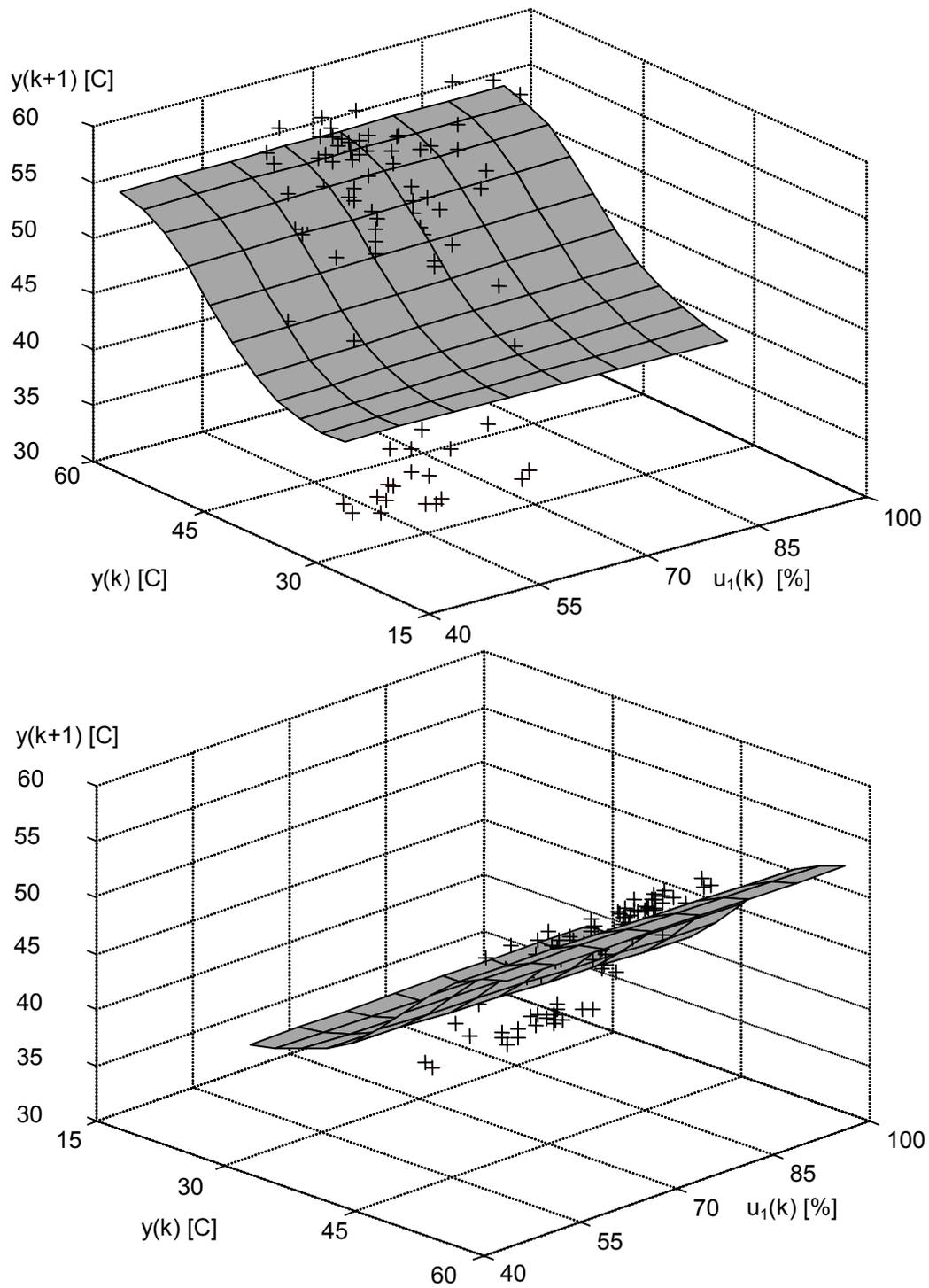


Figure 2.50 Surface du modèle identifié en considérant une entrée, la position de la vanne présentée de deux points de vue différents. Les points mesurés sont distribués autour de la surface du modèle ; leur dispersion est due aux entrées non considérées dans le modèle.

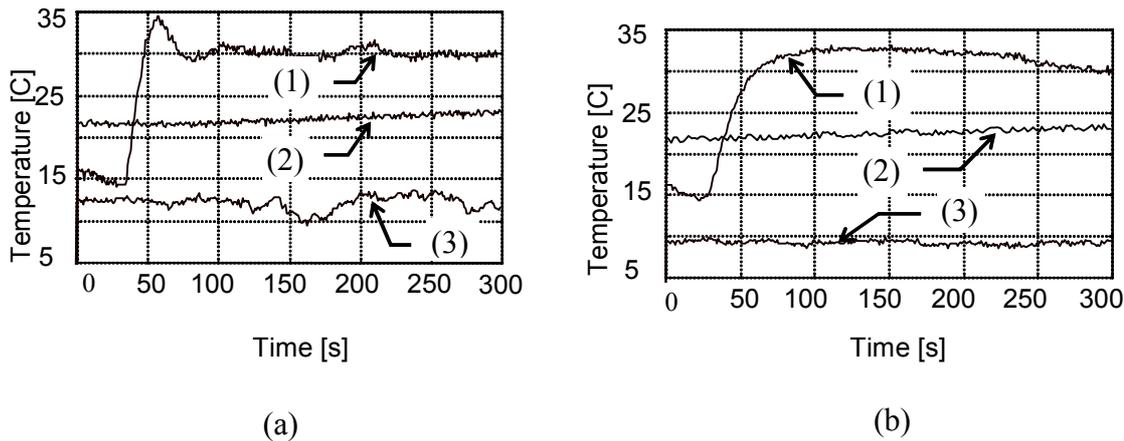


Figure 2.51 Evolution de la température de soufflage du ventilo-convecteur pour un changement de consigne de 20 à 30°C : (a) régulateur flou de type Sugeno ; (b) PID avec anti-wind up. (1) température de soufflage du ventilo-convecteur; (2) température ambiante ; (3) température extérieure.

Les performances des algorithmes de contrôle flous et PID avec *anti-wind up* ont été comparés pendant un mois. Le régulateur PID a été paramétré en utilisant la procédure de Ziegler-Nichols. Une comparaison des résultats obtenus est présentée à la Figure 2.51. Dans ce test, l'algorithme flou atteint la performance requise de dépassement de 2,5°C et a un temps de réponse de 100s. Le régulateur PID donne un dépassement plus petit mais le temps de réponse est de 225s. Les deux régulateurs rejettent la perturbation introduite par la température extérieure.

Le but du régulateur est de contrôler la température de soufflage du ventilo-convecteur et de rejeter les perturbations introduites par la position des volets d'air et la vitesse du ventilateur. Sa consigne est imposée par le régulateur de la température d'ambiance avec qui le régulateur du ventilo-convecteur forme une boucle en cascade. La température de soufflage est également une entrée pour les modèles d'évaluation du confort.

L'avantage de formuler l'algorithme de contrôle sous la forme de règles floues réside non seulement dans sa performance mais également dans la possibilité de contenir des règles d'exploitation et de changer doucement le point de fonctionnement. En plus, l'algorithme peut englober des règles expertes obtenues à partir de l'expérience et de raisonnement plutôt que des lois physiques.

2.3.3.5 Conclusion

Pratiquement, un régulateur flou de type Sugeno basé sur un modèle flou identifié expérimentalement donne des résultats meilleurs et des performances similaires pour tout le domaine de fonctionnement et élimine l'ajustement continu des paramètres du régulateur classique de type PID quand le point de fonctionnement varie. Le modèle identifié est seulement valable pour le domaine de variation des entrées et des états atteints pendant l'identification. Le régulateur a, par conséquent, le même domaine de validité. Néanmoins, l'identification peut se faire pendant le fonctionnement normal du ventilo-convecteur augmentant ainsi le domaine de validité du modèle. Le modèle flou de type Sugeno est une

fonction non linéaire obtenue par la moyenne pondérée de plusieurs modèles linéaires locaux ; les poids pour la pondération sont donnés par les fonctions d'appartenance.

L'avantage d'utiliser un régulateur flou réside moins dans les performances que dans sa compréhension rapide et facile et dans la capacité d'introduire des connaissances de type expert pour l'exploitation ; en citant Lofti Zadeh, "dans presque tous les cas on peut construire le même produit sans logique floue mais la logique floue est plus rapide et moins chère".

2.3.3.6 Remerciements

Les expériences décrites dans cette section ont été réalisées en 1995 dans le Laboratoire de la maîtrise des ambiances et de froid de l'Université de Technologie de Delft, Pays Bas, avec le soutien financier de l'Organisation néerlandaise pour la coopération internationale dans le domaine de l'enseignement supérieur (NUFFIC). L'article a été finalisé au Laboratoire d'études des phénomènes de transfert appliqués aux bâtiments de l'Université de La Rochelle avec le soutien financier de la Région Poitou-Charentes. Les contributions du professeur A.H.C. van Paassen et du R. Babuska ont été très précieuses.

2.3.4 Références

- Altrock, C. V., H.-O. Arend, B. Krause, C. Steffens and E. Behrens-Rommeler (1994). "Adaptive fuzzy control applied to home heating systems." *Fuzzy Sets and Systems* **61**: 29-35.
- ASHRAE (1999). Supervisory control strategies and optimization. *ASHRAE Handbook HVAC Applications*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc.: 40.1-40.36.
- ASHRAE (2001). Energy Estimating and Modeling Methods. *ASHRAE Fundamentals*.
- ASHRAE (2001). Heat transfert. *Handbook Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2001). Thermal and water vapor transmission data. *ASHRAE Fundamentals*.
- ASHRAE (2001b). Psychrometrics. *ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc.: 6.1 - 6.17.
- ASHRAE, a. (2001). Humidifiers. *ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc.: 20.1 - 2.10.
- ASTM, E.-. (1999). Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Babuska, R. (1998). *Fuzzy Modeling for Control*. Boston, Kluwer Academic Press Publishers.
- Barguil, S. (1993). Contribution à l'évaluation de l'exposition du citoyen aux pollutant atmosphérique. Paris, Rné Descartes: 247.
- Bauer, M. and J.-L. Scartezzini (1998). "A simplified correlation method accounting for heating and cooling loads in energy-efficient buildings." *Energy and Buildings* **27**(2): 147-154.
- Beattie, K. H., I.C. Ward (1999). *The advantages of building simulation for building design engineers*. Building Simulation 99, Kyoto, Japan.
- Bel, L., L. Bellanger, V. Bonneau, G. Ciuperca, D. D. Castelle, C. Deniau, B. Ghattas, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi and R. Tamassone (1999). Eléments de comparaison de prévisions statistiques des pics d'ozone. Paris, Société de statistique de France.
- Bezdek, J. C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function*. New York, Plenum Press.
- Bi, Q., W.-J. Cai, Q.-G. Wang, C.-C. Hang, Eng-Lock Lee, Y. Sun, K.-D. Liu, Y. Zhang and B. Zou (2000). "Advanced controller auto-tuning and its application in HVAC systems." *Control Engineering Practice* **8**(6): 633-644.
- Biswas, G., X. Yu and K. Debelak (1996). *A formal modelling scheme for continuous-valued systems: focus on diagnosis*. The Sixth International Workshop on Qualitative Reasoning About Physical Systems, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK.
- Botsaris, P. N. and S. Prebezanos (2004). "A methodology for thermal energy building audit." *Building and Environment* **39**.
- Brager, G. and R. de Dear (1998). "Thermal adaptation in the built environment: a literature review." *Energy and Buildings* **27**: 83-96.
- Butler, R. W. and S. C. Johnson (1995). Techniques for Modeling the Reliability of Fault-Tolerant Systems With the Markov State-Space Approach, NASA: 130.
- Cano-Ruiz, J. A., D. Kong, R. B. Balas and W. W. Nazaroff (1993). "Removal of reactive gases at indoor surfaces: combining mass transport and surfaces kinetics." *Atmospheric Environment* **27**(13): 135-152.

- Chao, C. Y. H. (2001). "Comparison between indoor and outdoor air contaminant levels in residential buildings from passive sampler study." *Building and Environment* **36**(9): 999-1007.
- Chiu, S. L. (1994). "Fuzzy model identification based on cluster estimation." *Journal of Intelligent Fuzzy Systems* **2**(3): 267-278.
- CIBSE (1996). *Energy savings in buildings - General information leaflet 50*, Crown.
- Clarke, J. A., J. Cockroft, S. Conner, J. W. Hand, N. J. Kelly, R. Moore, T. O'Brien and P. Strachan (2002). "Simulation-assisted control in building energy management systems." *Energy and Buildings* **34**(9): 933-940.
- Colda, I. and C. Ghiaus (1998). *Ozone level forecasting using artificial neural networks*. 5th Symposium on Wind Engineering, Bucharest, Romania, Technical University of Civil Engineering.
- COSTIC (2003). *Réglementation de l'Équipement Technique du Bâtiment V01-03*. St. Remy les Chevreuse.
- CSTB (2000). Les règles Th-U. *Réglementation Thermique 2000*.
- Dahlsveen, T. and D. Petras (2003). *Energetický audit budov*, Jaga Group.
- Davies, T. D., B. Ramer, G. Kaspyzok and A. C. Delany (1984). "Indoor/Outdoor Ozone Concentrations at a Contemporary Art Gallery." *Air Pollution Control Association* **31**(2): 135-137.
- Davis, J. M., B. K. Eder, D. Nychka and Q. Yang (1998). "Modeling the effects of meteorology on ozone in Houston using cluster analysis and generalized additive models." *Atmospheric Environment* **32**(14/15): 2505-2580.
- de Dear, R. (1999). *Adaptive thermal comfort in natural and hybrid ventilation*. Sydney, Australia, International Energy Agency, Annex 35 Energy conservation in buildings and community systems.
- de Leeuw, F. and T. A. de Paus (2001). "Exceedance of ozone threshold values in Europe in 1997." *Water, Air, and Soil Pollution* **128**: 255-281.
- de_Leeuw, F., E. Berge, K. Gronsky and M. Tombrou (1996). *Review on requirements for models and model application*. Copenhagen, Denmark, European Topic Centre for Air Quality.
- de_Leeuw, F. and E. van_Znatvoort (1995). *Exceedance of ozone threshold values in European Community*. Copenhagen K, Denmark, European Topic Centre on Air Quality.
- deBoor, C. (1978). *A practical guide to splines*, Springer-Verlag.
- Delsante, A. E. (1991). "A response factor method for calculating coupled heat and moisture transfer in buildings."
- Deng, S. (2002). "The application of feedforward control in a direct expansion (DX) air conditioning plant." *Building and Environment* **37**(1): 35-40.
- Deng, S.-M. and J. Burnett (2000). "A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong." *Energy and Buildings* **31**(1): 7-12.
- Dexter, A. and M. Benouaret (1996). "A generic approach to identifying faults in HVAC plants." *ASHRAE Transactions* **102**(1): 607-539.
- Donaldson, C. A., R. M. Dyer and M. J. Krauss (1975). *An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events*. 9th Conf. Severe Local Storms.
- Dong, B., S. E. Lee and M. H. Sapor (2005). "A holistic utility bill analysis method for baselining whole commercial building energy consumption in Singapore." *Energy and Buildings* **37**(2): 167-174.
- Doswell, C. A., R. Davis-Jones and D. L. Keller (1990). "On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables." *Weather and forecasting* **5**: 576-585.

- Dounis, A. I., M. J. Santamouris, L. C.C. and A. Argiriou (1995). "Design of a fuzzy set environment comfort system." *Energy and Buildings* **22**: 81-87.
- Driankov, D. H., H. Hellendoorn and Reinfrank (1993). *An introduction to fuzzy control*. New York, Springer.
- Dumitrescu, D. (1993). "Fuzzy training procedures - I." *Fuzzy Sets and Systems* **56**: 155-169.
- Dumitrescu, D. (1994). "Fuzzy training procedures - II." *Fuzzy Sets and Systems* **67**: 277-291.
- EEC (1992). "Directive 92/72/EEC of September 21 on Ozone Air Pollution." *J. European Community* **L297**(1).
- Ekberg, L. E. (2000). "Outdoor air contaminants and indoor air quality under transient conditions." *Indoor Air Journal* **4**(189-196).
- Elkhuizen, P. A., H. C. Peitsman and W. J. Wienk (2003). "A new design guideline for the heating and cooling curve in AHU units of HVAC systems." *Building Services Engineering Research and Technology* **24**(3): 191-202.
- Ellis, M. W. and E. H. Mathews (2001). "A new simplified thermal design tool for architects." *Building and Environment* **36**(9): 1009-1021.
- Engel, F., C. Viel and H. Chanut (1998). "Développement d'un modèle statistique de prévision à 24 heures d'un dépassement du seuil d'information de la population pour l'ozone." *Pollution Atmosphérique* **jul.-sept.**: 59-63.
- Etheridge, D. W. (1977). "Crack flow equations and scale effect." *Building and Environment* **12**(3): 181-189.
- Evans, M., N. Hastings and B. Peacock (2000). *Statistical distributions*. New York, J. Wiley & sons.
- Fountain, M., G. Brager and R. deDear (1996). "Expectations of indoor climate control." *Energy and Buildings* **24**: 179-182.
- Fraisse, G., J. Virgone and J. J. Roux (1997). "Thermal control of a discontinuously occupied building using a classical and a fuzzy logic approach." *Energy and Buildings* **26**: 303-316.
- Frank, P. M. (1990). "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. A survey and some new results." *Automatica* **26**(3): 459-474.
- Frank, P. M. and B. Koppen-Seliger (1997). "New developments using AI in fault diagnosis." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **10**(1): 3-14.
- Fromage, A. and E. Gilbert (1997). "Prévision des épisodes d'ozone: état de l'art dans le monde." *Pollution atmosphérique*(avril-juin): 52-59.
- Gardner, M. W. and S. R. Dorling (1998). "Artificial neural networks (the multilayer perceptron) - A review of application in the atmospheric sciences." *Atmospheric Environment* **32**(14/15): 2627-2636.
- Gartner, J. R. (1972). "Simplified dynamic response relations for finned-coil heat exchangers." *ASHRAE Transactions* **78**(2): 163-168.
- Gartner, J. R. and L. E. Daane (1969). "Dynamic response relations for a serpentine crossflow heat exchanger with water velocity disturbance." *ASHRAE Transactions* **75**(1): 53-67.
- Gartner, J. R. and H. L. Harrison (1963). "Frequency response transfer functions for a tube in crossflow." *ASHRAE Transactions* **69**: 323-330.
- Gartner, J. R. and H. L. Harrison (1965). "Dynamic characteristics of water-to-air crossflow heat exchangers." *ASHRAE Transactions* **71**: 212-224.
- Germano, M., C. Ghiaus, C.-A. Roulet and F. Allard (2005). "Natural ventilation potential of urban buildings:." *International Journal of Ventilation* **4**: 49-56.
- Ghattas, G. (1999). Prévisions des pics d'ozone par arbre de régression, simple et agrégés par bootstrap. Paris, Société de statistique de France.
- Ghiaus, C. (1996). Intelligent Control of HVAC Systems. *Building Physics*. Bucharest, Romania, Technical University of Civil Engineering.

- Ghiaus, C. (1996). Intelligent control of indoor climate. *Electrical Engineering and Automation*. Bucharest, Technical University.
- Ghiaus, C. (2001). "Fuzzy model and control of a fan-coil." *Energy and Buildings* **33**(6): 545-551.
- Ghiaus, C. (2003). "Free-running building temperature and HVAC climatic suitability." *Energy and Buildings* **35**(4): 405-411.
- Ghiaus, C. and F. Allard (2005). "Potential for free-cooling by ventilation." *Solar Energy* **in press**.
- Ghiaus, C. and F. Allard (2006). "Potential for free-cooling by ventilation." *Solar Energy* **80**(4): 402-413.
- Ghiaus, C., F. Allard, F. Caini and A. Gazeau (2000). *La prévision des pics d'ozone en régime de brise à l'aide de la modélisation neuro-floue*. Journées thématiques "Automatique et Environnement", Nancy, France.
- Ghiaus, C., F. Allard, F. Caini and A. Gazeau (2000). *La prévision des pics d'ozone en régime de brise à l'aide de la modélisation neuro-floue*. Journées thématiques Automatique et Environnement, Nancy, France.
- Ghiaus, C., F. Caini and R. Belarbi (2003). *Linear discriminant analysis applied to forecast ozone concentration classes in sea-breeze regime*. ICUC5 5th Intl. Conference on Urban Climate, Lodz, Poland.
- Ghiaus, C., V. Iordache, F. Allard and P. Blondeau (2005). Outdoor-indoor pollutant transfer. *Natural Ventilation in the Urban Environment*. C. Ghiaus and F. Allard. London, UK, James and James / Earthscan: 256.
- Gibert, J. P. (1988). Etude de l'écoulement à travers les défauts d'étanchéité du bâtiment. Extrapolation des mesures aux petits débits. *Rapport CETE*. Lyon, France, HEB.
- González, P. A. and J. M. Zamarréño (2005). "Prediction of hourly energy consumption in buildings based on a feedback artificial neural network." *Energy and Buildings* **37**(6): 595-601.
- Gustafson, D. E. and W. C. Kessel (1979). *Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix*. IEEE CDC, San Diego, CA, SUA.
- Hales, C. H., A. M. Rollinson and F. H. Shair (1974). "Experimental Verification of Linear Combination Model for Relating Indoor-Outdoor Pollutant Concentrations." *Environment Science and Technology Journal* **8**(5): 452-453.
- Hammarsten, S. (1987). "A critical appraisal of energy-signature models." *Applied Energy* **26**(2): 97-110.
- Haves, P., T. Salsbury and J. Wright (1996). "Condition monitoring in HVAC subsystems using first principles models." *ASHRAE Transactions* **102**(1): 519-527.
- Hayes, S. R. (1991). "Use of an Indoor Air Quality Model (IAQM) to Estimate Indoor Ozone Levels." *Journal Air & Waste Management Association* **41**(2): 161-170.
- Hays, W. L. (1973). *Statistics for the social sciences (2nd edition)*, Holt, Rinehart and Winston Inc.
- Heldman, D. R. (2003). *Encyclopedia of agriculture, food, and biological engineering*, Marcel Dekker.
- Heras, M. R., M. J. Jiménez, M. J. S. Isidro, L. F. Zarzalejo and M. Pérez (2004). "Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept." *Solar Energy* **78**(1): 85-96.
- Himmelblau, D. M. (1970). *Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Processes*. North Holland, Elsevier.
- Howell, J. (1988). "Relative humidity in HVAC systems: improving control." *Building Services Engineering Research and Technology* **9**(2): 55-61.

- Hubbard, M. and G. Cobourn (1998). "Development of a regression model for forecast ground-level ozone concentration in Louisville, KY." *Atmospheric Environment* **32**(14/15): 2637-2647.
- Huré, P. and X. Rousselin (1999). L'émission d'ozone par les photocopieurs et les imprimantes laser. France, INRS.
- Iordache, V. (2003). Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire Recherche de moyens de prédiction et de protection. *LEPTAB*. La Rochelle, France, University of La Rochelle.
- Isakson, H. R. (1983). "Residential space heating : An analysis of energy conservation." *Energy Economics* **5**(1): 49-57.
- ISO (1996). Isolation thermique - Détermination de l'étanchéité à l'air des bâtiments - Méthode de pressurisation par ventilateur, Norme Internationale.
- Jang, J.-S. R., C. T. Sun and E. Mizutani (1997). *Neuro-fuzzy and soft computing*, Prentice Hall.
- Jang, J.-S. R., C.-T. Sun and E. Mizutani (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- Jimenez, M. J. and M. R. Heras (2004). "Application of multi-output ARX models for estimation of U and g values of building components in outdoor testing." *Solar Energy* **79**(3): 302-310.
- Jin, G.-Y., W.-J. Cai, Y.-W. Wang and Y. Yao (2005). "A simple dynamic model of cooling coil unit." *Energy Conversion and Management* **in press**.
- Jolliffe, I. T. (1986). *Principal component analysis*, Speinger-Verlag.
- Jones, B. A. (1998). *Statistics toolbox user's guide*, MathWorks™.
- Jonsson, G. and O. P. Palsson (1994). "An application of extended Kalman filtering to heat exchanger models." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* **116**: 257-264.
- Jorquera, H., R. Pérez, A. Cipriano, A. Espejo, V. Letelier and G. Acuña (1998). "Forecasting ozone daily maximum levels at Santiago, Chile." *Atmospheric Environment* **32**(20): 3415-3424.
- Kaymak, U. and R. Babuska (1995). *Compatible cluster merging for fuzzy modelling*. FUZZ-IEEE/IFES '95, Yokohama, Japan.
- Kiel, D. E., D. J. Wilson and M. H. Sherman (1985). "Air leakage flow correlations for varying house construction types." *ASHRAE Transactions* **91**(91).
- Kirchner, S., O. Bailloit, B. Collignan, J.-P. Flori, O. Garret, A.-M. Laurent, Y. L. Moullec, P. O'Kelly, O. Ramalho, M. Sauvaget, J. G. Villenave and C. Vedel (2001). Experimental study on the transfert conditions of local atmospheric pollution to indoor dwelling environment. *Final Report, Convention Recherche n° 98.04.051*, ADEME, France: 147-148.
- Klenø, J. G., P. A. Clausen, C. J. Weschler and P. Wolkoff (2001). "Determination of ozone removal rates by selected building products using the FLEC emission cell." *Environmental Science and Technology* **36**(12): 2548-2553.
- Koene, M. (1992). "Les émissions d'ozone à l'origine de problèmes climatiques." *JANUS* **10**: 264.
- Kramer, R. (2003). System Integration of Distributed Power for Complete Building Systems. Golden, Colorado, National Renewable Energy Laboratory: 258.
- Laub, A. J., M. T. Heath, C. C. Paige and R. C. Ward (1987). "Computation of system balancing transformations and other applications of simultaneous diagonalization algorithms." *IEEE Trans. Automatic Control* **32**: 115-122.

- Lee, S.-C. (1997). "Comparison of indoor and outdoor air quality at two staff quarters in Hong Kong." *Environment International* **23**(6): 791-797.
- Lee, W., C. Park and G. Kelly (1996). "Fault detection in an air-handling unit using residual and recursive parameter identification methods." *ASHRAE Transactions* **102**(1): 528-539.
- Leemans, R., W. Cramer (1991). The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness of a global terrestrial grid. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Leftheriotis, G. and P. Yianoulis (2000). "Thermal properties of building materials." *Solar Energy* **69**(4): 295-304.
- Lepelley, N. (1998). Modèle d'exposition quotidienne de la population harvraise à la pollution atmosphérique. *Rapport Primequal-Predit*, Air Normand, Rouen, France.
- Levermore, G. (2000). *Building Control Systems - CIBSE Guide H*. Oxford, UK, Butterworth-Heinemann.
- Levermore, G. J. (1995). "Performance lines and energy signatures - Analysis with respect to the CIBSE Building Energy Code." *Building Services Engineering Research and Technology* **16**(1): 47-50.
- Li, X., H. Vaezi-Nejad and J.-C. Visier (1996). "Development of a fault diagnosis method for heating systems using neural networks." *ASHRAE Transactions* **102**(1): 607-614.
- Litvak, A. (2000). Etanchéité à l'air des constructions - Etat de l'art, recensements des pratiques. *Final report. Contract n° 99.04.009*. Lyon, France, CETE de Lyon and ADEME.
- Ljung, L. (1999). *System Identification - Theory for the User*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR.
- Ljung, L. (2005). *System Identification Toolbox*. Natick, MA, The MathWorks Inc.
- Lundin, M., S. Andersson and R. Östin (2004). "Development and validation of a method aimed at estimating building performance parameters." *Energy and Buildings* **36**(9): 905-914.
- Lundin, M., S. Andersson and R. Östin (2005). "Further validation of a method aimed to estimate building performance parameters." *Energy and Buildings* **37**(8): 867-871.
- Mamdani, E. H. (1974). "Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant." *Proceedings IEEE* **121**(12): 1585-1588.
- Mamdani, E. H. (1993). *Twenty years of fuzzy control: experienced gained and lessons learnt*. 2nd IEEE Intl. Conf. on Fuzzy Systems, San Francisco, USA.
- Marchio, D. and A. Rabl (1991). "Energy-efficient gas-heated housing in France: predicted and observed performance." *Energy and Buildings* **17**(2): 131-139.
- Mathews, E. H. and C. P. Botha (2003). "Improved thermal building management with the aid of integrated dynamic HVAC simulation." *Building and Environment* **38**(12): 1423-1429.
- McAdams, W. H. (1954). *Heat transmission*. New York, McGraw-Hill.
- Millions, A. E. and T. D. Davis (1994). "Regression and stochastic models for air pollution - review, comments and suggestions." *Atmospheric Environment* **28**(17): 2801-2810.
- Montgomery, D. C. (1996). *Introduction to Statistical Quality Control*. New York, John Wiley Sons.
- Moore, B. (1981). "Principal component analysis in linear systems: controllability, observability, and model reduction." *IEEE Transactions on Automatic Control* **26**: 17-31.
- Murray, C. and A. Lopez (2002). *World Health Report 2002*. Geneva, World Health Organization.

- Nazaroff, W. W., A. J. Gadgil and C. J. Weschler (1993). Critique of the use of deposition velocity in modelling indoor air quality. *Modeling of indoor air quality and exposure*. N. L. Nagda. Philadelphia, American Society for Testing and Materials: 81-104.
- Nicol, F. J. (2001). *Characterizing occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans*. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- Nouwynck, J., P.-P. Hermoye and L. Verduyck (1990). "Analysis of fuel consumption in a building estate." *Energy and Buildings* **14**(3): 243-247.
- O'Sullivan, D. T. J., M. M. Keane, D. Kelliher and R. J. Hitchcock (2004). "Improving building operation by tracking performance metrics throughout the building lifecycle (BLC)." *Energy and Buildings* **36**(11): 1075-1090.
- Olofsson, T., S. Andersson and R. Östin (1998). "A method for predicting the annual building heating demand based on limited performance data." *Energy and Buildings* **28**(1): 101-108.
- Pakanen, J. E. and T. Sundquist (2003). "Automation-assisted fault detection of an air-handling unit; implementing the method in a real building." *Energy and Buildings* **35**(2): 193-202.
- Parnell, R. and O. P. Larsen (2005). "Developing the home energy report: An everyday householder-centred approach." *Energy and Buildings* **37**(10): 1092-1103.
- Parrilo, P. and L. Ljung (2003). Initialization of physical parameter estimates. Linköping, Sweden, Linköping Universitet: 9.
- Pearson, J. T., R. G. Leonard and R. D. McCutchan (1974). "Gain and time constant for finned serpentine crossflow heat exchangers." *ASHRAE Transactions* **80**(2): 255-267.
- Pedersen (1991). "A transient model for analysing the hygrothermal behaviour of building constructions."
- Pedrycz, W. (1984). "An identification algorithm in fuzzy relational systems." *Fuzzy Sets and Systems* **13**: 153-167.
- Pedrycz, W. (1993). *Fuzzy control and fuzzy systems*. New York, Research Studies Press, Wiley & sons.
- Peitsman, H. and V. Bakker (1996). "Application of black-box models to HVAC systems for fault detection." *ASHRAE Transactions* **102**(1): 628-640.
- Perros, P. and G. Toupance (1988). "Climatologie d'ozone en régime de brise." *Pollution atmosphérique juillet-aout*.
- Pfafferott, J., S. Herkel and M. Jäschke (2003). "Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements." *Energy and Buildings* **35**(11): 1129-1143.
- Pfafferott, J., S. Herkel and J. Wapler (2005). "Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models." *Energy and Buildings* **37**(8): 844-852.
- Rabl, A. and A. Rialhe (1992). "Energy signature models for commercial buildings: test with measured data and interpretation." *Energy and Buildings* **19**(2): 143-154.
- Reinsch, C. (1967). "Smoothing by spline functions." *Numer. Math.* **10**: 177-183.
- Ribéron, J. (1991). Guide méthodologique pour la mesure de la perméabilité à l'air des enveloppes de bâtiments. *Cahiers du CSTB n° 2493*. Paris, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment: 21.
- Richalet, V., F. P. Neirac, F. Tellez, J. Marco and J. J. Bloem (2001). "HELP (house energy labeling procedure): methodology and present results." *Energy and Buildings* **33**(3): 229-233.
- Robeson, S. M. and D. G. Steyn (1990). "Evaluation and comparison of statistical forecast models for daily maximum ozone concentration." *Atmospheric Environment* **24B**(2): 303-312.

- Romieu, I., M. C. Lugo, S. Colome, A. M. Garcia, M. A. Hernandez, A. Geyh, S. V. Ruiz and E. R. Palazuelos (1998). "Evaluation of Indoor Ozone Concentration and Predictors of Indoor-Outdoor Ratio in Mexico City." *International Journal Air & Waste Management Association* **48**: 327-336.
- Rosenberg, R. and D. Karnopp (1983). *Introduction to Physical System Dynamics*. New-York.
- Roulet, C.-A., J.-R. Millet, H. vanDijk and M. Speikman (2004). Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, European Standard: 92.
- Roulet, C.-A., J.-R. Millet, H. vanDijk and M. Speikman (2004). Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling CEN/TC 89 N 974 E, European Standard: 92.
- Rumelhart, D. and J. McClelland (1988). *Parallel distributed processing*, MIT Press.
- Ruspini, E. (1969). "A New Approach to Clustering." *Inf. Control* **15**: 22-32.
- Ryan, W. (1995). "Forecasting severe ozone episodes in the Baltimore metropolitan area." *Atmospheric Environment* **29**(17): 2387-2398.
- Saberski, R. H., D. A. Simena and F. H. Shair (1973). "Concentrations, Decay Rates and Removal of Ozone and Their Relation to Establishing Clean Indoor Air." *Environmental Science And Technology Journal* **7**(4): 157-166.
- Salmon, L. G., G. R. Cass, K. Bruckman and J. Haber (2000). "Ozone exposure inside museums in the historis central district of Krakow, Poland." *Atmospheric Environment* **34**: 3823-3832.
- Salsbury, T. I. (1999). "A practical algorithm for diagnosing control loop problems." *Energy and Buildings* **34**(4): 429-449.
- Sayigh, A. and A. H. Marafia (1998). "Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2**(1-2): 3-24.
- Shair, F. H. and K. L. Heitner (1974). "Theoretical model for relating indoor pollutant concentrations to those outside." *Environmental Science And Technology Journal* **8**(5): 444-451.
- Shaviv, E., A. Yezioro, I. G. Capeluto (2001). "Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy." *Renewable Energy* **24**: 445-452.
- Shin, Y., Y. S. Chang and Y. Kim (2002). "Controller design for a real-time air handling unit." *Control Engineering Practice* **10**(5): 511-518.
- Singh, G., M. Zaheer-uddin and R. V. Patel (2000). "Adaptive control of multivariable thermal processes in HVAC systems." *Energy Conversion and Management* **41**(15): 1671-1685.
- Singh, M., G. Schimdt and S. Tzafestas, Eds. (1987). *European Workshop on Fault Diagnostics, Reliability, and Related Knowledge-based Approaches*. Oxford, UK, Pergamon.
- So, A. T. P., W. L. Chan, T. T. Chow, W. L. Tse (1995). "New HVAC Control by System Identification." *Building and Environment* **30**(3): 349-357.
- Sousa, J. M., R. Babuska and H. B. Verbruggen (1997). "Fuzzy predictive control applied to an air-conditioning system." *Control Engineering Practice* **5**(10): 1395-1406.
- Spiegel, M. R. (1996). *Statistique. Cours et Problèmes, 2nd ed.* Paris, Mc Graw-Hill.
- Stanners, D. and P. Bourdeau (1995). *Europe's Environment: The Dobris Assessment*. Copenhagen K, Denmark, European Topic Centre on Air Quality.
- Sugeno, M. (1985). *Industrial applications of fuzzy control*, Elsevier Science.
- Takagi, T. and M. Sugeno (1985). "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **15**: 116-132.

- Takagi, T. and M. Sugeno (1985). "Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **15**(1): 116-132.
- Tashtoush, B., M. Molhim and M. Al-Rousan (2005). "Dynamic model of an HVAC system for control analysis." *Energy* **30**(10): 1729-1745.
- Thompson, R. and A. Dexter (2005). "A fuzzy decision-making approach to temperature control in air-conditioning systems." *Control Engineering Practice* **13**(6): 689-698.
- Tobi, T. and T. Hanafusa (1991). "A practical application of fuzzy control for an air-conditioning system." *International Journal of Approximate Reasoning* **5**(3): 331-348.
- Toupance, G. (1988). "L'ozone dans la basse troposphère. Théorie et pratique." *Pollution atmosphérique jan.-mars*: 32-42.
- Tzafestas, S., M. Singh and G. Schimdt, Eds. (1986). *European Workshop on Fault Diagnostics, Reliability, and Related Knowledge-based Approaches*. Dordrecht, NL, Pergamon.
- Underwood, C. P. (1999). *HVAC Control Systems: Modelong, analysis and design*. London and New York, E & FN Spon.
- van_Aalst, R. M. and F. de_Leeuw (1997). National ozone forecasting systems and international data exchange in northwest Europe, European Environmental Agency.
- Virk, G. S., J. Y. M. Cheung and D. L. Loveday (1995). "Practical stochastic multivariable identification for buildings." *Applied Mathematical Modelling* **19**(10): 621-636.
- Wang, H. and D. Linkens (1996). "Intelligent supervisory control." *World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems*, **14**.
- Wang, S. and X. Jin (2000). "Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm." *Building and Environment* **35**(6): 471-487.
- Wang, S. and X. Xu (2002). "A robust control strategy for combining DCV control with economizer control." *Energy Conversion and Management* **43**(18): 2569-2588.
- Wang, S. and L. Zheng (2001). "Dynamic and real-time simulation of BMS and air-conditioning system as a 'living' environment for learning/training." *Automation in Construction* **10**(4): 487-505.
- Wang, Y.-W., W.-J. Cai, Y.-C. Soh, S.-J. Li, L. Lu and L. Xie (2004). "A simplified modeling of cooling coils for control and optimization of HVAC systems." *Energy Conversion and Management* **45**(18-19): 2915-2930.
- Wannacott, T. H. and R. J. Wannacott (1990). *Introductory statistics for business and Economics*. New York, J. Wiley & Sons.
- Wernholt, E. (2004). On Multivariable and Nonlinear Identification of Industrial Robots. *Division of Automatic Control and Communication Systems*. Linkoping, Sweden, Linkoping University: 139.
- Weschler, C. J. (2000). "Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry." *Indoor Air Journal*, **10**: 269-288.
- Weschler, C. J., H. C. Shields and D. V. Naik (1989). "Indoor Ozone Exposures." *J Air Pollut Control Assoc* **39**: 1562-1568.
- Westergren, K.-E., H. Högberg and U. Norlén (1999). "Monitoring energy consumption in single-family houses." *Energy and Buildings* **29**(3): 247-257.
- Wolkoff, P. (1999). "Photocopies and indoor air pollution." *Atmospheric Environment* **33**: 2129-2130.
- Wonnacott, T. H. and R. J. Wonnacott (1990). *Introductory Statistics for Buissness and Economics, 4th ed.*, John Wiley & Sons.
- Yager, R. R. and D. P. Filev (1993). "Unified structure and parameter identification of fuzzy models." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **23**: 1198-1205.

- Yang, J., H. Rivard and R. Zmeureanu (2005). "On-line building energy prediction using adaptive artificial neural networks." *Energy and Buildings* **37**(12): 1250-1259.
- Yannas, S. (1996). "Energy indices and performance targets for housing design." *Energy and Buildings* **23**(3): 237-249.
- Yi, J. and V. Prybutok (1996). "A neural model forecasting for prediction of daily maximum ozone concentration in an industrialized urban area." *Environmental Pollution* **92**(3): 349-357.
- Yik, F. W. H. and K. S. Y. Wan (2005). "An evaluation of the appropriateness of using overall thermal transfer value (OTTV) to regulate envelope energy performance of air-conditioned buildings." *Energy* **30**: 41-71.
- Yocom, J. E. (1982). "Indoor-outdoor air quality relationship. A critical review." *JAPCA* **32**(500-520).
- Yoshida, H., T. Iwami, H. Yuzawa and M. Suzuki (1996). "Typical faults of air-conditioning systems and fault detection by ARX model and extended Kalman filter." *ASHRAE Transactions* **102**(1): 557-564.
- Yoshinari, Y., W. Pedrycz and K. Hirota (1993). "Construction of fuzzy models through clustering techniques." *Fuzzy Sets and Systems* **54**(25-33).
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy Sets." *Information and Control* **8**: 338-353.
- Zadeh, L. A. (1989). "Knowledge Representation in Fuzzy Logic." *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* **1**(1): 89-100.
- Zhang, J. and P. J. Liou (1994). "Ozone in Residential Air: Concentrations, I/O Ratios, Indoor Chemistry, and Exposures." *Indoor Air Journal* **4**(95-105).
- Zmeureanu, R. (1990). "Assessment of the energy savings due to the building retrofit." *Building and Environment* **25**(2): 95-103.
- Zmeureanu, R. and P. Fazio (1991). "Analysis of the energy performance of office buildings in Montreal in 1988." *Energy and Buildings* **17**(1): 131-139.
- Zmeureanu, R., P. Fazio, S. DePani and R. Calla (1999). "Development of an energy rating system for existing houses." *Energy and Buildings* **29**(2): 107-119.

3 Projet de recherche

Mes activités de recherche ont été constamment orientées vers la solution des problèmes de société liés à la consommation énergétique et la maîtrise de la qualité de l'air dans l'espace construit. Le projet de recherche que je propose s'articule autour du concept du bâtiment adaptatif. La démarche envisagée reste celle que j'ai menée jusqu'à présent : une combinaison entre la modélisation mathématique basée sur les lois physiques et le traitement statistique, vérifié par des études expérimentales. La complexité de la problématique, l'échelle des expériences et les résultats pratiques attendus nécessitent un travail en équipe et un partenariat structuré autour de projets de recherche nationaux et internationaux. Naturellement, dans ce contexte mes activités seront principalement des contributions au sein d'équipes et de projets. De plus, le sujet étant très vaste, il n'est pas possible de le traiter de manière exhaustive.

La technologie informatique actuelle et son développement permettent d'envisager l'intégration de la conception du bâtiment avec son exploitation. Une conception du bâtiment orientée objet permet d'obtenir le modèle dynamique du bâtiment en même temps que la conception architecturale. Ce modèle peut être utilisé par le système de Gestion Technique du Bâtiment (GTB) en liaison avec les prévisions météorologiques et l'usage du bâtiment. Les systèmes techniques peuvent être conçus comme des éléments enfichables ("plug-in") qui, une fois installés, sont reconnus par le système de GTB.

Pour atteindre cet objectif, peut-être utopique mais concevable, le concept de bâtiment adaptatif peut être décliné sur trois niveaux : équipements techniques, bâtiment et microclimat urbain. Mon projet de recherche à moyen terme vise ces trois niveaux.

3.1 Contrôle et diagnostic des défauts des équipements techniques du bâtiment distribués géographiquement

Le contrôle des systèmes représente la première approche d'adaptation des bâtiments. L'intégration des éléments adaptatifs dans le bâtiment est traitée dans l'Annexe 44 de l'Agence Internationale de l'Energie, *Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings*. Les travaux menés par A. Chicinas dans sa thèse concernant le contrôle des Centrales de Traitement d'air (CTA) à débit d'air constant seront poursuivis par G. Simeonovici pour les CTA à débit d'air variable. J'ai initié une collaboration avec l'Université de Northumbrie, RU, pour, d'une part, allier le contrôle basé sur les lois physiques avec un superviseur basé sur la logique floue, et, d'autre part, étudier un système de diagnostic des défauts pour toute la chaîne de contrôle de la CTA.

La gestion technique des bâtiments connaît des mutations technologiques et d'organisation très importantes. Le développement des technologies informatiques permet l'automatisme local des équipements de chauffage et de climatisation avec la communication des données. Ces technologies ont encouragées le développement de sociétés spécialisées dans la

maintenance des équipements techniques des bâtiments. La tendance actuelle, encouragée par la politique européenne de libéralisation des marchés, est le développement de sociétés ayant comme activité de service le confort des usagers.

Une nécessité émergente est l'utilisation de systèmes de gestion technique des bâtiments pour la détection et le diagnostic des défauts à distance afin de permettre de trier les informations reçues et de réduire les déplacements. Des études démontrent qu'on peut obtenir une réduction de la consommation énergétique de 20 à 30% par une gestion adéquate des équipements techniques des bâtiments. La technologie existe mais les connaissances nécessaires pour les exploiter sont insuffisantes. En effet, une barrière pour le développement de l'utilisation des systèmes de GTB est la difficulté de chiffrer leurs avantages.

L'enjeu scientifique est de réunir des connaissances de différents domaines (thermique, hydraulique, automatique, communication) et de développer des méthodes applicables dans le contexte techno – économique actuel.

La recherche proposée a pour objectif **de construire une méthode de détection et de diagnostic des défauts pour les systèmes de chauffage et climatisation**. Les hypothèses de travail portent sur (1) la possibilité d'utiliser la technologie GTB existante dans les environs de La Rochelle (2) la coopération avec des entreprises de maintenance (plus généralement des fournisseurs de confort) (3) la collaboration avec des industriels de la GTB.

Concernant le contrôle des équipements technique du bâtiment, nous pouvons citer les travaux de l'Agence Internationale de l'Energie. D'abord, il y a eu l'Annexe 25 "Real Time HEVAC Simulation" qui a duré de 1991 à 1995. Dans le cadre de cette annexe, les chercheurs se sont plus particulièrement intéressés au développement de modèles des composants des équipements techniques des bâtiments. Ensuite, durant les années 1997 à 2001, les participants à l'Annexe 34 "Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings" ont travaillé sur le diagnostic des défauts de bâtiments réels. Cependant, ces études ont surtout porté sur les équipements et ont peu ou pas du tout abordé les problématiques de communication et l'exploitation des équipements techniques.

L'originalité du sujet consiste dans l'approche intégrative des traitements distribués géographiquement. Cette approche intègre le cadre conceptuel de la spécialisation et de l'éloignement géographique entre les sociétés de maintenance et les installations surveillées.

L'étude peut se faire en collaboration avec les services énergie de la ville de La Rochelle. La ville de La Rochelle possède environ 300 sites avec plus de 2500 points de mesure et de commande. Les équipements, les systèmes de contrôle et de gestion sont en place et fonctionnels.

Les données disponibles sont difficilement exploitables. En raison du grand nombre d'informations, celles-ci sont collectées avec un temps d'échantillonnage de 1 heure, qui est

insuffisante pour relever l'apparition de défauts transitoires comme, par exemple, une fréquence élevée de commandes marche arrêt ou le positionnement des vannes 3 voies. Un protocole d'acquisition des données et d'archivage peut être élaboré afin d'obtenir des mesures avec des pas de temps de 10 min, voire plus faible.

Les résultats suivants sont attendus :

- *Classification des types de défauts, de leurs causes et des actions à entreprendre.*
- *Algorithme d'alarme* : il sera développé afin de signaler les défauts de fonctionnement
- *Algorithme de filtration des alarmes*
- *Algorithme de diagnostic de la performance des équipements* : la performance économique est dépendante de l'efficacité énergétique et des coûts d'entretien. Cet algorithme va montrer si les éléments du système sont gérés sur leur optimum économique et va aider à la planification des entretiens.
- *Algorithme de diagnostic des performances du bâtiment.* Les mesures des températures intérieures, des flux de chaleur et des données météorologiques permettront l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment en utilisant le concept de la température en évolution libre.
- *Tableau de bord.* La multitude des informations sera transmise de façon condensée dans un tableau de bord qui affichera aux gestionnaires des installations le fonctionnement et les performances des systèmes et des bâtiments.

3.2 Définition et vérification des performances des bâtiments à faible consommation énergétique

La conception des bâtiments aidée par ordinateur peut être divisée en deux classes : la préparation de la documentation et l'amélioration des performances notamment par simulation. Actuellement, les ordinateurs sont largement utilisés pour la préparation de la documentation mais très rarement comme un aide à la conception. Un étude montre qu'environ 60% des architectes n'évaluent pas l'impact énergétique de la conception architecturale et qu'environ d'entre eux 20% utilisent le bon sens et l'intuition ; l'explication de la manque d'utilisation de la simulation pour la conception architecturale a été le coût et les doutes concernant l'utilité (Beattie 1999).

Actuellement, la simulation des bâtiments est utilisée pour le calcul de la demande en chauffage et refroidissement, l'étude de la conformité avec la réglementation thermique et l'analyse des coûts. L'intérêt se porte maintenant sur des outils de l'aide à la phase initiale de la conception. Dans cette phase on doit définir des critères de performances qui constituent la base du cahier de charge. Ces critères doivent être mesurable à la réception et durant l'exploitation du bâtiment.

Dans le cadre du projet européen URBVENT – *Natural ventilation in urban areas*, j'ai contribué au développement d'une méthodologie d'évaluation du potentiel de refroidissement

par la ventilation naturelle. Ces travaux sont repris par I. Jaffal dans sa thèse menée en collaboration avec l'Office Public des HLM de La Rochelle qui porte sur la définition et la vérification des performances d'un bâtiment d'habitation collectif. L'idée d'utiliser une description statistique du comportement de bâtiment, développée dans le projet URBVENT, est intégrée dans sa thèse par L. Rosales (Université de Caracas, Argentine) concernant la conception des bâtiments à faible consommation énergétique.

Les résultats attendus de ces recherches sont une méthodologie de spécification et de vérification des performances énergétiques des bâtiments.

4 Liste de publications

4.1 Articles dans des revues internationales à comité de lecture

- [RI 1] C. **Ghiaus**, A. Chicinas, C. Inard. (2007). Grey-box identification of air-handling unit elements. *Control Engineering Practice*, 15(4), 421-433
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.08.005>
- [RI 2] R. Belarbi, C. **Ghiaus**, F. Allard. Modeling of water spray evaporation: Application to passive cooling of buildings. *Solar Energy*, 80(12), 1540-1552
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.01.004>
- [RI 3] C. **Ghiaus** (2006). Experimental estimation of building energy performance by robust regression. *Energy and Buildings*, 38(6), 582-587
doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.014>
- [RI 4] C. **Ghiaus** (2006). Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods. *Energy and Buildings*, 38(5), 429-435
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.003>
- [RI 5] C. **Ghiaus**, F. Allard (2006). Potential for free-cooling by ventilation. *Solar Energy*, 80(4), 402-413
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.01>
- [RI 6] C. **Ghiaus**, F. Allard, M. Santamouris, C. Georgakis and F. Nicol (2006). Urban environment influence on natural ventilation potential, *Building and Environment*, 41(4), 395-406
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.003>
- [RI 7] C. **Ghiaus** (2005). Linear fuzzy-discriminant analysis applied to forecast ozone concentration classes in sea-breeze regime, *Atmospheric Environment*, 39(26), pp. 4691-4702
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.012>
- [RI 8] M. Germano, C. **Ghiaus**, C.-A. Roulet, and F. Allard (2005). Natural ventilation potential of urban buildings, *International Journal of Ventilation*, vol. 4(1), 49-56
- [RI 9] C. **Ghiaus** (2003). Free-running building temperature and HVAC climatic suitability, *Energy and Buildings*, 35 (4), 405 – 411
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00110-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00110-X)
- [RI 10] C. **Ghiaus**, R. Belarbi, F. Allard (2002). Optimal settings of residential oil burners, *Energy and Buildings*, 34 (1), 83-90
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00082-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00082-2)
- [RI 11] C. **Ghiaus** (2001). Fuzzy model and control of a fan-coil, *Energy and Buildings*, 33 (6), 545-551
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00097-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00097-9)
- [RI 12] C. **Ghiaus**, F. Allard (2001). Fuzzy schedule control of a fan-coil, *Solar Energy*, 21, 131-145
- [RI 13] C. **Ghiaus**, A. Meslem, K. Abed-Meraim, M. Robitu (2000). A template matching-based method for identifying the separation point of buoyant wall jets, *Journal of Flow Visualisation and Image Processing*, 7, 21-30
- [RI 14] C. **Ghiaus** (1999). Fault diagnosis of refrigerating systems using qualitative bond graphs. *Energy and Buildings*, 30(3), 221-232
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00070-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00070-X)

- [RI 15] **C. Ghiaus**, A.G. Ghiaus (1999). Evaluation of the indoor temperature field using a given air velocity distribution, *Buildings and Environment*, 34(6), 671-679
[http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00051-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00051-1)

4.2 Chapitres dans des ouvrages collectifs internationaux

- [OI 1] **C. Ghiaus**, F. Allard (2005). Physics of natural ventilation, in C. Ghiaus, F. Allard (ed.), *Natural ventilation in urban environment*, Earthscan, UK USA, ISBN 1-84407-129-4, pp. 36-80
- [OI 2] **C. Ghiaus**, V. Iordache, F. Allard, P. Blondeau (2005). Outdoor-indoor pollutant transfer, in C. Ghiaus, F. Allard (ed.), *Natural ventilation in the urban environment*, Earthscan, UK USA, ISBN 1-84407-129-4, pp. 124-135
- [OI 3] C.-A. Roulet, **C. Ghiaus** (2005) Specific devices for natural ventilation, in C. Ghiaus, F. Allard (ed.), *Natural ventilation in the urban environment*, Earthscan, UK USA, ISBN 1-84407-129-4, pp. 158-167
- [OI 4] **C. Ghiaus**, C.-A. Roulet (2005), Strategies for natural ventilation, in C. Ghiaus, F. Allard (ed.), *Natural ventilation in the urban environment*, Earthscan, UK USA, ISBN 1-84407-129-4, pp. 136-157
- [OI 5] M. Germano, **C. Ghiaus**, C.-A. Roulet (2005). Natural ventilation potential, in C. Ghiaus, F. Allard (ed.), *Natural ventilation in the urban environment*, Earthscan, UK USA, ISBN 1-84407-129-4, pp. 195-226
- [OI 6] **C. Ghiaus**, L. Roche (2005). Whole life costing of ventilation options, in C. Ghiaus, F. Allard (ed.), *Natural ventilation in urban environment*, Earthscan, UK USA, ISBN 1-84407-129-4, pp. 227-235
- [OI 7] **C. Ghiaus**, J. Axley, C.-A. Roulet (2004). Natural ventilation: principles, solutions and tools. *Summer Academy for Mediterranean Solar Architecture*. ISES Italia, Rome August 2004, pp. 1-25
- [OI 8] **C. Ghiaus**, C. Inard (2004). Energy and environment issues of smart buildings. *Handbook of Intelligent Buildings*. NKUA, Greece, pp. 26-52
- [OI 9] **C. Ghiaus**, F. Allard, J. Axley (2003). Natural ventilation in urban areas. *Solar Thermal Technology for Buildings: State of the Art and Future Priorities*. Editor M. Santamouris. James & James, London, UK, ISBN 1 902916 47 6. pp. 116-138.

4.3 Ouvrages scientifiques

- [OS 1] **C. Ghiaus**, F. Allard, eds.(2005). *Natural Ventilation in the Urban Environment* ISBN 1844071294, Earthscan, London, UK
- [OS 2] **C. Ghiaus**, N. Postavaru (2001). Le management intégré avec des systèmes informationnels. Matrix, Bucarest, Roumanie. ISBN 976852636

4.4 Actes des congrès internationaux avec comité de lecture

- [CI 1] A. Chicinas, **C. Ghiaus**, C. Inard (2006). Grey model identification of constant volume air handling unit. Part 1: Discrete Models/. *Healthy Buildings 2006*, vol. 4,

- Materials, Systems and Technologies for Healthy Buildings, Lisboa, Portugal 4-8 June 2006, p.199-204, ISBN 989-95067-1-0.
- [CI 2] A. Chicinas, **C. Ghiaus**, C. Inard (2006). Grey model identification of constant volume air handling unit. Part 2: Parameter Identification/. Healthy Buildings 2006, vol. 4, Materials, Systems and Technologies for Healthy Buildings, Lisboa, Portugal 4-8 June 2006, p.205-210, ISBN 989-95067-1-0.
- [CI 3] **C. Ghiaus**, F. Allard, M. Santamouris, C. Georgakis, C.-A. Roulet, M. Germano, F. Tillenkamp, N. Heijmans, F. Nicol, E. Maldonado, M. Almeida, G. Guarracino, L. Roche (2005). Natural ventilation of urban buildings – summary of URBVENT project. Proceedings of 1st International conference Passive and Low Energy cooling for Built Environment PALENC, ISBN 960-88152-4-7 pp. 29-34, Santorini, Greece, 19-21 May 2005
- [CI 4] F. Allard, **C. Ghiaus**, Y. Mansouri (2003). Natural ventilation for health, comfort and efficiency. Proceedings ENAC-COTEDI 2003, Curitiba, Brazil, 5-7 Nov. 2003
- [CI 5] **C. Ghiaus**, F. Caïni, R. Belarbi (2003). Linear discriminant analysis applied to forecast ozone concentration classes in sea-breeze regime. 5th International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland. pp. 141-144, 1-5 September 2003
- [CI 6] V. Iordache, P. Blondeau, **C. Ghiaus**, F. Allard (2003). Surveillance en temps réel des niveaux de pollution en O₃ et NO₂ a l'intérieur et l'extérieur des bâtiments, Conferinta Internationala CIEM, Bucuresti , Romania, 30 Octombrie 2003
- [CI 7] F. Allard, **C. Ghiaus**, Y. Mansouri (2003). Natural ventilation strategies. *Proceedings Workshop EnerBuild RTD*. Budapest 24-25 January 2003, ISBN 80-239-0742-5, pp. 46-64
- [CI 8] **C. Ghiaus**, A.H.C. van Paassen, C. Inard (2003). Evaluation of the indoor temperature field using a given air velocity distribution. *Workshop Matlab/Simulink Building and HVAC simulation*. Paris, France, 23-24 October 2003.
- [CI 9] M. Germano, **C. Ghiaus** (2003). Multicriteria assessment of the natural ventilation potential of a building in an urban environment. CISBAT 2003. Lausanne, Switzerland. 8 October 2003, pp. 173-178
- [CI 10] **C. Ghiaus** (2003). Dynamic compensation of feed-forward control of buildings. CISBAT 2003. Lausanne, Switzerland. 8 October 2003, pp. 315-322
- [CI 11] **C. Ghiaus**, F. Allard (2003). Statistical interpretation of the results of building simulation and its use in design decisions. Building Simulation 2003, 8th Intl. IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 11-15 August 2003, pp. 387-390
- [CI 12] **C. Ghiaus**, F. Allard (2003). Interprétation statistique des résultats de simulations de comportement thermique des bâtiments. VI-e Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Thermique des systèmes, Université de Laval, Québec, 26-28 mai 2003, pp. 11-02
- [CI 13] **C. Ghiaus**, F. Allard (2002). Assessment of natural ventilation potential of a region using degree-days estimated on global weather data, *EPIC 2002 AIVC Conference Energy efficient and healthy buildings in sustainable cities*, Lyon, 23-26 October, 2002, pp. 475-480
- [CI 14] M. Germano, C.-A. Roulet, F. Allard, **C. Ghiaus** (2002). Potential for natural ventilation in urban context: an assessment method, *EPIC 2002 AIVC Conference Energy efficient and healthy buildings in sustainable cities*, Lyon, 23-26 October, 2002, pp. 519-524
- [CI 15] M. Kolokotroni, R. Watkins, M. Santamouris, K. Nichou, F. Allard, R. Belarbi, **C. Ghiaus**, S. Alvarez, J. M. Salmeron-Lissen (2002). Passive ventilation cooling in urban buildings: an estimation of potential environmental impact and benefits, *EPIC*

- 2002 AIVC Conference Energy efficient and healthy buildings in sustainable cities, Lyon, 23-26 October, 2002, pp. 531-536
- [CI 16] **C. Ghiaus**, F. Allard (2002). Assessing climatic suitability to natural ventilation by using global and satellite climatic data, *Air Distribution in Rooms*, 8th International Conference on Air Distribution in Rooms, Copenhagen, Denmark, 8-11 September, 2002, ISBN 87-989117-0-8, pp. 625-628
- [CI 17] C.-A. Roulet, M. Germano, F. Allard, **C. Ghiaus** (2002). Potential for natural ventilation in urban context: an assessment method. Proceedings Indoor Air 2002, 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, (Full paper on CD), June 30-July 5 2002, Monterey, California, USA, pp. 830-835
- [CI 18] M. Kolokotroni, R Watkins, M Santamouris, K Niachou, F Allard, R Belarbi, **C Ghiaus**, S Alvarez, J M Salmeron-Lissen (2002). Passive ventilation cooling in urban buildings: an estimation of potential environmental impact benefits, *EPIC 2002 AIVC Conference Energy efficient and healthy buildings in sustainable cities*, Lyon, 23-26 October, 2002
- [CI 19] **C. Ghiaus**, R. Belarbi, F. Allard (2002). Evaluation of natural ventilation potential by using degree-day, *Forum international sur les énergies renouvelables*, Tétouan, Maroc, 8-10 mai 2002, pp. 467-473
- [CI 20] **C. Ghiaus**, A. Meslem, C. Inard, M. Robitu (2001). An Integral Solution for Trajectory and Impingement Point Location of Axisymmetric Offset Isothermal Wall Jets, 7th REHVA World Congress CLIMA 2000, Napoli 15-18 Sept. 2001, Paper Abstracts pp.137, Full paper on CD ID 321
- [CI 21] **C. Ghiaus**, F. Allard, R. Belarbi (2001). Optimal Settings of Residential Oil Burners by Using Response Surface Methodology, 7th REHVA World Congress CLIMA 2000, Napoli 15-18 Sept. 2001, Paper Abstracts pp.137, Full paper on CD ID 317
- [CI 22] **C. Ghiaus**, F. Allard, R. Belarbi (2001). Optimisation du point de fonctionnement d'un brûleur à l'aide de la méthode des surfaces de réponse. V^e Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Lyon, 28-30 mai 2001, pp. 389-395, 2001
- [CI 23] M. Kolokotroni, M. Santamouris, K. Papakonstantinou, C. Georkakis, F. Allard, **C. Ghiaus**, S. Alvarez, J. Palmer, R. Watkins (2001). SOLVENT: Development of Strategies for the Efficient Use of Solar and Passive Ventilation in Urban Buildings, 7th REHVA World Congress CLIMA 2000, Napoli 15-18 Sept. 2001, Paper Abstracts pp.59, Full paper on CD ID 146
- [CI 24] M. Kolokotroni, M. Santamouris, F. Allard, **C. Ghiaus**, S. Alvarez, J. Palmer (2001). SOLVENT: Development of Strategies for the Efficient Use of Solar and Passive Ventilation in Urban Buildings, 22nd Annual AIVC Conference, Bath, UK, 11-14 Sept. 2001.
- [CI 25] **C. Ghiaus**, A. Meslem, F. Allard, M. Robitu (2000). Locating the separation point of nonisothermal wall-jets using computer vision, dans H.B. Awbi (éditeur) *Air Distribution in Rooms*, Proceedings of the 7th International Conference on Air Distribution in Rooms, Reading, UK, 9-12 juillet, ISBN 0 080 43017 1, pp. 485-490, Elsevier Science, 2000
- [CI 26] V. Iordache, **C. Ghiaus**, P. Blondeau, F. Allard (2000). Statistical prediction model of the indoor/outdoor air pollutant transfer, dans H.B. Awbi (éditeur) *Air Distribution in Rooms*, Proceedings of the 7th International Conference on Air Distribution in Rooms, Reading, UK, 9-12 juillet, ISBN 0 080 43017 1, pp. 1219-1224, Elsevier Science, 2000
- [CI 27] **C. Ghiaus** (1998). A fast way to solve the systems of transport differential equations, *Differential Equations - Section of International Congress of Mathematics*, Prague, République Tchèque, 1998

- [CI 28] **C. Ghiaus**, X. Peng, A.H.C. van Paassen, A.G. Ghiaus (1995). A continuous time dynamic model of temperature in air conditioned rooms, *Proceedings of 2nd International Symposium on HVAC*, Beijing, China, 1995, pp. 382-391
- [CI 29] **C. Ghiaus**, X. Peng, A.H.C. van Paassen. A state-space representation of the dynamic model of air temperature distribution, *Proceedings of 19th International Congress of Refrigeration*, The Hague, The Netherlands, 1995
- [CI 30] **C. Ghiaus** (1995). Statistic identification of a district heating system - Dynamic model, *Proceedings of the 5th International Symposium on District Heating Systems*, Espoo, Finland, 1995
- [CI 31] **C. Ghiaus**, F. Chiriac, C. Ionescu (1994). Discrete dynamics models for buildings, *Proceedings of the 2nd Bucharest International Refrigerating and Air Conditioning Symposium*, BIRAC'94, 1994
- [CI 32] **C. Ghiaus** (1992). ARMA models for buildings, *Proceedings of The 6th International Conference on 'Heat Transfer and Refrigeration'*, Bucarest, Roumanie, 1992

4.5 Articles dans des revues nationale à comité de lecture

- [RN 1] A. Chicinas, **C. Ghiaus**, A. Domsa, I. Nastase (2004). Detectarea defectelor intr-o centrala de climatizare a aerului cu flux simplu (Détection des défauts dans un centrale de traitement de l'air simple flux). *Instalatorul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs d'installation)*, no. 8, pp. 38-42, 2004
- [RN 2] **C. Ghiaus**, A.-G. Ghiaus (2005). *Smart Buildings (III) – Energy savings and environmental quality*, in Romanian: *Cladiri inteligente (III) – Economia de energie si calitatea spatiului amenajat*, UTCB Scientific Bulletin Nr. 2/2005, Bucharest, pp. 30-37
- [RN 3] **C. Ghiaus**, A.-G. Ghiaus (2005). *Smart Buildings (II) – Thermal comfort in adaptive buildings*, in Romanian: *Cladiri inteligente (II) – Confortul termic in cladiri adaptive*, UTCB Scientific Bulletin Nr. 1, Bucharest, pp. 14-21
- [RN 4] **C. Ghiaus**, A.-G. Ghiaus (2005). *Smart Buildings (I) - Urban environment, energy and buildings*, in Romanian: *Cladiri inteligente (I) - Mediul urban, energia si cladirile*, UTCB Scientific Bulletin Nr. 1, Bucharest, pp. 38-43
- [RN 5] V. Iordache, P. Blondeau, **C. Ghiaus**, F. Allard (2003). Permeabilitatea la aer a cladirilor (La perméabilité des bâtiments), *Revista Tehnica Instalatiilor*, nr III.6, 2003, Tirgu Mures, Romania
- [RN 6] R. Belarbi, **C. Ghiaus**, F. Allard (2001). Approche d'évaluation du potentiel des systèmes passifs de rafraîchissement, *Anales du Bâtiment et des Travaux Publics*, N° 6/2001, pp. 35-41, 2001
- [RN 7] **C. Ghiaus**, D. Popescu (2001). La conception assistée par ordinateur de schémas électriques (II), *Electricianul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs de génie électrique)*, no. 2, pp. 36-37, 2001
- [RN 8] **C. Ghiaus**, D. Popescu (2001). La conception assistée par ordinateur de schémas électriques (I), *Electricianul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs de génie électrique)*, no. 1, pp. 38-39, 2001
- [RN 9] **C. Ghiaus** (2001). Le contrôle de la legionelle dans les réseaux d'alimentation d'eau, *Instalatorul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs d'installation)*, no. 3, pp. 38-40, 2001

- [RN 10] **C. Ghiaus**. Visualisation d'écoulements – la nouvelle tendance dans la technique d'évaluation de la qualité de distribution de l'air (2000). *Instalatorul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs d'installation)*, no.7, pp 15-17, 2000
- [RN 11] **C. Ghiaus** (1998). Contrôlabilité et linéarité des systèmes de réglage local de la température, *Instalatorul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs d'installation)*, no. 1/1998
- [RN 12] **C. Ghiaus** (1997). Principes d'automatisation d'équipements du bâtiment, *Instalatorul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs d'installation)*, no.5-6/1997
- [RN 13] **C. Ghiaus** (1996). Principes d'automatisation de ventilo-convecteurs, *Instalatorul (Journal de l'association roumaine d'ingénieurs d'installation)*, no.3/1996
- [RN 14] C. Ionescu, **C. Ghiaus** (1993). Comment éviter les boucles de masse, *Electricianul (Journal de la Société Roumaine d'Installations Electriques et d'Automatisation)*, 1993
- [RN 15] **C. Ghiaus**, D. Cipaianu (1988). Management en cascade de production, *Revista Economica, Journal National Roumaine d'Economie*, Bucarest, 1988
- [RN 16] **C. Ghiaus** (1984). Automatisation avec microprocesseur d'une bétonnière, *Bulletin Scientifique des Etudiants de l'Université Technique de Construction*
- [RN 17] **C. Ghiaus** (1984). Etude et automatisme d'une pompe à chaleur, *Bulletin Scientifique des Etudiants de l'Université Technique de Construction*
- [RN 18] **C. Ghiaus** (1983). Programmation linéaire – application en activité de travaux dans les projets de bâtiment, *Bulletin Scientifique des Etudiants de l'Université Technique de Construction*
- [RN 19] **C. Ghiaus** (1980). Management, application et efficacité en l'association d'étudiants, *Bulletin Scientifique des Etudiants de l'Université Technique de Construction*
- [RN 20] **C. Ghiaus** (1980). Système, structure, structuralisme, *Bulletin Scientifique des Etudiants de l'Université Technique de Construction*, Roumanie

4.6 Actes des congrès nationaux

- [CN 1] **C. Ghiaus**, G.-A. Ghiaus (2004). Le refroidissement des bâtiments adaptatifs par la ventilation (Racirea cladirilor adaptive prin ventilare). *Conférence scientifique de la faculté d'installations de l'Université Technique de Construction de Bucarest*, Bucarest, Roumanie, 24-26 nov. 2004, pp. 128-135
- [CN 2] V. Iordache, P. Blondeau, **C. Ghiaus**, F. Allard (2003). Starea timplariei - parametru ce influenteaza permeabilitatea la aer a cladirii, (L'état de la menuiserie – paramètre qui influence la perméabilité du bâtiment) *Conférence scientifique de la faculté d'installations de l'Université Technique de Construction de Bucarest*, Bucarest, Roumanie, 27-28 nov. 2003
- [CN 3] V. Iordache, **C. Ghiaus**, P. Blondeau, F. Allard (2003). Outdoor-Indoor pollutant transfer. *Conférence scientifique de la faculté d'installations de l'Université Technique de Construction de Bucarest*, Bucarest, Roumanie, 27-28 nov. 2003
- [CN 4] V. Iordache, P. Blondeau, **C. Ghiaus**, F. Allard (2003). L'influence de la perméabilité sur le transfert d'ozone de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments. *Actes de 37^{ème} Conférence Scientifique de l'Association Roumaine des Ingénieurs en Installation*, Sinaia, Roumanie, 15 oct. 2003
- [CN 5] **C. Ghiaus**, F. Allard, F. Caini, A. Gazeau (2000). La prévision des pics d'ozone en régime de brise à l'aide de la modélisation neuro-floue, *Journées thématiques Automatique et Environnement*, Nancy, 9-10 mars, 2000

- [CN 6] V. Iordache, **C. Ghiaus**, P. Blondeau, F. Allard (2000). Modèle statistique de prédiction du transfert des polluants atmosphériques de l'extérieur vers l'intérieur des espaces habitables, *Actes du forum des associations du Génie Civil et Urbain*, INSA-Lyon 27-28 juin 2000, ISBN 2-9509268-8-6, pp. 117-124, 2000
- [CN 7] **C. Ghiaus** (2001). Stictiunea si oscilatiile buclelor de reglare, *Actes de 35^{ème} Conférence Scientifique de l'Association Roumaine des Ingénieurs en Installation*, Sinaia 2-5 oct., vol.2, pp. 86-92, 2001
- [CN 8] C. Colda, **C. Ghiaus**, M. Teaca (1998). Méthodes neuronales appliquées à l'étude de la pollution atmosphérique, *Actes de la Conférence de l'Ingénierie du vent*, Bucarest, 1998
- [CN 9] **C. Ghiaus** (1995). Modélisation avec les réseaux neuronaux, *Conférence scientifique de la faculté d'installations de l'Université Technique de Construction de Bucarest*, Bucarest, Roumanie, 1995
- [CN 10] **C. Ghiaus**, A. Racoviceanu (1994). La conception et la mise en œuvre des automates séquentiels avec des relais électromagnétiques, *Actes de 27^{ème} Conférence Scientifique de l'association Roumaine des Ingénieurs en Installation*, Sinaia, 1994, pp. 206-215
- [CN 11] **C. Ghiaus** (1992). Nouveaux procédés de contrôle intelligent d'équipement du bâtiment, *Actes de la 5^{ème} Conférence Scientifique de la Société d'Installations Electriques et d'Automatisation de Roumanie*, Sinaia, 1992
- [CN 12] **C. Ghiaus**, C. Ionescu (1992). Décisions basées sur simulation du réseau Petri, *Actes de la Conférence Scientifique "Science moderne et énergie"*, Cluj-Napoca, 1992
- [CN 13] **C. Ghiaus**, C. Ionescu (199&). Réseaux Pétri implémentés en automates programmables, *Actes de la 25^{ème} Conférence Scientifique de l'association Roumaine des Ingénieurs en Installation*, Sinaia, 1991
- [CN 14] **C. Ghiaus** (1990). Automates programmables dans l'automatisme d'équipement du bâtiment, *Actes de la 24^{ème} Conférence Scientifique de l'association roumaine des Ingénieurs en Installation*, Sinaia, 1990
- [CN 15] **C. Ghiaus**, L. Stanila (1987). Contrôle hiérarchique d'une station de mélange, *Actes de la 40^{ème} Conférence Nationale "Systèmes, Modèles, Informatique"*, Académie Roumaine, Bucarest, 1987
- [CN 16] **C. Ghiaus** (1984). Le modèle dynamique d'une pompe à chaleur, *Actes de la 17-ème Session Scientifique Nationale des Etudiants*, Université Technique de Construction de Bucarest, 1984
- [CN 17] **C. Ghiaus** (1983). Management – une expérience effectuée à l'Université Technique de Construction, *Actes de la 16-ème Session Scientifique Nationale des Etudiants*, Université Babes-Bolyai, Cluj-Napoca, 1983

4.7 Ouvrages pédagogiques

- [OP 1] **C. Ghiaus**. Commandes séquentielles : cahiers de charge et implémentations. Support de cours. Université de La Rochelle, 2002
- [OP 2] **C. Ghiaus**. Analyse et synthèse des systèmes de contrôle. Support de cours. Université de La Rochelle, 2004
- [OP 3] **C. Ghiaus**. *Conception assistée par ordinateur* (en français et en roumain), Maison d'Édition de l'Université Technique de Construction, Bucarest, 1997
- [OP 4] **C. Ghiaus**. *State-space representation of indoor-air dynamic model, MATLAB implementation*, Laboratorium voor Koudetechniek en Klimaatregeling, Technische Universiteit Delft, Pays Bas, 1995

- [OP 5] **C. Ghiaus**. *Know how to make computer controlled experiments on fan-coil unit*, R. K-227, Laboratorium voor Koudetechniek en Klimaatregeling, Technische Universiteit Delft, Pays Bas, 1995
- [OP 6] **C. Ghiaus**. *Dynamic models of rooms for use under MATLAB*, R. K-223, Laboratorium voor Koudetechniek en Klimaatregeling, Technische Universiteit Delft, Pays Bas, 1995
- [OP 7] C. Ionescu, **C. Ghiaus**, O. Noran. *L'analyse des systèmes automatiques* (en roumain), Maison d'Edition de l'Université Technique du Construction, Bucarest, 1993